

SASAK

Aluminiumshåndbog

1. udgave, 2001



Et udviklingsprojekt for Søfartsstyrelsen



Søfartsstyrelsen

SASAK

Aluminiumshåndbog

1. udgave, 2001

Et udviklingsprojekt for Søfartsstyrelsen

FORCE Technology

Bilcon A/S

Knud E. Hansen A/S

Mærsk Container Industri A/S

Migatronic A/S

Institut for Skibs- og Havteknik
Danmarks Tekniske Universitet

Institut for Maskinteknik
Aalborg Universitet

SASAK Aluminiumshåndbog
1. udgave, 2. oplag

© FORCE Technology 2002

Denne håndbog udgives af FORCE Technology som et resultat af udviklingskontrakten SASAK - ”Sammenføjning Af Store AluminiumsKonstruktioner”. Enhver anvendelse af håndbogen er på eget ansvar. Hverken FORCE Technology eller andre parter involveret i udarbejdelsen af nærværende håndbog kan gøres ansvarlig for eventuelle fejl og mangler.

Trykning og salg:

FORCE Technology
Park Allé 345
2605 Brøndby

Telefon: 43 26 70 00

ISBN 87-7784-105-0

Forord

Om SASAK-projektet i almindelighed

SASAK er en forkortelse for Sammenføjning Af Store Aluminiumskonstruktioner.

Projektet er et almennyttigt udviklingsprojekt, iværksat af Søfartsstyrelsen. Finansieringen af projektet er sket dels gennem midler fra Erhvervsfremmestyrelsen, dels ved medfinansiering fra konsortiets partnere.

Projektet er udtryk for en målrettet erhvervspolitisk indsats med henblik på at fremme innovationen og dermed konkurrenceevnen for dansk erhvervsliv, herunder "Det Blå Danmark".

Formålet med projektet har været at danne grundlag for et bredere kendskab til brugen af aluminium og dermed give danske virksomheder mulighed for at producere aluminiumskonstruktioner mere effektivt.

Projektets resultater foreligger nu i form af denne håndbog samt en lang række detaljerede baggrundsrapporter.

Håndbogen retter sig mod en bred kreds af virksomheder og personer, som enten allerede arbejder med aluminiumskonstruktioner eller som har til hensigt at arbejde med dette materiale, samt mod undervisningsinstitutioner på alle niveauer. For at nå så bredt ud som muligt indeholder håndbogen derfor informationer af såvel teoretisk som praktisk karakter og med forskellig detaljeringsgrad. Personer, som ønsker at sætte sig dybere ind i baggrunden for informationerne i håndbogen, henvises til de tekniske baggrundsrapporter, som er vedlagt på en CD-ROM.

Det er Søfartsstyrelsens opfattelse, at dette materiale opfylder det oven for anførte formål samt at der er tilført dansk erhvervsliv en væsentlig forøget viden og kompetence på aluminiumsområdet.

*Jørgen Rasmussen,
Søfartsstyrelsen*

Følgende har leveret bidrag til SASAK Aluminiumshåndbogen:

Michael Myrup Andersen, FORCE Technology
Martin Birk-Sørensen, Knud E. Hansen A/S
Michael Boesen, Alucluster
Niels Kåre Bruun, FORCE Technology
Curt Christensen, FORCE Technology
Thomas Eriksen, Mærsk Container Industri A/S
Kim Hurup, FORCE Technology
Bent Jensen, Migatronic A/S
Bo Rohde Jensen, Barsmark A/S
Jørgen Juncher Jensen, Danmarks Tekniske Universitet
Thomas Aaboe Jensen, FORCE Technology
Lars Tofte Johansen, FORCE Technology
Per Kallestrup, Mærsk Container Industri A/S
Jesper Kanstrup, Knud E. Hansen A/S
Hans Knudsen, FORCE Technology
Per Faxøe Larsen, FORCE Technology
Hans Peter Nielsen, FORCE Technology
Steen Erik Nielsen, FORCE Technology
Carsten J. Rasmussen, FORCE Technology
Jan Stegmann, Aalborg Universitet
Gunnar Sørensen, FORCE Technology
Jan Thernøe, FORCE Technology
Ole Thybo Thomsen, Aalborg Universitet
Steen Ussing, FORCE Technology
Jakob Weldingh, FORCE Technology

En særlig tak rettes til følgende firmaer for støtte i form af lån af udstyr og/eller leverancer i forbindelse med forsøg og udviklingsarbejder:

3M A/S
AGA A/S
Fronius GmbH
Sika Danmark A/S
Strandmøllen A/S
V. Løwener A/S

Præsentation af projektpartnerne

SASAK HÅNDBOGEN er blevet til i et samarbejde imellem to danske universiteter, tre danske industrivirksomheder, et teknologisk serviceinstitut og en skibskonsulentvirksomhed.

Partnerne er; HMK Bilcon A/S, FORCE Institutet, Svejsemaskinefabrikken Migatronic, Mærsk Container Industri, Danmarks Tekniske Universitet, Aalborg Universitet og Knud E. Hansen A/S.

HMK BILCON A/S har gennem mere en 45 år specialiseret sig i udviklingen og produktion af tankvogne til transport af olie, benzin, gas og CO₂. De første konstruktioner i aluminium blev udviklet i 1965 og siden da har letvægtstankbilerne domineret markedet. HMK Bilcon A/S har ca. 100 ansatte og producerer til hele Norden fra fabrikken i Aalborg.

HMK Bilcon A/S tilbyder desuden højt kvalificeret aluminiumsunderleverandørarbejde. Opgaverne svinger i størrelse samt kompleksitet, men fokuserer som oftes på afgørende kvaliteter som f.eks. høj finish. Produktion af tankbiler er forbundet med de strengeste krav til høj finish af svejsning samt pladeforarbejdning. Det har igennem mange år været medvirkende til opbygning af kernekompetencer indenfor både aluminiumforarbejdning samt udvikling af tankbiler. Til stadighed er den største opgave, som HMK Bilcon A/S har løst, produktionen af pontonerne til katamaranfærgerne som besejler linien imellem Ebeltoft og Odden.

www.bilcon.dk

FORCE Technology er en selvejende, non-profit institution, der er godkendt af Erhvervsministeriet som teknologisk serviceinstitut og tilknyttet Akademiet for de tekniske Videnskaber.

FORCE Technology har hovedkontor i Brøndby nær København og afdelinger i Esbjerg, Vejen, Aalborg og Århus samt datterselskab i Sverige, STK Inter Test AB.

Institutet beskæftiger 700 medarbejdere

www.force.dk

Migatronic A/S er en børsnoteret koncern med datterselskaber i 10 lande og har en fremtrædende placering blandt Europas svejsemaskineproducenter. Migatronic har formået at omsætte industriens behov for svejseudstyr til produkter, der lever op til kundernes krav.

Migatronic er certificeret efter ISO 9001 og sætter kvaliteten i højsædet.

En effektiv rådgivnings- og serviceorganisation bakker Migatronics maskiner op over hele verden.

Migatronic Gruppen med hovedkontor og produktion i Nordjylland beskæftiger ca. 400 medarbejdere og omsætter for ca. 300 mill. kr. på koncernbasis.

www.migatronic.dk

Migatronic har igennem sit helejede datterselskab Migatronic Automation A/S formået at placere sig som en meget betydelig udvikler af automatiserede og robotiserede svejseløsninger - især på det skandinaviske marked. Migatronic Automation A/S, som er beliggende i Aabybro nær Aalborg, er i stor fremgang og beskæftiger i dag ca. 50 medarbejdere. Virksomheden omsætter for mere end 40 mill. kr.

www.migatronic-automation.dk

Mærsk Container Industri etableredes i januar 1990. Et år senere blev fabrikken i Tinglev indviet af Hendes Majestæt Dronning Ingrid.

Efter at have opbygget ekspertise in fabrikering af tørlastcontainere besluttede MCI at lave kølecontainere. Efter at en ny serie af kølecontainere var blevet designet byggedes en ny fabrik skræddersyet til produktion af denne specielle type kølecontainere. Produktionen af disse startede i 1995. MCI er en moderne virksomhed med ca. 500 ansatte på den automatiserede fabrik i Tinglev. MCI er i dag den førende producent af køle og tørlastcontainere, og producerer mere end 20.000 FEU per år. I 1998 erhvervede MCI en kølecontainerfabrik i Kina, nu MCI Qingdao Ltd. Denne virksomhed har også faciliteter til produktion af kølecontainere.

MCI er 100 % ejet af Odense Stålskibsværft, og er en del af A.P.Møller gruppen.

www.maerskbox.com

Danmarks Tekniske Universitet deltager med Sektionen for Maritim Teknik, Institut for Mekanik, Energi, og Konstruktion. Instituttets samlede medarbejderstab er ca. 200, og råder over omfattende forsøgsfaciliteter og avanceret computerudstyr.

www.dtu.dk og www.mek.dtu.dk

Aalborg Universitet uddanner bl.a. ingeniører. Deltagende institut er Institut for Maskinteknik. Instituttets aktiviteter dækker det faglige område maskinteknik i bred forstand, og instituttet varetager undervisning og forskning i de fagområder, der knytter sig til maskinkonstruktion, herunder konstruktionsteknik, maskinelementer, mekanik, faststofmekanik og materiallære med hovedvægten i forskningen lagt på udvikling af det teknisk-naturvidenskabelige grundlag for beskrivelse af nye avancerede materialer, konstruktionsprincipper, analysemetoder, numeriske metoder og eksperimentelle metoder.

Især har ikke-metalliske materialer, såsom keramik og kompositter, været genstand for forskning m.h.t. mekaniske egenskaber og anvendelse i konstruktioner, der hidtil har været domineret af stål. Ud over udførelse af teoretisk- og eksperimentel forskning udføres konstruktionsprojekter, der har karakter af produktudvikling, ligesom formidling af nye teorier og metoder spiller en væsentlig rolle. Instituttet råder over veludstyrede laboratorier indenfor de nævnte områder og en samling af udstyr til undervisningsbrug, samt eget maskinværksted, der fremstiller eksperimentelt udstyr til flere institutter.

www.auc.dk og www.ime.auc.dk

Knud E. Hansen A/S har leveret skibsdesign service til den nationale som internationale maritime industri i mere en 60 år. Mere end 30 skibs-, maskiningeniører og arkitekter er ansat i firmaet, som tilbyder design service inden for nybygning, ombygning og havneanlæg samt interiør design. Derudover udarbejdes transport analyser, inspektion af ny og ombygning samt inspektion af eksisterende tonnage.

Knud E. Hansen anvender den mest avancerede computerteknik, der er til rådighed på markedet, og udvikler stadig mere avancerede skibstyper.

Knud E. Hansen er i dag en selvstændig del af den svenske Semcon gruppe med mere end 1400 ansatte.

www.knudehansen.com

Redaktionen, 30. november 2001.

Civ.ing. Ph.D. Martin Birk-Sørensen, Knud E. Hansen A/S

Projektchef Ing. Steen Ussing, FORCE Technology

Indholdsfortegnelse

1	GENERELT OM MATERIALET ALUMINIUM	1
1.1	INTRODUKTION.....	1
1.2	ALUMINIUM.....	1
1.2.1	Ren aluminium.....	1
1.2.2	Legeringer	1
1.2.3	Leveringstilstande.....	5
1.2.4	Hærdning af aluminiumlegeringer.....	6
1.2.5	Deformationshærdning	7
1.2.6	Modningshærdning.....	9
1.2.7	Almindelige konstruktionskvaliteter	12
1.3	ALUMINIUM KONTRA STÅL.....	16
1.3.1	Generelt.....	16
1.3.2	Vægt	16
1.3.3	Styrke / stivheds forholdet.....	17
1.3.4	Brudgrænse / flydegrænse forholdet.....	19
1.3.5	Tab af styrke ved varmepåvirkning fra svejsning	20
1.3.6	Temperaturbestandighed & brandkrav.....	22
1.3.7	Varmeledningsevne	23
1.3.8	Kærvfølsomhed, udmattelse & pålidelighed.....	24
1.3.9	Længdeudvidelseskoefficient	24
1.3.10	Hårdhed.....	24
1.3.11	Svingninger, vibrationer og dæmpningsfaktor	24
1.3.12	Korrosion.....	25
1.3.13	Strengpresning (ekstrudering)	26
1.3.14	Skæring og bearbejdning af aluminium	26
1.3.15	Overfladebehandling	27
1.3.16	Materiale- og produktionsomkostninger.....	27
1.3.17	Reparation.....	27
1.4	SAMMENLIGNING MELLEM DIMENSIONER, DEFORMATIONER OG MASSE FOR SIMPLE IKKE SVEJSTE ELEMENTER I ALUMINIUM OG STÅL.....	29
1.4.1	Arealfaktorer for trækstænger eller korte tryk stænger i aluminium belastet til elasticitetsgrænsen i forhold til tilsvarende stænger i stål.....	31
1.4.2	Massefaktorer for trækstænger eller relativt korte trykstænger i aluminium belastet til elasticitetsgrænsen i forhold til tilsvarende stænger i stål.....	33
1.4.3	Deformationsfaktorer for trækstænger eller korte trykstænger i aluminium belastet til elasticitetsgrænsen i forhold til tilsvarende stænger i stål.....	35

1.4.4	Skaleringsfaktorer for bøjning af stænger i aluminium belastet til elasticitetsgrænsen i forhold til tilsvarende stænger i stål.	37
1.4.5	Udbøjningfaktorer for bøjning af momentpåvirkede bjælker i aluminium belastet til elasticitetsgrænsen i forhold til tilsvarende bjælker i stål.	39
1.4.6	Massefaktorer for bøjning af momentpåvirkede bjælker i aluminium belastet til elasticitetsgrænsen i forhold til tilsvarende bjælker i stål.	41
1.4.7	Masse af simpelt understøttet meget slank søjle i aluminium i forhold til en tilsvarende søjle i stål.	43
1.5	REFERENCELISTE.....	45
2	DESIGN OG DIMENSIONERING	47
2.1	DESIGN PRINCIPPER.....	47
2.1.1	Fail safe design	47
2.1.2	Safe life design.....	47
2.1.3	Damage tolerant design.....	47
2.1.4	Infinite life design.....	48
2.2	SAMMENHÆNGEN MELLEM BELASTNINGSFASTSÆTTET, BEREGNINGSMETODEN OG ACCEPTKRITERIET	48
2.3	NORMER OG STANDARDER.....	48
2.3.1	Eurocode 9.....	50
2.3.2	DS/EN 30042	50
2.3.3	DS 419 Aluminiums-konstruktioner.....	51
2.3.4	Klasseregler.....	51
2.4	DIREKTE BEREGNINGSMETODER.....	53
2.4.1	Nøjagtighed ved direkte beregninger	54
2.5	TILLADELIGE SPÆNDINGSNIVEAUER, EFFEKTIV FLANGE, BULING AF SØJLER OG STABILITET AF PLADEFELTER.....	55
2.5.1	Generelt.....	55
2.5.2	Det tilladelige spændingsniveau.....	55
2.5.3	Effektiv flange	57
2.5.4	Bulingsteori – generelt	60
2.5.5	Buling af søjler.....	60
2.5.6	Lokal stabilitet af pladefelter.....	66
2.6	DIMENSIONERING OG UDFORMNING AF LATERALT BELASTEDE AFS TIVEDE PLADEFELTER..	70
2.6.1	Indledning.....	70
2.6.2	Geometrisk udformning af pladepaneller	71
2.6.3	Valg af profil type	71
2.6.4	Dimensionering af pladepaneller	73
2.6.5	“Sunde” dimensioner	77
2.6.6	Stabilitet af stivere og dragere.....	77
2.6.7	Elementer, der ikke står vinkelret på pladefeltet.....	84

2.7	DIMENSIONERING AF AFSTIVEDE STØTTESKODDER OG PLADEFELTER UDSAT FOR KANTTRYK.....	86
2.7.1	Indledning.....	86
2.7.2	Lodret afstivede støtteskodder.....	87
2.7.3	Vandret afstivede støtteskodder.....	90
2.8	DIMENSIONERING AF KORRUGEREDE PLADEPANELER.....	96
2.8.1	Indledning.....	96
2.8.2	Typiske korrugerede paneler.....	96
2.8.3	Beregning af tværsnitsdata for korrugeringer.....	99
2.8.4	Dimensionering.....	104
2.9	DIMENSIONERING OG UDFORMNING AF GITTER-KONSTRUKTIONER.....	111
2.9.1	Dimensionering.....	112
2.9.2	Optimering af gitterkonstruktioner.....	114
2.9.3	Sikkerhed.....	114
2.10	DIMENSIONERING AF CENTRALT PÅVIRKEDE TRYKSTÆNGER - EUROCODE 9.....	115
2.10.1	Indledning.....	115
2.10.2	Centralt påvirkede trykstænger.....	116
2.10.3	Symmetriske og valsede profiler.....	117
2.10.4	Asymmetriske profiler.....	117
2.10.5	Opsvejste profiler.....	118
2.11	EKSTRUDERING / EKSTRUDEREDE PROFILER.....	123
2.11.1	Indledning.....	123
2.11.2	Ekstruderings teknologier.....	123
2.11.3	Ekstruderings svejsning.....	126
2.11.4	Begrænsninger i størrelsen af ekstruderede profiler.....	128
2.11.5	Design af ekstruderede profiler.....	129
2.11.6	Anvendelsesområder for ekstruderede aluminium profiler.....	131
2.11.7	Indbyggede funktioner.....	131
2.11.8	Pladepaneler samlet af ekstruderede profiler.....	133
2.11.9	Sammensvejsning af ekstruderede profiler.....	137
2.11.10	Case story over produktionstekniske erfaringer.....	140
2.12	DESIGNREGLER FOR UDFORMNING AF KONSTRUKTIONSDETALJER.....	141
2.12.1	Generelt.....	141
2.12.2	Hoved designregler:.....	142
2.12.3	Designregel 1: - Undgå hårde punkter.....	143
2.12.4	Designregel 2: - Sørg for strukturel kontinuitet og forløb i konstruktionen.....	157
2.12.5	Designregel 3: - Placer udkap på steder hvor de gør mindst mulig skade.....	168
2.12.6	Designregel 4: - Understøt knæklinier.....	169
2.12.7	Designregel 5: - Begræns relativ deformation.....	170
2.12.8	Designregel 6: - Forebyg korrosion i designfasen.....	171
2.12.9	Designregel 7: - Udform konstruktionen, så den kan svejses i god kvalitet.....	177
2.12.10	Designregel 8: - Undgå om muligt at svejse på tværs af hovedspændingsretningen.....	181

2.12.11	Designregel 9: - Undgå svejseophobninger	182
2.12.12	Designregel 10: - Undgå om muligt at svejse i geometriske hot-spots.....	183
2.12.13	Designregel 11: - Placer svejsningerne, hvor de forringede materialeegenskaber i den varmpåvirkede zone gør mindst mulig skade.....	184
2.12.14	Designregel 12: - Brug stumpsvejsninger i hårdt belastede områder i stedet for kantsømme.....	188
2.12.15	Specielle detaljeløsninger ved samlinger mellem stål og aluminium.....	189
2.13	BRANDTEKNISKE ASPEKTER VED ANVENDELSE AF ALUMINIUM.....	196
2.13.1	Introduktion.....	196
2.13.2	Kurver og beregningsmetoder for temperaturstigning ved brand.....	196
2.13.3	Eksisterende love & regler	198
2.13.4	Isoleringstyper og deres egenskaber	201
2.13.5	Isoleringstyper og deres nøgletal.....	203
2.13.6	Aluminium og brand	204
2.13.7	Risiko analyse.....	206
2.13.8	Kurver over aluminiums styrke som funktion af temperaturen.....	206
2.13.9	Beregningsmetoder	208
2.13.10	Temperatur analyse for isoleret aluminium.	211
2.13.11	Kurver over materiale temperaturen for ubeskyttet aluminium	213
2.13.12	Kurver over temperaturen for Isolerede aluminiums strukturer	214
2.13.13	Isolerings teknikker.....	218
2.13.14	Eksempler	219
2.13.15	Kombination af bærende elementer i stål og sekundær struktur i aluminium.....	225
2.14	PRODUKTIONSTEKNISKE ERFARINGER - CASE STORIES	226
2.14.1	Case story I – Afstivet plant panel.....	226
2.14.2	Case story II – Afstivede plane pladepaneler sammensvejst i en vinkel	232
2.14.3	Case story III – Model af et Styrehus	237
2.14.4	Case story IV - Brug af ekstruderede profiler i kølecontainer.....	243
2.15	DIMENSIONERING AF STATISK BELASTEDE SVEJSESAMLINGER I ALUMINIUM EFTER EUROCODE 9	247
2.15.1	Materialer (ENV9 kapitel 3)	247
2.15.2	Laster, karakteristiske værdier	248
2.15.3	Beregningsmæssige krav for grundmateriale	250
2.15.4	Beregningsmæssige krav for den varmpåvirkede zone HAZ	251
2.15.5	Statisk dimensionering af svejsesamlinger (ENV9 kapitel 6)	251
2.15.6	Inspektion og prøvning.....	255
2.15.7	Appendix A: Oversigt over formler til beregning af statisk belastede svejste samlinger i aluminium efter Eurocode 9	257
2.16	REFERENCER.....	259
3	SVEJSNING.....	261
3.1	SVEJSNING AF ALUMINIUM- INTRODUKTION.....	261
3.1.1	Svejselighed af renaluminium samt ikke-modningshærdbare legeringer	261

3.1.2	Svejselighed af modningshærdbare legeringer.....	262
3.1.3	Svejselighed af støbelegeringer.....	262
3.1.4	Referencer.....	263
3.2	UDFORMNING AF SVEJSESAMLINGER.....	264
3.2.1	Udformning af svejsesamlinger med hensyn til produktionsvenlighed	264
3.2.2	Udformning af svejsesamlinger under hensyntagen til adkomst	266
3.2.3	Detailudformninger af svejsesamlinger - fugeforberedelse	267
3.2.4	Referencer.....	268
3.3	TILSATSMATERIALER TIL SVEJSNING AF ALUMINIUM	269
3.3.1	Tilsatsmaterialer i relation til processer	269
3.3.2	Tråddiameter.....	270
3.3.3	Valg af tilsatsmateriale legering	271
3.3.4	Legeringselementer og legeringstyper.....	274
3.3.5	Styrke	277
3.3.6	Modningshærdbart svejsegods	277
3.3.7	Trådlegeringens indflydelse på svejsedata.....	279
3.3.8	Aluminiumtrådenes overflade - shaving	281
3.3.9	Standardiserede betegnelser.....	282
3.3.10	Afprøvninger og godkendelser	283
3.3.11	Opbevaring af tilsatsmaterialer.....	287
3.3.12	Referencer.....	288
3.4	VALG AF SVEJSEPROCES TIL ALUMINIUM.....	289
3.4.1	Referencer.....	294
3.5	TIG-SVEJSNING	296
3.5.1	Procesbeskrivelse	296
3.5.2	Wolframelektroder.....	304
3.5.3	Krav til udstyr.....	308
3.5.4	Forslag til svejsedata.....	311
3.5.5	Referencer.....	314
3.6	PLASMASVEJSNING.....	316
3.6.1	Plasmasvejsprocessen.....	316
3.6.2	Smeltesvejsning, Tryksvejsning, key-hole svejsning	318
3.6.3	Anvendelsesområder og produktionsmæssige konsekvenser	319
3.6.4	Krav til udstyr.....	320
3.6.5	Beskyttelsesgas og plasmagas	322
3.6.6	Wolframelektroder til plasmasvejsning	323
3.6.7	Eksempler på svejsedata.....	324
3.6.8	Betragtninger vedrørende svejsefikstur	328
3.6.9	Referencer.....	331
3.7	MIG-SVEJSNING.....	332
3.7.1	Procesbeskrivelse	333
3.7.2	MIG tandemsvejsning	337

3.7.3	Traditionel MIG kontra tandem-MIG	342
3.7.4	Krav til udstyr	348
3.7.5	Forslag til svejsedata	355
3.7.6	Referencer	357
3.8	BESKYTTELSESGASSEN	359
3.8.1	Beskyttelsesgassens funktion	359
3.8.2	Anvendte beskyttelsesgasser	360
3.8.3	Eksempler på gassens indflydelse	364
3.8.4	Gasflow	368
3.8.5	Måling af gasflow	371
3.8.6	Undgå porer og urolig lysbue	372
3.8.7	Transport af beskyttelsesgas	373
3.8.8	EN 439 Klassifikation	376
3.8.9	Referencer	377
3.9	MODSTANDSSVEJSNING	381
3.9.1	Introduktion	381
3.9.2	Aluminiums modstandssvejsning egenskaber	382
3.9.3	Elektrodematerialer	384
3.9.4	Elektrodedesign	385
3.9.5	Porøsitet i punktsvejsninger	386
3.9.6	Aluminiumlegeringers modstandssvejsbarhed	386
3.9.7	Konstruktionsanvisninger	388
3.9.8	Maskiner til modstandssvejsning af aluminium	390
3.9.9	Retningsgivende værdier for maskinindstillinger	390
3.9.10	Kvalitetskontrol	391
3.9.11	Boltesvejsning	393
3.9.12	Boltesvejsning med trukken lysbue (løftetænding)	393
3.9.13	Kondensatorboltesvejsning	393
3.9.14	Særlige forhold ved boltesvejsning af aluminium	395
3.9.15	Overflade kvalitet	396
3.9.16	Anodiseret aluminium	396
3.9.17	Oversigt over fordele og ulemper ved boltesvejsning	396
3.9.18	Investeringsbehov ved boltesvejsning	397
3.9.19	Referencer	398
3.10	LASERSVEJSNING	399
3.10.1	Lasersvejsning af aluminiumslegeringer	403
3.10.2	Lasersvejsningers struktur og egenskaber	404
3.10.3	CO ₂ -Lasersvejsning af aluminiumslegeringer	408
3.10.4	ND-YAG-lasersvejsning af aluminiumslegeringer	414
3.10.5	Hybrid-svejsning (YAG-laser og MIG)	419
3.10.6	Referencer	424
3.11	FRICION STIR SVEJSNING	428
3.11.1	Introduktion	428

3.11.2	Procesbeskrivelse	428
3.11.3	Friction Stir - fordele og begrænsninger	429
3.11.4	Svejseshastighed	430
3.11.5	Mekaniske egenskaber	431
3.11.6	Mikrostruktur	433
3.11.7	Materialer og godstykkelser	434
3.11.8	Fugegeometrier	436
3.11.9	Udvikling inden for FSW	436
3.11.10	Anvendelsesområder	439
3.11.11	Referencer	443
3.12	REPARATION	444
3.12.1	Forberedelser før svejsereparation	445
3.12.2	Valg af svejseproces til reparationer	446
3.12.3	Andre foranstaltninger	446
3.12.4	Referencer	448
3.13	STYRKETAB VED SVEJSNING	449
3.13.1	Introduktion	449
3.13.2	Varmpåvirkning	450
3.13.3	Varmetilførsel ved forskellige svejseprocesser	451
3.13.4	Styrketab	454
3.13.5	Sasak-model for HAZ-bredde	457
3.13.6	Referencer	463
3.14	DEFORMATIONER VED SVEJSNING	465
3.14.1	Introduktion	465
3.14.2	Vinkelknæk	466
3.14.3	Tværkrympning	468
3.14.4	Længdekrympning	470
3.14.5	Eksempel på beregning af deformationer	471
3.14.6	Kontrol/minimering af svejsedeformationer	472
3.14.7	Svejseprocesser	479
3.14.8	Referencer	481
3.15	RETNING AF ALUMINIUM	483
3.15.1	Introduktion	483
3.15.2	Mekanisk retning	483
3.15.3	Varmretning	484
3.15.4	Varmretning med TIG-brænder – orienterende forsøg	487
3.15.5	Referencer	490
3.16	FUGEFORBEREDELSE VED SVEJSNING	491
3.16.1	Generelt om skæring og fugeforberedelse	491
3.16.2	Laserskæring	492
3.16.3	Plasmaskæring	495
3.16.4	Krav til efterbearbejdning ved plasmaskæring	501
3.16.5	Sikkerhed ved plasmaskæring af aluminium i vandbad	501

3.16.6	Korrosionsproblemer som følge af skæring i vandbad.....	502
3.16.7	Vandskærebørde som tidligere har været benyttet til jernholdige emner	503
3.16.8	Kapaciteter og skærehastigheder ved plasmaskæring.....	504
3.16.9	Abrasiv vandstråleskæring	507
3.16.10	Mekanisk fugeforberedelse	511
3.16.11	Fræsning.....	514
3.16.12	Klipning.....	515
3.16.13	Nibbling.....	515
3.16.14	Filning.....	515
3.16.15	Rystepudsere.....	516
3.16.16	Vinkelslibere.....	516
3.16.17	Oversigt over fugetyper samt tilhørende svejseprocesser.....	516
3.16.18	Referencer.....	524
3.17	BIMETALLER.....	527
3.17.1	Svejseanvisninger.....	529
3.17.2	Maksimum temperaturer	529
3.17.3	Svejseprocesser.....	530
3.17.4	Tilsatsmaterialer	530
3.17.5	Hæftning.....	530
3.17.6	Forvarme.....	530
3.17.7	Stumpsømme i bimetal.....	531
3.17.8	Kontrol efter svejsning	531
3.17.9	Skæring.....	531
3.17.10	Bukning	532
3.17.11	Konstruktive råd	532
3.17.12	Korrosionsaspekter	533
3.17.13	Typiske fejl.....	534
3.17.14	Referencer.....	535
3.18	KVALITETSSTYRING OG KONTROL VED SVEJSNING.....	536
3.18.1	Kvalitetsstyring generelt.....	536
3.18.2	Svejekvalitet ifølge EN 30042.....	537
3.18.3	Acceptkriterier / reparation	539
3.18.4	Kontrolmetoder	542
3.18.5	Produktionsmæssige konsekvenser ved indførelse af aluminium.....	543
3.18.6	Reparationer og udbedringer	545
3.18.7	Dokumenterede gode råd om design.....	545
3.18.8	Adkomst- og arbejdsforhold	546
3.18.9	Normer og standarder.....	546
3.18.10	Økonomiske konsekvenser	547
3.18.11	Uddannelse.....	548
3.18.12	Referencer.....	551
3.19	ØKONOMISKE ASPEKTER.....	552
3.19.1	Investeringsbehov for alternative svejseprocesser.....	552
3.19.2	Faktorer af betydning for omkostninger og besparelser	554

3.19.3	Udskiftningstærskel.....	556
3.19.4	Referencer.....	558
4	LIMNING	559
4.1	INTRODUKTION.....	559
4.1.1	Anvendelse af limteknologi.....	559
4.1.2	Fordele og ulemper ved limteknologien.....	564
4.2	MEKANISK DIMENSIONERING AF LIMSAMLINGER.....	565
4.2.1	Lastoverføringsmekanismer.....	566
4.2.2	Fugegeometri.....	568
4.2.3	Dimensioneringseksempel.....	571
4.3	LANGTIDSEGENSKABER	574
4.3.1	Kemisk ældning.....	574
4.3.2	Korrosion af grundmaterialet.....	578
4.3.3	Krybning	579
4.4	VALG AF LIM.....	580
4.4.1	Limfamilier.....	580
4.4.2	Afbinding af lime	583
4.5	UDFØRELSE - VALG AF FOR- OG EFTERBEHANDLING	585
4.5.1	Forbehandling.....	585
4.5.2	Produktionstekniske aspekter.....	588
4.5.3	Efterbehandling.....	591
4.6	KVALITETSSIKRING.....	592
4.6.1	Kvalitetsstyring og kontrol.....	592
4.6.2	Krav til produktionsfaciliteter.....	595
4.6.3	Normer og standarder.....	597
4.6.4	Økonomiske konsekvenser	597
4.6.5	Uddannelse.....	597
4.7	REPARATIONER.....	598
4.8	GODKENDELSE.....	599
4.8.1	Krav til containere til søtransport.....	599
4.8.2	Krav til tankbiler	599
4.9	PRAKTISKE MODELFORSG.....	600
4.9.1	Beskrivelse af case virksomhederne.....	600
4.9.2	Case #1 – Limning af bagbeklædning til køleunit.....	602
4.9.3	Case #2 – Limning af indvendig header til tag.....	605
4.9.4	Case #3 – Fastgørelse af dræntank ved limning	609
4.9.5	Case #4 – Fastgørelse af additivanlæg ved limning.....	613
4.10	NØGLETAL FRA PRODUKTION/FORSØG.....	616

4.10.1	Indledning.....	616
4.10.2	Eksempler på produktionstider for limning.....	617
4.10.3	Vejledning i valg af proces (teknisk/økonomisk fornuftigt).....	617
4.11	REFERENCER.....	619
5	MEKANISK SAMMENFØJNING.....	623
5.1	INTRODUKTION.....	623
5.2	BEREGNING AF BOLTE- OG NITTESAMLINGER.....	623
5.2.1	Udformning af samlingselementer.....	623
5.2.2	Fordeling af kræfter i boltesamlinger.....	625
5.2.3	Bæreevne af bolte- og nittesamlinger.....	626
5.3	MEKANISK INTERLOCKING (TOX-JOINING).....	631
5.3.1	Anvendelsesområder.....	631
5.3.2	Process beskrivelse.....	632
5.3.3	Egenskaber.....	633
5.4	ANVENDELSE AF SKRUER OG NITTER.....	634
5.4.1	Indledning.....	634
5.4.2	Skruemateriale.....	634
5.4.3	Gevindhuler og gevindindsatse.....	635
5.4.4	Pladeskruer.....	636
5.4.5	Anvendelse af ekstruderede aluminiumprofiler.....	637
5.4.6	Nitning.....	638
5.4.7	Nittematerialer.....	639
5.5	EKSEMPEL PÅ SAMMENFØJNING AF SIDEPANEL.....	640
5.5.1	Indledning.....	640
5.5.2	Nuværende samling.....	640
5.5.3	Mekanisk Interlocking.....	641
5.6	KVALITETSSIKRING.....	646
5.6.1	Kvalitetsstyring og kontrol.....	646
5.6.2	Økonomiske konsekvenser.....	649
5.6.3	Uddannelse.....	649
5.7	REFERENCER.....	650
6	LEVETID.....	651
6.1	UDMATTELSE AF SVEJSTE ALUMINIUMSKONSTRUKTIONER.....	651
6.1.1	Indledning.....	651
6.1.2	Udmattelseskaraktistika.....	651
6.2	GRUNDLÆGGENDE FORHOLD VEDRØRENDE SVEJSTE SAMLINGERS UDMATTELSESTYRKE.....	654
6.3	BEREGNINGSMETODER FOR SVEJSTE KONSTRUKTIONER.....	655

6.3.1	Baggrund.....	655
6.3.2	Beregningsmetoder	655
6.3.3	Strukturel analyse.....	657
6.3.4	Levetidsbestemmelse	660
6.3.5	Beregning af revneudbredelse.....	661
6.4	SÆRLIGE FORHOLDSREGLER VED UDMATTELSE.....	664
6.4.1	Svækkelse.....	664
6.4.2	Forbedrende tiltag.....	666
6.5	DIMENSIONERING AF UDMATTESBELASTEDE SVEJSTE SAMLINGER I ALUMINIUM EFTER EUROCODE NO. 9 PART 2.....	667
6.5.1	Indledning.....	667
6.5.2	Grundlag.....	667
6.5.3	Definitioner	667
6.5.4	Belastninger.....	670
6.5.5	Beregning af spændinger	671
6.5.6	”Reservoir”-metoden.....	672
6.5.7	Detaljekategorier, udmattelseskurver	673
6.5.8	Detaljekategorier for grundmateriale	674
6.5.9	Detaljekategorier for påsvejste dele ved tværgående sidekærv.....	676
6.5.10	Detaljekategorier for langsgående svejsesømme	678
6.5.11	Detaljekategorier for kraftoverførende svejste samlinger mellem elementer	680
6.5.12	Udmattelsesvurdering.....	682
6.5.13	Påvirkning fra miljø (korrosionspåvirkning).....	683
6.5.14	Kvalitetskrav	683
6.5.15	Beregningseksempel.....	684
6.6	KORROSION.....	686
6.6.1	Aluminiums korrosionsforhold	686
6.6.2	Forholdsregler mod korrosion.....	686
6.6.3	Generel korrosionsbeskyttelse.....	687
6.6.4	Særlige forholdsregler	689
6.6.5	Overfladebeskyttelse af metal-på-metal samlinger samt boltede og nittede sammenføjninger.....	692
6.6.6	Højstyrke slipbestandige samlinger	698
6.6.7	Fastgjorte sammenføjninger.....	698
6.6.8	Svejste sammenføjninger.....	698
6.6.9	Klæbe/Limsamlinger	698
6.6.10	Kontakt mellem aluminium og ikke-metalliske materialer	698
6.6.11	Inspektion og sikkerhed	698
6.7	KORROSIONSFORHOLD FOR STORE ALUMINIUMSKONSTRUKTIONER I MARINE MILJØER	699
6.7.1	Legeringsvalg.....	699
6.7.2	Neddypning i havvand.....	700
6.7.3	Neddypning i havvand med katodisk beskyttelse	700
6.7.4	Korrosionsfaktorens betydning for levetiden	702

6.7.5	Karakteristiske indikatorer på korrosion off-shore og on-shore.....	707
6.8	RETNINGSLINIER FOR KONCEPTER FOR KORROSIONSOVERVÅGNING.....	711
6.9	ATMOSFÆRISK BELASTEDE KONSTRUKTIONER.....	712
6.9.1	Filiform korrosion.....	712
6.10	KORROSIONSBESKYTTELSE VED OVERFLADEBEHANDLING.....	717
6.10.1	Forbehandling af mindre stykgods	717
6.10.2	Forbehandling af større marine installationer.....	718
6.10.3	Opstilling af simple kvalitetskriterier og udfaldskrav for forbehandlede aluminiumoverflader før videre overfladebehandling.....	718
6.10.4	Maling og plastsystemer	719
6.10.5	Valg af belægningssystem.....	723
6.11	KORROSION OG UDMATTELSE.....	726
6.11.1	Udmattelse under korrosive forhold	726
6.11.2	Revneinitiering.....	727
6.11.3	Revnevækst.....	729
6.11.4	Legeringer	731
6.11.5	Frekvens betydning.....	732
6.11.6	Lavtemperatur udmattelse	734
6.11.7	Højtemperatur udmattelse	734
6.11.8	Beskyttelse	737
6.12	RETNINGSLINIER FOR DESIGN MOD KORROSIONS-UDMATTELSE.....	738
6.12.1	Indledning.....	738
6.12.2	Generelle betragtninger.....	738
6.12.3	Specifikke designregler for Korrosionsudmattelse	738
6.13	REFERENCE LISTE.....	743
7	ARBEJDSMILJØ OG EKSTERNT MILJØ VED SAMMENFØJNING AF ALUMINIUM	747
7.1	ARBEJDSMILJØ.....	747
7.2	SVEJSNING	747
7.2.1	Arbejds miljørisici.....	747
7.2.2	Luftforurening	748
7.2.3	Svejserøg	749
7.2.4	Optisk stråling	752
7.2.5	Øjen- og hudskader forårsaget af optisk stråling	753
7.2.6	Støj	756
7.2.7	Risiko ved strømpåvirkning.....	757
7.2.8	Eksplodingsfare.....	757
7.3	FORANSTALTNINGER MOD ARBEJDSMILJØPÅVIRKNINGER VED SVEJSNING	757
7.3.1	Luftforurening	757
7.3.2	Åndedrætsvæm.....	760

7.3.3	Beskyttelse mod optisk stråling	761
7.3.4	Foranstaltninger mod el-ulykker	762
7.4	MILJØFORHOLD VED SVEJSEPROCESSER TIL ALUMINIUM.....	763
7.4.1	TIG-svejsning af aluminium.....	763
7.4.2	MIG-svejsning af aluminium	764
7.4.3	Lasersvejsning	766
7.5	LIMNING.....	767
7.5.1	Arbejds miljørisici.....	767
7.5.2	Arbejds miljøforanstaltninger generelt	767
7.5.3	Limtyper og limformer.....	768
7.6	EKSTERNT MILJØ VED SAMMENFØJNING AF ALUMINIUM.....	773
7.7	LUFTFORURENING.....	774
7.7.1	Begreber, definitioner og forklaringer.....	774
7.8	AFFALD OG SPILDEVAND	775
7.9	REFERENCELISTE.....	776
7.10	OVERSIGT OVER ANDRE RELEVANTE AT-BEKENDTGØRELSER, MEDDELELSER, VEJLEDNINGER M.V.....	779
8	OPSLAGSDEL	785
8.1	NOMENKLATUR	785
8.2	LEGERINGER.....	789
8.3	STYRKEFORHOLD OG MEKANISKE EGENSKABER	790
8.4	PROFIL TABELLER.....	791
9	STIKORDSREGISTER	829

1 Generelt om materialet aluminium

1.1 INTRODUKTION

Aluminium som konstruktionsmateriale adskiller sig fra stål på en række punkter. Derfor er et vist grundlæggende materialekendskab nødvendigt for at kunne designe konstruktioner i aluminium.

Det efterfølgende afsnit 1.2 beskriver aluminiums klassificering og materialeegenskaber.

I afsnit 1.3 findes en kortfattet sammenligning mellem aluminium og stål på de vigtigste områder, der har betydning ved design i aluminium, og i afsnittet er det samtidigt muligt at få et første foreløbigt gæt på nogle rimelige dimensioner, når man påtænker at skifte fra stål til aluminium.

1.2 ALUMINIUM

1.2.1 REN ALUMINIUM

Aluminium er i ren tilstand et relativt blødt materiale, som er meget duktilt. Som det er typisk for ikke-jernmetallerne, har aluminium ikke nogen markeret flydespænding, idet der er en glidende overgang fra det elastiske til det plastiske område. I stedet benyttes ofte 0,2-grænsen, dvs. den spænding, der giver en længdeforøgelse på 0,2%. Trækstyrken for ren aluminium er forholdsvis lav (brudstyrke 65 – 105 N/mm²) og duktiliteten er stor (brudforlængelse 25 – 40%). Aluminium i ren form har ingen anvendelse til bærende konstruktioner, men benyttes i næringsmiddelindustrien og i elektroteknisk industri. Tilsætning af *legeringselementer* øger styrken. Størstedelen af aluminiumsprodukterne er derfor aluminiumslegeringer. De mekaniske egenskaber kan forbedres yderligere ved plastisk bearbejdning (deformationshærdning) eller varmebehandling (modningshærdning).

Smeltepunktet for ren aluminium er ligget på 660 °C, mens det for legeringer vil ligge mellem ca. 570 og 660 °C. I sammenligning med stål er varmeledningsevnen omkring fire gange så stor, mens varmfylde er dobbelt så stor. Kombinationen af stor varmfylde og stor varmeledningsevne betyder, at aluminium ved svejsning skal tilføjes lige så meget eller mere varme end stål – til trods for det lave smeltepunkt.

1.2.2 LEGERINGER

Forskellige lande har indtil nu haft hver deres betegnelser på aluminiumslegeringer, og ofte har de enkelte producenter desuden benyttet egne betegnelser på sine aluminiumsprodukter. Dermed har det været vanskeligt at orientere sig om produkterne og sammenligne kvaliteter.

I dag går flere og flere lande i Europa over til at benytte euronormen (EN), som igen bygger på AA-systemet (American Aluminium Association) for betegnelse af aluminiumslegeringer.

Dette system er anvendt i denne håndbog.

Aluminium inddeles i to hovedgrupper: *valselegeringer* og *støbelegeringer*.

Betegnelsen AW (W = wrought) anvendes for *valselegeringer*, dvs. legeringer, som efter udstøbning vales, trækkes, ekstruderes, presses, smedes eller på anden måde undergår plastisk deformation for at give emnet sin endelige form.

Betegnelsen AC (C = cast) anvendes for *støbelegeringer*, der bruges til emner, der får deres endelige form ved selve udstøbningen.

I Europæiske normer er der sat EN foran de tilsvarende betegnelser, altså EN-AW og EN-AC.

For såvel valse- som støbelegeringerne klassificerer AA-systemet legeringerne vha. en firecifret betegnelse, men denne klassificering er ikke 100% identisk for valselegeringer og støbelegeringer.

Valselegeringer

Herunder hører legeringer, som har gennemgået en mekanisk bearbejdning (såsom valsning, trækning, presning eller smedning) efter udstøbningen. I lighed med ren Aluminium kan alle legeringerne opnå en styrkeforøgelse ved koldbearbejdning (d.v.s ved deformationshærdning).

En del af legeringerne har endvidere den egenskab, at styrken kan forøges ved modningshærdning (udskilleleshærdning). Normalt sker modningen under opvarmning (typisk for 6000-serien, AlMgSi), men enkelte legeringer har den egenskab, at modningen – i hvertfald til en hvis grad – kan ske ved stue-temperatur. Dette er tilfældet for en række legeringer i 7000-serien.

En hærdning betyder altid en nedgang i duktiliteten, men fordelen ved modningshærdning fremfor deformationshærdning er, at nedgangen i duktiliteten bliver relativt mindre – legeringen bliver mindre skør. Ved en kombination af begge hærde-metoder kan man for nogle legeringer opnå en meget høj styrke i forhold til vægten (over 600 N/mm² for nogle legeringer, der blandt andet bruges i fly).

Tabel 1.1 viser hovedinddelingen for valselegeringer. Første ciffer angiver hovedlegeringselementet.

I serie 1XXX (ren aluminium) betegner 2. ciffer grænserne for urenheder. Er dette ciffer 0, er der ingen særlig kontrol med urenhederne, mens tallene 1 til 9 angiver, at der er kontrol med en eller flere typer urenheder. De to sidste cifre betegner den krævede aluminiumsprocent.

I serie 2XXX til 8XXX (aluminiumslegeringer) betegner andet ciffer legerings modifikationer. Er dette ciffer 0, indikerer det den oprindelige legering, mens tallene 1 til 9 angiver modifikationer af den oprindelige legering. De to sidste cifre har ingen særlig betydning, men skal blot identificere de enkelte legeringer indenfor gruppen. Serie 9XXX er en ubrugt serie.

Tabel 1.1 Hovedinddeling for valselegeringer efter AA-systemet.

Hovedinddeling for valselegeringer efter AA-systemet			
Serie	Hovedlegerings-element	Anvendelsesområder	Eksempel
1XXX	<1% (teknisk ren)	El- og varmeledere, cladding	AW-1050 (Al99,5)
2XXX	Kobber	Højstyrke applikationer, flydele	AW-2024 (AlCu4Mg1)
3XXX	Mangan	Dækplader, lette konstruktioner	AW-3103 (AlMn1)
4XXX	Silicium	Dækplader, El-ledere	AW-4042 (AlSi5)
5XXX	Magnesium	Konstruktioner , El-leder, dækplader	AW-5083 (AlMg4,5Mn0,7)
6XXX	Magnesium, silicium	Konstruktioner , El-ledere, dækplader	AW-6082 (AlSi1MgMn)
7XXX	Zink	Højstyrke applikationer, flydele	AW-7020 (AlZn4,5Mg1Cu)
8XXX	Andre elementer		
9XXX	Ubrugt serie		

Støbelegeringer

Silicium (Si) er det dominerende legeringselement. Med stigende siliciumindhold stiger støbeligheden – for at blive maksimal ved 12% Si. Kobber og magnesium er ligeledes i stand til at påvirke støbeligheden positivt, og disse kan optræde alene eller sammen med silicium. Støbelegeringer kan gøres hærdbare ved tilsætningen af magnesium (Mg), kobber (Cu) og zink (Zn).

Tabel 1.2 viser hovedinddelingen for støbelegeringer, og det bemærkes, at der i støbelegeringernes serienummer er indsat et punktum før sidste ciffer.

Første ciffer betegner det vægtmæssigt betydeligste legeringselement.

I serie 1XX.X (ren aluminium) betegner de to næste cifre renheden (indholdet af aluminium), mens de i serie 2XX.X til 9XX.X (aluminiumslegeringer) blot betegner legeringens identifikationsnummer.

Sidste ciffer efter punktum'et indikerer, hvorvidt legeringen forekommer som metalbarre eller støbegods. "0" angiver støbning; "1" (eller "2") angiver metalbarre eller råblok.

Tabel 1.2 Hovedinddeling for støbelegeringer efter AA-systemet.

Hovedinddeling for støbelegeringer efter AA-systemet			
Serie	Hovedlegerings-element	Anvendelsesområder	Eksempel
1XX.X	>99% Al	El-ledere, lette konstruktioner	AC-100.1 (Al99)
2XX.X	Kobber	Højtemperaturstyrke. Trykbelastede motordele	AC-204.0 (AlCu4MgTi)
3XX.X	Silicium og kobber	Krav til tæthed ved moderat temperatur. Motorer	AC-319.0 (AlSi5Cu3)
4XX.X	Silicium	Fødevareproduktion	AC-445.2 (AlSi7)
5XX.X	Magnesium	Marine miljøer	AC-514.0 (AlMg3)
6XX.X	Ubrugt serie		
7XX.X	Zink	Krav til høj styrke uden forudgående varmebehandling	AC-705.0 (AlZn3)
8XX.X	Tin	Lejer	AC-850.0 (AlSn6)
9XX.X	Andre elementer		

Egenskaberne af de enkelte aluminiumslegeringer hænger sammen med legeringselementerne.

De vigtigste legeringselementer er: magnesium, mangan, silicium, zink og kobber, nikkel, titan og litium.

Alle de nævnte legeringselementer giver en opløsningshærdning omend af varierende styrke, ligesom de alle - bortset fra titan - sænker smeltepunktet.

De enkelte legeringselementers har følgende egenskaber:

- **Magnesium** (Mg) forekommer i mange typer af aluminiumslegeringer. Magnesium giver en meget effektiv opløsningshærdning, men indgår også i flere modningshærdede systemer, og øger styrken ved deformationshærdning. Øger korrosionsmodstanden. Magnesium tilsættes i mængder op til ca. 7%. Styrken øges med stigende indhold af Mg. Ved Mg mængder over 3% bliver legeringen følsomt overfor spændingskorrosion ved drifttemperaturer på over 65°C i marine miljøer. Dette kan eksempelvis være et problem tæt på udstødninger på skibe.
- **Mangan** (Mn) øger styrken gennem opløsningshærdning. Sænker smeltepunktet. Mangan gavner styrken og modstandsdygtigheden overfor korrosion, men er ikke så effektivt som magnesium.
- **Silicium** (Si) giver noget øget styrke, men normalt forringet duktilitet. I kombination med magnesium opstår muligheden for modningshærdning gennem udskillelse af Mg-Si-partikler i strukturen. Silicium sænker også smeltepunktet uden at give anledning til sprødhedsfænomener, og benyttes i støbelegeringer og i svejsetråd. Kombinationen Si og Mg fremmer modningshærdningseffekten og giver en lettere formbar legering i varm tilstand.
- **Zink** (Zn) giver i kombination med magnesium mulighed for opnåelse af meget stor styrke gennem modningshærdning. Zink kan ikke siges at være gavnlige for svejsbarheden generelt, men

zinklegeret aluminium er i forhold til sin høje styrke rimelig godt svejsbart, ligesom det ofte genvinder styrken efter svejsning alene ved lagring ved stuetemperatur (> ca. 30 dage). Korrosionstendensen øges i almindelighed (f.eks. spændings og lagdelingskorrosion (exfoliationskorrosion)). Sænker smeltepunktet.

- **Kobber** (Cu) giver meget høj styrke, der er sammenlignelig med konstruktionsstål. Duktiliteten og specielt svejsbarheden, reduceres betydeligt. Korrosionstendensen øges generelt. Sænker smeltepunktet.
- **Nikkel** (Ni) tilsættes for at øge styrken specielt ved forhøjede temperaturer.
- **Titanium** (Ti) er en finkorns danner, for dermed forbedrede mekaniske egenskaber og/eller korrosionsmodstandsdygtigheden. Hæver som det eneste legeringselement smeltepunktet ganske betragteligt.
- **Litium** (Li) er et relativt nyt legeringselement, der reducerer massefylden og øger elasticitetsmodulet.
- **Scandium** (Sc) er som legeringselement også nyt. Bruges hovedsageligt som styrkeforøger.

Li og Sc bruges hovedsageligt i jet fly industrien.

I ren aluminium (Al > 99 %) og i aluminiumslegeringer udgør **jern** (Fe) ofte en stor del af restprocenten. Dette er egentlig at betragte som en forurening, som stammer fra elektrolyseprocessen. Men et vist indhold af Fe kan være gunstigt, for eksempel ved fremstilling af folie. Små mængder af **krom** (Cr) kan reducere tendensen til spændingskorrosion i Cu-holdige materialer.

Der pågår et kontinuerligt forskningsarbejde for at forbedre kvaliteten af aluminiumslegeringer og finde frem til kvaliteter, som er specialtilpasset forskellige anvendelsesområder. Aluminiumsproducenterne har stor kompetence på dette område, og bør konsulteres om de muligheder der findes.

1.2.3 LEVERINGSTILSTANDE

De forskellige aluminiumslegeringer kan leveres i forskellige såkaldte ”*leveringstilstande*”, der betegner efterbehandlingen.

I AA-systemet betegnes *leveringstilstanden* med et bogstav efter den 4-cifrede *legeringsbetegnelse*, som beskrevet i nedenstående Tabel 1.3.

Tabel 1.3 Leveringstilstande.

F	Som emnet er produceret. Kolddeformation eller varmebehandling er ikke kontrolleret
O	Blødgødet til lavest mulig styrke
H	Deformationshærdet
W	Opløsningsglødet og bratkølet (ustabil tilstand, som anvendes til emner, der skal formgives inden senere modning)
T	Modningshærdet (varmebehandlet) – stabil tilstand opnået.

Leveringstilstandene H og T (de hærdede tilstande) er de mest relevante for bærende konstruktioner. Leveringstilstandene F og O er mindre relevante pga. deres relativt lave styrke, og W er en ustabil mellemtilstand.

1.2.4 HÆRDNING AF ALUMINIUMLEGERINGER

Når ren aluminium tillegeres andre stoffer, vil legeringsstofferne indgå i krystalgitteret enten som substitutionsatomer (store atomer) eller som indskudsatomer (små atomer) og dermed medføre indre spændinger, der vil modvirke dislokationer af atomerne og dermed øge styrken. Dette fænomen kaldes ”opløsningshærdning”, og legeringer, der er hærdede på denne måde kaldes ”opløsningshærdede legeringer” (engelsk: solution hardened alloys).

Ud over denne opløsningshærdning, der altså alene skyldes legeringselementerne, kan styrken af de fleste aluminiumslegeringer øges yderligere ved en hærdningsproces efter udstøbningen – *deformationshærdning* eller *modningshærdning*.

Processerne er beskrevet nærmere i de følgende afsnit.

Det er imidlertid vigtigt at vide, at den styrkegevinst, der er opnået ved en hærdeproces (deformations- eller modningshærdning) efter udstøbningen, kun er stabil så længe temperaturen holdes under en vis grænse.

Over 150 – 200 °C går gevinsten delvist tabt, og ved endnu højere temperaturer f.eks. ved svejsning forsvinder styrkeøgningen fuldstændigt, idet de hærdede legeringer vender tilbage til den grundtilstand, de havde lige efter udstøbningen.

Alle legeringer kan i princippet deformationshærdes, men processen er kun relevant for valselegeringerne.

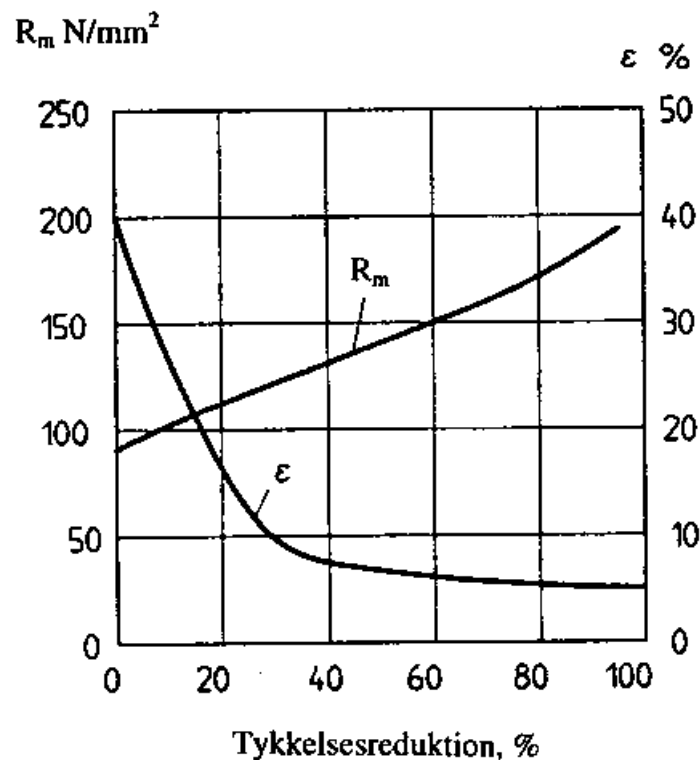
Det er kun legeringer i 2000-, 6000- og 7000-serierne, der er modningshærdbare, og man skelner derfor mellem modningshærdbare legeringer (engelsk: heat treatable alloys) og ikke-modningshærdbare legeringer.

1.2.5 DEFORMATIONSHÆRDNING

Brudstyrken af både ren aluminium og af aluminiumslegeringer kan øges betragteligt ved deformation, for eksempel valsning eller strækning, i kold ($T < 120\text{ °C}$) eller varm tilstand. Processen kaldes *deformationshærdning* (engelsk: cold-forming eller cold-working) og er meget almindelig ved fremstilling af pladematerialer i aluminium.

I Figur 1.1 er virkningen af deformationshærdning vist for ren aluminium. Brudstyrken R_m øges med tykkelsesreduktionen. Det ses også, at dette medfører reduceret duktilitet i form af brudtøjningen ϵ . Duktiliteten kan til en vis grad genvindes med forsigtig opvarmning. Ved fuld blødgødnings til 350 til 450 °C forsvinder styrkeøgningen efter deformationshærdningen helt, og duktiliteten bliver som i udgangspunktet. Tilsvarende effekter får vi i aluminiumslegeringer.

I valsede plader bruger man ofte deformationshærdning. De første valsestik bliver da gerne lavet i varm tilstand, mens koldvalsning udføres til slut.



Figur 1.1 Brudstyrke R_m og brudforlængelsen ϵ som funktion af tykkelsesreduktion i ren aluminium (kold valsning), [1].

Til at angive graden af deformationshærdning bruger AA-systemet som tidligere nævnt bogstavet H efterfulgt af et tal. Første ciffer i dette tal indikerer hærdningsprocessen:

H1 Kun deformationshærdet

H2 Deformationshærdet og delvist udglødet, dvs. emnet er først deformationshærdet mere end nødvendigt og hvorefter reduceret i styrke til det ønskede niveau ved delvis udglødning.

H3 Deformationshærdet og herefter stabiliseret ved en lav-temperatur termisk proces eller som resultat af varmepåvirkning under fabrikationsprocessen.

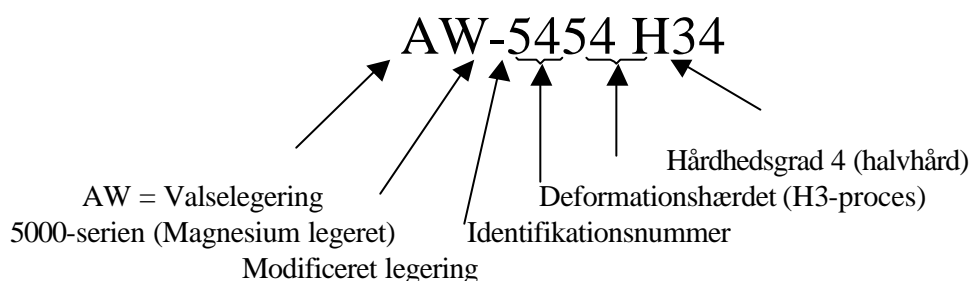
2. ciffer efter H'et (HXX) indikerer den opnåede hårdhedsgrad.

Graden hænger sammen med tykkelsesreduktionen. Tabel 1.4 viser de sædvanlige hårdhedsgrader og tilsvarende omtrentlige tykkelsesreduktioner i %.

Tabel 1.4 Hårdhedsgraderne i deformationshærdede aluminiumslegeringer

Hårdheds-grad HXX	Betegnelse	Tykkelsesreduktion cirka
HX1		Udefineret
HX2	Kvarthård	20 %
HX4	Halvhård	33 %
HX6	Trekvarthård	50 %
HX8	Helhård (hård)	67 %

Den totale betegnelse for en valselegering kan f.eks. se såedes ud:



Betegnelsen AW-5454 H34 betyder altså en valselegering (AW) i 5000 serien (Magnesiumlegeret) at kvaliteten 5454.

(H3) betyder deformationshærdet og derefter varmebehandlet til stabil tilstand, og det sidste ciffer (HX4) betyder, at der er opnået en halvhård hårdhedsgrad..

Der anvendes også en tocifret hårdhedsbetegnelser på enkelte kvaliteter f.eks.:

HX11, der henviser til emner, der har opnået for stor hårdhed efter afsluttende udglødning til at kunne få betegnelsen "O" (blødgjødning til lavest mulig styrke), men ikke tilstrækkelig hårdhed til at kunne få betegnelsen HX1.

H112, der vedrører produkter, som kan have opnået nogen deformationshærdning (ikke kontrolleret) under bearbejdning ved forhøjet temperatur, og for hvilke der findes grænser for de mekaniske egenskaber.

H116, der vedrører produkter, der har fået en behandling mod lagdelingskorrosion (exfoliation).

H321, der vedrører produkter, der er deformationshærdede mindre end krævet for at opnå betegnelsen H32.

Det er specielt plader i 1000-, 3000- og 5000-serierne som leveres i deformationshærdet tilstand, men også 6000-serien kan deformationshærdes.

Legeringer i 5000-serien egner sig specielt godt til deformationshærdning.

1.2.6 MODNINGSHÆRDNING

Aluminumslegeringer inddeles traditionelt i de hærdbare og de ikke-hærdbare legeringer. Med hærdbare legeringer menes legeringer, der kan modningshærdes.

Kun legeringer i 2000-, 6000- og 7000-serierne er modningshærdbare, så betegnelsen "hærdbare legeringer" er egentlig lidt misvisende, fordi legeringer i 1000, 3000 og 5000 serierne kan deformationshærdes.

Ved modningshærdning øges styrken betragteligt ved en to-trins varmebehandling som består af *opløsningsglødning* efterfulgt af *modning*.

Opløsningsglødning

Første trin i en modningshærdning er opløsningsglødning.

Materialet opvarmes til en temperatur over opløsningstemperaturen for de aktuelle partikler, holdes ved temperaturen en given tid og nedkøles (bratkøles) herefter, således at materialet forbliver i en én-fase tilstand.

Formålet er at få alle partikler som er sammensatte af legeringselementer og basismetall opløst og samtidig opnå en jævn fordeling af fremmede atomer i krystalgitteret. Derved opnås et homogent materiale med ensartede mekaniske og korrosionsmæssige egenskaber i alle retninger. Styrkeniveauet, som afhænger af legeringsindholdet, er lavt i den opløsningsglødede tilstand. Materialet er i kraft af den jævne atomfordeling bragt i optimal udgangstilstand for en hærdning i form af udskilleleshærdning også kaldet modningshærdning. Ved denne proces er det netop de mange spredte meget små partikler eller zoner, der giver størst styrkeøgning.

Opløsningsglødning i forbindelse med ekstrudering

En af fordelene ved ekstrudering af 6000-legeringer er, at legeringen kan blive ekstruderet ved en temperatur over opløsningstemperaturen for Mg₂Si. Man vil opnå maksimal temperatur, idet metallet presses ud gennem værktøjet. Minimum opløsningstemperatur (ekstruderingsstemperatur) afhænger af legeringsforholdet, men vil variere mellem 470°C og 530°C. Bliver temperaturen for høj, vil der opstå lokal smeltning og dermed rivninger i profilet. Er temperaturen for lav, opnås der ikke en optimal opløsningsglødning, hvilket vil reducere de mekaniske egenskaber.

Forskellige legeringer har forskellige krav til nedkølingshastigheder, så materialet forbliver i en én-fase tilstand. Således stiger kølehastigheden med koncentrationen af legeringselementer. Ved køling af f.eks. 6000-legeringer er det vigtigt, at legeringerne bliver kølet hurtigt igennem det kritiske

temperaturinterval, fra 500 til 250°C, for at undgå udskillelse af Mg₂Si partikler. Dette betyder, at medens legering AA 6060 kan blive kølet med luft på udløbsbordet, må en legering som AA6082 køles med vand straks efter pressen.

De mekaniske egenskaber efter modningshærdning er stærkt afhængige af at køleintervallerne er overholdt – man taler om *kølesensitivitet*.

Hurtig afkøling kan give problemer med termiske deformationer i profilet.

Tabel 1.5 viser hvilken brudstyrke (R_m), der opnås for nogle 6000-legeringer som funktion af kølehastigheden ned til 250°C.

Tabel 1.5 Brudstyrke som funktion af kølehastighed

Legering	Maks. køletid til 250°C	Brudstyrke (R _m)
AA6082.50	1 minut	F31 (310 MPa)
AA6005.40	2 minutter	F27 (270 MPa)
AA6063.60	3 minutter	F25 (250 MPa)
AA6060.35	4 minutter	F 21 (210 MPa)

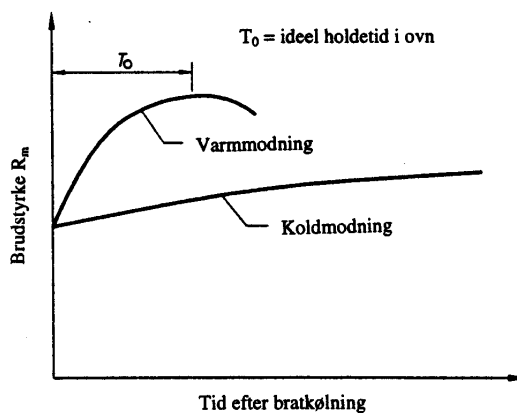
Kølehastigheden for 6082 og 6005 betyder, at disse legeringer i de fleste tilfælde skal vandkøles.

Modning

Andet trin i en modningshærdning er modning. Terminologien ”modning” refererer til udskillelsen af hærdeelementer dvs. partikler eller zoner, som øger metallets styrke.

Modning kan enten ske ved lagring i omgivelsestemperatur – *naturlig modning*, *koldmodning* eller *naturlig ældning* – eller ved forhøjet temperatur – *kunstig modning* eller *varmmodning*.

Ved koldmodning opnås styrkeforøgelsen først efter nogle dage eller måneder, mens den opnås langt hurtigere ved varmmodning, se Figur 1.2.



Figur 1.2 Styrkeøgningen under kold- og varmmodning, [1].

Naturlig modning (koldmodning)

De hærdbare legeringer ændrer deres mekaniske egenskaber, når de bliver lagret ved omgivelsestemperatur efter opløsningsglødning og bratkøling. Tiden, hvormed legeringerne ændrer mekaniske egenskaber, varierer ikke blot fra legeringsgruppe til legeringsgruppe, men også inden for de enkelte legeringsgrupper. Tiden for den naturlige modning indtil stabil tilstand opnås kan variere fra få dage til flere år. For nogle 7000-legeringer er denne type hærdning meget udpræget og for enkelte legeringer i denne legeringsgruppe kan den maksimale styrke opnås efter en måned i omgivelsestemperatur.

Kunstig modning (varmmodning)

Den højeste og hurtigste styrkeøgning opnås ved kunstig modning.

Legeringen lagres efter opløsningsglødningen i varmeovn ved temperaturer fra 120°C til 200°C i 6 – 24 timer afhængig af legerings typen, og det er vigtigt at temperaturen er korrekt og ikke bliver for høj, fordi styrken derved bliver forringet.

I løbet af lagringen stiger de mekaniske egenskaber op til et maksimum ved en specifik optimal hærdetid. Overskrides denne hærdetid – se Figur 1.2 – begynder styrken at aftage. Dette kaldes *overhærdning* og skyldes, at udskillelserne til sidst omdannes til krystaller uden kohærens med Al-gitteret. Under denne proces samles endvidere mange små udskillelser til færre og større krystaller.

Derimod giver en vis overopvarmning større sejhed i materialet, og i enkelte tilfælde øget korrosionsmodstand.

Forskellige kombinationer af hærdetid og temperatur giver forskellige mekaniske egenskaber. For 6000 legeringer ligger hærdetemperaturen normalt mellem 160°C og 200°C med en lagringstid mellem 2 og 8 timer. For de fæste legeringer findes der hærdekurver, hvor man kan aflæse de mekaniske egenskaber (R_m , $R_{p0,2}$ og A_5) ved forskellige kombinationer af tid og temperatur.

Betegnelser på modningshærdning (modningsgrader)

For at få bestemte egenskaber frem kan et modningshærdbart aluminiumsmateriale også deformationshærdes, enten under eller efter opløsningsglødningen, eller det kan gives forskellige former for varmebehandling.

For at angive de forskellige modningshærdningsprocedurer, som en legering har gennemgået, benytter man efter AA-systemet bogstavet T efterfulgt af et tal f.eks. AW-6082 T6. Denne modningsskala går fra T1 til T10.

T1 Materialet er kølet fra en formningsproces med forhøjet temperatur og naturligt modnet til en stabil tilstand.

T2 Materialet er kølet fra en formningsproces med forhøjet temperatur, kolddeformeret og naturligt modnet til en stabil tilstand.

T3 Materialet er opløsningsglødet, kolddeformeret og naturligt modnet til en stabil tilstand.

T4 Materialet er opløsningsglødet ved opløsningstemperatur og derefter naturligt modnet til en stabil tilstand.

- T5 Materialet er opløsningsglødet ved bearbejdningstemperatur (for eksempel ekstruderingsstemperatur) og derefter kunstigt modnet. Bearbejdningstemperaturen behøver ikke svare til fuld opløsningstemperatur.
- T6 Materialet er blevet opløsningsglødet ved opløsningstemperatur (450 – 530 °C) og derefter kunstigt modnet. (Ekstruderede produkter i 6000-serien får gerne betegnelsen T6 selvom ekstruderingsstemperaturen kan ligge noget under ideel opløsningstemperatur.)
- T7 Materialet er opløsningsglødet, overmodnet og stabiliseret.
- T8 Materialet er opløsningsglødet, kolddeformeret og kunstigt modnet.
- T9 Materialet er opløsningsglødet, kunstigt modnet og kolddeformeret.
- T10 Materialet er kølet fra en formningsproces med forhøjet temperatur, kolddeformeret og kunstigt modnet.

For konstruktionsmaterialer er det modningsgraderne T4, T5 og T6, som er de mest aktuelle.

Ekstra cifre kan tildeles for emner, der er spændingsudjævnede ved strækning, sammentrykning eller en kombination af strækning og sammentrykning.

TX51 bruges f.eks. specielt til plade eller valsede eller koldbearbejdede stænger.

Hærdningsgraden T651 er således en speciel variant af hærdningsgrad T6, som benyttes til pladematerialer af AW-6082 og AW-7020. Mellem opløsningsglødnings- og modningstrinnet bliver pladerne strukket for at udjævne indre spændinger.

1.2.7 ALMINDELIGE KONSTRUKTIONSKVALITETER

Ikke-modningshærdbare legeringer

Fælles for ren aluminium og de ikke-modningshærdbare legeringer er, at de kun kan opnå en styrkeforøgelse gennem deformationshærdning. Til denne hovedgruppe hører:

- 1000 serien, renaluminium (Over 99% Al)
- 3000 serien (AlMn-legeringer)
- 5000 serien (AlMg-legeringer)

3000-serien er almindeligvis tilsat 1,0 – 1,2 % mangan (Mn) for at forbedre styrken. Korrosionsmodstanden og svejsbarheden er god. Legeringerne benyttes mest i valseprodukter, for eksempel korrugerede tynde plader til beklædning og facadepaneler, karosserier, containere og svejsede rør. En typisk kvalitet er AW-3103. Denne har middel styrke, er let at valse ned til tynde plader og kan også ekstruderes til profiler. Legeringerne er ikke modningshærdbare.

5000-serien indeholder 1 – 6 % magnesium (Mg) og fremstilles som valseprodukter. Øgende Mg-indhold giver øget styrke, men reduceret plastisk bearbejdningsevne. Legeringerne har meget god korrosionsmodstand (når Mg < 3 %) og god svejsbarhed, og egner sig godt i marint miljø. Legeringerne benyttes som plader i bærende konstruktioner på land, i skibe og i olieplatforme, samt i

fryserum og beholdere til nedkølet gas ($-160\text{ }^{\circ}\text{C}$). De hårdeste kvaliteter er også godt egnede til bearbejdning med skærende værktøj.

- AW-5052 og AW-5754 har moderat styrke og meget god korrosionsmodstand. De har god duktilitet i tilstand O, men får hurtigt en hårdhedsøgning ved koldformning. I enkle, massive tværsnit kan de ekstruderes.
- AW-5083 har højeste styrke i 5000-serien, og har meget god korrosionsmodstand i marint miljø. Anvendes til udvendige plader i skibe, master, transporttanke, tårne og bygningskonstruktioner. Kvaliteten bør ikke udsættes for temperaturer over $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ eller koldformes.
- AW-5454 har moderat styrke, men tåler højere temperatur end de andre legeringer i denne gruppe uden at der opstår fare for spændingskorrosion. Kvaliteten er mindre egnet til komplicerede tyndvæggede tværsnit. Bruges som AW-5083, og desuden en del i procesindustrien.

Modningshærdbare legeringer

Legeringer kan tilføjes en markant styrkeøgning ved modningshærdning.

De modningshærdbare legeringer omfatter:

- 2000-serien (AlCu)
- 6000-serien (AlMgSi)
- 7000-serien (AlZn)

2000-serien (AlCu) bliver brugt hvor høj styrke (op mod 750 N/mm^2) er af størst betydning, for eksempel i fly. 2000-legeringerne kan ofte ikke svejses, men må limes, skrues eller nables sammen. På grund af lav korrosionsmodstand bliver legeringerne også gerne belagt med et tyndt lag af renaluminium udenpå

6000-serien (AlMgSi) giver let ekstruderbare materialer og kan opløsningsglødes direkte fra ekstruderingsstemperatur. Legeringerne har desuden middel til høj styrke, er godt svejsbare og har meget god korrosionsmodstand, også i marint miljø, men mindre end 5000-seriens legeringer. Der er af klassifikationsselskaberne sat begrænsning på hvor den må benyttes. Størstedelen af ekstruderet gods til bærende konstruktioner er fremstillet i disse kvaliteter. De benyttes som profiler og plader i bærende konstruktioner både på land og til søs. Styrkereduktionen i svejsezonen er større end for 5000-serien.

- AW-6060 har middel styrke og er meget let ekstruderbar selv i komplicerede tværsnitsformer. Typisk anvendelsesområde er vindues- og dørprofiler, lysarmaturer, stiger, rækværk og møbelprofiler. Den er let formbar ved bøjning i tilstand T4.
- AW-6061 har højere styrke end AW-6060, men er vanskeligere at ekstrudere i komplicerede tværsnit. Benyttes i højere udsatte konstruktioner i skibe, bygninger, tårne, broer samt til nagle materiale.
- AW-6063 har noget mindre styrke end AW-6061, men har bedre formbarhed og er lettere at ekstrudere. Anvendelse som for AW-6061.

- AW-6082 har høj styrke, er godt ekstruderbar i ikke for komplicerede tværsnit. Kvaliteten er meget almindelig i højt udsatte konstruktioner både i byggeri, skibe, transportmateriel, platforme, master, broer, stilladser og lignende. Legeringen bliver fremstillet både som plader, rør og profiler, men den er lidt mindre egnet til ekstrudering end de mere lavtlegerede legeringer i denne serie. Muligheden for at fremstille tyndvæggede tværsnit er dermed noget mindre.

7000-serien har højest styrke af de mest brugte konstruktionslegeringer. 7000-legeringerne er godt svejsbare, og de får mindre styrkereduktion i svejsezonen end legeringer i 6000-serien. Korrosionsmodstanden og formbarheden er imidlertid ikke så god som for legeringer i 6000-serien, men tilsætning af små mængder af Zr, Cr eller Mn kan rette op på noget af dette. Legeringerne benyttes en del i bilproduktion og er også blevet brugt i hurtigbåde.

- AW-7020 er en typisk legering i denne serie. Den har meget høj styrke og god udmatningsstyrke, men har begrænset ekstruderbarhed og formbarhed. Legeringen kan være udsat for spændingskorrosion i zoner hvor der er store strækspændinger. Modstanden mod spændingskorrosion kan bedres noget med overopvarmning. Benyttes i højt udsatte konstruktioner i bygninger, broer og transportmateriel.

Desuden findes **4000-serien**. Kvaliteten i 4000-serien bruges gerne i svejsetråd eller som støbegods.

Selvom der findes mange forskellige legeringer og kvaliteter i aluminium, ser vi at udvalget er mere begrænset når det gælder bærende konstruktionsdele. Talværdier for mindste garanterede flydespænding og brudstyrke for de almindelige konstruktionskvaliteter er gengivet i Afsnit 8.3.

I Tabel 1.6 er kemisk indhold, produktformer og mekaniske egenskaber for nogle af de almindeligste konstruktionskvaliteter sammensat. Alle kvaliteterne i tabellen er godt svejsbare.

Tabel 1.6 Generelle egenskaber for formbare valselegeringer, [1].

Legering	Indhold	Produkt	Styrke	Korrosionsmodstand	Formbarhed	Anodiserbarhed
AW-3103	AlMn1	Tynde plader	B/D	A	A/B	B
AW-5083	AlMg4,5Mn0,7	Plader, rør, (enkle profiler)	A/B	A	B/D	A/B
AW-5052	AlMg2,5	Plader	B/C	A	A/C	A/B
AW-5454	AlMg3Mn	Plader	B/C	A	A/C	A/B
AW-5754	AlMg3	Plader	B/C	A	B/D	A/B
AW-6060	AlMgSi	Profiler, rør	B/C	B	B/C	A
AW-6061	AlMg1SiCu	Profiler, rør	B/C	B	B/C	B
AW-6063	AlMg0,7Si	Profiler, rør	B/C	B	B/C	A
AW-6005A	AlSiMg(A)	Profiler	B	B	C	A
AW-6082	AlSi1MgMn	Profiler, plader, rør	A/B	B	B/C	B
AW-7020	AlZn4,5MgCu	Plader, rør, (enkle profiler)	A	C	C	B

A = Meget god, B = God, C = Acceptabel, D = Dårlig, E = Ikke anbefalet

1.3 ALUMINIUM KONTRA STÅL

1.3.1 GENERELT

Ved anvendelse af aluminium i stedet for stål er der en række vigtige forskelle mellem de to materialer, designeren skal være opmærksom på. En ”stålkonstruktion” bygget i aluminium vil som oftest være uhensigtsmæssig, uoptimal og give en række problemer.

I det følgende ridses de vigtigste forskelle og de deraf følgende konstruktionsmæssige konsekvenser op.

I Tabel 1.7 er nogle vigtige materialeegenskaber for aluminiumslegeringer sammenlignet med konstruktionsstål. Vi ser, at massefylde og elasticitetsmodul for aluminium er ca. 1/3 af ståls, mens den termiske udvidelseskoefficient er dobbelt så stor. Smeltetemperaturen for aluminium er under den halve af ståls.

Tabel 1.7 Mekaniske og fysiske egenskaber for aluminiumslegeringer og konstruktionsstål.

Egenskab	Aluminiumslegeringer	Konstruktionsstål
Massefylde	2700 kg/m ³	7900 kg/m ³
Elasticitetsmodul	70 000 N/mm ²	210 000 N/mm ²
Forskydningsmodul	26 000 N/mm ²	80 000 N/mm ²
Termisk udvidelseskoefficient	23 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹	12 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹
Smeltepunkt	650 – 660 °C	1530 °C

Da aluminiums materialeegenskaber så som styrke, svejsbarhed, korrosionsbestandighed etc. afhænger stærkt af både legeringselementerne og leveringstilstanden, som beskrevet i de foregående afsnit, skal valg af legering til et specifikt formål foretages efter et nøje studium.

1.3.2 VÆGT

Når der overhovedet tænkes på at skifte fra stål til aluminium er et af hovedformålene som oftest vægtbesparelse.

Aluminiums massefylde er 2.700 kg/m³ hvilket er ca. 1/3 af ståls på 7.850 kg/m³.

Det betyder dog ikke, at en aluminiumskonstruktion kun vejer 1/3 af den tilsvarende stålkonstruktion, idet der skal kompenseres for aluminiums lavere stivhed og styrke. Selv om selve forholdet mellem vægt og styrke er væsentlig bedre end for stål ender man med i praksis med, at en

godt designet aluminiumskonstruktion vejer ca. det halve af en tilsvarende konstruktion i normalt stål og ca. 2/3 af en konstruktion i højstyrke stål "HTS" – High Tensile Steel.

Undtagelsen for denne regel er, når en plade i stål erstattes af en aluminiumsplade i samme tykkelse. Det ses i de tilfælde, hvor stålpladetykkelsen ikke direkte er dikteret af et styrkekrav, men skyldes enten et krav til en minimums tykkelse (et "dog-aldrig-mindre-end" krav) eller et krav fra produktionen om, at tyndere plade ikke kan håndteres i praksis uden at få for store omkostninger til buleretning.

1.3.3 STYRKE / STIVHEDS FORHOLDET

Elasticitetsmodul for aluminium er ca. 7×10^4 N/mm² hvilket kun er 1/3 af ståls på $2,1 \times 10^5$ N/mm².

Styrken af aluminium (flyde- og brudspænding) er også generelt ringere end stål, men svinger meget afhængig af legering og leveringstilstand.

Deformations- eller modningshærdede legeringer har ofte en styrke på næsten samme niveau som stål, mens ikke-hærdede legeringer har mindre end den halve styrke.

Nedenstående skema Tabel 1.8 viser som eksempel flydespændingen og brudstyrken for normalt stål sammenlignet med en 6082 legering i to forskellige leveringstilstande.

Tabel 1.8 Sammenligning mellem normal stål og aluminium.

	Normalstyrke stål	Alu. 6082 T4	Alu. 6082 T6
Flydespænding	235 N/mm ²	110 N/mm ²	260 N/mm ²
Brudspænding	400 - 520 N/mm ²	205 N/mm ²	310 N/mm ²

Tabel 1.9 viser højstyrke stål til konstruktionsformål sammenlignet med de stærkeste aluminiumslegeringer.

Tabel 1.9 Sammenligning mellem højstyrke stål og højstyrke aluminium.

	Medium/højstyrke stål	Højstyrke stål	Alu. 7075 T651
Flydespænding	360 N/mm ²	490 N/mm ²	470 N/mm ²
Brudspænding	490 - 620 N/mm	640 - 790 N/mm ²	540 N/mm ²

Disse forskelle i materialeegenskaber i forhold til stål giver en principiel forskel i filosofien ved dimensionering af stål og aluminiumskonstruktioner.

En stålkonstruktion dimensioneres som regel efter et tilladeligt spændingsniveau hvorefter udbøjning og stabilitet som oftest ikke vil være det store problem.

Det omvendte er tilfældet ved mange aluminiumskonstruktioner.

Udbøjningen af en bøjningsbelastet konstruktion er som bekendt omvendt proportional med elasticitetsmodul "E" og inertimomentet "I", og da elasticitetsmodul er lavt for aluminium, må der

tit dimensioneres efter en tilladelig udbøjning og et check af stabiliteten, hvorefter spændingniveauet så til gengæld vil vise sig at være relativt lavt.

Aluminiums elementer med bøjningsbelastning skal generelt udføres med større konstruktionsdybde end tilsvarende elementer i stål for at udbøjningen ikke skal blive uacceptabel stor. I praksis bør der regnes med en øgning af dybden med 20-40%. Jo større øgning, jo lavere vægt.

Figur 1.3 viser 3 bøjnings belastede bjælker med samme $E \cdot I$ og dermed samme udbøjning – én i stål (IPE 200) og to i aluminium.

Bemærk vægten pr. meter. Eksemplet viser, at hvis en aluminiumsbjælke skal udføres med samme konstruktionsdybde som en tilsvarende stålbjælke og ikke må have større udbøjning, er der ingen nævneværdig vægtbesparelse ved skift fra stål til aluminium !

Profiler		Last: $q = 700 \text{ kg/m} + \text{egenvægt}$		
		Længde: 6 m		
		Stål IPE 200	Aluminium profiler	
A	mm ²	2848	7830	4178
E	N/mm ²	2,1 E5	7,0 E4	7,0 E4
I	mm ⁴	1,94 E7	5,80 E7	5,67 E7
W	mm ³	1,94 E5	5,80 E5	4,05 E5
$E \cdot I$	N*mm ²	4,07 E12	4,06 E12	3,97 E12
Vægt pr. m	kg/m	22,4	21,1	11,3
Bøjnings spænding	N/mm ²	164	55	78
Nedbøjning	mm	29	29	29
1. ordens egenfrekv.	Hz	3,3	5,7	5,6

Figur 1.3 3 bjælker med samme udbøjning.

Ved trykpåvirkede elementer f.eks. søjler er stabiliteten (bulestivheden) proportional med elasticitetsmodulet af materialet.

Pga. aluminiums ringe elasticitetsmodul (1/3 af ståls) må specielt slanke søjler have et væsentlig højere inertimoment end tilsvarende søjler i stål for at opnå tilstrækkelig stabilitet.

Dermed ender vægten ofte med at blive ca. 3/4 af vægten af en tilsvarende søjle i stål.

Tilsvarende må profiler, der er svejst til en plade og har trykspændinger i flangen, have en bredere flange og dermed højere inertimoment i tværetningen end det ville være nødvendigt for stålprofiler for at undgå torsionsudbøjning. L-profiler eller T-profiler vil i mange tilfælde være gode erstatninger for de bulbprofiler, der typisk anvendes i stålkonstruktioner i skibe. (I den forbindelse skal man tænke på, at det ofte ikke er nødvendigt at male profilerne hvilket ellers er vanskeligt på undersiden af flanger.)

Det ringe forhold mellem elasticitetsmodulet og styrken har afgørende betydning for større konstruktioner f.eks. hurtiggående skibe (katamaraner). Op til en vis længde (ca. 80 m) er udbøjningen (fjedringen af skrogbjælken som helhed) ikke det store problem, men ved større længder er det svært at gøre skrogene tilstrækkelig stive uden at vægten øges for meget. Over ca. 120 m vil HTS derfor ofte være en bedre løsning end aluminium.

Sammenlignet med en konstruktion i almindeligt stål betyder kombinationen af aluminiums lave elasticitetsmodul og den lavere tilladelige spænding, at der ved afstivede pladepaneler må regnes med en stiverafstand, der kun skal være mellem halvdelen og 2/3. (Se bl.a. afsnit 2.14 om praktiske model forsøg og afsnittet kvalitet, og adkomstforhold under kapitel 3 Svejsning.)

I forhold til en vægtoptimeret konstruktion i HTS vil aluminiumskonstruktionen skulle have en stiverafstand på mellem 2/3 og 3/4. Generelt må der altså regnes med flere stivere og dermed svejsemeter.

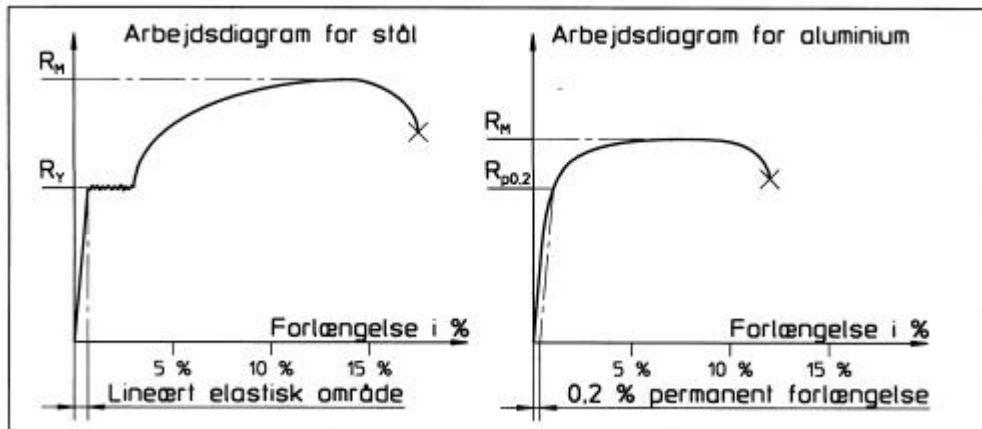
1.3.4 BRUDGRÆNSE / FLYDEGRÆNSE FORHOLDET

Arbejdsdiagrammerne for stål og aluminium er meget forskellige.

Stål har et lineært elastisk område indenfor hvilket en konstruktion altid vil vende tilbage til sin oprindelige facon ved aflastning. Efter det lineære område er der et område hvor stålet ”flyder” dvs. deformeres under konstant spænding – det der kaldes flydespændingen ” R_y ”.

Aluminium har ikke denne udprægede flydning idet det, der kaldes flydegrænsen for aluminium ($R_{P0,2}$), i virkeligheden bare svarer til det punkt på en jævn kurve, hvor der efter aflastning vil være en varig deformation på 0,2 %.

Figur 1.4 viser arbejdsdiagrammerne for stål og aluminium.



Figur 1.4 Arbejdsdiagrammer for stål og aluminium.

For mange aluminiumslegeringer til konstruktionsformål gælder, at forholdet mellem brudgrænsen (R_m) og flydegrænsen ($R_{p0,2}$) er relativt lavt sammenlignet med stål.

For aluminium kan forholdet (afhængig af legering) være så lavt som: $R_m/R_{p0,2} = 1,2$, mens det for normalstål er ca. 1,7. (Se Tabel 1.8 & Tabel 1.9).

En aluminiumskonstruktion, der er belastet til flydegrænsen er altså tættere på brud end en stålkonstruktion, der tilsvarende er belastet til flydning.

En stålkonstruktion vil flyde i de hårdest belastede områder, når den belastes ud over flydegrænsen. Herved udjævnes spændingerne så større dele af konstruktionen efter flydning har et ensartet spændingsniveau. Normalt medfører det ikke brud, fordi der efter ophør af flydningen stadig er relativt langt til brudgrænsen.

Aluminium har ikke denne spændingsudjævrende flydning. Da brudforlængelsen desuden er lavere end for stål, må man ved dimensionering af konstruktioner i de aluminiumslegeringer, hvor brudgrænsen kun ligger lidt over flydegrænsen, være meget påpasselig med at få defineret de maksimalt optrædende påvirkninger, og der må ved specielt kritiske konstruktioner indlægges en større sikkerhedsmargin end hvis der var tale om stål. Dette forøger naturligvis vægten og gør fordelen ved skift fra HTS til aluminium mindre.

1.3.5 TAB AF STYRKE VED VARMEPÅVIRKNING FRA SVEJSNING

De deformations- og modningshærdede aluminiumslegeringer er generelt kendetegnede ved høje 0,2-flydespændinger, men taber i modsætning til stål en væsentlig del af deres styrke i den varmpåvirkede zone – (“HAZ” = Heat Affected Zone) - omkring svejsninger. Efter svejsning kan materialestyrken - afhængig af legeringen - være reduceret til 65%-85% af den oprindelige styrke. Se endvidere afsnit 3.13 Styrketab ved varmpåvirkning.

De hærdede legeringer har fået deres styrke ved en hærtningsproces (kolddeformation eller modning ved en varmebehandling) hvorved legeringen har fået en struktur, der giver den øgede styrke.

Denne struktur nedbrydes ved kraftig opvarmning, hvorved den styrke øgning, der blev opnået ved hærtningen, mistes igen.

De ikke-hærdede legeringer har væsentlig lavere 0,2-flydespændinger end de hærdede, men til gengæld forringes flydespændingen ikke ved svejsning.

Tabel 1.10 viser som eksempel styrken af forskellige legeringer i svejst og ikke-svejst tilstand. Bemærk at 5083 legeringen i HAZ svarende til den hærdede leveringstilstand (H116/H321) vender tilbage til samme styrke som den ikke hærdede (udglødede og kun lettere koldvalsede O/H111) efter svejsning.

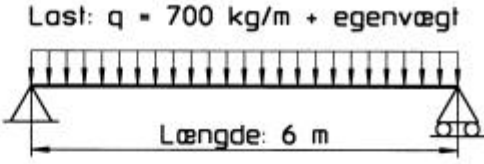
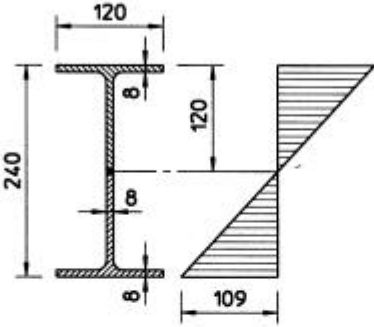
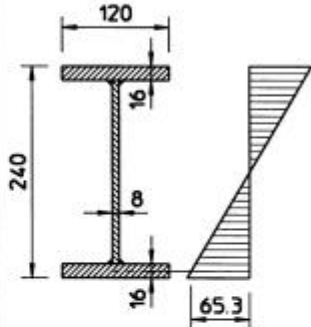
Tabel 1.10 Styrke af forskellige legeringer i svejst og ikke-svejst tilstand.

Legering	Leverings tilstand	0,2 flydespænding $R_{p0,2}$, N/mm ²		Brudstyrke R_m , N/mm ²	
		Ikke svejst	Svejst	Ikke svejst	Svejst
5083	O/H111	125	125	275	275
5083	H116/H321	215	125	305	275
6061	T5/T6	240	125	290	160

Det betyder, at der skal tages særlige forholdsregler ved anvendelse af hærdede legeringer, så svejsninger placeres på steder i konstruktionen, hvor spændingsniveauet er lavt. Hvis dette ikke er muligt må der dimensioneres efter styrkeegenskaberne efter svejsning. Fremstilling af et I-profil ved sammensvejsning af to T-profiler vil f.eks. være bedre end sammensvejsning af to flanger og en kropplade.

Figur 1.5 viser et eksempel med to aluminiumsbjælker, der er udsat for den samme bøjningsbelastning som bjælkerne i Figur 1.3 og dimensioneret efter den tilladelige spænding. Begge er fremstillet i en AW6061-T6 legering.

Forskellen er, at svejsningen i den første bjælke er placeret rigtigt i neutralaksen, hvor bøjningsspændingerne er lave og forringelsen af materialeegenskaberne i HAZ derfor er uden betydning. Den anden bjælke har svejsningerne placeret ikke-optimalt og er dermed dimensioneret efter den fulde effekt af HAZ. Bemærk forskellen i dimensionering og vægt.

Alu. profiler			
		 <p>2 Stk 120*120*8 T-profiler</p>	
A	mm ²	3760	5504
E	N/mm ²	7,0 E4	7,0 E4
I	mm ⁴	3,44 E7	5,43 E7
W	mm ³	2,86 E5	4,52 E5
E*I	N*mm ²	2,41 E12	3,80 E12
Vægt pr. m	kg/m	10,2	14,9
Bøjnings spænding	N/mm ²	109 (yderste fiber)	65 (1/2 flangetykkelse)
Nedbøjning	mm	49	31
1. ordens egenfrekv.	Hz	4,4	5,5

Figur 1.5 Rigtig og ikke-optimal placering af svejsninger under hensyntagen til HAZ.

For elementer f.eks. søjler, der er udsat for tryk, må der som en tommelfingerregel regnes med en bæreevneforringelse på 10%, fordi den reducerede flydespænding betyder en reduktion af stabiliteten.

Elementer i træk med svejsninger på tværs af trækretningen vil skulle dimensioneres efter den fulde effekt af HAZ.

Tab af styrke ved svejsning behandles mere indgående i afsnit 3.13 samt i SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0005 og SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0010.

1.3.6 TEMPERATURBESTANDIGHED & BRANDKRAV

Brudstyrken, flydespændingen og elasticitetsmodulet for aluminium er højest ved det absolutte 0-punkt (0° K) og aftager gradvist efterhånden som temperaturen stiger op mod smeltepunktet på ca. 650 °C.

(Til sammenligning ligger ståls smeltepunkt på ca. 1.500 °C)

Omvendt øges brudforlængelsen (A_5) ved stigende temperatur.

Aluminium udviser i modsætning til mange ståltypen ingen tendens til sprødhed ved lave temperaturer.

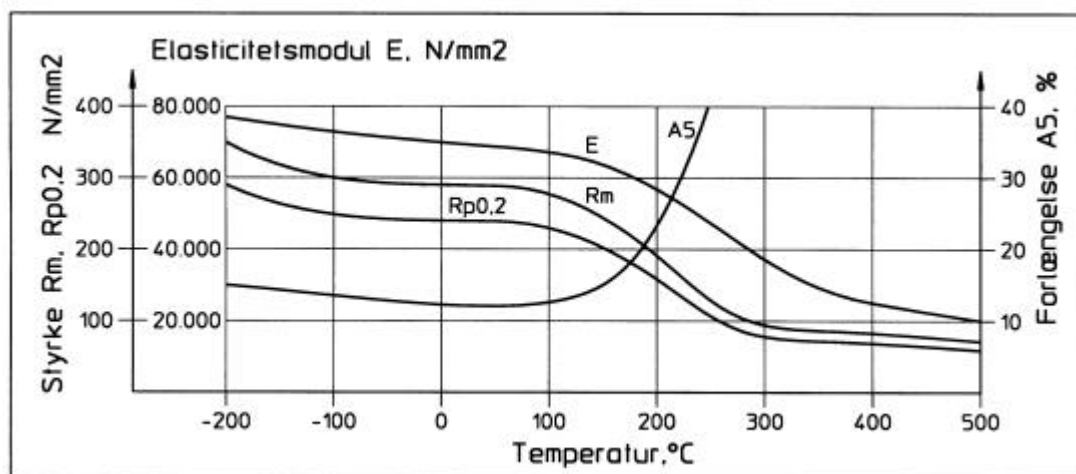
Aluminiums gode styrkeegenskaber (trækstyrke og flydespænding) aftager relativt brat ved temperaturer over ca. 150 °C hvilket dog under normale driftsbetingelser kun er et problem i områder omkring varme maskinkomponenter. Dog sker der ved vedvarende høj statisk belastning en mærkbar krybning allerede ved væsentlig lavere temperaturer.

Ved temperaturer over 250 - 300 °C er styrken i praksis reduceret så meget at det er sandsynligt, at en bærende aluminiumskonstruktion, der er dimensioneret til at anvendes ved "stuetemperatur", vil bryde sammen.

Dette forhold stiller meget større krav til brandisoleringen af bærende elementer end ved stålkonstruktioner, hvilket øger produktionsomkostningerne og vægten.

På trods af de korrosionsmæssige problemer med at kombinere stål og aluminium vil det derfor ofte være en fordel at indbygge vitale bærende elementer f.eks. søjler i stål.

Figur 1.6 viser det typiske forløb af elasticitetsmodulet, brudstyrken, flydespændingen og brudforlængelsen (A_5) som funktion af temperaturen, men kurverne varierer en del fra legering til legering.



Figur 1.6 Materialeegenskaber som funktion af temperaturen.

1.3.7 VARMELEDNINGSEVNE

Varmeledningsevnen for aluminiumslegeringer ligger mellem 120 W/m*K (visse magnesiumlegerede legeringer) og 230 W/m*K (ren aluminium).

Til sammenligning er varmeledningsevnen for stål i størrelsesordenen 50 W/m*K.

Det betyder, at der ved svejsning skal tilføres ret store varmemængder, fordi en del af varmen forsvinder ud i den omkringliggende struktur.

Ved manuel MIG-svejsning med lave svejseparametre og ren argon som beskyttelsesgas, vil den tilførte varmemængde være så lille, at det være vanskeligt at opnå en tilstrækkelig god indtrængning.

Automatsvejsning med højere svejseparametre og dermed mere intensiv varmetilførsel og/eller tilsætning af helium til beskyttelsesgassen løser problemet. For nærmere beskrivelse af emner med relation til svejsning, henvises til Kapitel 3 Svejsning.

Den høje varmeledningsevne har også indflydelse på brandisolering og isolering mod kondens.

Bredden af randisoleringen på plader, der står vinkelret på brand- eller kuldepåvirkede plader skal således være væsentlig større, end hvis der var tale om stål.

1.3.8 KÆRVFØLSOMHED, UDMATTELSE & PÅLIDELIGHED

Aluminiums udmattelsesegenskaber er ikke så gode som ståls og man kan sige, at aluminium generelt har en relativt lav udmattelsesstyrke set i forhold til trækstyrken.

Derfor stilles der i forhold til stål højere krav til detaljeudformningerne og arbejdsudførelsen. "Billige" detaljeløsninger med "hårde" punkter, der under visse driftsbetingelser er acceptable i stål, kan være uanvendelige under de samme betingelser i aluminium. I den forbindelse skal man også tænke på, at der udover en spændingskoncentration som følge af geometriske forhold ofte også vil være tale om en materialeforringelse som følge af svejsning.

Udmattelsesstyrken forringes ved stigende temperatur og allerede ved 150 °C kan der være tale om en forringelse på 15 %. Det kan være et problem f.eks. ved motorfundamenter hvor udmattelsesbelastningen i forvejen er høj.

Udmattelsesstyrken falder desuden under korrosive forhold, idet den beskyttende oxydhinde kan brydes under hver belastning.

Udmattelse i luft og vand er behandlet i kapitel 6 Levetid.

1.3.9 LÆNGDEUDVIDELSESKOEFFICIENT

Længdeudvidelseskoefficienten for aluminium er ca. $23,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ hvilket er ca. det dobbelte af ståls.

Det har betydning ved lange spænd, hvor der må beregnes dobbelt så stor plads til længdeudvidelse. Desuden vil der, når stål og aluminium forbindes f.eks. vha. sprængplaterede overgangsprofiler, optræde store indre spændinger ved f.eks. solopvarmning.

1.3.10 HÅRDHED

Aluminium er blødt sammenlignet med stål hvilket betyder risiko for overfladeskader ved håndtering og montage. Skibe i aluminium er som følge af den bløde overflade uegnede til sejlads i is.

1.3.11 SVINGNINGER, VIBRATIONER OG DÆMPNINGSAKTOR

Egenfrekvenserne af konstruktionselementer er proportional med elasticitetsmoduldet "E" og inertimomentet "I", men omvendt proportional med den medsvingende masse.

Aluminiums lave elasticitetsmodul modsvarer altså af den lave vægt.

En aluminiumskonstruktion, der er designet efter et deformationskriterium, vil som hovedregel have et højt inertimoment og dermed en egenfrekvens, der er højere end for den tilsvarende stålkonstruktion - se eksemplet i Figur 1.3.

Designes der derimod ud fra et spændingskriterium, vil egenfrekvensen pga. det lavere inertimoment generelt være mere på niveau med den tilsvarende stålkonstruktion - se eksemplet i Figur 1.5.

Aluminium har en lav dæmpningsfaktor hvilket betyder, at vibrationer forplanter sig langt i en aluminiumskonstruktion, og er længe om at dø ud. Derfor er det meget vigtigt, at egenfrekvenserne holdes udenfor (og helst over) et frekvensbånd på $\pm 20\%$ fra eksitationsfrekvenserne (hvilket i øvrigt også gælder for stål).

1.3.12 KORROSION

Pga. aluminiums store oxygen affinitet (tendens til at danne bindinger med ilt) vil aluminiumslegeringer hurtigt af sig selv blive dækket af en tynd, men kompakt og uigennemtrængelig beskyttende hinde af aluminiumsoxyder - Al_2O_3 , der forhindrer yderligere oxidering. Hinden er uopløselig i vand, resistent overfor mange kemikalier og forbliver stabil ved pH-værdier mellem 4 og 9. Hvis oxidlaget beskadiges, vil det hurtigt blive gendannet, hvis blot der er ilt til stede i omgivelserne.

Derfor er aluminium generelt langt mere modstandsdygtigt mod korrosion i f.eks. saltvandsmiljø end stål - specielt for aluminium i 5000 serien. Ekstruderede profiler af 6000 serien er dog lidt mere følsomme end 5000 serien, men anvendes ikke så ofte i områder med direkte kontakt til saltvand.

De mest almindelige former for korrosion i aluminium er:

- Galvanisk korrosion
- Pitting (grubetæring)
- Spaltekorrosion
- Spændingskorrosion

Galvanisk korrosion

Aluminium er et meget "uædelt" metal dvs. har et stort elektronegativt potentiale. Faktisk er kun zink og magnesium mere uædelt. Derfor vil kontakt med mere elektropositive - "ædle" - materialer f.eks. kobber og stål give anledning til galvanisk korrosion, hvis der samtidigt er fugtighed til stede. Derfor skal der, når f.eks. stål og aluminium forbindes, altid sørges for enten fuldstændig elektrisk adskillelse f.eks. v.h.a. neopren pakninger eller en samling så tæt, at der ikke er plads til en elektrolytvæske imellem fladerne. Det sidste udnyttes i de såkaldte sprængplaterede overgangsprofiler (også kaldet bi-metals profiler).

I forbindelse med saltvand vil tilstedeværelsen af selv små mængder rustfrit stål eller endnu værre kobber (kabler, rør, rørfittings, udrustning etc.) kunne få voldsomme konsekvenser i form af meget hurtig korrosion. Ofte vil det ikke være tilstrækkeligt blot at montere offeranoder af zink, og der må direkte påtrykkes en elektrisk spænding for at undgå korrosion.

Ved rørsystemer med strømmende væske må aluminiumsrør aldrig anvendes efter (set i strømningsretningen) rør i mere elektropositive materialer f.eks. kobber.

Det omvendte giver ikke korrosion forudsat, at væsken strømmer og ikke står stille.

Pitting (grubetæring)

Pitting er en hyppig form for korrosion, der opstår under indflydelse af en elektrolyt. Lokale angreb af kloridioner skaber små huller i den beskyttende oxidhinde, hvorved korrosionen kan få fat i den underliggende ubeskyttede aluminium. Derved dannes små tragtformede huller (eller gruber), der trænger lidt ind i materialet, men som ikke nedsætter styrken væsentligt.

Katodisk beskyttelse og effektive dræn, så der ikke står vand, kan modvirke pitting.

Spaltekorrosion

Hvor to aluminiumsoverflader ligger tæt sammen, kan der i forbindelse med fugtighed, der trænger ind imellem fladerne, dannes såkaldt spaltekorrosion som følge af forskellen i iltkoncentration i overfladerne og i fugtigheden i spalten.

Korrosionsformen kan forhindres ved at tætte revner med en fugemasse.

Spændingskorrosion

Spændingskorrosion er en meget speciel form for korrosion, hvor samspillet mellem længere tids trækspændinger, miljøet og metallurgiske forhold kan danne revner, der kan forringe styrken af en konstruktionsdel. Visse aluminiumslegeringer er mere følsomme end andre. Det gælder f.eks. de hårde modningshærdelige højstyrkelegeringer i kloridholdigt miljø.

En mere fyldestgørende beskrivelse af emnet korrosion findes i Kapitel 6 Levetid.

1.3.13 STRENGPRESNING (EKSTRUDERING)

Aluminium har den egenskab, at det kan strengpresses. Processen går ud på, at aluminium opvarmes til 450-500 °C og i blød, men ikke-smeltet form presses gennem en stålmatrice, der giver emnet sin ydre form. Efter afkøling strækkes emnet.

Hule profiler (rør) kan fremstilles ved hjælp af en indre matrice, der er forbundet til den ydre via smalle ”broer”, som den bløde aluminium flyder rundt om under presningen.

Ekstrudering giver nogle enestående muligheder for at designe profiler, der er skræddersyede til de enkelte formål. Se afsnittet om ekstrudering i kapitel 2.11 Design og dimensionering.

1.3.14 SKÆRING OG BEARBEJDNING AF ALUMINIUM

Aluminium kan ikke skærebrændes (oxygen/acetylen skæring) som stål, fordi man ikke opnår aluminiums høje forbrændingstemperatur.

Derfor må aluminium skæres på anden måde f.eks. med plasmaskæring, med skæreskiver eller saves. I den forbindelse betyder det elektronegative potentiale (se galvanisk korrosion), at skæreværktøjet ikke må indeholde kobber eller kobberlegeringer.

Vandstråleskæring og laserskæring kan anvendes i fabriksmiljø. Skæring og bearbejdning behandles yderligere i afsnit 3.16 Skæring og fugeforberedelse.

1.3.15 OVERFLADEBEHANDLING

Til indendørs anvendelse overfladebehandles næsten udelukkende af æstetiske årsager eller for at gøre overfladen mere slidstærk. Udendørs vil det på trods af aluminiums basalt set gode korrosionsbestandighed ofte være nødvendigt med en yderligere korrosionsforebyggelse i form af maling, chromatering eller anodisering (eloxering). Visse højstyrkelegeringer af 7000 serien er så følsomme for korrosion, at de som hovedregel altid skal males.

Maling er ikke så uproblematisk som ved stål, og der ses tilfælde, hvor malingen falder af i store flager. Forbehandlingen er ekstremt vigtig. En grundig rensning efterfulgt af en kemisk eller elektrokemisk forbehandling er nødvendig for et varigt resultat udendørs. Hvis det er nødvendigt med almindelig håndværksmæssig maling, kan det gøres ved først at affedte overfladen og påføre en speciel primer (ættegrundning), herefter grundmaling og til sidst dækmaling.

1.3.16 MATERIALE- OG PRODUKTIONSOMKOSTNINGER

Aluminiumsplade koster pr. vægtenhed ca. 6 gange så meget som stål, 2001 priser. Valsede profiler 7-8 gange så meget og ekstruderede profiler ca. 10 gange så meget. Det betyder, at materialeomkostningerne for en aluminiumskonstruktion, der vejer 2/3 af en konstruktion i HTS vil være minimum 4-5 gange så høje.

I forhold til vægten vil forbruget af mandetimer erfaringsmæssigt være mindst dobbelt så højt som for HTS hvilket bl.a. skyldes den meget tættere stiverafstand.

Kombinationen af de meget højere materialeomkostninger og det dobbelte forbrug af mandetimer pr. kg betyder, at en vægtbesparelse på ca. 30% skal holdes op imod rundt regnet den dobbelte totale produktionspris !

Disse tal kan dog forbedres ved kreativ anvendelse af ekstruderede profiler.

Store helt plane pladepaneller (inkl. langsgående stivere) på f.eks. 12 x 3 m bygget op af ekstruderede profiler, der er sammensvejste vha. Friction-Stir-Welding (friktions svejsning), kan købes færdige og vil i mange tilfælde kunne reducere produktionstiden meget væsentligt.

1.3.17 REPARATION

Reparation kræver kvalificeret personale og omtanke.

Forsøg i SASAK regi har vist, at hvis en svejsesamling udmattelsespåvirkes til brud, repareres ved svejsning og udmattelsespåvirkes igen, vil levetiden (dvs. antallet af udmattelsespåvirkninger før brud) efter reparationen kun være ca. 1/3 af levetiden før brud, [SASAK-RAP-LE-AKS-KEH-0006-03]

Hypotesen er, at dette skyldes, at det omkringliggende materiale også vil være udmattelsespåvirket, og dermed svækket således, at der vil være stor sandsynlighed for, at der kort tid efter reparationen vil opstå nye revner lige udenfor reparationssvejsningen.

Det vil derfor ofte være nødvendigt enten at erstatte en del af det udmattelsesvækkede materiale omkring revnen og/eller at forstærke konstruktionen, så spændingsniveauet nedsættes.

Forsøg viser derimod også, at skærer man en helt ny svejsning, der aldrig har været udmattelsespåvirket, op, og gensvejses den, vil levetiden være nogenlunde den samme, som for den oprindelige svejsning, hvis overfladen af svejsningen er lige så pæn og glat som den oprindelige, og der ikke er kærve eller indbrændinger.

Det viser, at de gentagne varmepåvirkninger på samme sted ikke i sig selv giver anledning til nogen væsentlig svækkelse, [SASAK-RAP-E5-AKS-FI-0001-00]

Ved reparation er det derfor vigtigt først og fremmest at finde årsagen til fejlen, og derefter tage stilling til hvordan der skal repareres og evt. forstærkes.

Alpha og omega ved reparation af svejsefejl er at undgå at introducere nye fejl i form af slibespor, geometriske diskontinuiteter, kærvedannelser eller svejsefejl som følge af utilstrækkelig fugeforberedelse.

Endvidere henvises der til afsnittene 3.12 Reparation og 3.18 Kvalitetskriterier.

1.4 SAMMENLIGNING MELLEM DIMENSIONER, DEFORMATIONER OG MASSE FOR SIMPLE IKKE SVEJSTE ELEMENTER I ALUMINIUM OG STÅL.

Med udgangspunkt i en stålkonstruktion i en given stålkvalitet (flydespænding) kan følgende afsnit være til hjælp ved en hurtig foreløbig vurdering af dimensioneringen af tilsvarende konstruktionselementer i forskellige aluminiumslegeringer.

Afsnittet giver mulighed for at sammenligne:

- Arealfaktorer for trækstænger eller korte tryk stænger i aluminium i forhold til tilsvarende stænger i stål.
- Deformationsfaktorer for trækstænger eller relativt korte trykstænger i aluminium i forhold til tilsvarende stænger i stål.
- Massefaktorer for trækstænger eller relativt korte trykstænger i aluminium i forhold til tilsvarende stænger i stål.
- Skaleringsfaktorer for bøjning af stænger i aluminium i forhold til tilsvarende stænger i stål.
- Udbøjningfaktorer for momentpåvirkede bjælker i aluminium i forhold til tilsvarende bjælker i stål.
- Massefaktorer for momentpåvirkede bjælker i aluminium i forhold til tilsvarende bjælker i stål.
- Masse af simpelt understøttet meget slank søjle i aluminium i forhold til en tilsvarende søjle i stål.

Ved hærdede aluminiumslegeringer er der er regnet med de hærdede materialeegenskaber. Ved svejste konstruktioner må der derfor korrigeres for de forringede materialeegenskaber i svejsezonen (HAZ).

Sammenligningen er foretaget under forudsætningen af, at såvel aluminiumselementet som stålelementet udsættes for samme karakteristiske last, og er desuden foretaget overfor elasticitetsgrænsen, dvs. elementerne forudsættes belastede til deres respektive flydespændinger.

Der er ikke medtaget vurdering af partialkoefficienternes størrelse i normmæssig sammenhæng.

Følgende symboler anvendes i de forskellige formler:

Symbolliste:	Aluminium	Stål
Elasticitetsmodul	: $E_{\text{alu}} = 70.000 \text{ N/mm}^2$	$E_{\text{st}} = 210.000 \text{ N/mm}^2$
Massefylde	: $\rho_{\text{alu}} = 2,7 \text{ kg/dm}^3$	$\rho_{\text{st}} = 7,85 \text{ kg/dm}^3$
Tværsnitsareal	: A_{alu}	A_{st}
Modstandsmoment	: W_{alu}	W_{st}
Inertimoment	: I_{alu}	I_{st}
Højde af element	: h_{alu}	h_{st}
Tykkelse	: t_{alu}	t_{st}
Længde	: l	l
Udbøjning	: U_{alu}	U_{st}
Masse	: m_{alu}	m_{st}
Spænding	: σ_{alu}	σ_{st}
0,2-spænding	: $R_{p0,2}$	R_y
Kraft	: F	F
Bøjningsmoment	: M	M

1.4.1 AREALFAKTORER FOR TRÆKSTÆNGER ELLER KORTE TRYK STÆNGER I ALUMINIUM BELASTET TIL ELASTICITETSGRÆNSEN I FORHOLD TIL TILSVARENDE STÆNGER I STÅL.

Der refereres til trækstænger eller så korte trykstænger, at der ikke er nogen søjlevirkning, hvilket betyder, at der for trykstængernes vedkommende ikke skal foretages nogen korrektion efter Eulerkurven.

Stængerne kan altså dimensioneres efter et rent flydespændingskriterium hvilket betyder, at forholdet mellem tværnsnitsarealerne af aluminiumsstangen og stålstangen må være omvendt proportionalt med forholdet mellem flydespændingerne af aluminium og stål:

$$\frac{A_{alu}}{A_{st}} = \frac{R_y}{R_{p0,2}}$$

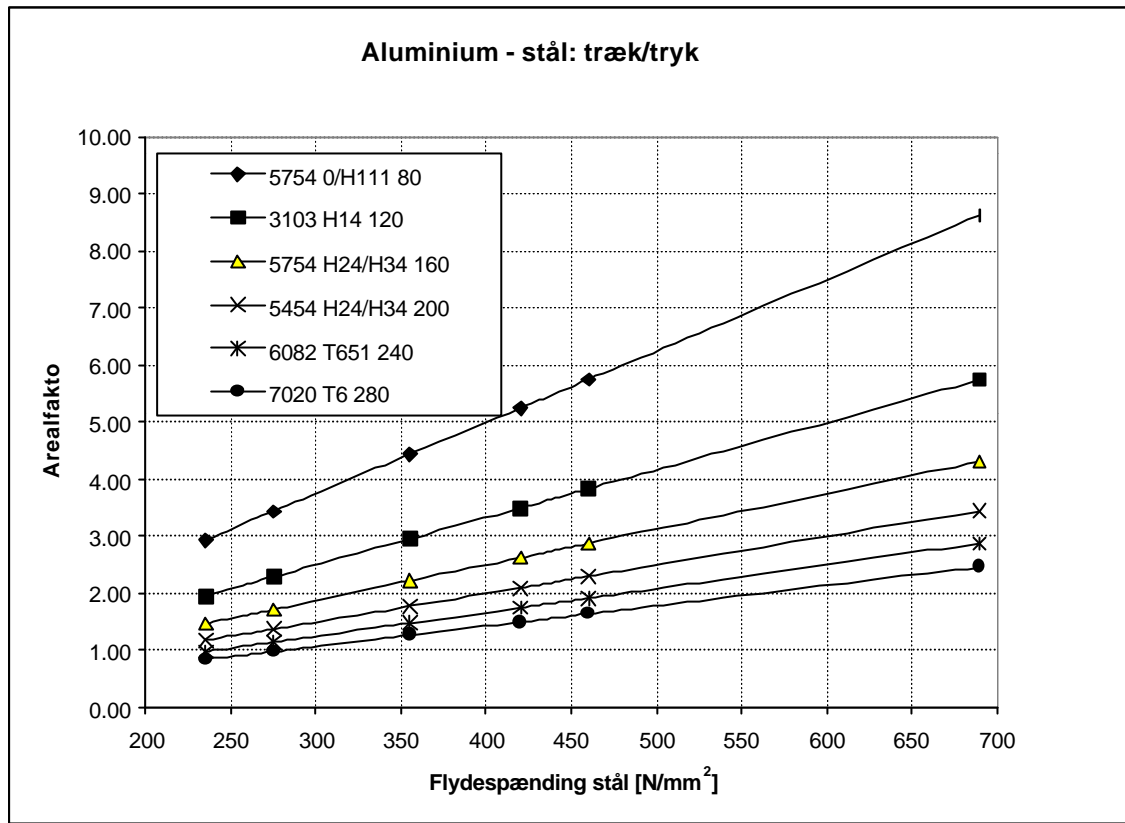
Nedenstående **Tabel 1.11** viser arealfaktoren $R_y/R_{p0,2}$ ved sammenligning mellem en stang i en aluminiumslegering og en tilsvarende stang i forskellige stålqualiteter.

Sammenlignes f.eks. en stang i 5052 H12 aluminium med en tilsvarende i S355 stål, hvor begge stænger er belastede til deres respektive elasticitetsgrænser (flydespændinger), skal aluminiumsstangen alt andet lige have et tværnsnit, der er 2,22 gange større end stålstangen, hvis de skal kunne bære samme last.

Tabel 1.11 - Arealfaktorer for trækstænger eller korte trykstænger

Aluminium			Stå					
aluminium legering	leverings-tilstand	$R_{p0,2}$	S235	S275	S355	S420	S460	S690
			$R_y = 235$	$R_y = 275$	$R_y = 355$	$R_y = 420$	$R_y = 460$	$R_y = 690$
3103	H14	120	1.96	2.29	2.96	3.50	3.83	5.75
5052	H12	160	1.47	1.72	2.22	2.63	2.88	4.31
5454	H24/H34	200	1.18	1.38	1.78	2.10	2.30	3.45
5754	O/H111	80	2.94	3.44	4.44	5.25	5.75	8.63
5754	H24/H34	160	1.47	1.72	2.22	2.63	2.88	4.31
5083	O/H111	125	1.88	2.20	2.84	3.36	3.68	5.52
5083	H24/H34	250	0.94	1.10	1.42	1.68	1.84	2.76
6061	T4	110	2.14	2.50	3.23	3.82	4.18	6.27
6061	T6	240	0.98	1.15	1.48	1.75	1.92	2.88
6082	T4	110	2.14	2.50	3.23	3.82	4.18	6.27
6082	T651	240	0.98	1.15	1.48	1.75	1.92	2.88
7020	T6	280	0.84	0.98	1.27	1.50	1.64	2.46
7020	T651	280	0.84	0.98	1.27	1.50	1.64	2.46

På basis af stål med en given flydespænding viser Figur 1.7 en grafisk fremstilling af arealfaktorerne for 6 forskellige aluminiumslegeringer.



Figur 1.7 Grafisk fremstilling af arealfaktorer.

1.4.2 MASSEFAKTORER FOR TRÆKSTÆNGER ELLER RELATIVT KORTE TRYKSTÆNGER I ALUMINIUM BELASTET TIL ELASTICITETSGRÆNSEN I FORHOLD TIL TILSVARENDE STÆNGER I STÅL.

Forholdet mellem massefylden af aluminium og stål er $2,7 / 7,85 = 0,344$.

Arealfaktoren fra afsnit 1.4.1 kan dermed omegnes til en massefaktor ved at gange arealfaktoren med 0,344:

$$\frac{m_{alu}}{m_{st}} = 0,344 \cdot \frac{A_{alu}}{A_{st}} = 0,344 \cdot \frac{R_y}{R_{0,2}}$$

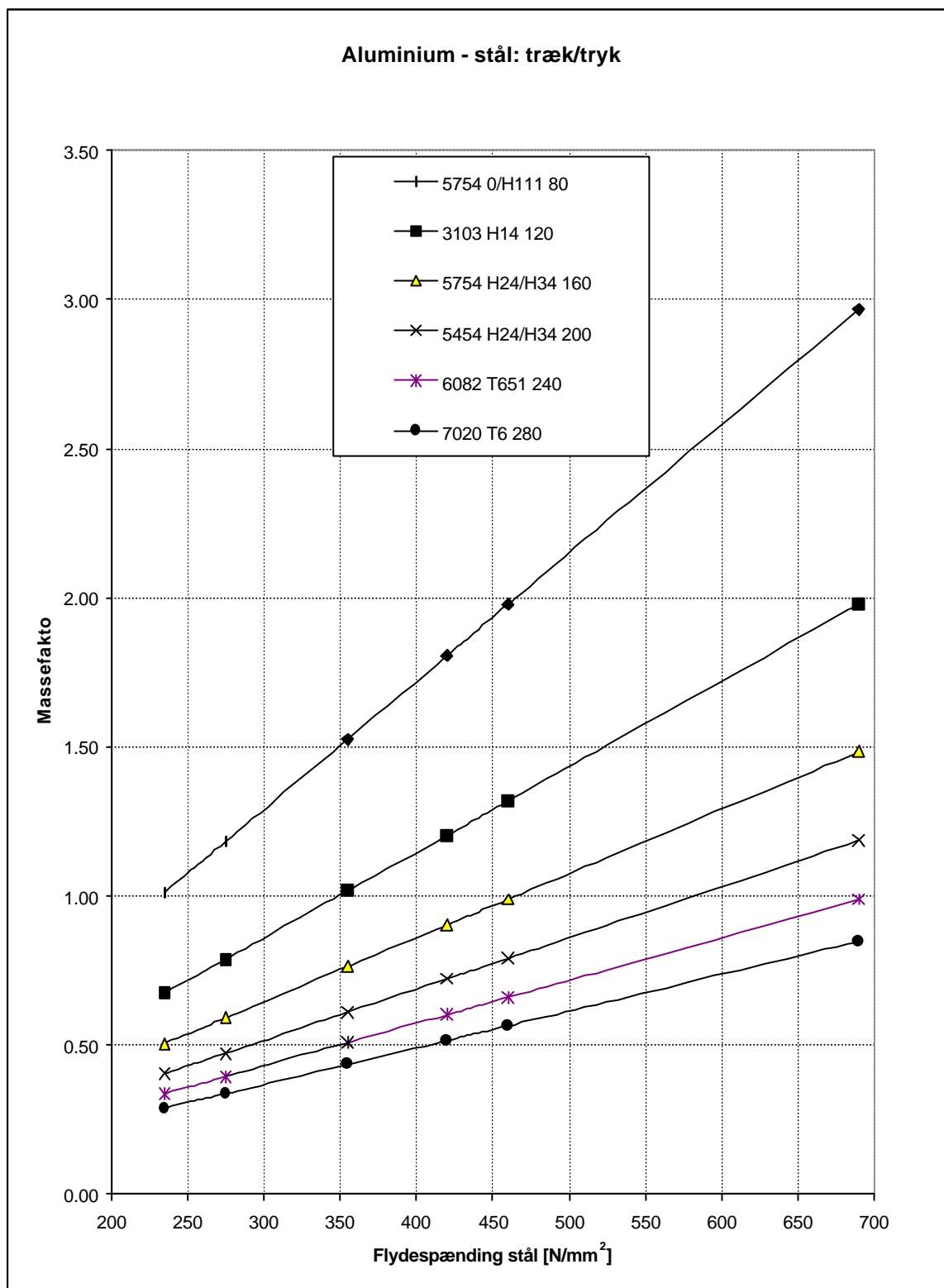
Nedenstående Tabel 1.12 viser massefaktoren ($0,344 R_y/R_{p0,2}$) ved sammenligning mellem en stang i en aluminiumslegering med forøget tværsnit og en tilsvarende stang i forskellige stålqualiteter.

Sammenlignes f.eks. en stang i 5052 H12 aluminium og med et tværsnit, der er 2,22 gange større (se Tabel 1.11) end en tilsvarende stang i S355 stål, vil massen af aluminiumsstangen alt andet lige kun være 0,76 gange massen af stålstangen.

Tabel 1.12 Massefaktorer for trækstænger eller korte trykstænger.

Aluminium			Stål					
aluminium leverings- legering	tilstand	R _{p0,2}	S235	S275	S355	S420	S460	S690
			R _y = 235	R _y = 275	R _y = 355	R _y = 420	R _y = 460	R _y = 690
3103	H14	120	0.67	0.79	1.02	1.20	1.32	1.98
5052	H12	160	0.51	0.59	0.76	0.90	0.99	1.48
5454	H24/H34	200	0.40	0.47	0.61	0.72	0.79	1.19
5754	0/H111	80	1.01	1.18	1.53	1.81	1.98	2.97
5754	H24/H34	160	0.51	0.59	0.76	0.90	0.99	1.48
5083	0/H111	125	0.65	0.76	0.98	1.16	1.27	1.90
5083	H24/H34	250	0.32	0.38	0.49	0.58	0.63	0.95
6061	T4	110	0.73	0.86	1.11	1.31	1.44	2.16
6061	T6	240	0.34	0.39	0.51	0.60	0.66	0.99
6082	T4	110	0.73	0.86	1.11	1.31	1.44	2.16
6082	T651	240	0.34	0.39	0.51	0.60	0.66	0.99
7020	T6	280	0.29	0.34	0.44	0.52	0.57	0.85
7020	T651	280	0.29	0.34	0.44	0.52	0.57	0.85

På basis af stål med en given flydespænding viser Figur 1.9 en grafisk fremstilling af massefaktorerne for 6 forskellige aluminiumslegeringer, når stængernes tværsnit er øget med en arealfaktor som udledt af Tabel 1.11.



Figur 1.8 Grafisk fremstilling af massefaktorer.

1.4.3 DEFORMATIONSFAKTORER FOR TRÆKSTÆNGER ELLER KORTE TRYKSTÆNGER I ALUMINIUM BELASTET TIL ELASTICITETSGRÆNSEN I FORHOLD TIL TILSVARENDE STÆNGER I STÅL.

Den relative deformation af en træk - eller trykstang kan udtrykkes som:

$$\mathbf{d} = \frac{1 \cdot F}{A \cdot E}$$

Da elasticitetsmodulet af aluminium kun er 1/3 af ståls, vil en aluminiumstang deformeres 3 gange så meget som en tilsvarende stålstang med samme tværsnit.

Hvis tværsnittet af aluminiumsstangen øges med en arealfaktor efter afsnit 1.4.1 ($R_y/R_{p0,2}$), således at begge stænger er belastede til deres respektive elasticitetsgrænser (flydespændinger), kan deformationsfaktoren = deformationen af aluminiumsstangen i forhold til stålstangen udtrykkes som:

$$\frac{\mathbf{d}_{alu}}{\mathbf{d}_{st}} = 3 \cdot \frac{R_{p0,2}}{R_y}$$

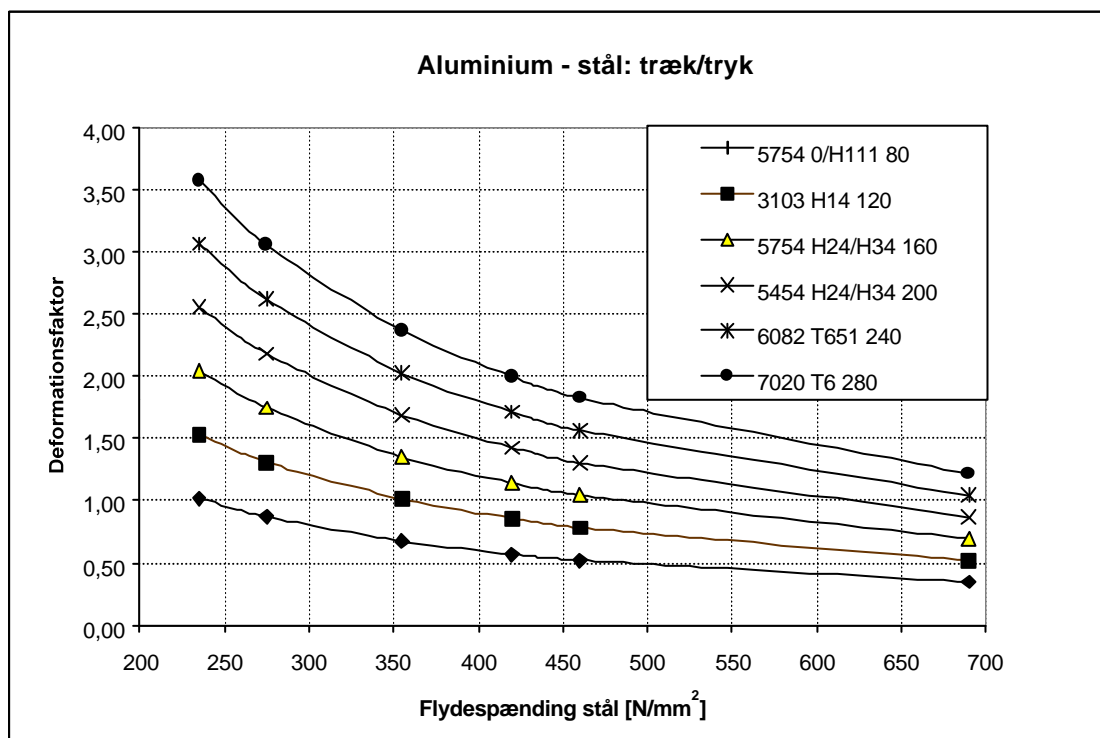
Nedenstående Tabel 1.13 viser deformationsfaktoren ($3 R_{p0,2}/R_y$) ved sammenligning mellem en aluminiumsstang med forøget tværsnit og en tilsvarende stang i forskellige stålqualiteter, således at begge stænger er belastede til deres respektive elasticitetsgrænser (flydespænding).

Sammenlignes f.eks. en stang i 5052 H12 aluminium og med et tværsnit, der er 2,22 gange større (se Tabel 1.11) end en tilsvarende stang i S355 stål, vil aluminiumsstangen alt andet lige deformeres 1,35 gange mere end stålstangen.

Tabel 1.13 Deformationsfaktorer for trækstænger eller korte trykstænger.

Aluminium			Stål					
aluminium legering	leverings-tilstand	$R_{p0.2}$	S235 $R_y = 235$	S275 $R_y = 275$	S355 $R_y = 355$	S420 $R_y = 420$	S460 $R_y = 460$	S690 $R_y = 690$
3103	H14	120	1.53	1.31	1.01	0.86	0.78	0.52
5052	H12	160	2.04	1.75	1.35	1.14	1.04	0.70
5454	H24/H34	200	2.55	2.18	1.69	1.43	1.30	0.87
5754	O/H111	80	1.02	0.87	0.68	0.57	0.52	0.35
5754	H24/H34	160	2.04	1.75	1.35	1.14	1.04	0.70
5083	O/H111	125	1.60	1.36	1.06	0.89	0.82	0.54
5083	H24/H34	250	3.19	2.73	2.11	1.79	1.63	1.09
6061	T4	110	1.40	1.20	0.93	0.79	0.72	0.48
6061	T6	240	3.06	2.62	2.03	1.71	1.57	1.04
6082	T4	110	1.40	1.20	0.93	0.79	0.72	0.48
6082	T651	240	3.06	2.62	2.03	1.71	1.57	1.04
7020	T6	280	3.57	3.05	2.37	2.00	1.83	1.22
7020	T651	280	3.57	3.05	2.37	2.00	1.83	1.22

På basis af stål med en given flydespænding viser Figur 1.9 en grafisk fremstilling af deformationsfaktorerne for 6 forskellige aluminiumslegeringer, når stængernes tværsnit er øget med en arealfaktor som udledt af Tabel 1.11.



Figur 1.9 Grafisk fremstilling af deformationsfaktorer.

1.4.4 SKALERINGSFAKTORER FOR BØJNING AF STÆNGER I ALUMINIUM BELASTET TIL ELASTICITETSGRÆNSEN I FORHOLD TIL TILSVARENDE STÆNGER I STÅL.

Med ”skaleringsfaktor” menes den faktor, alle dimensioner i et profils tværsnit (højde, bredde, godstykkelse) skal skaleres med, når man erstatter et bøjningsbelastet stålprofil med et tilsvarende i aluminium, og begge profiler belastes til deres respektive elasticitetsgrænse (flydespænding).

For et I-profil vil disse dimensioner være bredde og tykkelse af flangerne samt højde og tykkelse af kroppladen. For et rør diameteren og godstykkelsen.

Hvis begge profiler belastes til deres flydespænding, kan forholdet mellem det nødvendige modstandsmoment af aluminiumsprofilet W_{alu} og modstandsmomentet af stålprofilet W_{st} udtrykkes ved:

$$\frac{W_{alu}}{W_{st}} = \frac{R_y}{R_{p0,2}}$$

Skaleres alle dimensioner (godstykkelse, højde og bredde) i et profils tværsnit med samme faktor c , vil modstandsmomentet af profilet være proportionalt med skaleringsfaktoren i 3. potens.

Skaleringsfaktoren c kan også udtrykkes som h_{alu}/h_{st} .

Ovenstående forhold mellem modstandsmomenterne af aluminiumsprofilet og stålprofilet kan derfor omskrives til:

$$\frac{W_{alu}}{W_{st}} = \frac{R_y}{R_{p0,2}} \Rightarrow \left(\frac{h_{alu}}{h_{st}} \right)^3 = \frac{R_y}{R_{p0,2}} \Rightarrow \frac{h_{alu}}{h_{st}} = \sqrt[3]{\frac{R_y}{R_{p0,2}}}$$

Det kræves, at højden ligger inden for grænserne mht. begyndende ”foldning”.

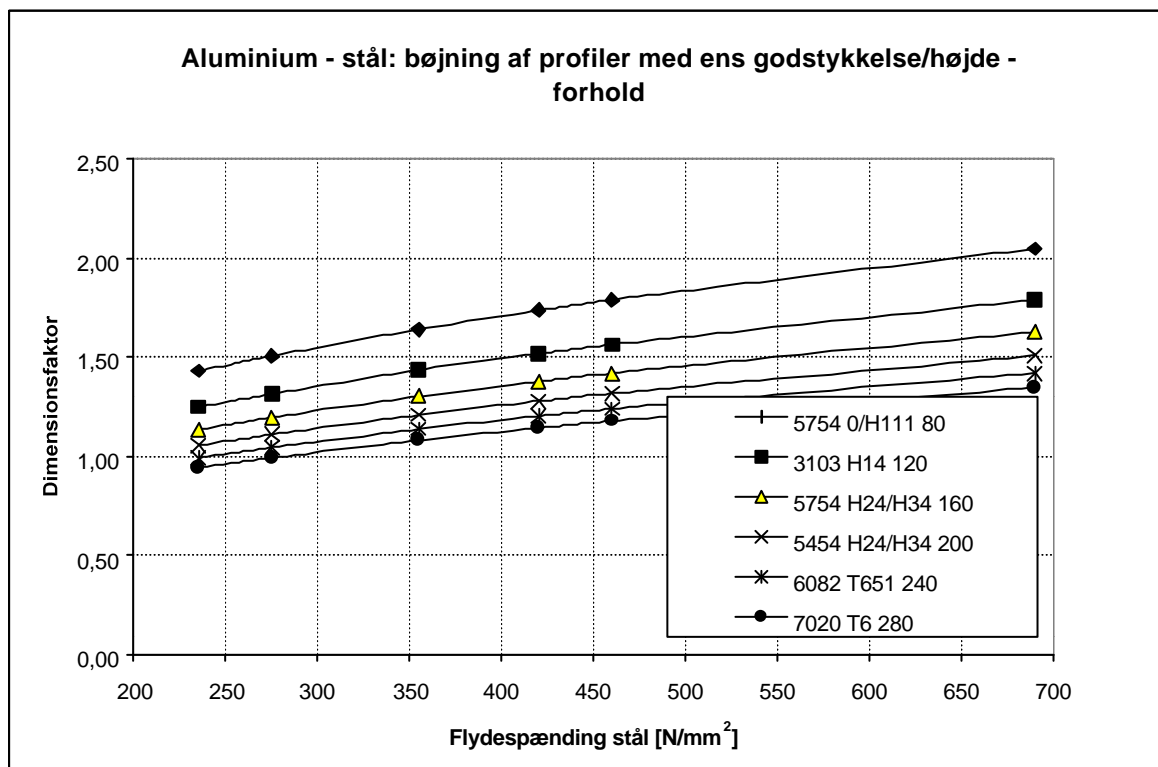
Nedenstående Tabel 1.14 viser skaleringsfaktoren for et bøjningsbelastet profil i en given aluminiumslegering i forhold til et tilsvarende profil i forskellige stålqualiteter, når begge profiler er belastede til deres respektive elasticitetsgrænse (flydespænding).

Sammenlignes f.eks. et profil i 5052 H12 aluminium med et tilsvarende profil i S355 stål, skal alle dimensioner af aluminiumsprofilets tværsnit alt andet lige skaleres med en faktor på 1,30 i forhold til dimensionerne af stålprofilet.

Tabel 1.14 Skaleringsfaktorer.

Aluminium			Stål					
aluminium legering	leverings-tilstand	$R_{p0.2}$	S235 $R_y = 235$	S275 $R_y = 275$	S355 $R_y = 355$	S420 $R_y = 420$	S460 $R_y = 460$	S690 $R_y = 690$
3103	H14	120	1.25	1.32	1.44	1.52	1.57	1.79
5052	H12	160	1.14	1.20	1.30	1.38	1.42	1.63
5454	H24/H34	200	1.06	1.11	1.21	1.28	1.32	1.51
5754	0/H111	80	1.43	1.51	1.64	1.74	1.79	2.05
5754	H24/H34	160	1.14	1.20	1.30	1.38	1.42	1.63
5083	0/H111	125	1.23	1.30	1.42	1.50	1.54	1.77
5083	H24/H34	250	0.98	1.03	1.12	1.19	1.23	1.40
6061	T4	110	1.29	1.36	1.48	1.56	1.61	1.84
6061	T6	240	0.99	1.05	1.14	1.21	1.24	1.42
6082	T4	110	1.29	1.36	1.48	1.56	1.61	1.84
6082	T651	240	0.99	1.05	1.14	1.21	1.24	1.42
7020	T6	280	0.94	0.99	1.08	1.14	1.18	1.35
7020	T651	280	0.94	0.99	1.08	1.14	1.18	1.35

På basis af stål med en given flydespænding viser Figur 1.10 en grafisk fremstilling af skaleringsfaktorerne for 6 forskellige aluminiumslegeringer.



Figur 1.10 Grafisk fremstilling af skaleringsfaktorer.

1.4.5 UDBØJNINGFAKTORER FOR BØJNING AF MOMENTPÅVIRKEDE BJÆLKER I ALUMINIUM BELASTET TIL ELASTICITETSGRÆNSEN I FORHOLD TIL TILSVARENDE BJÆLKER I STÅL.

Med "udbøjningsfaktor" menes forholdet mellem udbøjningen af et bøjningsbelastet aluminiumsprofil og udbøjningen af et tilsvarende stålprofil, når begge profiler er belastede til deres respektive elasticitetsgrænser (flydespænding).

Udbøjningen U af et momentbelastet profil er omvendt proportional med produktet af elasticitetsmodul E og inertimomentet I , og kan udtrykkes som:

$$U = \frac{C}{E \cdot I}$$

hvor C er en konstant, der varierer alt efter belastningstilfældet.

Da elasticitetsmodul for aluminium kun er $1/3$ af ståls, vil udbøjningen af et momentbelastet aluminiumsprofil i forhold til udbøjningen af et tilsvarende stålprofil være 3 gange så stor og kunne udtrykkes som:

$$\frac{U_{alu}}{U_{st}} = 3 \cdot \frac{I_{st}}{I_{alu}}$$

Skaleres alle dimensioner (godstykkelse, højde og bredde) i et profils tværsnit med samme factor c , vil inertimomentet af profilet være proportionalt med skaleringsfaktoren i 4. potens.

Forholdet mellem udbøjningen af et aluminiumsprofil og det tilsvarende stålprofil kan derfor udtrykkes som:

$$\frac{U_{alu}}{U_{st}} = 3 \cdot \left(\frac{h_{st}}{h_{alu}} \right)^4$$

Indsættes skaleringsfaktoren fra afsnit 1.4.4:

$$\frac{h_{alu}}{h_{st}} = \sqrt[3]{\frac{R_y}{R_{p0,2}}}$$

i ovenstående formel fås:

$$\frac{U_{alu}}{U_{st}} = 3 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt[3]{\frac{R_y}{R_{p0,2}}}} \right)^4 = \frac{3}{\left(\sqrt[3]{\frac{R_y}{R_{p0,2}}} \right)^4}$$

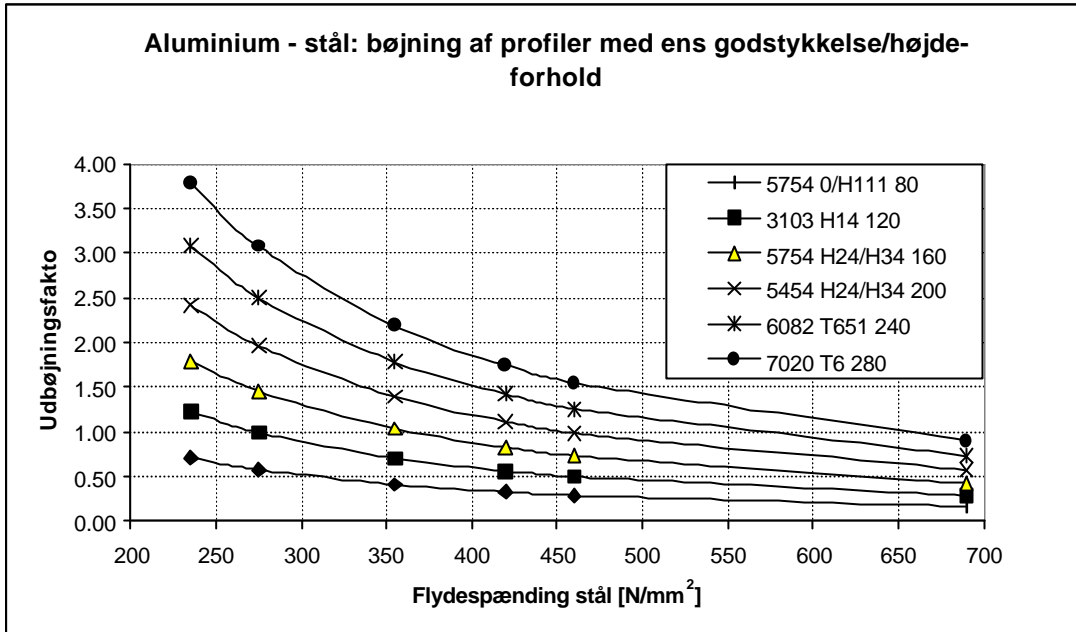
Nedenstående Tabel 1.15 viser udbøjningsfaktoren for et bøjningsbelastet profil i en given aluminiumslegering og i forhold til et tilsvarende profil i forskellige stålkvaliteter, når begge profiler er belastede til deres respektive elasticitetsgrænser (flydespænding), og aluminiumsprofilet er skaleret med en faktor som angivet i Tabel 1.14 i forhold til stålprofilet.

Sammenlignes f.eks. et profil i 5052 H12 aluminium med et tilsvarende profil i S355 stål, vil udbøjningen af aluminiumsprofilet alt andet lige være 1,04 gange større end stålprofilet.

Tabel 1.15 Udbøjningsfaktorer for bøjning af profiler med ens godstykkelse/højde - forhold

Aluminium			Stå					
aluminium legering	leverings-tilstand	$R_{p0,2}$	S235 $R_y = 235$	S275 $R_y = 275$	S355 $R_y = 355$	S420 $R_y = 420$	S460 $R_y = 460$	S690 $R_y = 690$
3103	H14	120	1.22	0.99	0.71	0.56	0.50	0.29
5052	H12	160	1.80	1.46	1.04	0.83	0.73	0.43
5454	H24/H34	200	2.42	1.96	1.40	1.12	0.99	0.58
5754	0/H111	80	0.71	0.58	0.41	0.33	0.29	0.17
5754	H24/H34	160	1.80	1.46	1.04	0.83	0.73	0.43
5083	0/H111	125	1.29	1.05	0.75	0.60	0.53	0.31
5083	H24/H34	250	3.26	2.64	1.88	1.50	1.33	0.77
6061	T4	110	1.09	0.88	0.63	0.50	0.45	0.26
6061	T6	240	3.09	2.50	1.78	1.42	1.26	0.73
6082	T4	110	1.09	0.88	0.63	0.50	0.45	0.26
6082	T651	240	3.09	2.50	1.78	1.42	1.26	0.73
7020	T6	280	3.79	3.07	2.19	1.75	1.55	0.90
7020	T651	280	3.79	3.07	2.19	1.75	1.55	0.90

På basis af stål med en given flydespænding viser en grafisk fremstilling af udbøjningsfaktorerne for 6 forskellige aluminiumslegeringer, når bjælkernes tværsnit er skaleret med en skaleringsfaktor som udledt af Tabel 1.14



Figur 1.11 Grafisk fremstilling af udbøjningsfaktorer

1.4.6 MASSEFAKTORER FOR BØJNING AF MOMENTPÅVIRKEDE BJÆLKER I ALUMINIUM BELASTET TIL ELASTICITETSGRÆNSEN I FORHOLD TIL TILSVARENDE BJÆLKER I STÅL.

Skaleres alle dimensionerne i et tværsnit med en faktor – se afsnit 1.4.4 – på

$$\frac{h_{alu}}{h_{st}} = \sqrt[3]{\frac{R_y}{R_{p0,2}}}$$

vokser tværsnitsarealet proportionalt med skaleringsfaktoren i 2. potens, og arealfaktoren bliver derfor:

$$\frac{A_{alu}}{A_{st}} = \left(\sqrt[3]{\frac{R_y}{R_{p0,2}}} \right)^2$$

Da forholdet mellem massefylden af aluminium og stål er $2,7 / 7,85 = 0,344$ kan arealfaktoren omskrives til en massefaktor ved at gange med dette forhold:

$$\frac{m_{st}}{m_{alu}} = 0,344 \cdot \frac{A_{alu}}{A_{st}} = 0,344 \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{R_y}{R_{p0,2}}} \right)^2$$

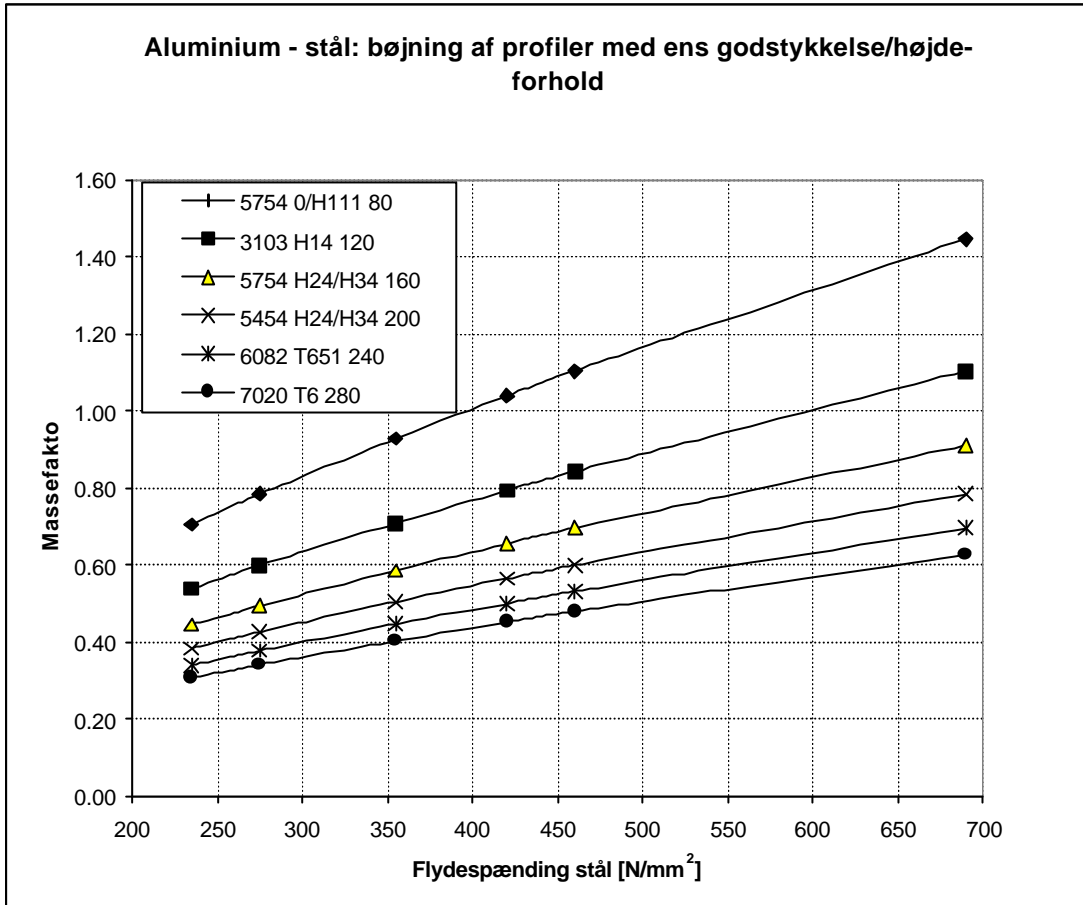
Nedenstående Tabel 1.16 viser massefaktoren ved et bøjningsbelastet profil i en given aluminiumslegering i forhold til et tilsvarende profil i forskellige stålqualiteter, hvis begge profiler er belastede til deres elasticitetsgrænser (flydespændingen), skal bære samme last og har samme godstykkelse/højde - forhold.

Sammenlignes f.eks. et profil i 5052 H12 aluminium med et tilsvarende profil i S355 stål, vil massen af aluminiumsprofilet alt andet lige være 0,59 gange massen af stålprofilet.

Tabel 1.16 Massefaktorer for bøjning af profiler med ens godstykkelse/højde - forhold

Aluminium			Stål					
aluminium legering	leverings-tilstand	R _{p0,2}	S235 R _y = 235	S275 R _y = 275	S355 R _y = 355	S420 R _y = 420	S460 R _y = 460	S690 R _y = 690
3103	H14	120	0.54	0.60	0.71	0.79	0.84	1.10
5052	H12	160	0.44	0.49	0.59	0.65	0.70	0.91
5454	H24/H34	200	0.38	0.43	0.50	0.56	0.60	0.79
5754	O/H111	80	0.71	0.78	0.93	1.04	1.10	1.45
5754	H24/H34	160	0.44	0.49	0.59	0.65	0.70	0.91
5083	O/H111	125	0.52	0.58	0.69	0.77	0.82	1.07
5083	H24/H34	250	0.33	0.37	0.43	0.49	0.52	0.68
6061	T4	110	0.57	0.63	0.75	0.84	0.89	1.17
6061	T6	240	0.34	0.38	0.45	0.50	0.53	0.70
6082	T4	110	0.57	0.63	0.75	0.84	0.89	1.17
6082	T651	240	0.34	0.38	0.45	0.50	0.53	0.70
7020	T6	280	0.31	0.34	0.40	0.45	0.48	0.63
7020	T651	280	0.31	0.34	0.40	0.45	0.48	0.63

På basis af stål med en given flydespænding viser Figur 1.12 en grafisk fremstilling af massefaktorerne for 6 forskellige aluminiumslegeringer, når bjælkernes tværsnit er skaleret med en faktor som udledt af



Figur 1.12 Grafisk fremstilling af massefaktorer

1.4.7 MASSE AF SIMPELT UNDERSTØTTET MEGET SLANK SØJLE I ALUMINIUM I FORHOLD TIL EN TILSVARENDE SØJLE I STÅL.

For meget slanke søjler afhænger den tilladelse spænding af Euler-kurven og en sikkerhedsfaktor, der dog kan udlades i nedenstående relative sammenligning mellem aluminium og stål, fordi den er af nogenlunde samme størrelsesorden for begge materialer.

Den kritiske bulespænding for en meget slank søjle, der er simpelt understøttet i begge ender, kan udtrykkes efter Euler's formel som:

$$s_{cr} = \frac{p^2 \cdot E}{\left(\frac{l}{i}\right)^2} = \frac{p^2 \cdot E}{\left(\frac{l}{\sqrt{\frac{I}{A}}}\right)^2} = \frac{p^2 \cdot E \cdot I}{l^2 \cdot A}$$

Indsættes værdien:

$$s_{cr} = \frac{F}{A}$$

i ovenstående formel fås:

$$\frac{F}{A} = \frac{p^2 \cdot E \cdot I}{l^2 \cdot A} \Rightarrow F = \frac{p^2 \cdot E \cdot I}{l^2}$$

Skal bæreevnen F af en slank, simpelt understøttet søjle i aluminium være den samme som for en søjle i stål, skal produktet EI være ens for de to søjler, og da elasticitetsmodul for aluminium kun er $1/3$ af ståls, må inertimomentet af aluminiumssøjlen modsvarende være 3 gange så højt, uanset materialestyrken!

Skaleres alle ydre dimensioner i et tværsnit med en faktor c , mens alle godstykkelser holdes konstante, skales tværsnitsarealet dermed i 1. potens af c og inertimomentet i 3. potens.

For at opnå et 3 gange så stort inertimoment når godstykkelsen holdes konstant, kan den nødvendige skaleringsfaktor c beregnes:

$$c^3 = 3 \Rightarrow c = \sqrt[3]{3}$$

Da tværsnitsarealet skales i 1. potens fås:

$$\frac{A_{alu}}{A_{st}} = \sqrt[3]{3}$$

Da forholdet mellem massefylden af aluminium og stål $= 2,7 / 7,85 = 0,344$, kan arealforholdet omskrives til et masseforhold ved at gange med denne værdi:

$$\frac{m_{alu}}{m_{st}} = 0,344 \cdot \frac{A_{alu}}{A_{st}} = 0,344 \cdot \sqrt[3]{3} \approx 0,5$$

Baseret på de beskrevne forudsætninger kan man altså konkludere, at slanke søjler i aluminium kun vejer ca. det halve af tilsvarende søjler i stål, hvis de skal bære samme last.

1.5 REFERENCELISTE

- [1] **Rørvik, Tarald.** *Aluminiumskonstruksjoner, Innføring i material- og konstruksjonslære.* Håndbog 46, Norges byggforskningsinstitutt, 1997.

2 Design og dimensionering

2.1 DESIGN PRINCIPPER

Ved design af konstruktioner i aluminium afhænger dimensioneringen bl.a. af den krævede levetid og konsekvenserne ved kollaps.

I den forbindelse refereres der ofte til 4 forskellige designprincipper, hvor man normalt bruger de engelske udtryk i mangel på gode danske oversættelser:

- Fail safe design (dansk: design, der er sikret mod sammenbrud)
- Safe life design (dansk: design, med garanteret levetid)
- Damage tolerant design (dansk: design, der tolererer skader)
- Infinite life design (dansk: design, med uendelig levetid)

Da Eurocode 9 i dag anvendes hyppigt ved dimensionering af landbaserede konstruktioner er det væsentligt at bemærke, at de nævnte betegnelser for designprincipper ikke umiddelbart anvendes entydigt i Eurocode 9.

2.1.1 FAIL SAFE DESIGN

Fail safe design anvendes i udmattelsesafsnittet i Eurocode 3 (stålkonstruktioner) for konstruktioner, hvor der er begrænsede svigtkonsekvenser for bærende komponenter, således at lokalt svigt af en komponent ikke medfører svigt af hele konstruktionen.

2.1.2 SAFE LIFE DESIGN

Safe life design anvendes i udmattelsesafsnittet i Eurocode 9 for konstruktioner, hvor der beregnes et forholdstal mellem summationen af påførte belastningsvariationer og det totale antal tilladelige belastningsvariationer (d.v.s. med fuld partialkoefficient).

Er forholdstallet mindre end eller lig med 1 er betingelsen for safe life opfyldt, og konstruktionen forventes at overleve i hele sin beregnede levetid uden revner eller svigt.

2.1.3 DAMAGE TOLERANT DESIGN

Ved f.eks. meget vægtekritiske konstruktioner må der dimensioneres lige til grænsen, og man må derfor påregne, at der vil kunne opstå udmattelsesrevner. Derfor må konstruktionerne udføres, så et vist antal

sådanne revner kan tolereres uden at konstruktionen bryder sammen eller funktionen forringes – damage tolerant design.

Konstruktionens sikkerhed opfyldes ved at foretage inspektioner med passende intervaller, således at udmattelsesrevner kan detekteres og repareres i tide.

2.1.4 INFINITE LIFE DESIGN

Infinite life design er ikke beskrevet i Eurocode 9, men kan tolkes som konstruktioner, der udmattelsesmæssigt er designet med fuld sikkerhed ud til den vandrette del på udmattelseskurverne, efter 10^8 påvirkninger. En sådan konstruktion vil i princippet have uendelig levetid. Supplerende skal nævnes at spændingsvidder under værdien for $1 \cdot 10^8$ påvirkninger medtages normalt ikke i udmattelsesvurderingen.

2.2 SAMMENHÆNGEN MELLEM BELASTNINGSAFTTTELSEN, BEREGNINGSMETODEN OG ACCEPTKRITERIET

Enhver beregningsmetode, der kan findes i normer og regler har en ubrydelig sammenhæng mellem **belastningsfastsættelsen, beregningsmetoden og acceptkriteriet**, og er opbygget efter samme grundlæggende koncept:

”Hvis man fastsætter belastningerne på den angivne måde og bruger den beskrevne beregningsmetode kan det nævnte acceptkriterie anvendes.”

Det betyder, at selv om ingen af de 3 elementer er rigtige, kan det samlede resultat godt være korrekt.

Hvis f.eks. belastningen i et regelsæt er fastlagt lavere end i andre sammenlignelige regler, kan beregningsmetoden eller acceptkriteriet sagtens kompensere herfor, uden at brugeren kan gennemskue dette (f.eks. ved at der kun tillades en lav spænding).

De 3 elementer er altså uløseligt forbundet og kan kun i undtagelses tilfælde bruges i andre sammenhænge. Man kan derfor ikke tage en belastning fra f.eks. klassereglerne, kombinere denne belastning med en beregningsmetode fra Eurocode 9 og holde resultatet op mod et acceptkriterium, der er taget fra nogle helt 3. regler.

2.3 NORMER OG STANDARDER.

Ved en konkret opgave er det vigtigt at vælge et regelsæt, der er relevant i den pågældende situation.

Valget beror på en række spørgsmål, man som designer må stille sig selv:

- Hvor nøjagtigt kan belastningerne bestemmes?

Hvis belastningerne er meget usikre, er der ingen grund til at bruge et meget kompliceret regelsæt, der kan optimere konstruktionen i mindste detalje, fordi gevinsten ved optimeringen alligevel drukner i den store sikkerhedsmargin, der alligevel må lægges på belastningerne.

- Kan konstruktionen beskyttes mod belastninger, der er højere, end den er dimensioneret til?

Der er stor forskel på f.eks. dimensionering af oceangående skibe, der ikke kan nå i havn, hvis der opstår et voldsomt uvejr (og derfor må tage, hvad der kommer) og f.eks. hurtiggående katamaraner, der sejler i beskyttet farvand på ruter, der er så korte, at man altid kan nå at afbryde sejladsen inden bølgehøjden blive større, end fartøjet er dimensioneret til at klare.

- Hvad er konsekvenserne ved svigt?

Ved dimensionering af f.eks. en gangbro vil konsekvenserne ved svigt være katastrofale måske med tab af menneskeliv. Ved andre konstruktioner vil svigt måske være relativt ufarligt.

- Hvilke krav er der til konstruktionens levetid?

Specielt når der er tale om udmattelsespåvirkede konstruktioner vil kravet til levetid få direkte indflydelse på dimensioneringen.

Der er simpelthen en direkte sammenhæng mellem størrelsen af de spændingsvariationer, der opstår i konstruktionen, og det antal spændingsvariationer den kan tåle, før den bryder sammen.

Hvis konstruktionen til og med skal anvendes i korrosivt miljø f.eks. til havs, kan udmattelsesstyrken blive forringet meget væsentligt i forhold til hvis den skulle anvendes i tør luft, hvis ikke overfladebehandlingen er absolut perfekt.

- Hvilke krav kan der accepteres i form af løbende kontrol af den færdige konstruktion?

Hvis konstruktionen ikke kan forventes at blive inspiceret regelmæssigt for opståede revner eller korrosion, må regelsættet nødvendigvis indeholde en ret høj sikkerhedsmargin.

Da opståede revner ikke kan forventes at blive opdaget, må sandsynligheden for at de overhovedet opstår begrænses til et minimum, og konstruktionen dimensioneres, så enkelte revner ikke vil have større konsekvenser for hele konstruktionens styrke.

- Hvor kritisk er vægten?

Ved meget vægtekritiske konstruktioner f.eks. hurtiggående fartøjer eller i ekstrem grad fly skal alle dimensioner nødvendigvis presses helt i bund.

Det betyder meget høje krav til nøjagtigheden af belastningsfastsættelsen, og sofistikerede og dermed desværre meget tidskrævende beregningsmetoder, der bl.a. tager hensyn til plastisk deformation.

- Skal konstruktionen fremstilles i mange eksemplarer eller er der tale om enkelstyks produktion?

Ved enkelstyks produktion er der som regel ikke råd til en meget nøjagtig og tidskrævende beregning, hvorimod der ved storserier kan ofres mere på optimering.

- Skal konstruktionen godkendes (klasses) efter et specielt regelsæt?

Dette er meget ofte tilfældet f.eks. ved skibskonstruktion, og så er der ikke så meget diskussion om, hvilke regler, der skal benyttes.

Dimensionering efter de forskellige regelsæt kan, som det fremgår af ovenstående, godt give vidt forskellige resultater, selv om de ydre belastninger er ens; men dette forhold skal altså ses i sammenhæng med, at forudsætningerne også er vidt forskellige.

2.3.1 EUROCODE 9

Eurocode 9 er udarbejdet af en række eksperter fra flere europæiske lande.

Deres arbejde har resulteret i forelæggelse af Eurocode 9 for CEN, der er en sammenslutning af de nationale standardiseringsorganer i Østrig, Belgien, Tjekkiet, Danmark, Finland, Frankrig, Tyskland, Grækenland, Island, Irland, Italien, Luxembourg, Holland, Norge, Portugal, Spanien, Sverige, Schweiz og Storbritanien.

CEN har godkendt standarden som ENV den 26. oktober 1997 (som forslag til foreløbig anvendelse).

Eurocode skal give rammerne for en sammenhæng imellem de stillede krav og de udførte konstruktioner og skal endvidere danne rammen for at opstille harmoniserede tekniske specifikationer for konstruktionsprodukterne.

Eurocode dækker designreglerne generelt, men sikkerhedsniveauet er altid et nationalt anliggende.

Endvidere dækker Eurocode kun fremstilling og kontrol i det omfang det er nødvendigt til at indikere at produktet er i orden.

2.3.2 DS/EN 30042

Lysbuesvejste samlinger i aluminium og dets svejsbare legeringer, Vejledning om kvalitetsniveauer for svejsefejl.

Denne internationale standard giver vejledning om fejlniveauer i lysbuesvejste samlinger (TIG og MIG) i aluminium og dets svejsbare legeringer i tykkelse mellem 3mm og 63mm.

Denne standard som er international bør anvendes som reference ved udarbejdelse af normer og/eller andre anvendelsesstandarder. Den kan anvendes inden for et totalt kvalitetssystem til produktion af tilfredsstillende svejste samlinger. Den angiver tre niveauer for dimensionsværdi, hvorfra der kan vælges til en bestemt anvendelse. Det kvalitetsniveau, der er nødvendigt i hvert tilfælde, bør defineres af anvendelsesstandarder eller af den ansvarlige konstruktør i samarbejde med producenten, brugeren og/eller andre involverede parter. Kvalitetsniveauerne refererer til de forskellige typer svejste samlinger ved en fabrikation og ikke til det færdige produkt eller selve komponenten. Forskellige kvalitetsniveauer kan derfor anvendes til individuelt svejste samlinger for det samme produkt eller komponent.

De tre kvalitetsniveauer er tilfældigt identificeret som D, C, B og har til formål at dække størstedelen af de praktiske anvendelser.

Ved valg af kvalitetsniveau for en vilkårlig anvendelse bør der tages hensyn til designovervejelser, efterfølgende bearbejdning, spændingsform (f.eks. statisk, dynamisk), betingelser for service (F.eks. temperatue og miljø) og konsekvenser ved svigt. Økonomiske faktorer er også vigtige og bør udover svejseomkostninger også indbefatte omkostninger til inspektion, prøvning og reparation.

2.3.3 DS 419 ALUMINIUMS-KONSTRUKTIONER

Dansk Ingeniørforening har lavet en norm for aluminiums-konstruktioner, som er Dansk Standard DS 419. En konstruktion er i overensstemmelse med alle gældende DS normer, når de opfylder kravene i DS 419 og kravene i DS 409 Sikkerhedsbestemmelser. Denne norm tager sigte på bærende aluminiumkonstruktioner i husbygning, brobygning, mastebygning eller lignende. For konstruktioner, hvortil der stilles krav, og for konstruktioner med særlig udformning vil normens bestemmelser alene ikke være tilstrækkelige. Normen gælder kun for fågangspåvirkede konstruktioner. Normen alene er ikke tilstrækkelig for f.eks. rullende materiel, skibsbygning og beholdere.

Som konstruktionsmateriale forudsættes anvendt materialer, hvis kemiske sammensætning og styrkeegenskaber opfylder kravene i DS3012, ISO/DIS 6361 eller ISO/DIS 6362. Andre standarder kan benyttes, såfremt materialet eller disse i alle væsentlige henseender er underkastet mindst lige så krævende materiale- og prøvningsbestemmelser som anført i ovennævnte standarder. Materialer der ikke er standardiserede, kan benyttes, såfremt det kan dokumenteres, at anvendelsen er forsvarlig .

Normen omhandler materialer, laster, sikkerhed, beregning og konstruktion, udførelse, kontrol, særlige forhold og beskyttelsesklasser. Alt sammen meget summarisk fortalt.

En ny udgave af DS 419 er udgivet i december 2001. Denne reviderede udgave har sin baggrund i forslag til Eurocode 9: ENV 1999-1-1, 1999-1-2 og 1999-2.

2.3.4 KLASSEREGLER

Enhver maritim konstruktion er underkastet en eller anden form for tilsyn fra offentlige myndigheder.

Paragraf 23 i Lov om sikkerhed til søs bestemmer, at Erhvervsministeren kan fastsætte regler om, at skibe med en længde på 45 m og derover skal være optaget i registret hos et autoriseret klassifikationsselskab. Der er endnu ikke fastsat sådanne regler.

Langt de fleste skibe er imidlertid allerede bygget ”til klasse”, dvs. at de er bygget i overensstemmelse med de regler på områderne skrog, maskineri, elanlæg og automation (det traditionelle ”klasseområde”), som et klassifikationsselskab har opstillet, og under tilsyn fra dette selskab, som står som garant over for myndigheder, reder og forsikringsselskaber, ved befragtning og ved køb og salg.

De af klassifikationsselskaberne udgivne byggeregler holdes til stadighed á jour. Selskaberne fører ikke alene tilsyn med skibenes bygning, men kontrollerer også de benyttede materialer på produktionsstederne. De fører derudover ulykkesstatistik og driver forsknings- og udviklingsarbejde.

I Danmark varetager Søfartsstyrelsen kontrollen med sikkerheden til søs, herunder også tilsynet med skibenes bygning og udstyr samt den sikkerheds- og miljømæssige drift af skibene.

Søfartsstyrelsen har autoriseret følgende klassifikationsselskaber til, på Søfartsstyrelsens vegne og under ansvar over for denne, at udføre visse syn på skibe og udstede de deraf følgende certifikater:

- American Bureau of Shipping (ABS)
- Bureau Veritas (BV)
- Det Norske Veritas (DNV)
- Germanischer Lloyd (GL)
- Lloyd's Register (LR)
- Nippon Kaiji Kyokai (NK).

Et klassifikationsselskabs varetagelse af opgaver inden for det traditionelle klasseområde kaldes "acceptområdet", og varetagelsen af de opgaver, som er omfattet af autorisation eller bemyndigelse – hvor Søfartsstyrelsen har uddelegeret dele af sit lovpligtige tilsynsarbejde – kaldes "bemyndigelsesområdet".

Hovedparten af klassifikationsselskabernes regler er udviklet for skibe bygget i stål, hvorfor også reglerne for aluminium tager udgangspunkt i stål-design, men med materialeparametre for aluminium.

Både DNV og LR har dog også specielle klasseregler for lette og hurtige fartøjer. Hos DNV hedder disse regler: "Rules for Classification of High Speed and Light Craft", hos LR: "Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft".

Disse regelsamlinger bruges ved design og dimensionering af højhastighedsfartøjer. Regelsamlingerne har selvstændige kapitler for fartøjer i forskellige materialer så som stål, aluminium og glasfiber. Kapitlet om aluminium ligger dog meget tæt op ad reglerne for stålskibe mht. strukturel design. Det skal dog bemærkes, at der i skrogbjælkens design tages højde for den specielle skrogform, som et højhastighedsfartøj ofte har, nemlig katameranform eller enkeltskrog med et specielt flare.

Introduktionen af FN's søfartsorganisations (International Maritime Organization – IMO) "High Speed Craft (HSC) Code" i 1996 har ledt til ændringer i opfattelsen af sikkerhed til søs. Filosofien bag denne kode er at tage hensyn til og reducere risici, mere end sikring af "passiv" beskyttelse i tilfælde af en ulykke. Dette gælder fx krav til redundans på bro og i maskinen. Samtidig stilles der krav om definition af specielle operationsområder, herunder også krav om landbaserede faciliteter.

IMO har også udviklet en international kode for sikker skibsdrift (International Safety Management (ISM) Code), som stiller krav om at rederier skal have et sikkerhedsstyringssystem for rederiet og dets skibe. Sikkerhedsstyringssystemet skal bl.a. indeholde procedurer for skibets vedligeholdelse. Denne kode er obligatorisk for bl.a. højhastighedsfartøjer.

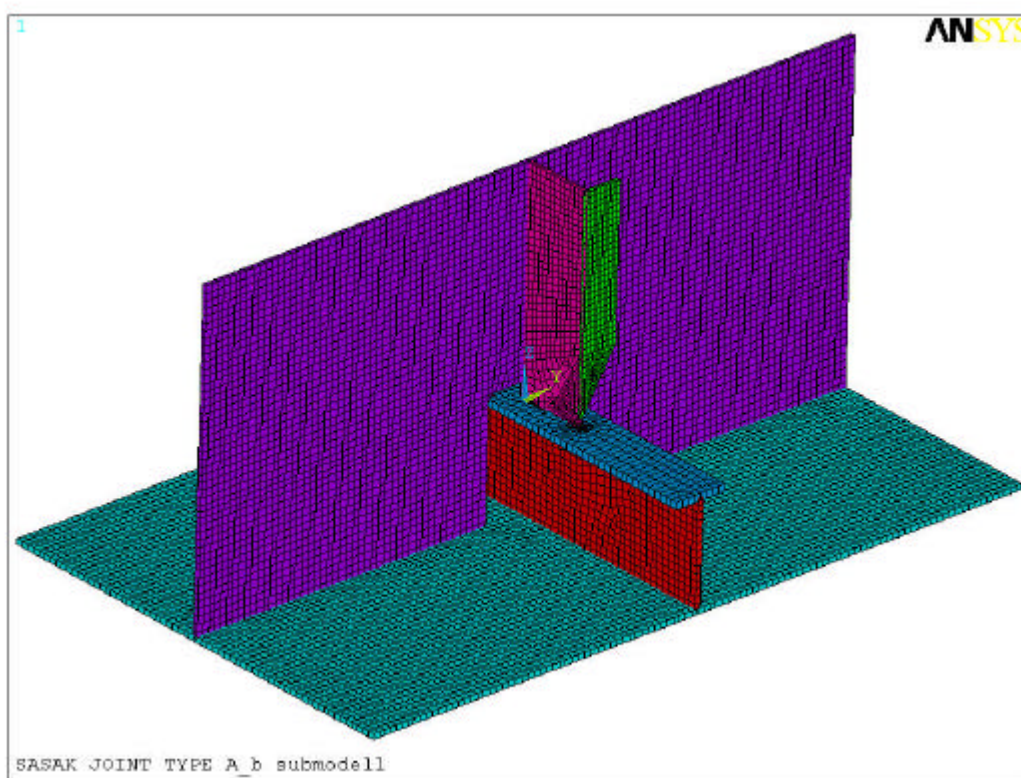
2.4 DIREKTE BEREGNINGSMETODER

I de fleste tilfælde kan designeren i stedet for at følge en beregningsprocedure fra normer eller regler vælge at anvende en såkaldt direkte beregningsmetode f.eks. FEM-beregninger.

Ved ”direkte beregningsmetoder” forstås almindeligvis numeriske metoder baseret på computerberegninger. Dette er betegnelsen for en bred vifte af metoder, som kan benyttes til såvel bestemmelse af belastninger som den strukturelle opførsel. Til bestemmelse af konstruktioners opførsel under en givet en belastning benyttes oftest den såkaldte ”Finite Element” (FE) metode.

FE metoden er baseret på at inddele konstruktionen i et antal elementer, som er indbyrdes forbundet med knudepunkter.

Figur 2.1, viser som eksempel en FE model af gennemføringen af en stiver gennem en plade. Alle elementer i denne model er firkantede pladeelementer med en knude i hvert hjørne. Til hvert af elementerne er knyttet materialedata og en teori for hvordan pladen opfører sig under belastning. For hele modellen skal endvidere specificeres, hvordan randene er fastholdt og hvilke ydre belastninger, der virker.



Figur 2.1 Eksempel på modellering af en afstivet plade med Finite Element metoden.

Ved hjælp af en computer er det muligt at løse ligningerne, der beskriver opførslen af elementerne. Resultatet er udbøjning af konstruktionen samt spændinger i materialet.

Elementerne i en FE model vælges efter den nødvendige detaljeringsgrad. Typiske elementer er:

1. Bjælkeelementer
2. Plade/skal elementer, evt. pladeelementer der tager højde for effekten af en stiver
3. Rumlige elementer (3D kasse-elementer)

Med en bjælkeelementer er det muligt at bestemme hvorledes kræfterne optages i en konstruktion på et ret overordnet niveau. For en skibskonstruktion kan en sådan model for eksempel benyttes til bestemmelse af snitkræfter i en tværskibsramme udsat for vandtryk. Ved at benytte pladeelementer kan detaljeringsgraden af spændingsbestemmelsen øges og det er for eksempel muligt at beregne spændingskoncentrationer omkring et hul eller en påsvejset stiver. Det er også muligt at beregne den såkaldte 'shear lag effect', d.v.s. den effektive flange af en bred plade på en stiver. Med 3D elementer kan detaljeringsgraden øges vilkårligt – den er kun begrænset af ressourcer til modelleringen. Det ville for eksempel være muligt at modellere en svejsning med detaljeret angivelse af materialedata og geometri.

Uanset valget af element-type og størrelse vil FE løsningen altid vil angive en gennemsnitlig opførsel af elementet. Dette bliver vigtigt senere i forbindelse med direkte beregninger af udmattelse.

Sådanne direkte styrkeberegninger med FE metoden kan benyttes til

- Bestemmelser af spændinger og udbøjninger under en given statisk belastning
- Konstruktionens opførsel under dynamiske belastninger, for eksempel bestemmelse af egenfrekvenser

Ofte skelnes mellem lineære og ikke-lineære beregninger. I de lineære beregninger antages små udbøjninger og materialet antages at være elastisk. I ikke-lineære beregninger kan der tages hensyn til store udbøjninger og rotationer samt at materialet belastes ud over den elastiske grænse og deformerer plastisk.

2.4.1 NØJAGTIGHED VED DIREKTE BEREGNINGER

Ved anvendelse af direkte beregningsmetoder er det vigtigt at huske, at intet beregningsresultat er mere nøjagtigt end belastningsfastsættelsen, og at netop belastningsfastsættelsen i mange tilfælde vil være forbundet med stor usikkerhed.

En kompliceret men meget nøjagtig FEM-beregning vil derfor i mange tilfælde ikke give mere rigtige resultater end en simpel bjælke-element model.

Proceduren er derfor altid først at vurdere den nøjagtighed, det er muligt at opnå på belastningsfastsættelsen, og derpå på basis af denne vurdering vælge den simplest mulige passende beregningsmetode. Dermed bliver antallet af fejlkilder reduceret mest muligt, og det bliver et overkommeligt og overskueligt arbejde at foretage en efterkontrol af beregningerne.

2.5 TILLADELIGE SPÆNDINGSNIVEAUER, EFFEKTIV FLANGE, BULING AF SØJLER OG STABILITET AF PLADEFELTER

2.5.1 GENERELT

3 grundlæggende forhold indgår i de følgende dimensioneringsregler for lateralt- og kantbelastede afstivede eller korrugerede pladepaneler:

- Det tilladelige spændingsniveau
- Den effektive flange
- Bulingsstabilitet af elementer med trykspændinger

2.5.2 DET TILLADELIGE SPÆNDINGSNIVEAU

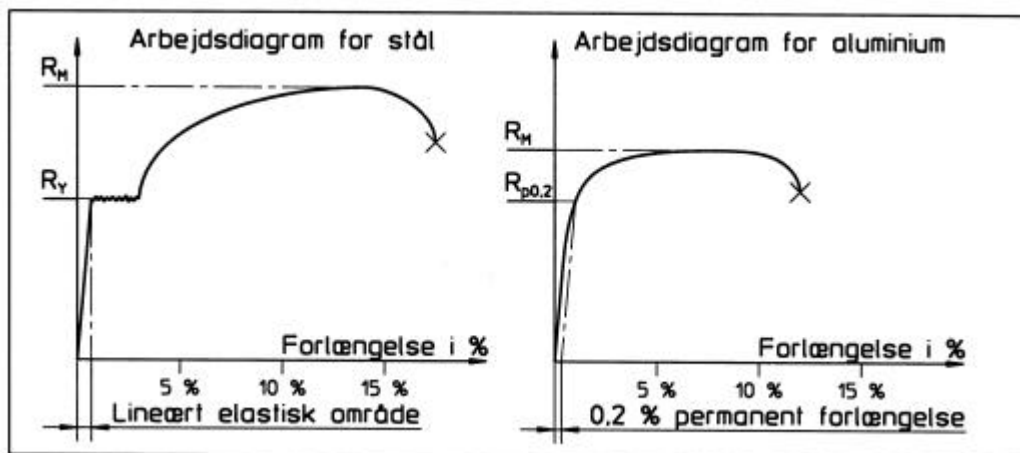
Ved dimensionering af konstruktioner i stål vil det normale dimensioneringskriterium være et spændingsniveau, der er en vis procentdel af flydespændingen.

Et sådant kriterium er fornuftigt, fordi stål ved et vist spændingsniveau – R_y – udviser en udpræget spændingsudlignende plastisk flydning, og fordi der efter flydningen stadig er relativt langt til brudspændingen R_m .

Aluminium udviser ikke denne flydning, men man taler alligevel om en såkaldt ”02 flydespænding” – $R_{p0,2}$ – der er defineret som den spænding, hvor der efter aflastning er en varig deformation på 0,2 %.

Da denne spænding ofte kun ligger lidt under brudspændingen, må man ved opstilling af et dimensionerings kriterium for aluminium tage hensyn til både flydespændingen og brudspændingen.

Figur 2.2 viser arbejdsdiagrammerne for stål og aluminium.



Figur 2.2 Arbejdsdiagrammer for stål og aluminium.

Det tilladelige spændingsniveau fremgår af de relevante regelsæt.

Til brug for en overslagsmæssig dimensionering kan værdierne fra klassifikationsselskabet DNV [1] f.eks. anvendes:

$$s_{till} = 160 \cdot f, \text{ hvor } f \text{ er den mindste værdi af } R_{p0,2}/235 \text{ eller } 0,7 R_m/235$$

($R_{p0,2}$ betegner 0,2% flydespændingen og R_m brudspændingen.)

Indsættes værdierne for f kan den maksimalt tilladelige normalspænding i en aluminiums konstruktion dermed (lidt afrundet) sættes til den mindste af følgende 2 værdier:

$$s_{till} = 0,65R_{p0,2}$$

eller

$$s_{till} = 0,5R_m$$

Den maximalt tilladelige forskydningsspænding kan sættes til:

$$t_{till} = \frac{s_{till}}{\sqrt{3}}$$

Defineres en referencespænding jvf. von Mises flydehypotese som:

$$s_e = \sqrt{(\sum s)^2 + 3(\sum t)^2}$$

kan den maximalt tilladelige referencespænding efter samme regelsæt sættes til:

$s_{e_{till}} = 180 \cdot f$, hvorved referencespændingen ved indsættelse af ovenstående værdier for f kan sættes til den mindste af følgende 2 værdier:

$$s_{e_{till}} = 0,73R_{p0,2}$$

eller

$$s_{e_{till}} = 0,56R_m$$

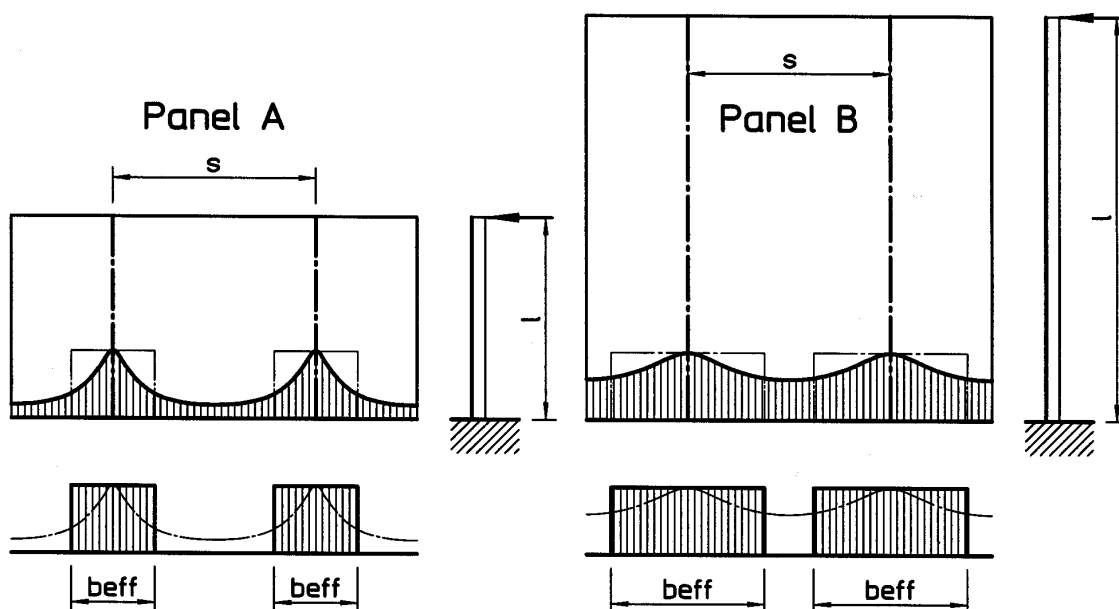
2.5.3 EFFEKTIV FLANGE

Teori

Ved afstivede eller korrugerede pladepaneller vil modstandsmoment og inertimoment af stivere, korrugeringer eller dragere være defineret som det aktuelle moment af stiveren eller drageren inklusive en vis såkaldt effektiv del af basispladen.

Figur 2.3 viser spændingsfordelingen i basispladen i profilernes retning langs de indspændte kanter af 2 forskellige paneller, der begge er lateralt belastede.

Panel A har et lavt forhold mellem stivernes længde l og deres indbyrdes afstand s , mens panel B har et højt forhold.



Figur 2.3 Spændingsfordeling i basispladen af 2 paneller med forskellige længde/bredde forhold.

Som det ses, er der stor forskel på spændingskurverne. Kurven for panel B er meget fladere end for panel A.

Jo højere forholdet l/s er, jo fladere vil kurven være.

Da spændingskurverne er vanskelige at håndtere i simple beregninger, erstattes de som regel af nogle beregningsmæssigt lettere håndterlige blokke, der har konstant spændingsniveau i en vis bredde.

Mellem blokkene antages spændingen at være = 0, se figur 2.3.

Blokkene konstrueres ved at indlægge vandrette tangentlinier gennem spændingskurvernes toppunkter, og beregne en effektiv bredde b_{eff} af blokkene således, at arealet af blokkene svarer til arealet under spændingskurven.

Det konstante spændingsniveau af blokkene kaldes den dimensionerende spænding.

Kombinationen af en effektiv pladebredde og den dimensionerende spænding vil derved give fornuftige beregningsresultater, selv om spændingen faktisk kun er korrekt i umiddelbar nærhed af stiveren.

Den effektive pladebredde \times tykkelsen af basispladen kaldes ”den effektive flange”.

Da spændingskurven teoretisk set aldrig bliver fuldstændig flad selv ved meget høje l/s -forhold, vil den effektive bredde heller aldrig blive lig stiverafstanden.

Tegnes en kurve over forholdet b_{eff}/s som funktion af forholdet l/s vil man derfor få en kurve, der nærmer sig asymptotisk til værdien 1.

I praksis indlægges de vandrette linier for blokkenes toppe imidlertid ikke nøjagtigt igennem spændingskurvernes toppe, men en smule under.

Det accepteres altså, at den dimensionerende spænding vil være en anelse lavere end den virkelige spidsværdi.

Dermed ”løftes” den asymptotiske kurve en smule således, at b_{eff} kan regnes lig s for forhold l/s højere end en vis grænse.

Praksis

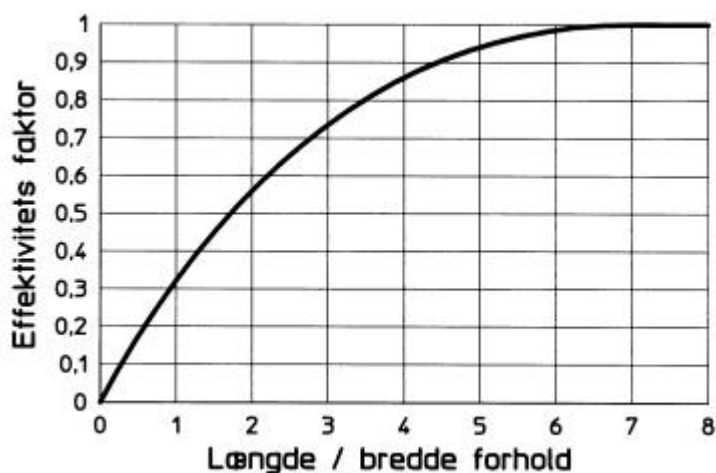
De forskellige regelsæt for dimensionering af aluminiums konstruktioner har hver deres metode til fastsættelse af den effektive bredde.

De fleste metoder giver imidlertid nogenlunde samme resultat.

Kurven i Figur 2.4 er opstillet som et kompromis på basis af regelsæt fra klassifikations selskaberne: Lloyds Register og Det Norske Veritas.

På basis af længde/bredde forholdet viser kurven en effektivitetsfaktor, der angiver, hvor stor en del af stiver- eller drager afstanden, der kan regnes som effektiv.

Kurven gælder naturligvis kun under forudsætning af, at basispladen forbliver stabil. Mere om emnet stabilitet kan læses i afsnittet om bulings teori.



Figur 2.4 Effektiv flange.

Som det ses af Figur 2.4 er effektivitetsfaktoren 1 for længde/bredde forhold omkring 6 og derover.

Da stivere normalt vil være 4 – 6 gange længere end stiverafstanden, vil man i praksis ofte kunne regne den effektive flangebredde for stivere = stiverafstanden.

Som en tommelfingerregel bør den effektive bredde ikke regnes højere end 60 x pladetykkelsen, med mindre der er foretaget en stabilitetsanalyse for at sikre mod lokalbulning af pladen – se underafsnittet 2.5.6 om stabilitet af pladefelter.

2.5.4 BULINGSTEORI – GENERELT

Buling er instabilitet af et element forårsaget af et trykspændingsniveau, der overskrider en vis kritisk værdi.

Buling kan enten være elastisk eller plastisk.

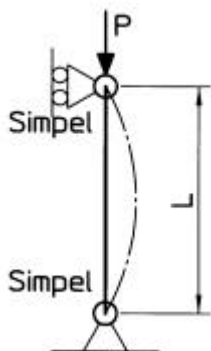
Ved elastisk buling vender konstruktionen tilbage til sin oprindelige facon efter aflastning.

Ved plastisk buling vender konstruktionen ikke tilbage til sin oprindelige facon, fordi visse dele har været udsat for spændinger, der har været større end flydespændingen.

Ved normale konstruktioner vil man tilstræbe altid at arbejde i det elastiske område, så derfor vil der i det følgende blive fokuseret på elastisk buling.

2.5.5 BULING AF SØJLER

Det enkleste standard tilfælde, når vi taler buling, er at se på en helt perfekt søjle, der er simpelt understøttet i begge ender og fuldstændig centralt belastet – se Figur 2.5.



Figur 2.5 Simpelt søjle.

Den maximalt tilladelige normalspænding σ_{till} for en sådan søjle kan udtrykkes ved den såkaldte

$$\sigma_{\text{till}} = \frac{P^2 E}{\left(\frac{L}{r}\right)^2}$$

”Euler-formel” [2]:

hvor:

E = elasticitetsmodulet

L = søjlens længde

$$r = \text{inertiradius} = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

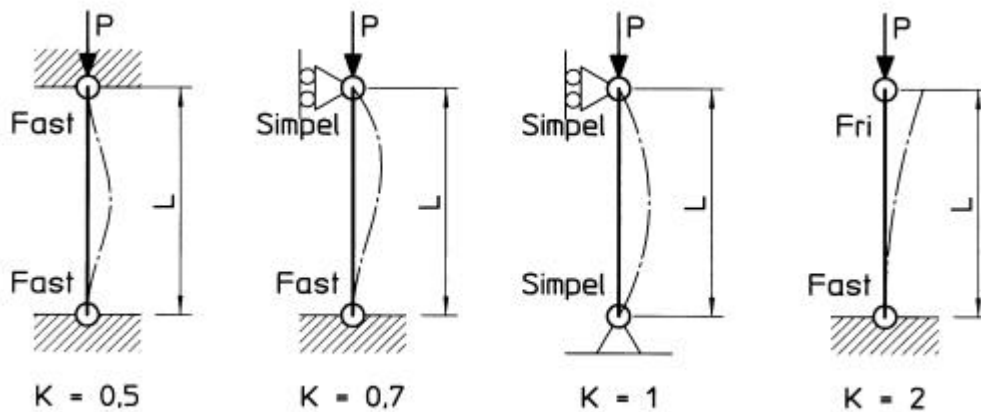
hvor I = søjlens inertimoment om 2. hovedakse dvs. på den svageste led

og A = søjlens effektive tværsnitsareal

Forholdet L/r kaldes slankhedsforholdet og betegnes med λ .

Lange tynde søjler har et højt slankhedsforhold – korte tykke et lavt forhold.

Dette grundlæggende standard tilfælde kan udvides til at omfatte andre indspændingsforhold ved at indføre en korrektionsfaktor "K" på søjlens længde – se Figur 2.6.



Figur 2.6 Korrektionsfaktor K ved forskellige indspændingsforhold

Ved at gange søjlens længde "L" med korrektionsfaktoren "K" fås den effektive søjlelængde $L_{\text{eff}} = KL$ [2].

Euler-formlen kan herefter omskrives til:

$$s_{\text{till}} = \frac{P^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} = \frac{P^2 E}{\left(\frac{L_{\text{eff}}}{r}\right)^2} = \frac{P^2 E}{(I_{\text{eff}})^2}$$

Hvor λ_{eff} er det effektive slankhedsforhold baseret på den effektive længde.

Gøres Euler-formlen dimensionsløs ved at dividere med flydespændingen $R_{p0,2}$ fås:

$$\frac{s_{\text{till}}}{R_{p0,2}} = \frac{P^2 E}{R_{p0,2} (I_{\text{eff}})^2}$$

Den dimensionsløse Euler-kurve kan ses på Figur 2.7.

Problemet med Euler-kurven er, at den ikke tager hensyn til, at den maksimalt tilladelige spænding ikke må overskride flydespændingen $R_{p0,2}$.

Det slankhedsforhold, hvor forholdet mellem den tilladelige spænding σ_{till} og flydespændingen $R_{p0,2}$ netop er lig 0,5 betegnes som " λ_c " (se Figur 2.7).

Indsættes $\sigma_{till}/R_{p0,2} = 0,5$ i den dimensionsløse Euler-formel fås:

$$0,5 = \frac{\mathbf{P}^2 E}{R_{p0,2} (\mathbf{I}_c)^2} \Rightarrow$$

Ligning 2.1:

$$\mathbf{I}_c = \sqrt{\frac{2\mathbf{P}^2 E}{R_{p0,2}}}$$

Ligning 2.1 kan omskrives til:

$$\frac{\mathbf{P}^2 E}{R_{p0,2}} = \frac{(\mathbf{I}_c)^2}{2}$$

Indsættes denne værdi i formlen for den dimensionsløse Euler-kurve, kan denne omskrives til:

$$\frac{\mathbf{s}_{till}}{R_{p0,2}} = \frac{(\mathbf{I}_c)^2}{2(\mathbf{I}_{eff})^2}$$

For effektive slankhedsforhold under λ_c erstattes Euler-kurven med en parabolisk kurve, der tager hensyn til, at spændingen ikke må overstige flydespændingen $R_{p0,2}$:

$$\frac{\mathbf{s}_{till}}{R_{p0,2}} = 1 - \frac{(\mathbf{I}_{eff})^2}{2(\mathbf{I}_c)^2}$$

Herved fås en korrigeret Euler-kurve, der består af 2 delkurver: den oprindelige Euler-kurve for slankhedsforhold λ_{eff} større end λ_c og den paraboliske kurve for lavere slankhedsforhold – se Figur 2.7.

Den korrigerede Euler-kurve er imidlertid stadig for optimistisk, idet den ikke tager hensyn til geometriske imperfektioner, ikke perfekt centreret last, residualspsændinger etc., så der bør indføres en sikkerhedsfaktor.

For stål foreslår ”The American Institute of Steel Construction” (AISC), at der for slankhedsforhold $\lambda_{eff} < \lambda_c$ anvendes følgende sikkerhedsfaktor ” n_1 ” [2]:

$$n_1 = \frac{5}{3} + \frac{3\mathbf{I}_{eff}}{8\mathbf{I}_c} - \frac{(\mathbf{I}_{eff})^3}{8(\mathbf{I}_c)^3}$$

For slankhedsforhold $\lambda_{\text{eff}} > \lambda_c$ anbefales sikkerhedsfaktoren "n₂"[2]:

$$n_2 = \frac{23}{12}$$

For aluminium anbefales en sikkerhedsfaktor på mindst 2 for alle slankhedsforhold, hvilket altså - specielt for de lave slankhedsforhold - er lidt højere end for stål.

For slankhedsforhold $\lambda_{\text{eff}} < \lambda_c$ bliver ligningen for den parabolisk korrigerede Euler-kurve inklusiv en sikkerhedsfaktor på 2 dermed:

Ligning 2.2 – Korrigeret ligning inkl. sikkerhed for slankhedsforhold $\lambda_{\text{eff}} < \lambda_c$:

$$\frac{\sigma_{\text{till}}}{R_{p0,2}} = 0,5 - \frac{(\lambda_{\text{eff}})^2}{4(\lambda_c)^2}$$

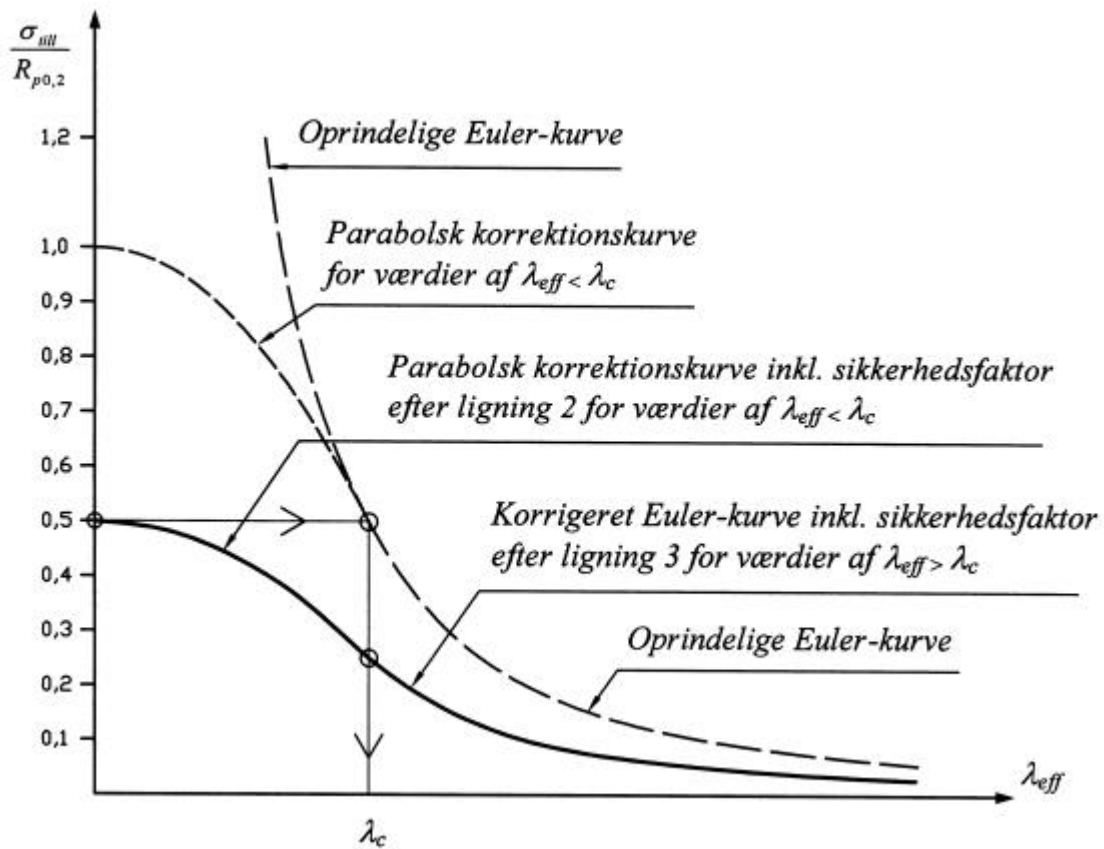
For slankhedsforhold $\lambda_{\text{eff}} > \lambda_c$ bliver ligningen for Euler-kurven inklusiv en sikkerhedsfaktor på 2:

Ligning 2.3 – Korrigeret ligning inkl. sikkerhed for slankhedsforhold $\lambda_{\text{eff}} > \lambda_c$:

$$\frac{\sigma_{\text{till}}}{R_{p0,2}} = \frac{(\lambda_c)^2}{4(\lambda_{\text{eff}})^2}$$

Figur 2.7 viser en grafisk præsentation af den oprindelige Euler-kurve, den paraboliske korrektionskurve samt Ligning 2.2 og Ligning 2.3.

De korrigerede kurver (fuldt optrukne) viser altså den tilladelige spænding σ_{till} i forhold til flydespændingen $R_{p0,2}$ på basis af det effektive slankhedsforhold λ_{eff} .



Figur 2.7 Grafisk præsentation af de korrigerede ligninger

Eksempel 1 – beregning af en søjle:

En rund, hul søjle har en længde $L = 2500$ mm og er fast indspændt i begge ender.

Søjleens yderdiameter D er 100 mm og godstykkelsen er 7 mm.

Den valgte legering har en 0,2-flydespænding $R_{p0,2} = 150$ N/mm².

Søjlen skal bære en last P på 140 kN (ca. 14 tons).

Det undersøges om søjlen er dimensioneret korrekt.

Inertimomentet I :

$$I = \frac{P}{64}(D^4 - d^4) = \frac{P}{4}(100^4 - 86^4) = 2,22 \cdot 10^6 \quad [mm^4]$$

Tværsnitsarealet A :

$$A = \frac{P}{4}(D^2 - d^2) = \frac{P}{4}(100^2 - 86^2) = 2045 \quad [mm^2]$$

Inertiradius r :

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{2,22 \cdot 10^6}{2045}} = 33 \quad [mm]$$

Søjleens effektive længde $L_{\text{eff}} = KL = 0,5 \times 2500 = 1250$ mm (se Figur 2.6).

Det effektive slankhedsforhold $\lambda_{\text{eff}} = L_{\text{eff}}/r = 1250/33 = 38$

$$I_c = \sqrt{\frac{2P^2 E}{R_{p0,2}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot P^2 \cdot 7 \cdot 10^4}{150}} = 96$$

Da $\lambda_{\text{eff}} < \lambda_c$ skal Ligning 2.2 anvendes.

Indsættes værdierne for λ_{eff} og λ_c i denne formel fås:

$$\frac{s_{\text{till}}}{R_{p0,2}} = 0,5 - \frac{(I_{\text{eff}})^2}{4(I_c)^2} = 0,5 - \frac{(38)^2}{4(96)^2} = 0,46$$

Den tilladelige spænding σ_{till} bliver altså $150 \times 0,46 = 69$ N/mm².

Den aktuelle spænding $\sigma_{\text{akt}} = P/A = 140000/2045 = 68,5$ N/mm².

Da $\sigma_{\text{akt}} < \sigma_{\text{till}}$ er søjlen altså lige netop forsvarligt dimensioneret.

2.5.6 LOKAL STABILITET AF PLADEFELTER

Den kritiske bulespænding σ_{cr} for et plant pladefelt som vist på Figur 2.8, der er simpelt understøttet langs kanten og udsat for én-akset kanttryk kan udtrykkes som [3]:

$$\sigma_{cr} = \frac{p^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot s^2 \cdot (1 - \nu)^2} \left(1 + \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right)^2$$

hvor:

E = elasticitetsmodulet

t = pladetykkelsen

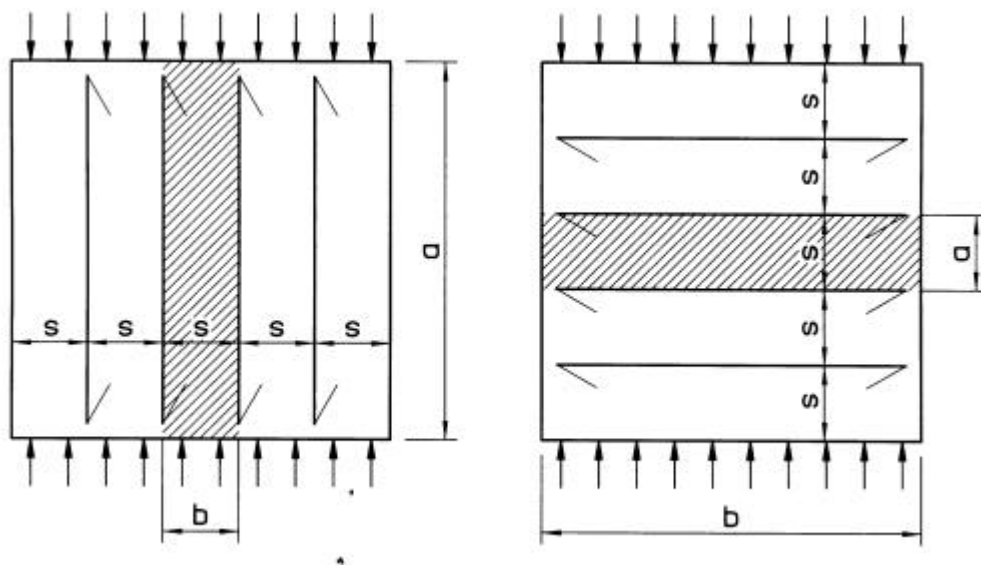
s = stiverafstanden (den korteste led af pladefelterne)

ν = poisson's forhold

a = panelets længde i retning parallelt med spændings retningen

b = panelets længde i retning vinkelret på spændings retningen

Forholder a/b må ikke regnes højere end 1.



Figur 2.8 Simpelt pladefelt med én-akset spænding

Indsættes de typiske værdier for aluminium ($E = 7 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$ og Poisson's forhold = 0,3) i ovenstående formel fås:

$$\sigma_{cr} = 6,3 \cdot 10^4 \left(\frac{t}{s} \right)^2 \left(1 + \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right)^2 \text{ [N/mm}^2 \text{]}$$

For et **vandret afstivet pladefelt** som vist på Figur 2.9 svarer det lodrette mål "a" til stiverafstanden "s".

Formlen forudsætter simpel understøtning langs pladefeltets kanter, men denne antagelse er lidt for konservativ. Ved vandret afstivede pladefelter vil stiverne, hvis de er forbundet til webberne, give en vis indspænding pga. torsionsstivheden og dermed en højere bulingsstyrke af pladefelterne. Derfor er det fornuftigt at indføre en korrektionsfaktor "c", der tager højde for torsionsstyrken af stiverne.

Herved kan formelen omskrives til:

Ligning 2.4 – Kritisk bulespænding for vandret afstivede støtteskodder i aluminium:

$$s_{cr} = 6,3 \cdot 10^4 \cdot c \cdot \left(\frac{t}{s}\right)^2 \left(1 + \left(\frac{s}{b}\right)^2\right)^2 [N/mm^2]$$

hvor:

t = pladetykkelsen i [mm]

s = stiverafstanden i [mm]

b = webafstanden i [mm] eller afstanden fra webben til en evt. bulestiver

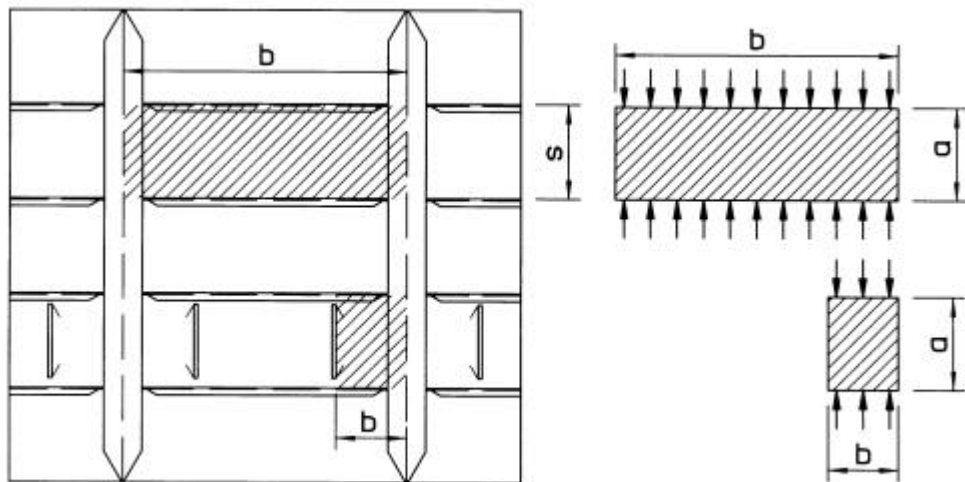
c = 1,2 for stivere i L- eller T-profiler, der er forbundet til webberne [4]

1,1 for bulbprofiler, der er forbundet til webberne

1 for fladprofiler og stivere, der ikke er forbundet til webben

Forholdet s/b må ikke regnes større end 1.

Er b < s er der lokalt tale om et lodret afstivet pladefelt.



Figur 2.9 Vandret afstivet pladefelt

For **lodret afstivede pladefelter** som vist på Figur 2.10 kan formelen for buling forenkles, idet forholdet a/b kan indsættes som max. værdien 1, hvorved det sidste led af formelen bliver = 4.

Torsionsstyrken af stiverne har ved lodret afstivede pladefelter ikke den store betydning hvilket betyder, at korrektion for stivertypen (som for vandret afstivede paneler) ikke er relevant.

Herved kan ligningen for den kritiske bulespænding forenkles til:

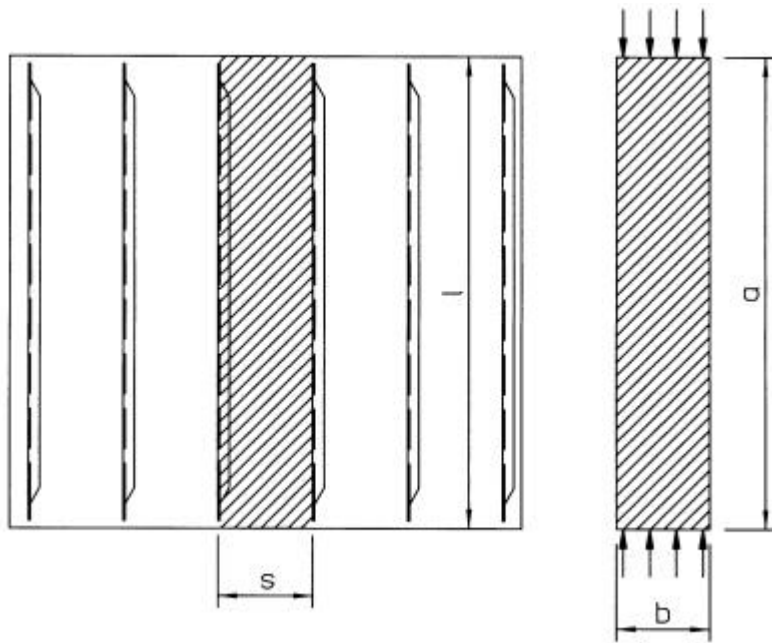
Ligning 2.5 – Kritisk bulespænding for lodret afstivede støtteskodder i aluminium:

$$s_{cr} = 25,2 \cdot 10^4 \left(\frac{t}{s} \right)^2 [N/mm^2]$$

hvor:

t = pladetykkelsen i [mm]

s = stiverafstanden i [mm]

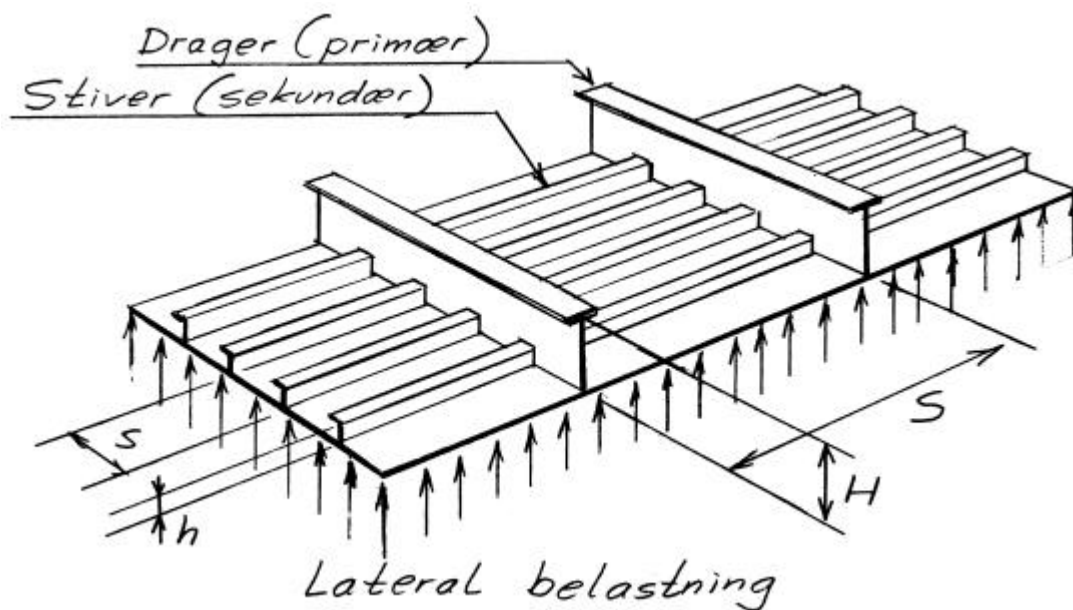


Figur 2.10 Lodret afstivet pladefelt

2.6 DIMENSIONERING OG UDFORMNING AF LATERALT BELASTEDE AFSTIVEDE PLADEFELTER

2.6.1 INDLEDNING

Udtrykket "lateralt belastede afstivede pladefelter" dækker over et typisk pladefelt, som vist på Figur 2.11 belastet med en jævnt fordelt belastning vinkelret på pladefeltet.



s = Afstanden mellem parallelle (sekundære) stivere

S = Afstanden mellem bærende (primære) dragere eller webrammer

h = Højden af de sekundære stivere

H = Højden af dragere eller webrammer

Figur 2.11 - Typisk lateralt belastet afstivet pladefelt

Dimensioneringen af et sådant pladefelt afhænger i høj grad af anvendelsesområdet og det tilhørende relevante regelsæt, hvilket er beskrevet i afsnittet om normer og standarder.

Af samme årsag indeholder afsnit 2.6 om: "Dimensionering af lateralt belastede afstivede pladefelter" ikke indeholde specifikke dimensioneringsregler, men give en række "tommelfingerregler" og eksempler på "Good Practise Design" således, at designeren hurtigst muligt spores ind på den rigtige løsning.

2.6.2 GEOMETRISK UDFORMNING AF PLADEPANELER

Aluminiums elasticitetsmodul er som tidligere nævnt kun ca. 1/3 af ståls.

Dette forhold betyder, at udbøjningerne (eller deformationerne) af et aluminiumspanel udført med samme geometriske udformning som det tilsvarende stålpanel vil blive 3 gange så stor.

Derfor er det en god idé at placere stiverne noget tættere og anvende lidt højere profiler, end hvis der var tale om stål.

Nedenstående Tabel 2.1 Sammenligning mellem geometrien af et panel i stål og det tilsvarende i aluminium viser tommelfingerregler for hvor stor stiverafstanden bør være på et panel i aluminium sammenlignet med det tilsvarende i stål.

Tabel 2.1 Sammenligning mellem geometrien af et panel i stål og det tilsvarende i aluminium.

	Stål	Aluminium
Stiverafstand	s	0,5 s
Dragerafstand	S	0,6 S
Højde af stivere	h	1.3 h
Højde af dragere	H	1.2 H

Ved valg af stiverafstand på svejste paneler står designeren altid i det dilemma, at en tæt stiverplacering, små stivere og tynd plade generelt vil give det letteste, men til gengæld også dyreste panel, idet der vil være mange elementer og svejsemeter.

Derfor må stiverafstanden altid blive et kompromis.

En undtagelse for dette er, hvis der anvendes ekstruderede profiler, hvor stiverne er udført i ét stykke med pladen. Så betyder flere stivere kun et marginalt dyrere presseværktøj, men ikke flere svejsemeter og dermed dyrere produktion. Mere om dette i afsnit 2.11 om ekstruderede profiler.

2.6.3 VALG AF PROFIL TYPE

Ved valg af profil type til stivere er situationen lidt anderledes end for stål dels på grund af forskellene i materiale styrke og stivhed og dels fordi det i mange tilfælde ikke er nødvendigt at male aluminiums profiler.

Stål profiler, der er velegnede som afstivninger af et pladefelt findes typisk i 4 forskellige udførelser, der alle fremstilles ved valsning – se Figur 2.12.

- Fladjern, der er et profil med et rent rektangulært tværsnit.
- Vinkeljern
- T-profiler

- Bulb-profiler, der i principper er en slags vinkeljern hvor flangen er mere klumpformet.



Figur 2.12 Geometri af forskellige typiske profiler

Den normale prioritets rækkefølge når der er tale om stålkonstruktioner vil være:

1. Bulb-profiler, fordi disse har det bedste styrke/vægt forhold, er lette at forbinde til den omkringliggende struktur, kun kræver relativt smalle udkap og sidst men ikke mindst er lette at male på alle sider.
2. 2. prioritet vil normalt være vinkeljern, men de er tungere end bulb'erne ved samme styrke og flangen kan være uhyre vanskelig/tidskrævende at male på undersiden.
3. T-profilerne er knap så lette at forbinde til den omkringliggende struktur (inkl. udkap) som vinkeljernene, men har i nogle tilfælde styrkemæssige fordele fordi forskydnings centret ligger i kroppladen, hvilket mindsker tendensen til kæntring.
4. Fladjern er billige og nemme at montere og male, men den frie kant vil i de fleste tilfælde ikke være stiv nok i sideværts retning. Små bulb profiler vil i langt de fleste tilfælde være et meget bedre valg, men de kan til gengæld være betydeligt sværere at skaffe.

Der ud over kan adkomstforhold i forbindelse med svejsning også være en væsentlig parameter i forbindelse med valg af profil type.

Ved aluminiumskonstruktioner vil der normalt prioriteres lidt anderledes.

Dels er det ofte ikke er nødvendigt at male profilerne (hvorved noget af argumentationen mod vinkeljern og T-profiler falder bort) og dels medfører det ringere elasticitetsmodul en større tendens til udbøjning af flangen i sideværts retning.

Denne udbøjningstendens kan med fordel udbalanceres ved anvendelse af et profil med en lidt bredere flange, så profilet får større inertimoment i sideværts retning.

Prioritets rækkefølgen for aluminiums profiler kunne derfor se således ud:

1. T- eller vinkelprofiler
2. Bulbprofiler
3. Fladprofiler

Ved udformningen af de enkelte profilers tværsnit er det desværre mere reglen end undtagelsen, at tværsnittet er taget direkte fra det tilsvarende stålprofil uden hensyntagen til forskellene i materiale egenskaber.

Da aluminium imidlertid let kan ekstruderes i stort set hvilken facon, man ønsker, kan der kun opfordres til kreativitet ved valg af profil type.

F.eks. ville en mellemting mellem de typiske stål bulbprofiler og vinkelprofiler være en oplagt løsning med bulb'ernes fordele kombineret med en lidt bredere flange for bedre sidestivhed.

2.6.4 DIMENSIONERING AF PLADEPANELER

Som beskrevet i afsnit 2.3 om normer og standarder og deres anvendelsesområder, vil enhver aluminiumskonstruktion afhængig af sit anvendelsesområde skulle dimensioneres efter et bestemt regelsæt.

Det er derfor ikke hensigten med dette afsnit at give præcise dimensioneringsregler, men derimod nogle enkle beregningsformler, der kan give et hurtigt gæt på nogle rimelige dimensioner, der f.eks. kan bruges i forbindelse med en foreløbig vægtberegning eller til et check af størrelsesordenen for dimensioner beregnet efter andre regelsæt.

Forudsætningen for at kunne benytte formlerne er, at der er tale om et panel med kontinuerte parallelle stivere, der passerer en række understøtningspunkter.

Stiverlængden (afstanden mellem understøtningspunkterne) skal være større end 4 x stiverafstanden, og der skal være tale om en jævnt fordelt ensartet belastning over hele panelet. Ved punktbelastninger f.eks. fra lastbilers hjul må der anvendes andre dimensionerings metoder.

Det skal også bemærkes, at formlerne er opstillet som en slags kompromis mellem de forskellige regelsæt fra klassifikationsselskaberne. Således vil de beregnede dimensioner være lidt kraftigere, end hvis de var beregnet efter reglerne for lette og hurtige fartøjer, der giver de laveste dimensioner; men til gengæld en smule svagere end hvis de var beregnet efter

de normale regler for store skibe. Pladetykkelsen "t" i [mm] kan estimeres til [4]:

$$t = \frac{s \cdot \sqrt{p}}{40 \cdot \sqrt{\sigma}} + 0.5$$

hvor:

s = stiverafstanden i [mm]

p = det jævnt fordelte tryk i [kN/m²]

σ = den tilladelige spænding i [N/mm²] taget som den mindste af to værdier:

0.65 x R_{p0,2} eller 0.5 x R_m hvor:

R_{p0,2} = 0,2% flydespændingen

R_m = brudspændingen

Kravet til stiverens modstandsmoment "W" i [mm³] kan estimeres til [4]:

$$W = \frac{100 \times l^2 \times s \times p}{s}$$

hvor:

l = stiverens længde i [m]

Kravet til forskydningsarealet " A_f " i [mm^2] kan udregnes på basis af den tilladelige forskydningsspænding som angivet i det generelle afsnit om tilladelige spændinger eller i dette tilfælde sættes til:

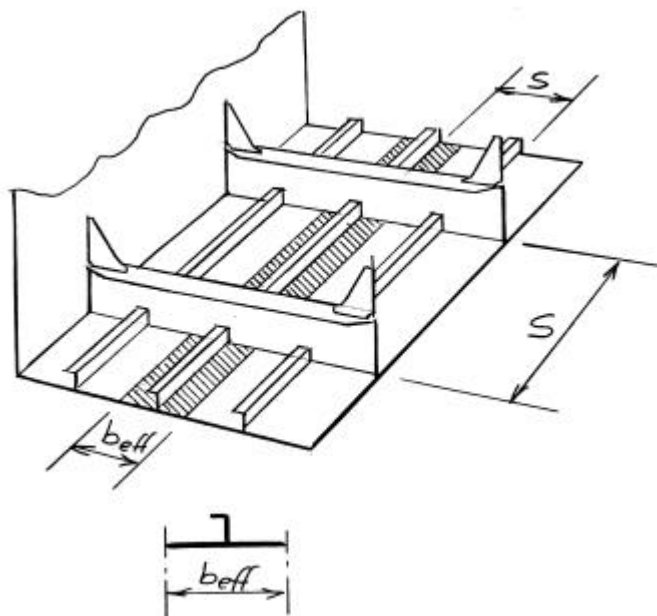
$$A_f = \frac{\sqrt{3} \cdot l \cdot s \cdot p}{2 \cdot s}$$

Effektiv flange

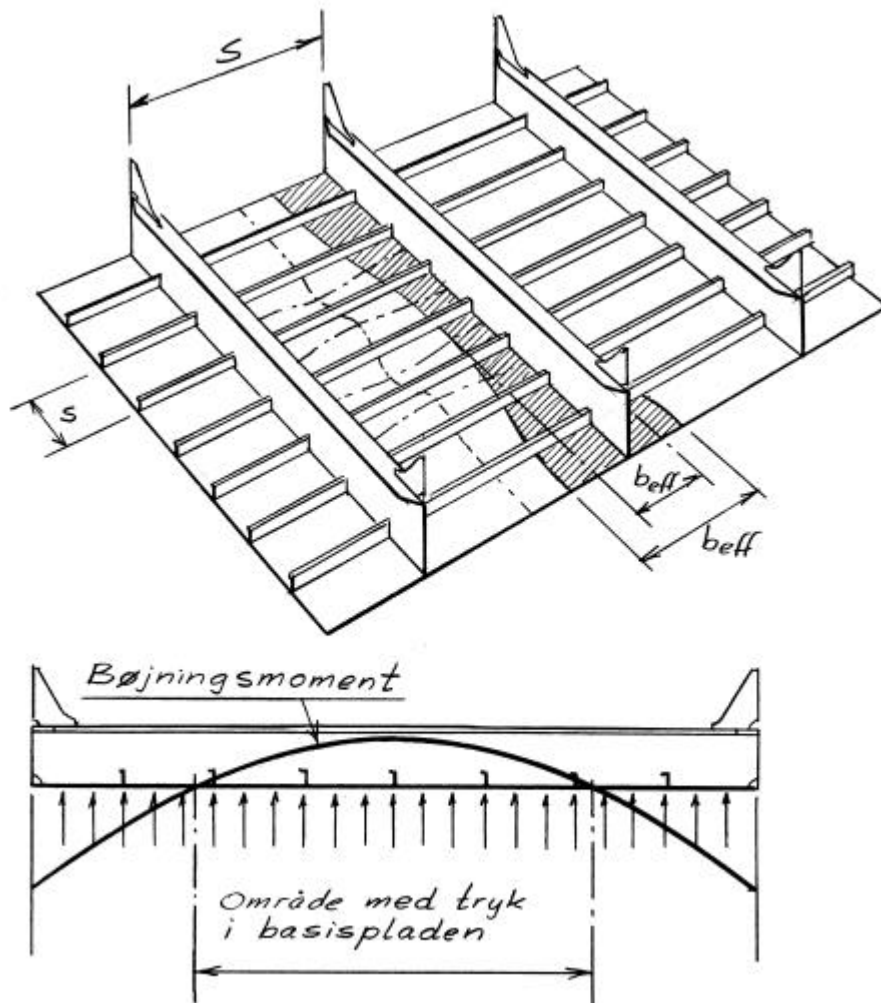
Som beskrevet i det generelle afsnit om effektiv flange medregnes en vis effektiv del af basispladen " b_{eff} " i modstandsmoment af stivere og dragere.

Det kræver selvfølgelig, at basispladen er stabil og ikke buler indenfor denne bredde.

Figur 2.13 og Figur 2.14 viser den effektive flange af henholdsvis en stiver og en drager.



Figur 2.13 Effektiv flange af stiver



Figur 2.14 Effektiv flange af drager

På grund af stivernes indbyrdes tætte afstand vil basispladen normalt være stabil med hensyn til buling i stivernes retning.

Dette er ikke tilfældet for drageren.

Ser man på momentkurven som vist på Figur 2.14 vil basispladen i forbindelse med bøjning af drageren være udsat for træk og derfor være stabil ved understøtningerne i siden.

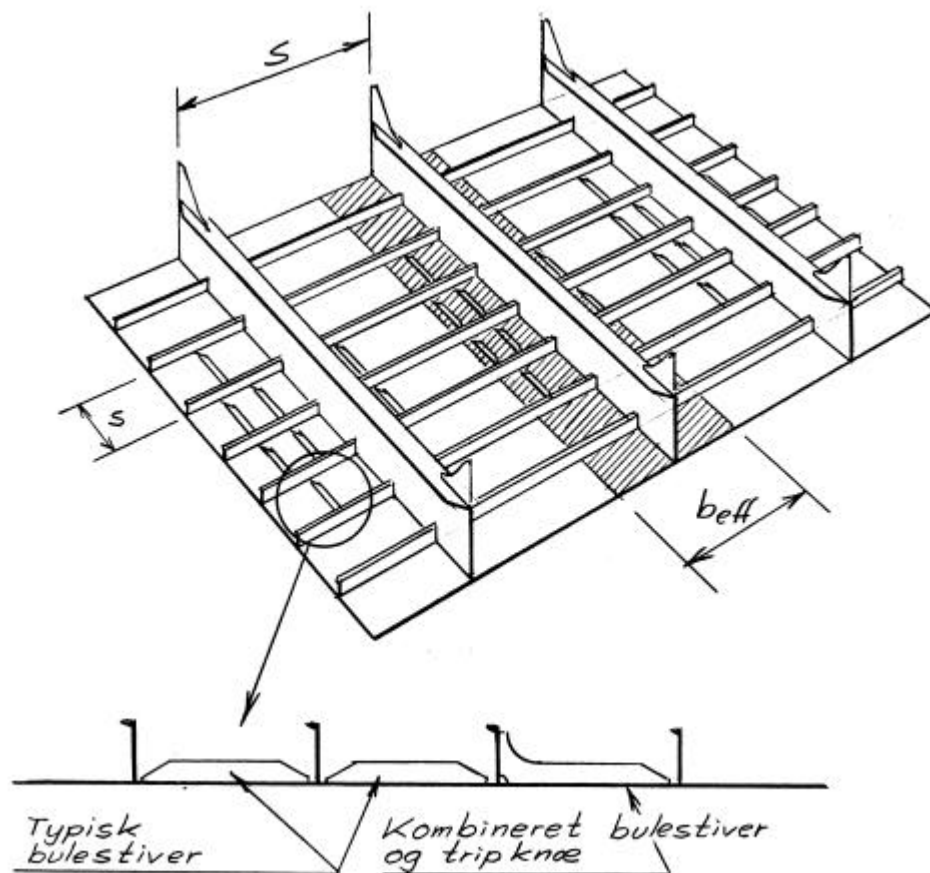
På midten af drageren vil den imidlertid være i tryk og derfor som alle trykpåvirkede elementer have tendens til instabilitet.

Den del af basispladen, der ligger lige op ad drageren, vil altid være stabil, men jo længere væk man kommer, jo lavere bliver den kritiske bulespænding.

Kun den del af pladen, hvor trykspændingen er lavere end den kritiske bulespænding, kan indregnes i den effektive bredde.

Dette forhold bevirker, at den effektive flangebredde specielt ved tynde plader må regnes noget smallere på midten af drageren end i siderne.

For af afhjælpe dette vil det ofte kunne betale sig at indsætte bulestivere parallelt med drageren i de områder, hvor der er trykspændinger – se Figur 2.15.



Figur 2.15 Bulestivere for forøgelse af den effektive flangebredde

Dette er fuldstændig analogt til bulestivere på et vandret afstivet støtteskod.

For beregning af pladefeltets stabilitet, skal der derfor henvises til dette afsnit.

Jo større trykspændinger, jo tættere skal stiverne sidde for at holde basispladen stabil.

Da bulestiverne udelukkende har til opgave at holde basispladen stabil, vil de kunne fremstilles i et lille fladprofil, der snipes 30° af i begge ender og blot behøver at blive hæftesvejst.

Ved anvendelse af bulestivere bliver den samlede konstruktion betydeligt lettere end hvis basispladens tykkelse alternativt var øget tilstrækkeligt til, at den blev stabil.

Bulestivere kan kombineres med tripknæ således, at de får en dobbeltfunktion, idet de både forhindrer buling af basispladen men også torsions kæntring af stiverne.

Denne løsning er dog noget dyrere at producere og anvendes derfor kun i de specielle tilfælde, hvor der er problemer med stabiliteten af stiveren.

Når der tales om effektiv flange, antages den dimensionerende spænding (som beskrevet i det generelle afsnit om effektiv flange), at være konstant i hele den effektive flangebredde, idet der anvendes en blokkurve i stedet for den virkelige spændingskurve.

Tæt ved dragerens kropplade vil denne dimensionerende spænding være tæt på den virkelige værdi, men jo længere væk, man kommer, jo lavere vil den faktiske spænding være i forhold til den dimensionerende – se f.eks. Figur 2.3.

Afstanden mellem bulestiverne, som vist på Figur 2.15, optimeres imidlertid normalt således, at den kritiske bulespænding af pladefelterne mellem stiverne svarer til den dimensioneringsmæssige spænding (og ikke den lidt lavere virkelige spænding ved bulestiverne). Derved indbygges en vis sikkerhedsfaktor.

2.6.5 “SUNDE” DIMENSIONER

Hvis et pladepanel skal være ”sundt” skal de forskellige elementer stå i et vist fornuftigt forhold til hinanden.

Det er f.eks. ikke rimeligt at svejse et profil med en kroppladetykkelse på 10 mm på en kun 5 mm tyk plade eller at anvende 300 mm høje profiler ved en stiverafstand på kun 200 mm.

Med udgangspunkt i stiverafstanden s vil relationerne som angivet i tabellen herunder være rimelige, men det må understreges, at formlerne kun er retningsgivende. Specielle forhold f.eks. i forbindelse med ekstruderede profiler kan betyde, at det vil være fornuftigt at fravige de opstillede regler i Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Tommelfingerregler for dimensionering af et afstivet pladefelt.

Maksimal tykkelse af basispladen	t_p	$s/60$
Maksimal højde af stivere	h_w	$\frac{2 \cdot s}{3}$
Tykkelse af stiverens kropplade	t_w	$0,8 \cdot t_p \leq t_w \leq 1,2 \cdot t_p$
Tykkelse af asymmetriske flanger	t_f	$t_w \leq t_f \leq 2 \cdot t_w$
Tykkelse af symmetriske flanger	t_f	$t_w \leq t_f \leq 4 \cdot t_w$
Maksimal længde af stivere mellem understøtninger	1	$\sqrt{5000 \cdot s}$

2.6.6 STABILITET AF STIVERE OG DRAGERE

Ved dimensionering af lateralt belastede pladefelter er det ikke nok, at modstands- og inertimomentet af stivere og dragere er tilstrækkeligt.

Lige så vigtigt er det at sikre sig, at stivere og dragere er stabile og ikke kæntrer eller buler – med andre ord er elastisk stabile.

Ved check af stabiliteten skelnes mellem den primære struktur dvs. de store bærende elementer som f.eks. dragere og webammer og den sekundære struktur dvs. stiverne.

Stabilitet af sekundær struktur (stivere)

Den væsentligste type af elastisk instabilitet for den sekundære struktur dvs. stiverne er ”tripping”.

Tripping er torsionskollaps sideværts af en stiver, når pladen, denne stiver sidder på, er under lateral- eller ”søjlebelastning” som beskrevet i afsnit 2.7 om dimensionering og udformning af støtteskodder.

Normalt vil stabilitet af selve stiverens kropplade ikke være noget problem.

Tripping forekommer hyppigst ved:

- asymmetrisk tværsnit af stiver
- stigende krumning af pladen
- når stiverens frie flange er i tryk
- hvor der er maximum bøjningsmoment

Sammenlignes vinkelprofiler med T-profiler (med samme flange) med hensyn til stabilitet kan man sige, at vinkelprofilerne vil have det største inertimoment og dermed den største stabilitet i sideværts retning, hvilket umiddelbart burde være en fordel.

Denne fordel opvejes imidlertid af, at vinkelprofilet ikke har forskydningscentret placeret i kroppladen, og derfor vil have en tendens til at kæntrre som følge af belastningen.

Da de fleste pladepaneller har en belastning, der er en kombination af lateral belastning og belastning i planet i stiverens retning, vil den generelle anbefaling være:

- Anvend T- eller bulbprofiler, hvis belastningen overvejende er lateral.
- Anvend vinkel-profiler, hvis belastningen overvejende består af søjlebelastning i planet i stiverens retning (se afsnittet om pladepaneller belastede i planet).

De forskellige regelsæt har forskellige metoder til at checke stiverne for instabilitet.

Nogle af disse metoder kan desværre være ret omfattende og tidskrævende.

I praksis er der dog sjældent de store problemer med tripping af stivere på lateralt belastede plader under forudsætning af, at stiverne sidder vinkelret på pladen.

Det vil dog være fornuftigt at overholde følgende grove regel for den maksimale frie længde l_{\max} af stivere – dvs. afstanden mellem understøtningspunkter eller eventuelle tripknæ

$$l_{\max} = C \cdot b_f \sqrt{\frac{150}{R_{p0,2}}}$$

Hvor:

b_f = bredden af stiverens flange eller bulb.

$C = 30$ for vinkel- og T-profiler og 50 for bulbprofiler med tyk klumpformet bulb

Stabilitet af den primære struktur

Dragere og webrammer vil dels være udsat for torsions tripping på samme måde som stiverne, men i modsætning til stivere vil dragere og webrammer også kunne få instabilitetsproblemer i selve kroppladen som følge af forskydningsspændinger.

Disse problemer opstår, hvis pladefelterne i kroppladen er for store i forhold til deres tykkelse, eller der er skåret store huller.

Der skelnes derfor mellem tripping, hvor hele drageren lægger sig ned, og buling af selve kroppladen (webben).

Tripping

Tripping tendensen afhænger primært af to faktorer:

- Bredden af flangen dvs. stivheden i sideværts retning
- Krumningen af flangen i plan med kroppladen

Som for stivere har de forskellige regelsæt forskellige beregningsmetoder for at checke for torsions tripping.

Tripping modvirkes ved at montere **tripknæ** der støtter drageren i sideværts retning.

For dragere med **rette symmetriske flanger** kan den maximale afstand s_t mellem tripknæsættes til:

$$s_t = B_f \left(32 - \frac{6}{\sqrt{\frac{B_f}{H_w}}} \right) \sqrt{\frac{150}{R_{p0,2}}}$$

Hvor:

B_f = bredden af flangen

H_w = højden af webben

$R_{p0,2} = 0,2\%$ flydespændingen i N/mm^2

Trippknæene skal gå helt op ad kroppladen, men behøver ikke at blive forbundet til flangen med mindre denne er meget bred dvs. forholdet B_f/H_w er $> ca. 0,8$.

Ved asymmetriske flanger, derimod, skal tripknæ normalt forbindes til flangen, med mindre denne er meget smal.

For dragere med **asymmetriske flanger** anbefales samme afstand mellem tripknæene som for symmetriske flanger, selv om afstanden teoretisk burde kunne øges, fordi sidestivheden (ved samme flangestørrelse) er større. Som for stivere opvejes denne fordel imidlertid af, at dragere med

asymmetriske flanger har en vis tendens til kæntring, fordi de ikke belastes i forskydningscentret. Desuden vil den frie kant af flangen have større tendens til egenbuling.

Symmetriske flanger er derfor generelt at foretrække frem for asymmetriske.

Hvor drageres flanger knækker, skal der altid monteres tripknæ umiddelbart ved siden af knækket dvs. maksimalt $5 \times t_w$ fra knækpunkter, hvor t_w er tykkelsen af kroppladen – se Figur 2.16.

Knæene skal altid forbindes til flangen, og det anbefales, at der ved store brede flanger monteres tripknæ på begge sider af kroppladen.

Hvor drageres flanger krummer skal afstanden mellem tripknæene reduceres, og også ved krumninger gælder det, at tripknæene bør forbindes til flangen med mindre der er tale om meget smalle symmetriske flanger dvs. hvis forholdet B/H_w er $< 0,25$.

Webbuling

Webbuling modvirkes ved at montere **webstivere** f.eks. i form af små snippede fladprofiler, der hæftesvejses til kroppladen.

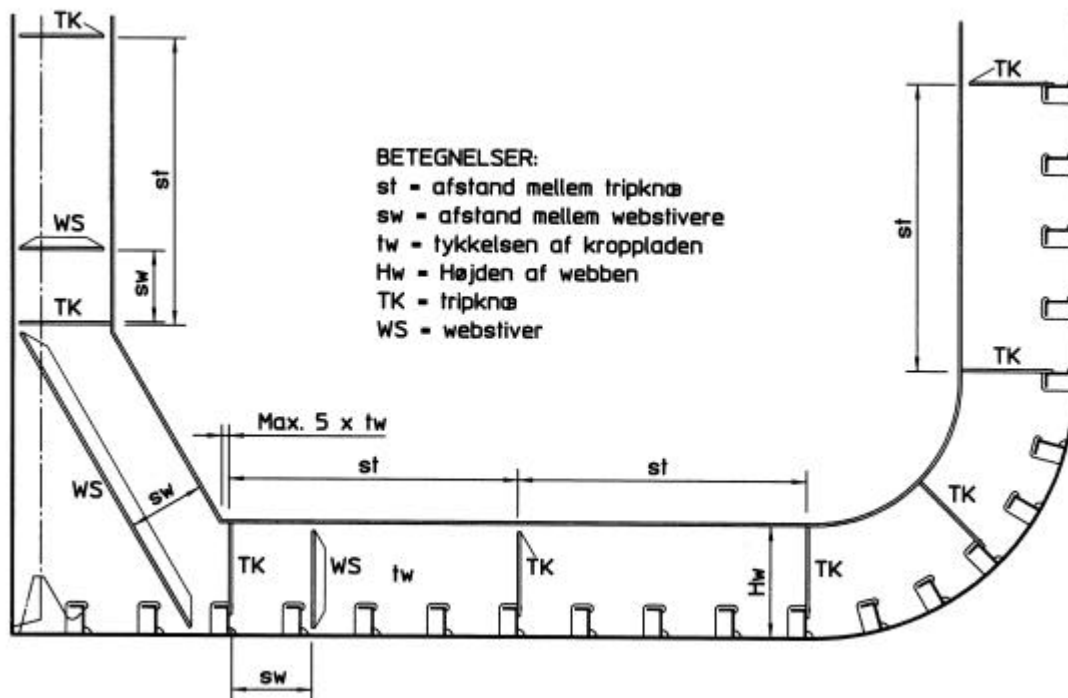
Figur 2.16 viser forskellige eksempler på hvorledes en kropplade uden huller bør afstives for at undgå lokal buling.

For en drager, der er fast indspændt i begge ender, må den korteste længde s_w af et hvilket som helst pladefelt i kroppladen ikke være større end $60t_w$ indenfor 20% af spændet fra enderne og $90t_w$ indenfor de midterste 60%.

For at undgå buling bør en drager derfor have en tykkelse t_w af kroppladen på $H_w/90$ hvor H_w er højden af kroppladen.

I siderne kan man så enten bibeholde kroppladens tykkelse og indsætte webstivere med en indbyrdes afstand på $2H_w/3$ eller øge tykkelsen til $H_w/60$.

Hvor dragere af forskellige årsager lokalt har kropplader, der er højere end s_w , indsættes der normalt webstivere, idet konstruktionen ville blive for tung, hvis kroppladen skulle øges tilstrækkeligt i tykkelse til at blive stabil.



Figur 2.16 Afstande mellem tripknæ og webstivere

Huller i dragere

Som oftest vil det af hensyn til f.eks. rørgennemføringer eller ønske om vægtbesparelse være nødvendigt at skære huller i kroppladen af dragere.

Ved udformningen af hullerne er det vigtigt at gøre sig klart, hvorledes hovedspændingerne forløber i kroppladen.

Som hovedregler for udformningen af huller gælder følgende:

- Huller bør generelt ikke være højere end halvdelen af kroppladens højde.
- Hullerne bør placeres på de steder af drageren, hvor spændingsniveauet i kroppladen er lavt, og så tæt på neutralaksen som muligt.
- Hullernes facon bør være "strømlinet" i retning af den største hovedspænding.
- Mellem 2 huller eller et hul og et udkap skal der være tilstrækkeligt materiale i kroppladen til at kunne overføre de nødvendige forskydningskræfter.
- Hvis afstanden mellem to huller er mindre end s_w (som beskrevet i afsnittet om webbuling), skal kroppladen stives med en webstiver.
- I mange tilfælde vil det være nødvendigt at lukke udkap med brikker for at øge forskydningsarealet omkring huller.

I den forbindelse er det langt bedre (men også dyrere) at bruge hele kraver end énsidige brikker – se Figur 2.17.

- Hullerne største længde bør ikke overstige den anbefalede længde s_w (som beskrevet i afsnittet om webbuling).

Er det nødvendigt med større huller, skal hulkanten afstives enten ved en webstiver monteret på kroppladen eller en flange indsat i hullet.

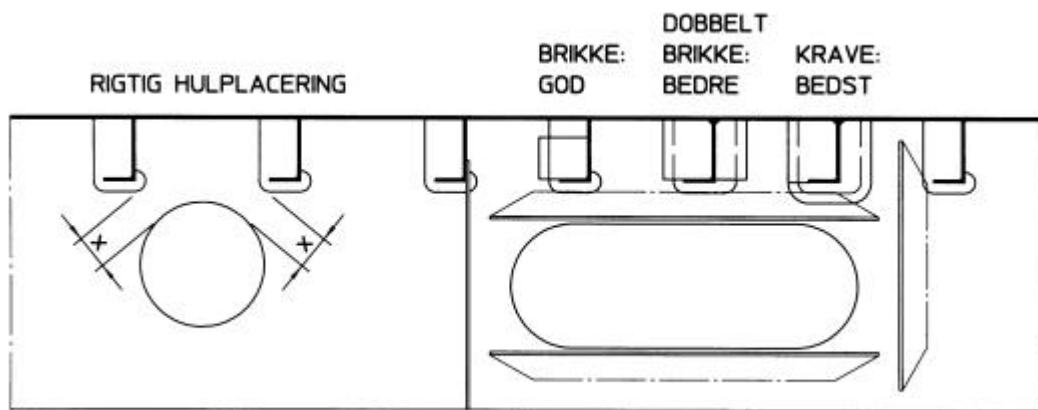
Specielt skal man være opmærksom på hulkanter, der er tæt på dragerens flange, fordi spændingsniveauet tæt på flangen ofte vil være så højt, at hulkanten kan blive instabil.

Disse regler er selvfølgelig kun retningsgivende.

F.eks. vil det kun ved meget hårdt belastede pladefelter være nødvendigt at udforme hullerne fuldstændig strømmlinjet (ellipse).

Som oftest vil man i stedet kunne anvende to forbundne halvcirkler.

Figur 2.17 viser eksempler på huller i kropplader.



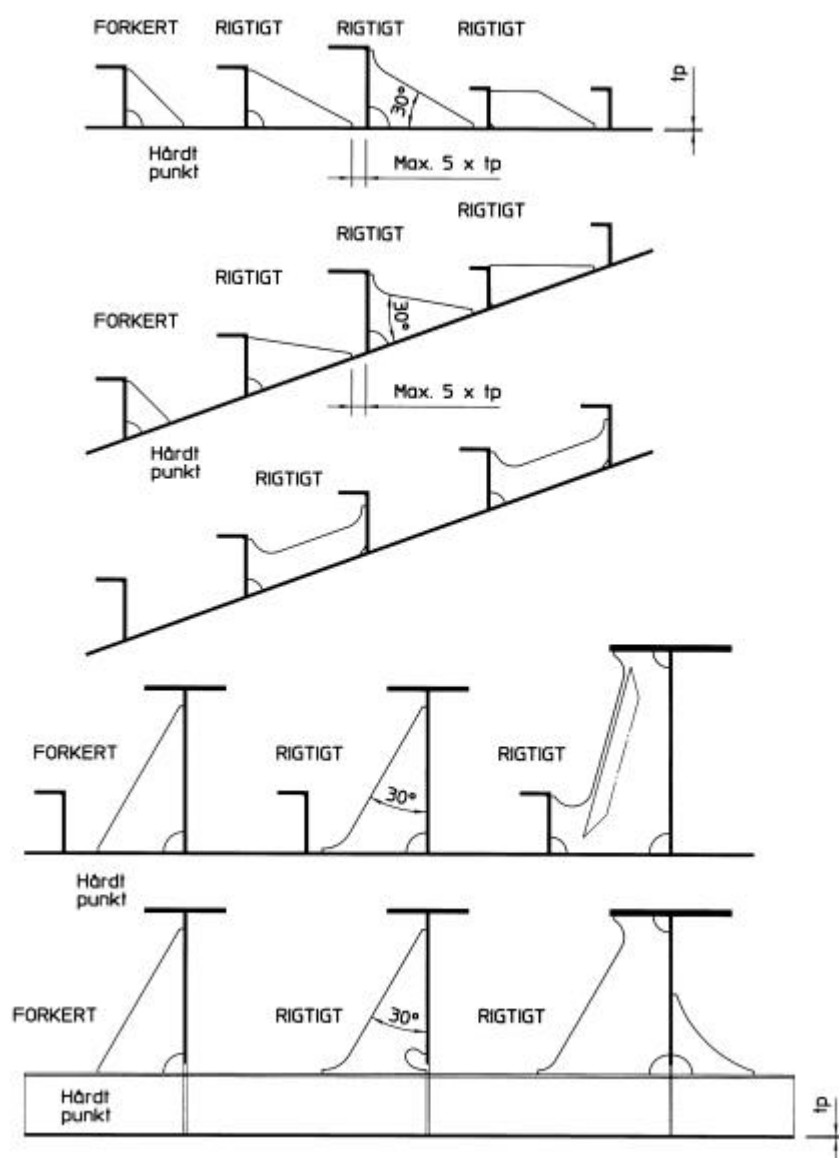
Figur 2.17 Huller i drageres kropplader

Udformning af kæntreknæ

Kæntreknæ giver ofte årsag til revnedannelser.

Derfor er det vigtigt at knæene udføres rigtigt med tilstrækkeligt bløde endeaflutninger.

Figur 2.18 viser typiske eksempler på rigtigt og forkert udførte kæntreknæ



Figur 2.18 Udformning af kæntreknæ

2.6.7 ELEMENTER, DER IKKE STÅR VINKELRET PÅ PLADEFELTET

Den generelle hovedregel er, at stivere og dragere altid skal stå så vinkelret på basispladen som muligt.

Elementer, der er op til 15° ude af lod, vil normalt ikke volde de store problemer.

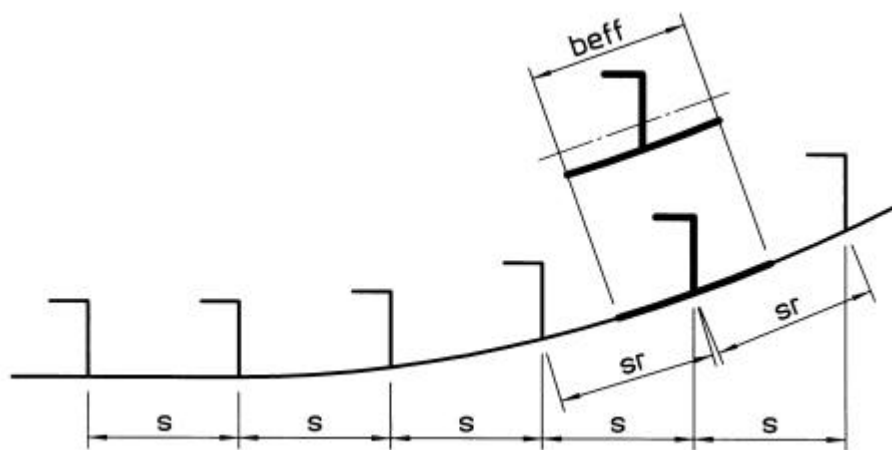
I området mellem 15 og 25° må der tages specielle forholdsregler mod kæntring af stiverne.

Vinkler over 25° bør ikke forekomme!

Elementer, der står vinkelret på pladefeltet, vil selvfølgelig give den letteste og stærkeste konstruktion med mindst muligt tendens til kæntring af stiverne.

Men specielt hvis der er tale om et krumt panel, vil det i nogen situationer ikke være praktisk at montere alle stivere vinkelret på pladen.

Figur 2.19 viser et eksempel på et sådant panel hvor stiverne er monteret efter et specielt system (netværk) med en konstant afstand "s".



Figur 2.19 Eksempel på krumpanel hvor stiverne ikke står vinkelret på pladen

Den konstante afstand "s" betyder, at den reelle afstand "s_r" mellem stiverne målt langs pladen er større end "s" hvilket igen betyder, at kravet til såvel stiverens styrke som pladens tykkelse skal udregnes på basis af denne større afstand.

Profilets stivhed vil heller ikke være den samme som hvis det stod i lod.

Fladprofilers modstandsmoment og inertimoment reduceres selvfølgelig ens uanset til hvilken side, det kæntreres, mens f.eks. vinkelprofiler hurtigt mister deres stivhed hvis de kæntreres til flangesiden, men faktisk inden for et vist område bliver stærkere, når de kæntreres til den modsatte side.

Stivere, der ikke står vinkelret på et lateralt belastet pladefelt vil få en udpræget tendens til kæntring.

Denne tendens varierer afhængig af profiltypen og hvilken vej, flangen vender.

Et asymmetrisk profil skal altid vendes, så afstanden mellem flangens frie kant og pladen bliver så stor som muligt.

Det har mange fordele:

- Profilets styrke bliver større
- Tendensen til kæntring bliver mindre
- Det bliver lettere at komme til at svejse og evt. overfladebehandle profilet

Ved profiler, der ikke står i lod i forhold til pladen, skal der tages særlige forholdsregler mod kæntring.

Som regel vil det være fornuftigt af reducere afstanden mellem understøtningerne eller indsætte kæntrækne

Dimensionering af stivere, der ikke står vinkelret på pladefeltet – sammenfatning

Dimensioneringen af et panel med stivere, der ikke står vinkelret på pladefeltet, kan sammenfattes til følgende "køreplan":

1. Der, hvor stiverne ikke sidder vinkelret på pladen, bliver den reelle stiverafstand målt langs pladen " s_r " større end den normale afstand " s ". Første step er derfor at udregne kravet til pladetykkelsen " t_r " ud fra denne større afstand.
2. Udregn kravet til stiverens modstandsmoment " W " under hensyntagen til den større belastningsbredde " s_r ".
3. Find den effektive bredde b_{eff} af basispladen på basis af et længde/bredde forhold = stiverlængden " l " / den reelle stiverafstand " s_r ".
4. Find et profil der, når det står skråt på en plade med bredden " b_{eff} " og tykkelsen " t_r ", har det nødvendige modstandsmoment om en akse parallel med pladen.
5. Check stabiliteten af stiveren for at sikre, at den ikke tripper (kæntrer), og monter om nødvendigt tripping knæ.

2.7 DIMENSIONERING AF AFSTIVEDE STØTTESKODDER OG PLADEFELTER UDSAT FOR KANTTRYK

2.7.1 INDLEDNING

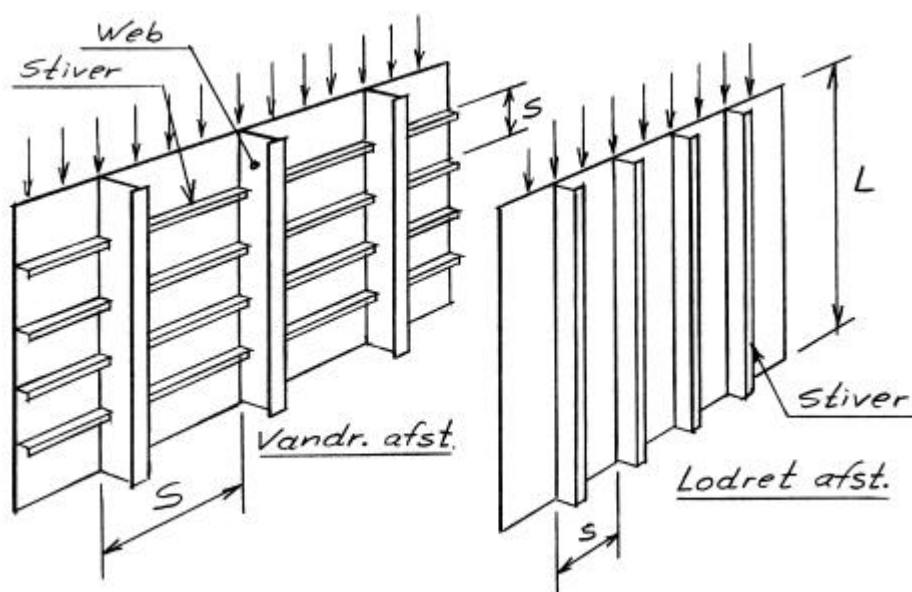
Udtrykket “støtteskodder” dækker over et typisk pladefelt, der er belastet i selve basispladens plan.

Eksempler på sådanne pladepaneller kunne være lodrette ruminddelere (skodder) mellem forskellige etager (dæk).

De lodretstående plader virker derved som støtter, der bærer de ovenliggende strukturer – deraf udtrykket støtteskodder.

Principielt set kan pladefeltet være afstivet efter to forskellige systemer som vist på Figur 2.20:

- Vandret afstivning kombineret med lodretstående webrammer
- Lodret afstivning



Figur 2.20 Typisk støtteskod med henholdsvis vandret- og lodret afstivning

Dimensioneringen af et sådant skod (pladefelt) er i høj grad et spørgsmål om stabilitets analyse for at sikre mod kollaps af enten pladefelterne mellem stiverne eller selve stiverne.

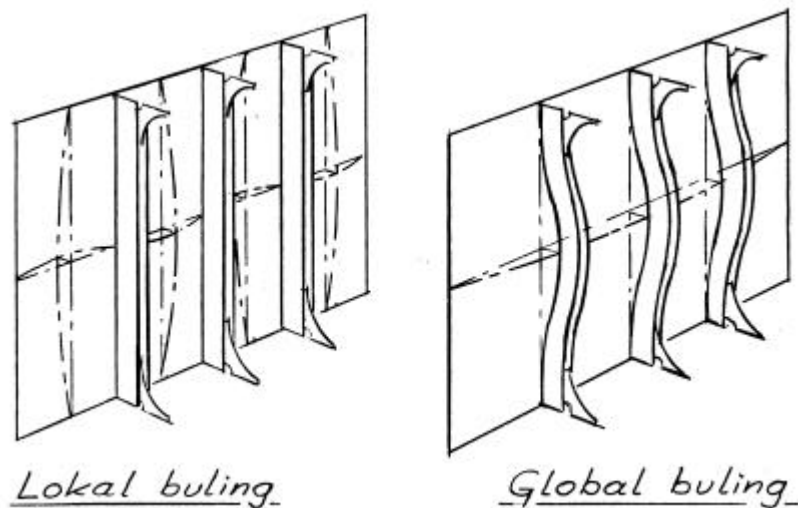
”Rækkefølgen af kollaps” mellem de forskellige elementer er meget vigtig.

Princippet for en god konstruktion er, at den buler (bryder sammen) i følgende rækkefølge:

1. Pladefelterne mellem afstivningselementerne buler lokalt, men afstivningerne forbliver rette således, at konstruktionen bibeholder tilstrækkelig bæreevne til fortsat at fungere efter hensigten.

2. Afstivningerne på pladen buler, men eventuelle store webrammer forbliver stadig intakte.
3. De store webrammer buler.

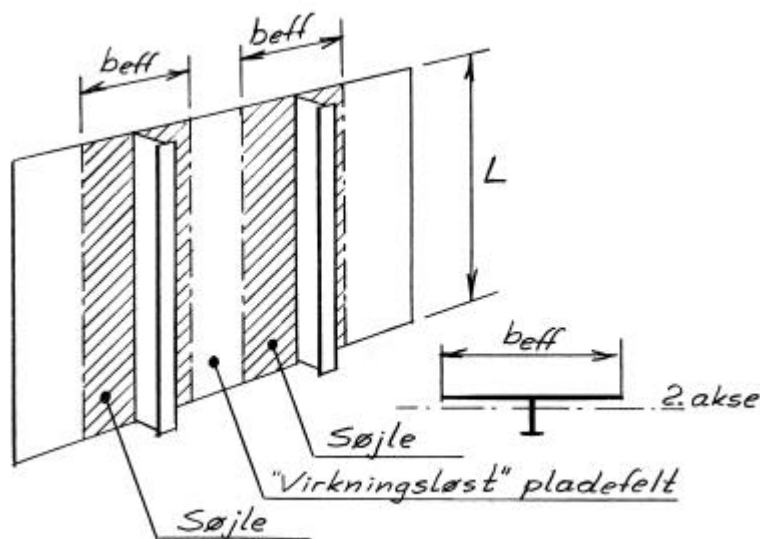
Figur 2.21 viser lokal- og global buling (kollaps) af et lodret afstivet pladefelt.



Figur 2.21 Lokal og global buling af lodret afstivet pladefelt

2.7.2 LODRET AFSTIVEDE STØTTESKODDER

Dimensionering af lodret afstivede støtteskodder er meget lig dimensionering af støtter, idet et støtteskod kan betragtes som en række virtuelle søjler (støtter), der er forbundne med (virkningsløse) pladefelter – se Figur 2.22.



Figur 2.22 Typisk støtteskod betragtet som et antal søjler, der er forbundne med "virkningsløse" pladefelter

Når der ved søjler tales om inertimomentet om 2. hovedakse, er det for at få værdien på den svageste led.

Ved et støtteskod er 2. akse selvfølgelig altid parallel med selve skoddet.

Bæreevnen af støtteskoddet betragtes som bæreevnen af de virtuelle søjler, idet pladefelterne imellem søjlerne betragtes som ikke-bærende.

Den effektive bredde af de virksomme pladefelter b_{eff} fastsættes efter de samme regler som beskrevet i det generelle afsnit om effektiv flange – se også Figur 2.4

Når den effektive bredde er fastsat kan stiverens bæreevne beregnes fuldstændig som om der var tale om en søjle.

Eksempel 2 viser princippet.

Eksempel 2 – beregning af lodret afstivet støtteskod

Et lodret afstivet støtteskod som vist på Figur 2.23 skal bære en belastning på 70 kN/m.

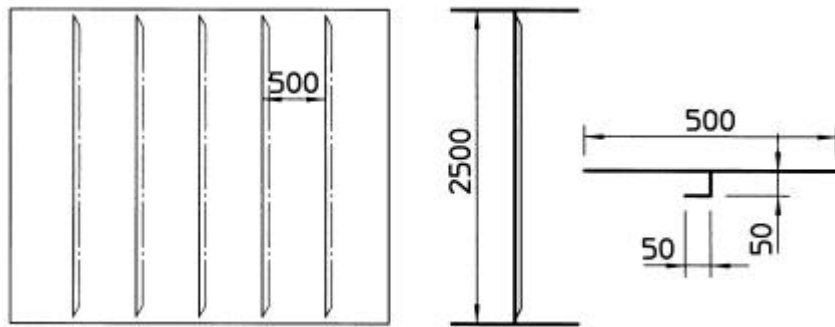
Skoddet er 2500 mm højt og afstivet med vinkelprofiler, der er snippede 30° i enderne.

Afstanden mellem stiverne er 500 mm.

Vinkelprofilerne har en dimension på 50 x 50 x 5, og basispladen er 5 mm tyk.

Både plade og profiler har en 0,2-flydespænding $R_{p0,2} = 150 \text{ N/mm}^2$.

Undersøg om skoddet er korrekt dimensioneret.



Figur 2.23 Lodret afstivet støtteskod

Forholdet mellem højden "l" og stiverafstanden "s" = $2500/500 = 5$

Det betyder, at den effektive flangebredde (se Figur 2.4) kan sættes = s.

En virtuel søjle som vist på Figur 2.23 bestående af en basisplade på 500 x 5 mm med en stiver i form af et 50 x 50 x 5 vinkelprofil skal altså bære en belastning på:

$$70 \text{ kN/m} \times 0,5 \text{ m} = 35 \text{ kN.}$$

Inertimomentet I om 2. akse parallelt med basispladen = $69,9 \times 10^4 \text{ mm}^4$

Tværsnitsarealet A = 2975 mm^2

Inertiradius r:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{69,9 \cdot 10^4}{2975}} = 15 \text{ [mm]}$$

Den effektive længde $L_{\text{eff}} = KL = 1 \times 2500 = 2500 \text{ mm}$ (se Figur 2.6).

Det effektive slankhedsforhold $\lambda_{\text{eff}} = L_{\text{eff}}/r = 2500/15 = 167$

Ligning 2.1 giver:

$$I_c = \sqrt{\frac{2p^2 E}{R_{p0,2}}} = \sqrt{\frac{2p^2 \cdot 7 \cdot 10^4}{150}} = 96$$

Da $\lambda_{\text{eff}} > \lambda_c$ skal Ligning 2.3 anvendes.

$$\frac{s_{till}}{R_{p0,2}} = \frac{(I_c)^2}{4(I_{eff})^2} = \frac{(96)^2}{4(167)^2} = 0,083$$

Den tilladelige spænding σ_{till} bliver altså $150 \times 0,083 = 12,4 \text{ N/mm}^2$.

Den aktuelle spænding $\sigma_{akt} = P/A = 35000/2975 = 11,8 \text{ N/mm}^2$.

Da $\sigma_{akt} < \sigma_{till}$ er søjlen altså korrekt dimensioneret rent spændingsmæssigt.

Tilbage står så kun at undersøge basispladen for bulestivhed.

Den kritiske bulespænding σ_{cr} jævnfør Ligning 2.5 bliver:

$$s_{cr} = 25,2 \cdot 10^4 \left(\frac{t}{s} \right)^2 = 25,2 \cdot 10^4 \left(\frac{5}{500} \right)^2 = 25,2 \quad [N/mm^2]$$

Bulestivheden er altså også tilstrækkelig.

2.7.3 VANDRET AFSTIVEDE STØTTESKODDER

Vandret afstivede støtteskodder er lidt mere komplicerede at beregne end lodret afstivede idet ækvivalensen til en række støtter ikke er helt så tydelig.

Vandret afstivede støtteskodder har 3 elementer, der skal dimensioneres:

- Selve basispladen
- De vandrette stivere
- Webben

Hvis der er tale om et støtteskod, der ikke har en decideret lateral belastning, vil tykkelsen af basispladen blive fastsat ud fra dens funktion i form af flange på webben (dvs. lokal bulingsstyrke) samt krav til f.eks. lokal kollisionsstyrke.

De fleste regelsæt indeholder krav til minimumstykkelser ("dog-aldrig-mindre-end" kriterier), og for støtteskodder vil disse værdier typisk være udslagsgivende.

Anvendelsesområderne bestemmer således dimensionerne ud fra en slags fornuftkriterier.

De vandrette stivere må generelt fastsættes efter tilsvarende fornuftkriterier. Dog vil det ved anvendelse af meget små stivere kunne blive nødvendigt at checke deres stabilitet for at sikre sig, at de kan opfylde deres funktion som stabil randindspænding af de lokale pladefelter.

Det normale er dog, at pladen vil bule før stiverne.

Ved dimensionering af webberne vil det generelt være sådan, at pladefelterne i umiddelbar nærhed af de lodrette webrammer vil være meget stivere og dermed langt bedre i stand til at optage et lodret

tryk end områderne midt imellem webberne, hvor pladefelterne ikke vil have nær den samme bulingsstyrke.

Da det i en konstruktion, der både består af stive og bløde dele altid vil være sådan, at de stive vil optage stort set al lasten, indtil de bryder sammen, kan man ved beregning af vandret afstivede støtteskodder nøjes med at betragte bæreevnen af webrammerne med den tilhørende stabile del af basispladen.

Dermed bliver beregningen af vandret afstivede støtteskodder ækvivalent til beregningen af lodret afstivede skodder dog med den forskel, at det ved fastsættelsen af den effektive flangebredde er nødvendigt at vurdere stabiliteten af basispladen.

Der er nu to muligheder:

- Bredden af den effektive flange ansættes på basis af kurven Figur 2.4, webben dimensioneres herefter og til sidst sikrer man sig, at basispladen indenfor den ansatte effektive bredde forbliver stabil evt. ved at montere bulestiverne som vist på Figur 2.24.

Hvis antallet eller tætheden af bulestiverne bliver urimelig øges tykkelsen af basispladen (evt. kun i en lodret strimmel omkring webben) og beregningen gentages – man bevæger sig altså i en design spiral ind mod at fornøftigt mål.

- Alternativt kan webrammen dimensioneres så kraftigt, at den beregningsmæssige effektive flange kan være så smal, at den ikke behøver bulestiverne for at forblive stabil.

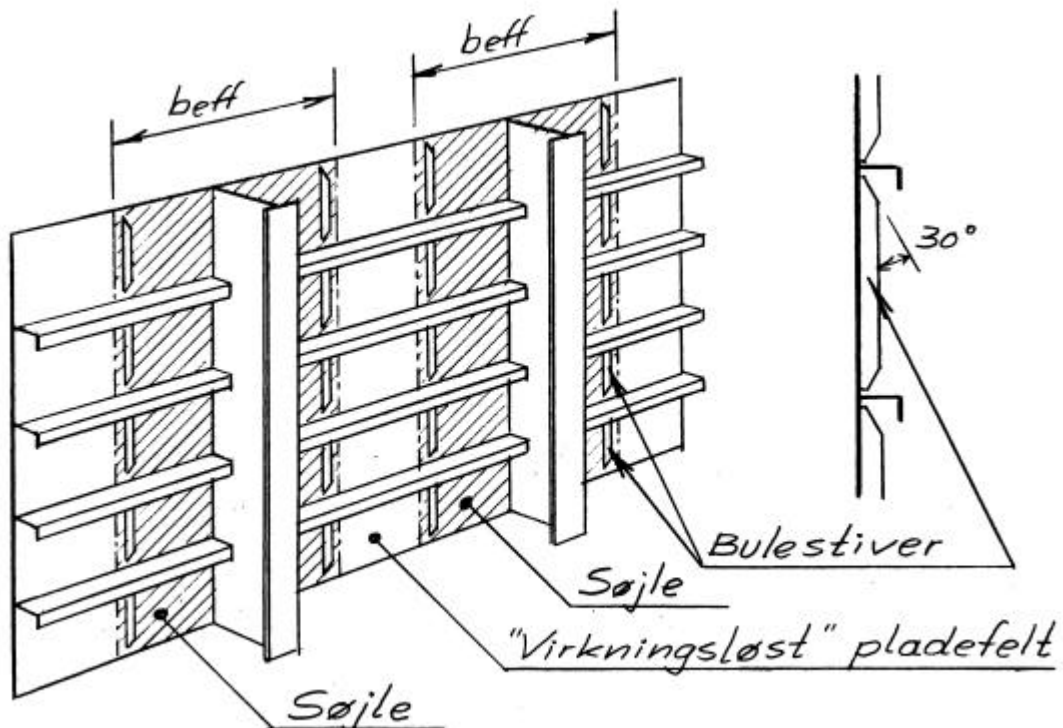
Den første løsning vil som regel give den letteste konstruktion, men vil til gengæld være lidt dyrere pga. bulestiverne.

Når der tales om effektiv flange, antages den dimensionerende spænding (som beskrevet i det generelle afsnit om effektiv flange), at være konstant i hele den effektive flangebredde, idet der anvendes en blokkurve i stedet for den virkelige spændingskurve.

Ved dragernes kropplader vil denne dimensionerende spænding være tæt på den virkelige værdi, men jo længere væk, man kommer, jo lavere vil den faktiske spænding være i forhold til den dimensionerende – se f.eks. Figur 2.3.

Bulestiverne, som vist på Figur 2.24, placeres imidlertid normalt således, at den kritiske bulespænding af pladefelterne mellem stiverne svarer til den dimensioneringsmæssige spænding (og ikke den lidt lavere virkelige spænding ved bulestiverne).

Derved indbygges en vis sikkerhedsfaktor.



Figur 2.24 Bulestivere til sikring mod lokalbulning

En løsning, der ofte ses, er støtteskodder opbygget af et antal lodrette lastbærende H- eller I-profiler, hvorimellem der er monteret helt sekundære pladefelter – se Figur 2.25.

Denne løsning har den fordel, at pladeflanger ved webben er tyk og dermed stabil samtidig med, at pladefelterne mellem H-profilerne kan dimensioneres meget svagt, da de ikke har nogen lastbærende funktion.

Løsningen er desuden billig, idet webberne er færdige profiler.



Figur 2.25 Støtteskod opbygget af H-profiler og sekundære pladefelter

Eksempel 3 – beregning af et vandret afstivet støtteskod

Et vandret afstivet støtteskod som vist på Figur 2.26 er 5 mm tykt.

Webberne sidder med en indbyrdes afstand S på 1600 mm.

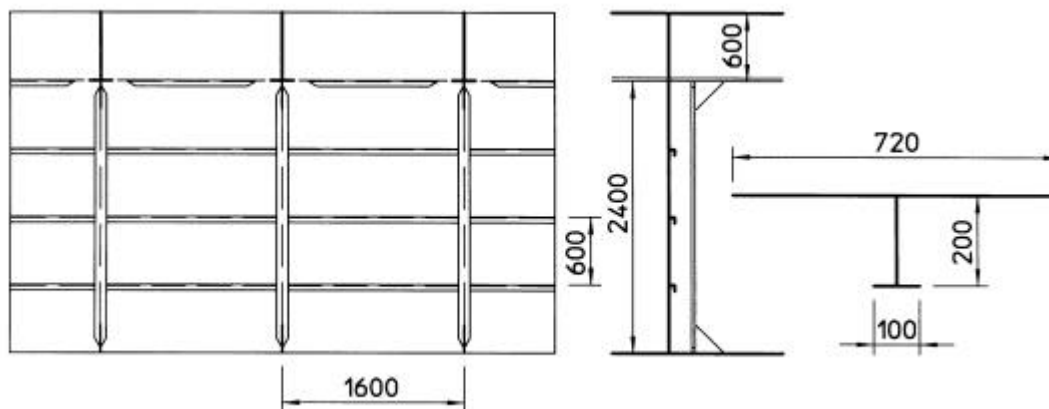
Kroppladerne er 200 x 5 mm og flangerne 100 x 10 mm.

Webberne bærer nogle dragere, der hver især overfører en lodret belastning på 400 kN (ca. 40 tons) ned i webben.

Højden L af webberne til underkanten af dragerne er 2400 mm, og de vandrette afstivninger består af gennemgående vinkelprofiler, der sidder med en indbyrdes afstand på 600 mm.

Såvel basispladen som webberne er fremstillet af en legering med en 0,2-flydespænding $R_{p0,2}$ på 150 N/mm².

Det undersøges om skoddet er hensigtsmæssigt dimensioneret.



Figur 2.26 Eksempel 3 - vandret afstivet støtteskod

Forholdet $L/S = 2400/1600 = 1,5$

Ud fra dette forhold viser kurven Figur 2.4, at den effektive flangebredde for webberne kan regnes som $0,45 \times S = 0,45 \times 1600 = 720$ mm.

De virtuelle støtter har altså følgende dimension:

Basisplade: 720 x 5 mm

Kropplade: 200 x 5 mm

Flange: 100 x 10 mm

Inertimomentet I om 2. akse (parallel med basispladen) = $39,8 \times 10^6$ mm⁴

Tværsnitsarealet $A = 5600$ mm²

Inertiradius r :

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{39,8 \cdot 10^6}{5600}} = 84 \text{ [mm]}$$

Den effektive længde af webberne $L_{\text{eff}} = KL = 0,5 \times 2400 = 1200$ mm (se Figur 2.6).

Det effektive slankhedsforhold $\lambda_{\text{eff}} = L_{\text{eff}}/r = 1200/84 = 14$

Ligning 2.1 giver:

$$I_c = \sqrt{\frac{2P^2 E}{R_{p0,2}}} = \sqrt{\frac{2P^2 \cdot 7 \cdot 10^4}{150}} = 96$$

Da $\lambda_{\text{eff}} < \lambda_c$ skal Ligning 2.2 benyttes.

$$\frac{s_{\text{till}}}{R_{p0,2}} = 0,5 - \frac{(I_{\text{eff}})^2}{4(I_c)^2} = 0,5 - \frac{(14)^2}{4(96)^2} = 0,49$$

Den tilladelige spænding σ_{till} bliver altså $150 \times 0,49 = 73,5 \text{ N/mm}^2$.

Den aktuelle spænding $\sigma_{\text{akt}} = P/A = 400000/5600 = 71,4 \text{ N/mm}^2$.

Da $\sigma_{\text{akt}} < \sigma_{\text{till}}$ er søjlen altså OK rent spændingsmæssigt.

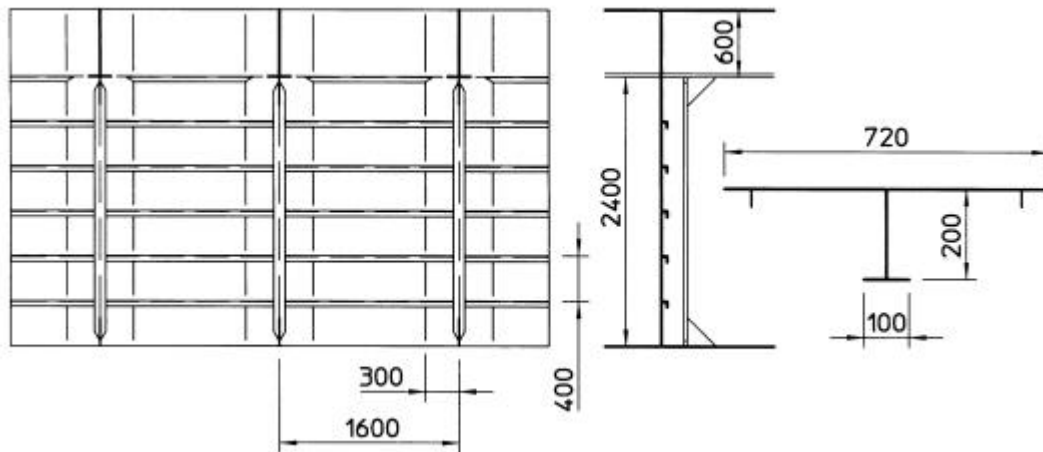
Tilbage står så kun at checke basispladen for bulestivhed.

Den kritiske bulespænding σ_{cr} jævnfør Ligning 2.4 bliver:

$$s_{\text{cr}} = 6,3 \cdot 10^4 \cdot c \cdot \left(\frac{t}{s}\right)^2 \left(1 + \left(\frac{s}{b}\right)^2\right)^2 = 6,3 \cdot 10^4 \cdot 1,2 \cdot \left(\frac{5}{600}\right)^2 \left(1 + \left(\frac{600}{1600}\right)^2\right)^2 \approx 7 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Det ses altså, at selv om webben er rigelig stærk er der slet ikke tilstrækkelig bulestivhed i basispladen!

Skoddet ændres nu som vist på Figur 2.27, ved at der indlægges en række lodrette snippede bulestivere 300 mm fra webben (på begge sider), afstanden mellem de vandrette stivere reduceres til 400 mm og tykkelsen af basispladen øges til 7 mm.



Figur 2.27 Ændret skod

Da højde/bredde forholdet for pladefelterne nu er < 1 , skal den kritiske bulespænding σ_{cr} efter ændringerne beregnes efter Ligning 2.5:

$$s_{cr} = 25,2 \cdot 10^4 \left(\frac{t}{s} \right)^2 = 25,2 \cdot 10^4 \left(\frac{7}{400} \right)^2 = 77 \quad [N/mm^2]$$

Tværsnitsarealet er nu øget til 7040 mm^2 hvilket betyder, at den aktuelle spænding er reduceret til: $\sigma_{akt} = P/A = 400000/7040 = 56,8 \text{ N/mm}^2$.

Dermed er dimensionerne i orden.

Hele skoddet kan eventuelt optimeres yderligere ved at prøve at reducere dimensionerne af webberne en smule og så køre designspiralen igennem en gang til; men som eksemplet viste, er bæreevnen af vandret afstivede støtteskodder i tynd plade relativt ringe.

Derfor må det anbefales, at støtteskodder, der skal bære en stor lodret belastning, altid udføres lodret afstivede.

2.8 DIMENSIONERING AF KORRUGEREDE PLADEPANELER

2.8.1 INDLEDNING

Korrugerede pladepaneler kan betragtes på samme måde som afstivede pladepaneler, idet korrugeringerne kan opfattes som stivere.

Derfor skal dette afsnit ses i sammenhæng med de foregående afsnit omhandlende afstivede pladepaneler.

Korrugerede pladepaneler anvendes af forskellige årsager:

- Hvor der ønskes paneler, der er "rene" på begge sider og dermed lette at renholde.
- Fordi de er billigere at producere end svejste afstivede paneler.
- Fordi det færdige panel som regel vil have færre kastninger end et afstivet panel.

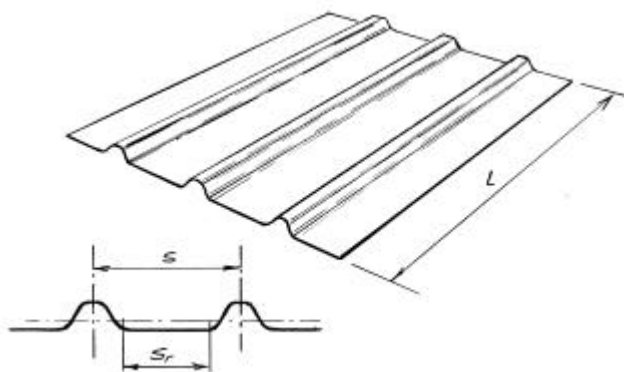
Korrugerede paneler er meget anvendelige hvor der ud over lateral belastning også er tale om søjlebelastning i korrugeringernes retning.

Korrugerede paneler er derimod ikke særlig anvendelige, hvor der stilles store krav til forskydningsstyrke i panelets plan (vinkelret på korrugeringerne) pga. "harmonika-virkningen".

Derfor bør f.eks. de tværskibs skodder i skibe, der har afgørende betydning for sidestivheden af hele skibet, ikke fremstilles korrugerede, med mindre der f.eks. er tale om tankskodder, hvor det er et absolut krav, at de er rengøringsvenlige på begge sider.

2.8.2 TYPISKE KORRUGEREDE PANELER

Figur 2.28 viser et typisk korrugeret panel, hvor de enkelte korrugeringer har en tydelig lighed med påsvejste stivere. Denne type panel ses normalt anvendt, hvor der er tale om relativt ringe lateral belastning. I det følgende vil denne type korrugering blive kaldt type "A".



Figur 2.28 Typisk korrugeret panel type A med relativt ringe lateral belastning

Beregningen af et panel som vist på Figur 2.28 følger principperne for afstivede pladefelter.

Pladetykkelsen beregnes på basis af den reelle afstand s mellem korrugeringerne, mens kravet til modstandsmoment af korrugeringen beregnes på basis af afstanden s mellem centerlinierne af to korrugeringer – se Figur 2.28.

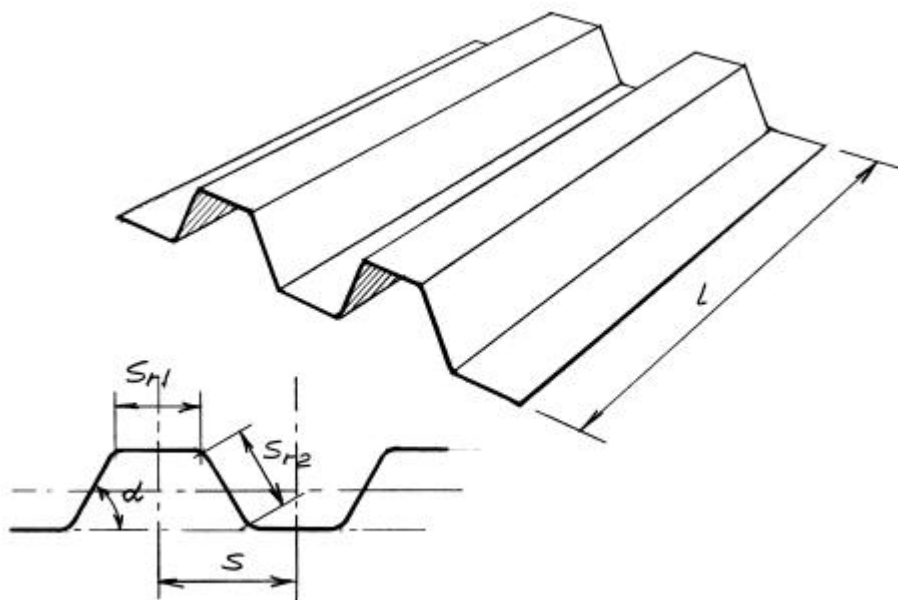
Figur 2.29 viser et eksempel på et korrugeret panel, der er velegnet til hårdere laterale belastninger.

Denne type panel vil i det følgende blive benævnt type "B".

Selv om ligheden med et afstivet pladepanel er ikke helt så tydelig, som ved den tidligere viste paneltype, behandles panelet på akkurat samme måde.

Afstivningerne udgøres af et antal Z-profiler som vist på figuren.

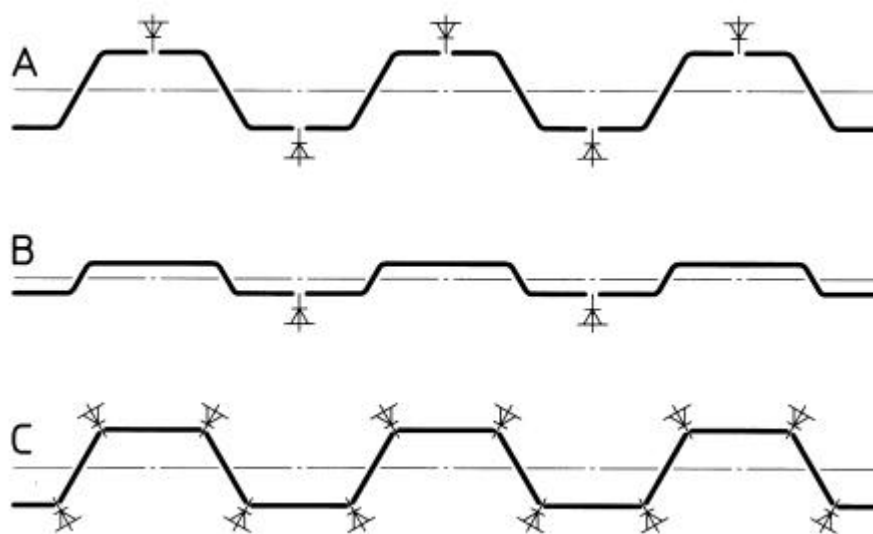
Pladetykkelsen beregnes ud fra den største uafstivede pladebredde s_{r1} eller s_{r2} og kravet til korrugeringens modstend- og inertimoment ud fra afstanden s mellem to Z-profiler.



Figur 2.29 Typisk korrugering type B for større hårdere belastede paneler

Opsvejsning af korrugerede pladepaneler

Et korrugeret panel som vist på Figur 2.29 kan udføres på flere måder f.eks. som vist på Figur 2.30.



Figur 2.30 Alternative produktionsmetoder

De forskellige metoder har hver deres fordele og ulemper.

Den mest almindelige vil være metode A, hvor panelet fremstilles af et antal sammensvejste bukkede eller ekstruderede Z-profiler.

Hvis denne metode anvendes kan det, hvis der er tale om store paneler med høj belastning og dermed høje krav til korrugerings styrke, være en fordel, hvis afstandene s_1 og s_2 som vist på Figur 2.29 er nogenlunde ens.

Dermed udnyttes materialet bedst muligt, idet pladetykkelsen må udregnes efter det største spænd, og hvis den ene af siderne er længere end den anden betyder det, at den korte side vil blive overdimensioneret og dermed for tung.

Ved svagere belastede paneler som er udformet som alternativ B, hvor s_1 er meget større end s_2 , har dette ingen betydning.

Ved meget store paneler eller hvis det nødvendige bukkeværktøj ikke er til rådighed, kan korrugerede paneler fremstilles af sammensvejste pladestrimler (alternativ C -Figur 2.30), men arbejdsmæssigt er denne metode normalt for dyr.

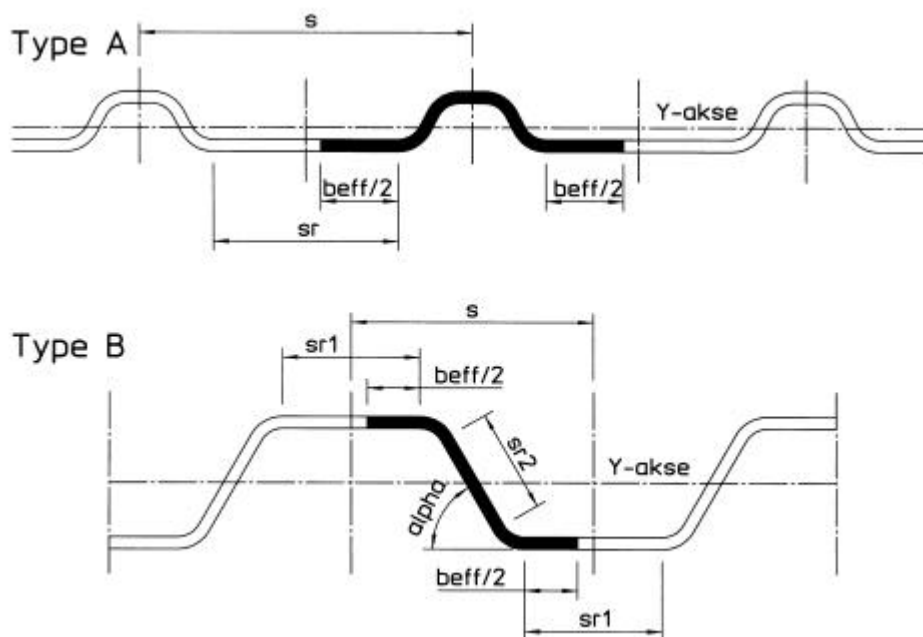
Hvis der anvendes en hærdet legering, der mister sin styrke ved varmepåvirkningen fra svejsningen, er det bestemt ikke ligegyldigt, hvor svejsningerne i korrugerede paneler ligger.

For optimal placering henvises til afsnit 2.12.13 om den optimale placering af svejsninger i forhold til HAZ.

2.8.3 BEREGNING AF TVÆRSNITSDATA FOR KORRUGERINGER

Effektiv flange

For at kunne beregne de geometriske tværsnitsdata er det nødvendigt at fastsætte hvor stor en del af pladefelterne omkring ”knæklinierne” der kan regnes som effektiv, dvs. som kan indregnes i tværsnittene som vist på Figur 2.31.



Figur 2.31 Beregningsmæssige tværsnit af korrugeringer

Som for svejste stivere er den effektive flangebredde af korrugeringerne afhængig af længde/bredde forholdet af de enkelte pladefelter.

På basis af dette forhold viser kurven Figur 2.4 i det generelle afsnit om effektiv flange hvor stor en del af pladefelternes bredde (s_r eller s_{r1}), der kan regnes som effektiv.

Da korrugerede pladefelter imidlertid typisk er kendetegnede ved lange uafstivede spænd, vil længde/bredde forholdet normalt være så højt, at man i de fleste tilfælde kan regne den effektive bredde = pladefelternes bredde.

Hvis der ikke foretages en stabilitetsanalyse af de enkelte pladefelter for at sikre mod lokal buling, bør den effektive bredde som hovedregel ikke regnes højere end følgende værdi [5]:

$$b_{eff} \leq C \cdot t \cdot \sqrt{\frac{150}{R}}$$

Hvor:

$C = 60$ for koldbukkede korrugerede paneler og 50 for paneler, der er sammensvejet af pladestrimler som tidligere beskrevet i Figur 2.30 alternativ C.

t = pladetykkelsen

R = den mindste af følgende værdier: $R_{p0,2}$ eller $0,7 \times R_m$.

En stabilitetsanalyse er imidlertid relativt enkel at foretage.

Selve analysen er fuldstændig analog til den metode, der er beskrevet i afsnit 2.7. Se endvidere rubrik 2.8.4 om dimensionering. Den aktuelle normalspænding σ_{akt} i de trykpåvirkede pladepaneler udregnes på basis af bøjningsmomentet (forårsaget af den laterale belastning) og snittets modstandsmoment.

$$\sigma_{akt} = \frac{M_b}{W}$$

Hvor:

M_b = bøjningsmomentet

W = modstandsmomentet

Den kritiske bulespænding σ_{cr} i $[\text{N}/\text{mm}^2]$ kan ifølge Ligning 2.5 udregnes som:

$$\sigma_{cr} = 25,2 \cdot 10^4 \left(\frac{t}{s_r} \right)^2$$

Hvis den aktuelle spænding $\sigma_{akt} < \sigma_{cr}$ er pladefelterne stabile!

Geometriske tværsnitsdata

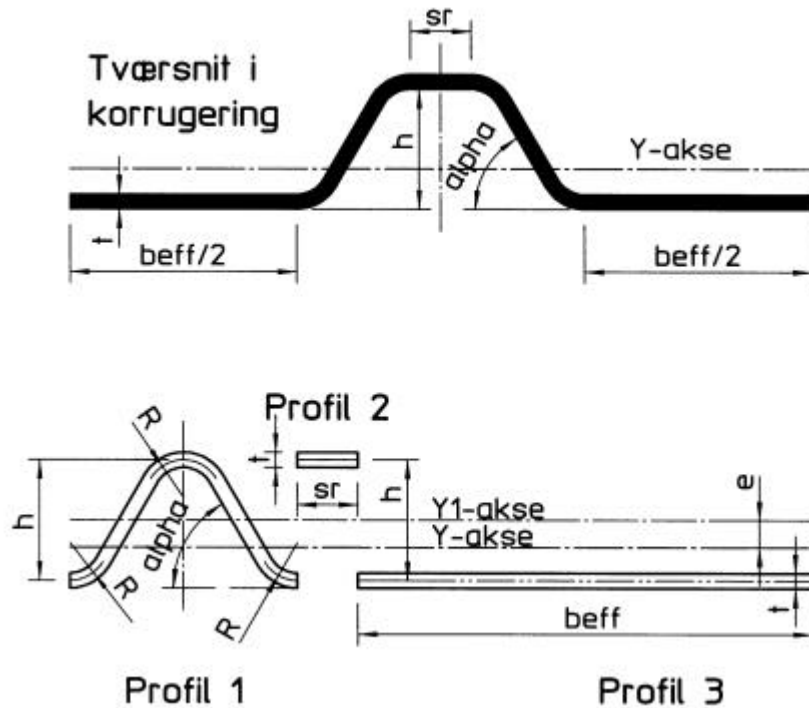
De geometriske tværsnitsdata af korrugeringer af type A eller B kan selvfølgelig beregnes vha. et egnet edb-program.

De fleste moderne CAD-programmer vil f.eks. kunne beregne tværsnitsdata'ene, hvis snittene tegnes i skala.

Har man ikke et egnet program til rådighed, vil nedenstående forenkledede beregningsmetoder kunne bruges til bestemmelse af tværsnitsdata'ene med tilstrækkelig nøjagtighed.

Korrugeringer af type A:

Figur 2.32 viser et tværsnit i en korrugering af type A.



Figur 2.32 Tværnsnit i korrugering type A

b_{eff} = den effektive flangebredde i [mm] fastsat på basis af kurven i Figur 2.4.

t = tykkelsen af pladen i [mm]

h = korrugeringsdybden i [mm]

s_r = bredden af toppen i korrugeringen i [mm]

α = korrugerings vinklen i grader

r = bukningsradius i korrugeringerne (radius til midt i tykkelsen) i [mm]

Den enkleste metode til beregning af tværnsnitsdata'ene er at dele korrugeringen op i 3 dele som vist på Figur 2.32:

Profil 1, der er en helt symmetrisk korrugering uden nogen plan top.

Profil 2, der er den plane top i korrugeringen, hvis en sådan findes.

Profil 3, der består af den effektive bredde af basispladen.

Arealet af profil 1 "A1" i [mm²] kan udregnes som:

$$A1 = t \cdot \left(\frac{p \cdot r \cdot a}{45} + \frac{2(h - 2 \cdot r \cdot (1 - \cos a))}{\sin a} \right)$$

Arealet af profil 2: $A2 = s_r \times t$ [mm²]

Arealet af profil 3: $A3 = b_{\text{eff}} \times t$ [mm²]

Totalarealet $A = A1 + A2 + A3$

Y1-aksen er neutralaksen i profil 1

Y-aksen er neutralaksen i det samlede profil

Afstanden mellem de to akser "e" i [mm] kan udregnes som:

$$e = \frac{A1 + \frac{(A3 - A2) \cdot h}{2}}{A}$$

Inertimomentet "I" om Y-aksen i [mm⁴] kan med god tilnærmelse udregnes som:

$$I = \frac{t \cdot h^3}{6 \cdot \sin \mathbf{a}} + \frac{h^2 \cdot t \cdot r \cdot \sin \mathbf{a}}{2} + A1 \cdot e^2 + A2 \cdot \left(\frac{h}{2} + e \right)^2 + A3 \cdot \left(\frac{h}{2} - e \right)^2$$

Modstandsmomentet "W" i [mm³] bliver herefter:

$$W = \frac{I}{\left(\frac{h+t}{2} + e \right)}$$

Det effektive forskydningsareal "A_f" i [mm²] kan fastsættes til:

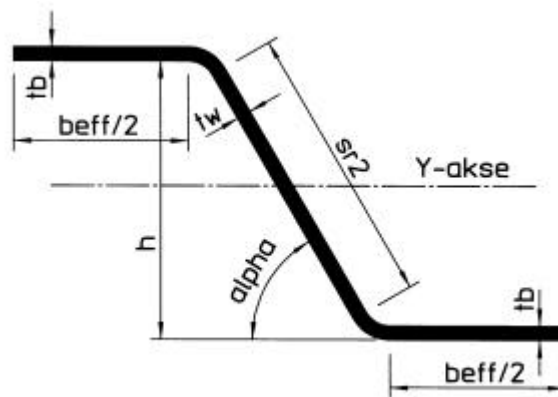
$$A_f = \frac{2 \cdot t \cdot (h+t)}{\sin \mathbf{a}}$$

Inertiradius "r" [mm] kan udregnes som:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Korrugeringer af type B:

Figur 2.33 viser et tværsnit i en korrugering af type B.



Figur 2.33 Tværsnit i korrugering type B

b_{eff} = den effektive flangebredde i [mm] fastsat på basis af kurven i Figur 2.4

t_p = tykkelsen af den effektive flange i [mm]

t_w = tykkelsen af webpladen i [mm]

h = korrugeringsdybden i [mm]

s_w = pladelængden af webben i [mm] = $d/\sin(\alpha)$

α = korrugerings vinklen i grader

Med en tilstrækkelig nøjagtighed kan tværsnitsdata'ene omkring y-aksen beregnes som følger:

Modstandsmomentet "W" i [mm³]:

$$W = \frac{h}{6} \left(3 \cdot b_{eff} \cdot t_p + \frac{h \cdot t_w}{\sin \alpha} \right)$$

Inertimomentet "I" i [mm⁴]:

$$I = \frac{W \cdot (h + t_p)}{2}$$

Forskydningsarealet "A_f" i [mm²]

$$A_f = \frac{(h + t_p) \cdot t_w}{\sin \alpha}$$

Tværsnitsarealet "A" i [mm²]:

$$A = b_{eff} \cdot t_p + A_f$$

Inertiradius "r" i [mm]:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

2.8.4 DIMENSIONERING

De forskellige regelsæt har hver deres egne metoder til beregning af korrugerede pladepaneler.

De følgende regler skal derfor kun betragtes som vejledende, hvis der ønskes et hurtigt gæt på nogle rimelige dimensioner, der f.eks. kan bruges i forbindelse med en foreløbig vægtberegning eller som et check på størrelsesordenen af dimensioner udregnet efter andre formler.

Dimensionering opdeles i to afsnit:

- Dimensionering for lateral belastning.
- Dimensionering for søjlebelastning / kantbelastning.

Dimensionering for ensartet lateral belastning

Pladetykkelsen, kravet til korrugeringens modstandsmoment og forskydningsareal kan estimeres ud fra formler, der er analoge med formlerne i afsnit 2.6.4 om dimensionering af pladepaneler.

Pladetykkelsen "t" i [mm] kan beregnes ud fra følgende formel:

$$t = \frac{s_r \cdot \sqrt{p}}{40 \cdot \sqrt{s}} + 0,5$$

hvor:

s_r = den største pladebredde i [mm] af s_r , s_{r1} eller s_{r2} som vist på Figur 2.28 og Figur 2.29.

p = det jævnt fordelte tryk i [kN/m²]

s = den tilladelige spænding i [N/mm²] taget som den mindste værdi af enten $0,65 \times R_{p0,2}$ eller $0,5 \times R_m$.

Idet det forudsættes, at korrugering kan regnes fast indspændt i begge ender og den laterale belastning er ens over hele fladen, kan kravet til korrugeringens modstandsmoment "W" i [mm³] af et "Z" eller en "bule" beregnes som:

$$W = \frac{100 \cdot l^2 \cdot s \cdot p}{S}$$

hvor:

l = korrugeringens længde i [m] mellem indspændinger.

s = afstanden mellem 2 Z-profiler eller 2 ”buler” i [mm]

Kravet til forskydningsarealet ” A_f ” i [mm²] kan udregnes på basis af den tilladelige forskydningsspænding som angivet i det generelle afsnit om tilladelige spændinger eller i dette tilfælde sættes til:

$$A_f = \frac{\sqrt{3} \cdot l \cdot s \cdot p}{2 \cdot S}$$

Dimensionering for søjle / kantbelastning

Dimensionering for søjlebelastning er i første række et spørgsmål om stabilitets-undersøgelse, og er fuldstændig analog til den metode, der er beskrevet i afsnit 2.7 om afstivede støtte skodder og pladefelter udsat for kantbelastning, og demonstreret i ”Eksempel 2 – beregning af lodret afstivet støtteskod”.

Beregningen følger følgende køreplan:

1. Beregn tværsnitsdata
2. Check stabiliteten af korrugeringen
3. Check stabiliteten af pladefelterne

Check af stabiliteten af korrugeringen:

Først beregnes den effektive længde af korrugeringerne L_{eff} og det effektive slankhedsforhold λ_{eff} .

λ_c beregnes på basis af 0,2-flydespændingen af den valgte legering, og ved at sammenligne dette tal med det effektive slankhedsforhold λ_{eff} bestemmes det, hvilken af de 2 mulige ligninger for den korrigerede Euler-kurve, der skal benyttes for at udregne den tilladelige spænding – se afsnittet om buling af søjler.

Denne spænding skal så selvfølgelig være større end den aktuelle, hvis korrugeringerne skal være stabile.

Check af stabiliteten af pladefelterne:

Stabiliteten af pladefelterne kontrolleres ligesom for lodret afstivede pladefelter.

Dimensionering for kombineret lateral og søjle belastning

Ved dimensionering for kombinationen af lateral og søjle belastning anvendes superpositionsprincippet efter følgende skema:

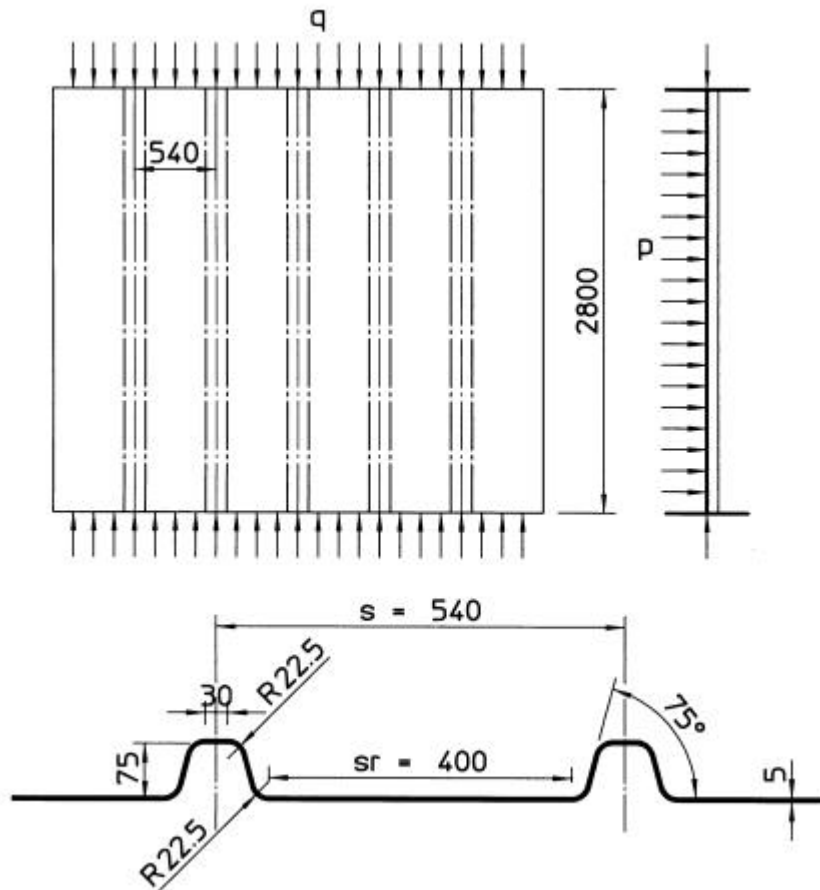
1. Dimensioner for den laterale belastning.
2. Udregn bøjningsspændingerne.
3. Udregn tillægget af normalspændinger som følge af søjlebelastningen.
4. Udregn den aktuelle normalspænding ved at addere bøjnings- og normalspændinger. (Skal selvfølgelig være $< R_{p0,2}$)
5. Check stabiliteten af korrugerings- og pladefelterne på baggrund af den aktuelle normalspænding.

Fornuftig udformning af korrugeringer

Som hovedregel bør vinklen α som vist på Figur 2.31 ikke være mindre end 40° , da der ellers kan opstå instabilitet af pladefeltet, idet korrugeringen så at sige kan "trykkes flad" af den laterale belastning.

Eksempel 4

Et korrugeret panel af type A med dimensioner som vist på Figur 2.34 betragtes som indspændt i begge ender.



$$l = 2,8 \text{ m}$$

$$t = 5 \text{ mm}$$

$$h = 75 \text{ mm}$$

$$r = 22,5 \text{ mm}$$

$$\alpha = 75^\circ$$

$$s = 540 \text{ mm}$$

$$s_r = 400 \text{ mm}$$

$$R_{p0,2} = 150 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\text{till}} = 0,65 \times R_{p0,2} = 0,65 \times 150 = 97,5 \text{ N/mm}^2$$

Figur 2.34 Pladepanel af type A

Hvad er den maksimalt tilladelige rene laterale belastning ?

Først kontrolleres pladen:

Indsættes ovenstående værdier i formlen for beregning af pladetykkelsen, kan den tilladelige laterale belastning "p" udledes:

$$t = \frac{s \cdot \sqrt{p}}{40 \cdot \sqrt{s}} + 0,5 \Rightarrow 5 = \frac{400 \cdot \sqrt{p}}{40 \cdot \sqrt{97,5}} + 0,5 \Rightarrow p = 19,7 \quad [kN/m^2]$$

Herefter kontrolleres korrugeringen:

$$l/s_r = 2800/400 = 7$$

Det høje forhold betyder, at den effektive flangebredde b_{eff} kan regnes = s_r

$$A1 = t \cdot \left(\frac{p \cdot r \cdot a}{45} + \frac{2 \cdot (h - 2 \cdot r \cdot (1 - \cos a))}{\sin a} \right) \Rightarrow$$

$$A1 = 5 \cdot \left(\frac{p \cdot 22,5 \cdot 75}{45} + \frac{2 \cdot (75 - 2 \cdot 22,5 \cdot (1 - \cos 75^\circ))}{\sin 75^\circ} \right) = 1020 \quad [mm^2]$$

$$A2 = 30 \times 5 = 150 \quad [mm^2]$$

$$A3 = 400 \times 5 = 2000 \quad [mm^2]$$

$$A = A1 + A2 + A3 = 1020 + 150 + 2000 = 3171 \quad [mm^2]$$

$$e = \frac{A1 + \frac{(A3 - A2) \cdot h}{2}}{A} = \frac{1020 + \frac{(2000 - 150) \cdot 75}{2}}{3170} = 22,2 \quad [mm]$$

$$W = \frac{I}{\left(\frac{h+t}{2} + e \right)} = \frac{2,18 \cdot 10^6}{\frac{75+5}{2} + 22,2} = 3,50 \cdot 10^4 \quad [mm^3]$$

$$I = \frac{t \cdot h^3}{6 \cdot \sin a} + \frac{h^2 \cdot t \cdot r \cdot \sin a}{2} + A1 \cdot e^2 + A2 \cdot \left(\frac{h}{2} + e \right)^2 + A3 \cdot \left(\frac{h}{2} - e \right)^2 \Rightarrow$$

$$I = \frac{5 \cdot 75^3}{6 \cdot \sin 75^\circ} + \frac{75^2 \cdot 5 \cdot 22,5 \cdot \sin 75^\circ}{2} + 1020 \cdot 22,2^2 + 150 \cdot \left(\frac{75}{2} + 22,2 \right)^2 + 2000 \cdot \left(\frac{75}{2} - 22,2 \right)^2 \Rightarrow$$

$$I = 2,18 \cdot 10^6 \quad [mm^4]$$

Indsættes denne værdi i formlen for det krævede modstandsmoment fås:

$$W = \frac{100 \cdot l \cdot s \cdot p}{s} \Rightarrow 3,5 \cdot 10^4 = \frac{100 \cdot 2,8 \cdot 540 \cdot p}{97,5} \Rightarrow p = 22,6 \quad [kN/m^2]$$

Pladen tåler altså en belastning på 19,7 kN/m², mens korrugeringen kan klare 22,6 kN/m².

I dette tilfælde er det altså den "svage" plade, der begrænser den tilladelige belastning til 19,7 kN/m².

Da der er tale om indspændte korrugeringer, vil langt den største del af forskydningskræfterne overføres igennem korrugeringen.

Ved den tilladelige belastning bliver forskydningskræfterne i hver ende af korrugeringen = 19,7 x 1,4 x 0,57 = 15,7 kN = 15700 N.

Forskydningsarealet er:

$$A_f = \frac{2 \cdot t \cdot (h+t)}{\sin \alpha} = \frac{2 \cdot 5 \cdot (75+5)}{\sin 75^\circ} = 828 \quad [mm^2]$$

Hermed bliver forskydningsspændingen $\tau = 15700/828 = 22 \text{ [N/mm}^2\text{]}$.

Den tilladelige forskydningsspænding τ_{ill} i $[N/mm^2]$ er:

$$\tau_{ill} = \frac{s_{ill}}{\sqrt{3}} = \frac{97,5}{\sqrt{3}} = 56 \quad [N/mm^2]$$

Der er altså ingen problemer med forskydningsspændingen.

Hvad er den maksimalt tilladelige rene kantbelastning ?

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{2,18 \cdot 10^6}{3170}} = 26,2 \quad [mm]$$

Da korrugeringerne er indspændte i enderne, er den effektive længde $L_{eff} = KL = 0,5 \times 2800 = 1400 \text{ mm}$

Det effektive slankhedsforhold $\lambda_{eff} = L_{eff}/r = 1400/26,2 = 54$

$$I_c = \sqrt{\frac{2p^2 E}{R_{p0,2}}} = \sqrt{\frac{2p^2 \cdot 7 \cdot 10^4}{150}} = 96$$

Da $\lambda_{\text{eff}} < \lambda_c$ skal Ligning 2.2 (parabolisk korrektionskurve inkl. sikkerhedsfaktor) benyttes:

$$\frac{s_{\text{till}}}{R_{p0,2}} = 0,5 - \frac{(I_{\text{eff}})^2}{4(I_c)^2} = 0,5 - \frac{(54)^2}{4(96)^2} = 0,42$$

Den tilladelige spænding for korrugeringen bliver derfor:

$$\sigma_{\text{till}} = 150 \times 0,42 = 63 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Den kritiske bulespænding for pladefelterne er:

$$s_{cr} = 25,2 \cdot 10^4 \left(\frac{t}{s_r} \right)^2 = 25,2 \cdot 10^4 \left(\frac{5}{400} \right)^2 = 39,4 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Pladen buler altså allerede ved 39,4 N/mm², mens selve korrugeringen først buler ved 67,5 N/mm².

Det er altså pladens stabilitet, der sætter begrænsningen for den maksimalt tilladelige kantbelastning, der dermed bliver:

$$q = \frac{A \cdot s}{s} = \frac{3170 \cdot 39,4}{0,57} = 219 \text{ [kN/m]}$$

Bemærk i øvrigt at pladepanelet er "sundt" forstået på den måde, at det buler i den rigtige rækkefølge dvs. først pladen og derefter korrugeringen.

Altså: lokal kollaps før global kollaps!

2.9 DIMENSIONERING OG UDFORMNING AF GITTER-KONSTRUKTIONER

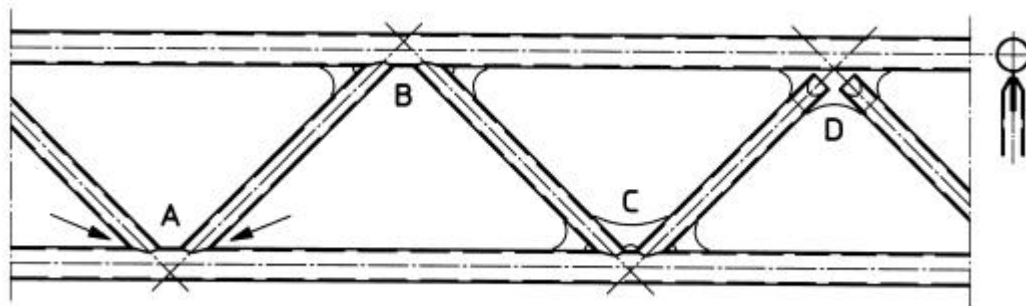
Gitterkonstruktioner er konstruktioner bestående af stænger (bjælker), der er forbundne i knudepunkter.

De enkelte stænger er slanke i forhold til deres længde.

Gitter konstruktioner anvendes typisk i lette broer, kranarme, glasoverdækninger etc. hvor stor stivhed skal kombineres med lav vægt.

Man taler om en "plangitter" konstruktion, når konstruktionen kun udstrækker sig i ét plan og en "rumgitter" konstruktion, når den udstrækker sig rumligt.

Figur 2.35 viser et eksempel på 4 forskellige samplingsdetaljer i en typisk plangitterkonstruktion sammensvejst af runde rør.



Figur 2.35 Typiske detaljer i en plangitterkonstruktion

Detalje A er en simpel sammensvejsning af rørene. Det er en billig og enkel løsning, men der opstår nogle hårde punkter (markeret med pile på skitsen), der samtidig kan være vanskelige at svejse ordentligt, hvis vinklen er meget spids.

Er der tale om konstruktioner, der ikke er specielt udmattelsesbelastede, vil løsningen være acceptabel, men risikoen for brud kan nedsættes væsentligt, hvis der monteres blødt afrundede knæ i de spidse vinkler som vist på detalje B.

Detalje C viser den styrkemæssigt helt optimale løsning, hvor samlingen er forstærket med yderligere et afrundet knæ.

Detalje D er en alternativ løsning, der er forholdsvis billig, fordi der ikke skal foretages en kompliceret tilpasning mellem to runde rør, men den er ikke så optimal rent styrkemæssigt som løsning C.

2.9.1 DIMENSIONERING

Gitterkonstruktioner er beregningsmæssigt svære at håndtere med ”hånd beregninger”, fordi der er tale om statisk ubestemte konstruktioner. Består gitteret af meget mere end 3-4 stænger, vil håndberegning i praksis blive alt for langsommelig.

Ved beregning af gitterkonstruktioner anvendes derfor som regel de relativt billige såkaldte bjælke-element programmer.

Programmerne er af samme type som Finite-Element programmer (FEM), men kan kun håndtere bjælker – ikke mere avancerede ”finite elements” som 2D og 3D ”solids” samt plade og skalelementer.

Ideen med programmerne er, at der opbygges en model bestående af elastiske bjælker (stænger), der er forbundne i knudepunkter. Bjælkerne er udstrækningsløse i deres tværsnitsretning.

De elastiske bjælkers tværsnitsdata beregnes som regel af programmet ud fra de geometriske data.

Hvor bjælkerne er forbundne med knæ, og derfor er meget stive i enderne, vil det være nødvendigt at erstatte det sidste stykke af den elastiske bjælke med et stift uelastisk stykke for at simulere den rigtige længde af det elastiske stykke. Ellers ville modellen virke for ”blød”.

Hvert enkelt knudepunkt forsynes med 6 såkaldte frihedsgrader, der beskriver punktets begrænsninger med hensyn til at kunne bevæge sig på de 6 mulige måder:

- Translation i X-, Y- eller Z-aksens retning
- Rotation om X-, Y- eller Z-aksen

Typisk vil programmerne tilbyde 3 mulige værdier for hver af de 6 frihedsgrader:

- Fast indspændt (værdien 0)
- Fri (værdien 1)
- Fjederbelastet (værdien 2 efterfulgt af en fjederkonstant)

En frihedsgrad for et knudepunkt kan således f.eks. være: 100001

Af hensyn til regnetiden vil det være en fordel at holde modellens størrelse (den såkaldte båndbredde) så lille som muligt. Det kan f.eks. gøres ved at ”låse” så mange frihedsgrader som muligt dvs. have så mange 0'er som muligt.

Ved at påtrykke de ydre kræfter i knudepunkterne eller på de enkelte bjælker beregner programmet så flytningen af de enkelte knudepunkter, reaktionskræfterne i punkterne samt kræfter, spændinger og deformationer i de enkelte bjælker.

Mange af de typiske bjælke-element programmer er ikke i stand til at checke stabiliteten af de enkelte bjælker.

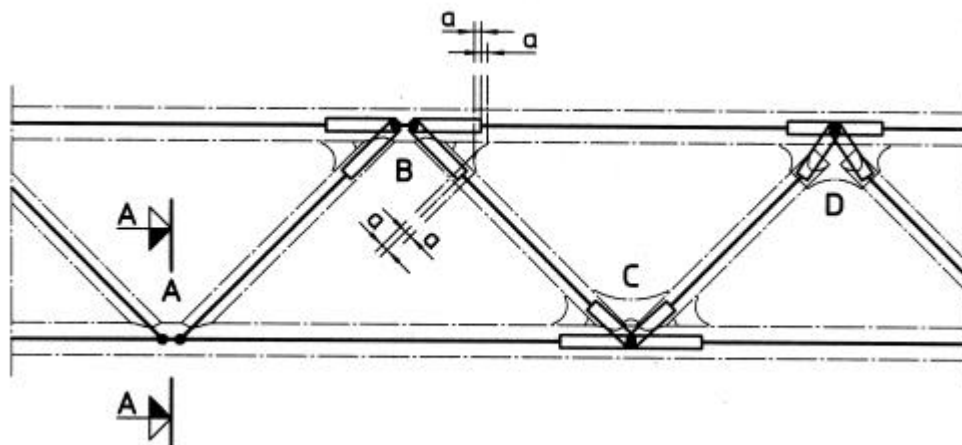
I disse tilfælde må alle trykpåvirkede bjælker ”manuelt” checkes f.eks. på samme måde som almindelige søjler (se det specielle afsnit om søjler). Det er i den forbindelse vigtigt at tage hensyn til, at bjælkerne ofte ikke blot vil være aksialt belastede, men at der også kan være tale om væsentlige bøjemomenter, hvilket nedsætter stabiliteten betydeligt.

Når bjælke modellerne opbygges, er det vigtigt at vælge en passende detaljeringsgrad, der tager hensyn til alle de mulige kritiske punkter.

Figur 2.36 viser gitterkonstruktionen fra Figur 2.35 opbygget som model.

De enkelte "matematiske" bjælker er indlagt i de virkelige bjælkers neutralakser.

I punkt A er bjælkerne forbundne i to knudepunkter.



Figur 2.36 Modellering af detaljer i gitterkonstruktion

Det kan være meget fristende at slå de to punkter sammen til ét, men så vil f.eks. forskydningsspændingerne i snittet A-A ikke blive beregnet.

Er der tale om store modeller vil man i praksis alligevel ofte vælge den forenkledte modellering og så evt. rette et enkelt punkt for at checke forskydningsspændingerne.

Man skal desuden være opmærksom på, at afstanden mellem de to knudepunkter er så lille, at bjælken mellem dem ikke kan betragtes som værende slank, dvs. lang i forhold til sit tværsnit. Da dette er en afgørende forudsætning for matematikken bag de typiske bjælkeelementsregninger, skal de beregnede spændinger altid tages med et vist forbehold.

Den beskrevne modellering betyder, at der introduceres en fejl, fordi de enkelte bjælker beregningsmæssigt er længere, end de er i virkeligheden. Så længe der er tale om bjælker, der er meget lange i forhold til deres tværsnit vil fejlen dog være så lille, at man som oftest vælger at se bort fra den.

I punkt B er der stadig indlagt to knudepunkter, men på grund af knæene har det været nødvendigt at indføre nogle uelastiske endestykker i de enkelte bjælker (vist som dobbeltlinier på skitsen). Længden af disse stykker vælges normalt således, at de slutter halvvejs ude langs knæet (se skitsen). Det er et kompromis, der erfaringsmæssigt giver et rimeligt beregnings resultat. Da knæets styrke reduceres mod enden, ville det f.eks. ikke være rimeligt at forlænge de uelastiske stykker helt ud til knæets ende.

I punkt C betyder det inderste knæ, at de to knudepunkter kan sammenlægges til ét. Længden af de uelastiske endestykker for de skrå bjælker må fastlægges som et fornuftigt kompromis, for den kan aldrig komme til at passe i forhold til begge knæene.

I punkt D er det naturligt kun at have ét knudepunkt, og som det ses, vil de uelastiske endestykker på de skrå bjælker være vinklet væsentligt i forhold til de elastiske stykker.

2.9.2 OPTIMERING AF GITTERKONSTRUKTIONER

Ved gitterkonstruktioner er det vigtigt at antallet og længden af trykstænger reduceres så meget som muligt. Det skyldes, at trykstænger i aluminium pga. kravene til stabilitet ofte må udføres med ret store tværsnit, og dermed vil blive ret tunge. Trækstænger vil derimod kunne dimensioneres efter et rent spændingskriterium, og kan derfor laves ganske tynde.

Der er meget at hente ved at optimere konstruktionen således, at alle elementerne er nogenlunde lige hårdt belastede i forhold til deres individuelle grænser. For nogle bjælker vil der være tale om en procentdel af den maksimalt tilladelige trækspænding, for andre vil der være tale om en afstand til en stabilitetsgrænse.

Hvis beregningen f.eks. viser, at en bjælke er for hårdt belastet, vil de fleste konstruktører vælge blot at forstærke den, men det er slet ikke sikkert, det er den rigtige fremgangsmåde. Muligvis vil det være mere optimalt at gøre den blødere eller at ændre geometrien, så andre dele af konstruktionen overtager en større del af arbejdet.

Det er disse kreative valg der gør det uhyre vanskeligt at lave programmer, der automatisk kan optimere en konstruktion, ikke mindst hvis der også skal tages hensyn til produktionsmæssige parametre som ønsket om reduktion af antallet og typer af elementer, reduktion af arbejdstimer, tilpasning til eksisterende produktionsfaciliteter etc.

2.9.3 SIKKERHED

Det bør tilstræbes at dimensionere en gitterkonstruktion, så den ”bryder sammen” i den rigtige rækkefølge. Sekundære elementer bør bryde sammen før de primære, så konstruktionen i første omgang får en større nedbøjning, men stadig ikke oplever totalt kollaps. Først efter flere ”forvarsler” må den bryde totalt sammen.

Hvis en gitterdrager med et stort spænd overbelastes og får en stor nedbøjning vil den få en facon, der på visse områder kan sammenlignes med bæretovene i en hængebro. Det kan give en stor rest bæreevne hvis blot man sikrer sig, at enderne ikke kan falde ned af understøtningerne selv om drageren på grund af nedbøjningen bliver kortere. Der er altså mulighed for at indføre en ekstra sikkerhed mod total kollaps ved at lave en form for faldsikring af enderne.

2.10 DIMENSIONERING AF CENTRALT PÅVIRKEDE TRYKSTÆNGER - EUROCODE 9

2.10.1 INDLEDING

Konstruktioner udsat for trykbelastning skal naturligvis have modstandsegenskaber svarende til kravene for trækbelastede elementer, men endvidere kan der i forbindelse med relativt slanke elementer i forhold til længden optræde svigt i form af kollaps (søjlevirkning) ved trykpåvirkede elementer.

Sådanne konstruktioner må have modstandsegenskaber således at søjlekollaps ikke opstår under trykbelastning.

I eurocode 9 er centralt påvirkede trykstænger behandlet i afsnit 5.8.4 side 71 - 73.

Grundlaget for beregning er velkendt med hensyn til, at der findes en bæreevne-reduktion i forhold til statiske bæreevne som funktion af søjlens slankhedsforhold.

Dette er anført for forskellige legeringstyper i såvel symmetriske som ikke-symmetriske konstruktionselementer og i svejst eller ikke-svejst udførelse.

De her anførte udtryk for bæreevnen af centralt påvirkede trykstænger er angivet i Eurocode 9 ENV 1999-1-1:1998.

Det antages, at trækbæreevnen af opsvejste profiler påvirket i svejsesømmens længderetning tidligere er angivet som

$$N_E \leq N_{t,R}$$

hvor $N_{t,R} = (A - A_{\text{haz}}) \cdot f_{0,2} + A_{\text{haz}} \cdot \rho_{\text{haz}} \cdot f_{0,2}$

$$N_{t,R} = f_{0,2} \cdot A \cdot (1 - A_{\text{haz}}/A \cdot (1 - \rho_{\text{haz}}))$$

$$N_{t,R} = f_{0,2} \cdot A \cdot k_{\text{haz}}$$

Her er der indført en vægtet styrkereduktionsfaktor $k_{\text{haz}} = (1 - A_{\text{haz}}/A (1 - \rho_{\text{haz}}))$.

Denne faktor er i søjleafsnittet 5.8.3 i Eurocode 9 angivet som $A1/A$.

Faktoren η for tværsklasser (1,2,3,4) i udtrykket for bæreevnen er udeladt, idet:

$\eta = 1$ for klasse 1, 2 og 3 tværsknit.

Der er således set bort fra klasse 4 tværsknit er i dette materiale.

2.10.2 CENTRALT PÅVIRKEDE TRYKSTÆNGER

For en centralt påvirket trykstang skal det eftervises, at den regningsmæssige trykbelastning N_E opfylder kravet:

$$N_E \leq N_{b,R}$$

hvor $N_{b,R}$ er den regningsmæssige bæreevne med hensyn til stabilitetssvigt.

$$N_{t,R} = f_s A / \gamma_{M1}$$

f_s karakteristiske kritiske stabilitetsspænding

A bruttoarealet uden reduktion for varmepåvirket svejseareal

γ_{M1} partialkoefficient (1,1 i Eurocode 9)

Den kritiske stabilitetsspænding afhænger af materialets styrke og leveringstilstand, profilet's symmetriforhold samt fremstillingsmetoden for profilet.

Ved beregningen af stabilitetsspændingen anvendes følgende formler:

$$f_s = \chi k_1 k_2 f_{0,2}$$

$f_{0,2}$ karakteristiske materialestyrke

χ søjlereduktionsfaktor

k_1 reduktionsfaktor for asymmetriske tværsknit

k_2 reduktionsfaktor for svejste profiler

$$\chi = 1 / (\phi + (\phi^2 - \lambda^2)^{1/2})$$

$\phi = 0,5(1 + 0,20(\lambda - 0,10) + \lambda^2)$ varmebehandlet tilstand

$\phi = 0,5(1 + 0,32\lambda + \lambda^2)$ ikke varmebehandlet tilstand

λ relative slankhedsforhold for den relevante udbøjningsretning

$$\lambda = l_s / (i \pi) (f_{02} / E)^{1/2}$$

l_s fri søjlelængde

i tværsnittets inertiradius = $(I / A)^{1/2}$

E karakteristiske elasticitetsmodul = 70000 N/mm²

A arealet af bruttotværsnittet

I inertimomentet om udbøjningsakslen

Den fri søjlelængde l_s kan findes i Eurocode 9 side 73 eller i ståbi-tabeller.

2.10.3 SYMMETRISKE OG VALSEDE PROFILER

Hvis søjlens tværsnit er symmetrisk om udbøjningsakslen og profilet ikke er opsvejt bliver reduktionsfaktorerne $k_1 = k_2 = 1,0$ og den kritiske stabilitetsspænding

$$f_s = \chi f_{0,2}$$

Søjlereduktionsfaktoren χ for varmebehandlede og ikke varmebehandlede legeringer er afbildet i Figur 2.37 som funktion af det relative slankhedsforhold λ .

2.10.4 ASYMMETRISKE PROFILER

For profiler med et asymmetrisk tværsnit om udbøjningsakslen kan reduktionsfaktoren k_1 beregnes efter

$$k_1 = 1 - 2,4 \psi^2 k_\lambda \quad \text{varmebehandlet tilstand}$$

$$k_1 = 1 - 3,2 \psi^2 k_\lambda \quad \text{ikke varmebehandlet tilstand}$$

hvor $k_\lambda = \lambda^2 / ((1 + \lambda^2)(1 + \lambda)^2)$

$$\psi = (y_{\max} - y_{\min}) / h$$

h tværsnittets højde

y_{\max} , y_{\min}

største og mindste kantafstand fra neutralakslen

Eksempel:

For et T-profil 50 x 50 x 6 mm er $y_{\max} = 50 - 13,9 = 36,1$ mm, $y_{\min} = 13,9$ mm og $h = 50$ mm.

$$\psi = (36,1 - 13,9) / 50 = 0,44$$

Reduktionsfaktoren k_1 er optegnet i Figur 2.38 for asymmetriske U, L og T- profiler med afstandsforholdet $\psi = 0,44$.

2.10.5 OPSVEJSTE PROFILER

Reduktionsfaktoren k_2 for opsvejste profiler med langsgående svejsesømme er givet ved

$$k_2 = 1 - (1 - k_{\text{haz}})10^{-\lambda} - (0,05 + 0,1k_{\text{haz}})\lambda^{1,3(1 - \lambda)} \quad \text{varmebehandlet tilstand}$$

$$k_2 = 1 + 0,04(4\lambda)^{(0,5 - \lambda)} - 0,22\lambda^{1,4(1 - \lambda)} \leq 1,0 \quad \text{ikke varmebehandlet tilstand}$$

I udtrykket for materialer i varmebehandlet leveringstilstand er der taget hensyn til styrkenedsættelsen af grundmaterialet i den varmepåvirkede svejsezone ved faktoren:

$$k_{\text{haz}} = (1 - A_{\text{haz}}/A (1 - \rho_{\text{haz}}))$$

A_{haz} arealet af den varmepåvirkede zone

A bruttoarealet af tværsnittet

ρ_{haz} styrkereduktionsfaktoren for den varmepåvirkede zone

For meget korte og tykke søjler, hvor det relative slankhedsforhold λ nærmer sig 0, vil reduktionsfaktoren k_2 for materialer i varmevarmebehandlet tilstand svare til k_{haz} faktoren.

For opsvejste profiler med tværgående svejsesømme anvendes reduktionsfaktoren:

$$k_2 = \rho_{\text{haz}}$$

Reduktionsfaktoren k_2 som funktion af det relative slankhedsforhold λ er afbildet i Figur 2.39 og Figur 2.40.

Eksempel:

Et profil tænkes opsvejt af 2 aluminiumplader i stedet for et færdigekstruderet profil.

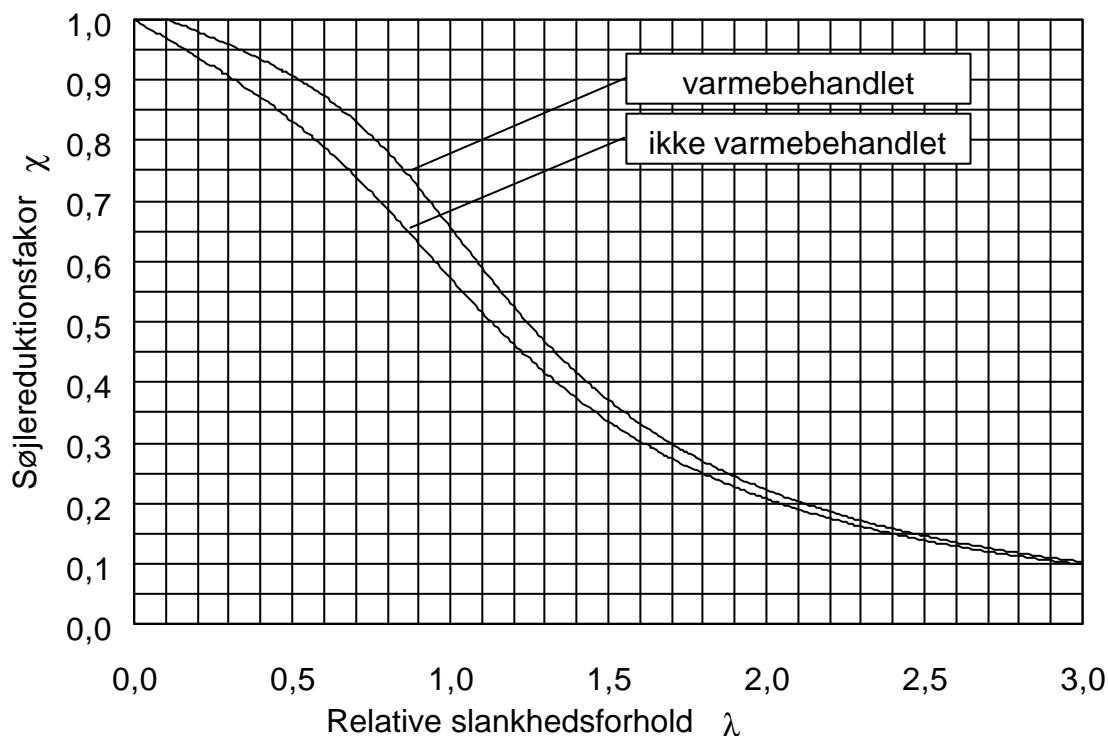
Givet: $\lambda = 0,7$ og $k_{\text{haz}} = 0,9$

$$k_2 = 1 - (1 - k_{\text{haz}}) \cdot 10^{-\lambda} - (0,05 + 0,1k_{\text{haz}})\lambda^{1,3(1 - \lambda)}$$

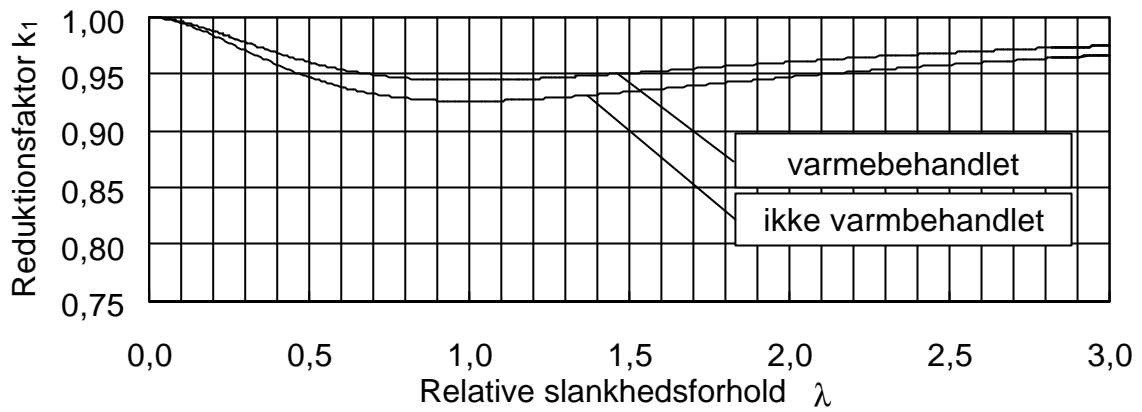
$$k_2 = 1 - (1 - 0,9) \cdot 10^{-0,7} - (0,05 + 0,1 \cdot 0,9) \cdot 0,7^{1,3 \cdot (1 - 0,7)}$$

$$k_2 = 1 - 0,1 \cdot 0,1995 - 0,14 \cdot 0,7^{0,39}$$

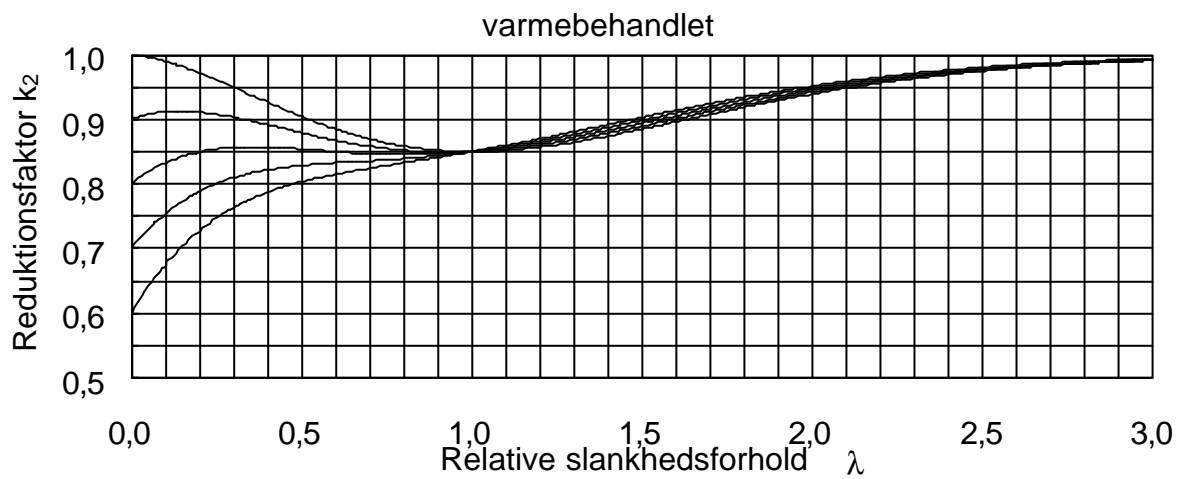
$$k_2 = 0,86 \quad (\text{værdien kan aflæses på Figur 2.39})$$



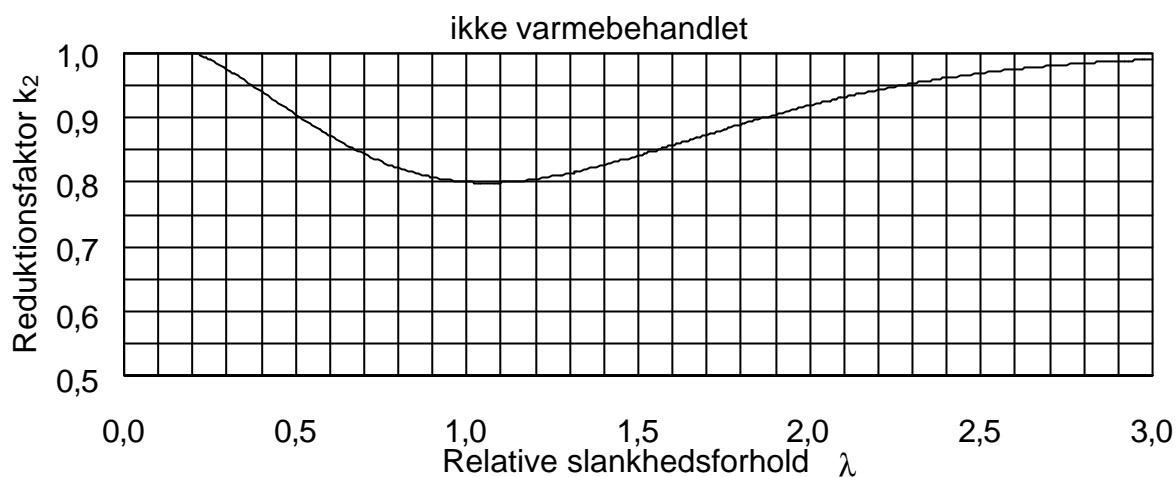
Figur 2.37 Søjlereduktionsfaktor som funktion af slankhedsforhold.



Figur 2.38 Reduktionsfaktor for asymmetriske U, L, T-profiler ($\gamma = 0,44$).



Figur 2.39 Reduktionsfaktor for opsvejste profiler ($K_{haz} = 0,6 - 0,7 - 0,8 - 0,9 - 1,0$).



Figur 2.40 Reduktionsfaktor for opsvejste profiler.

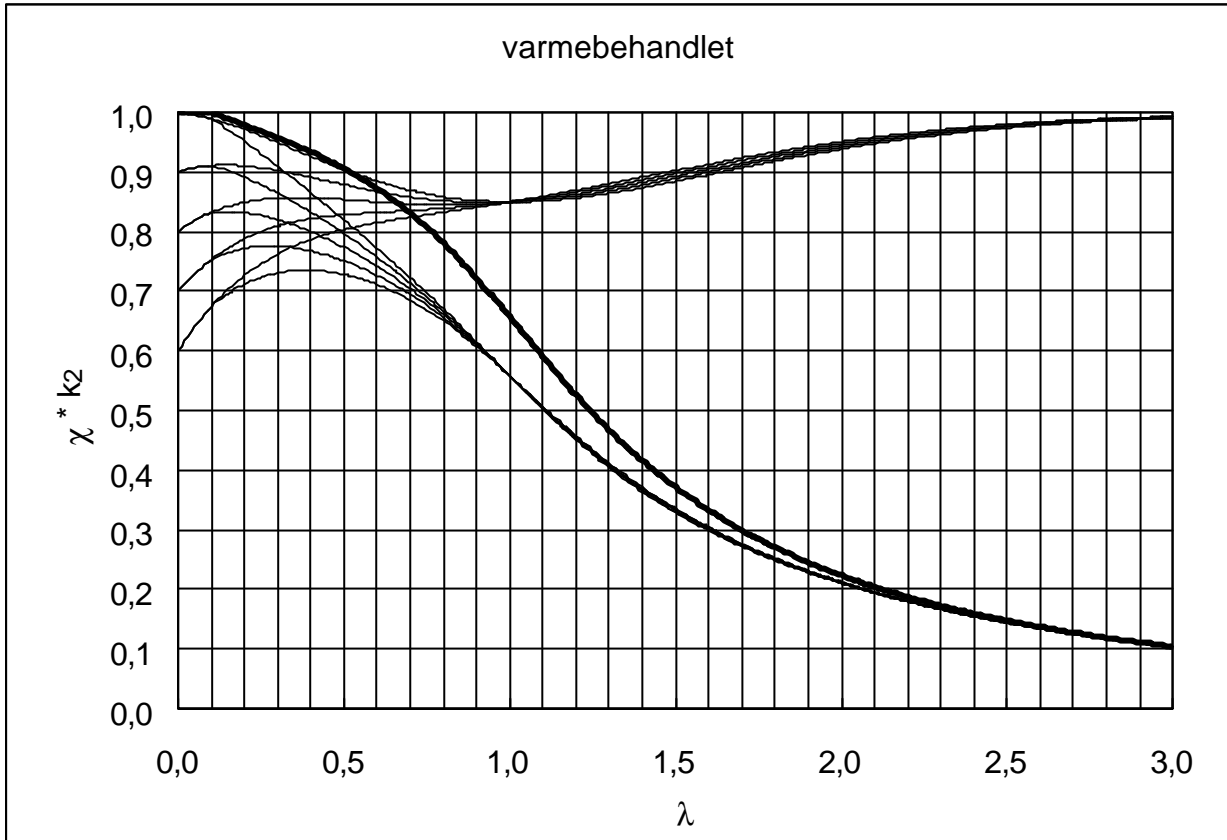
Kommentarer

Ifølge Figur 2.39 er reduktionsfaktoren k_2 for opsvejste profiler med langsgående svejsesømme konstant lig med 0,85 for $\lambda = 1,0$ uafhængig af udbredelsen af den varmepåvirkede svejsezone A_{haz} og styrkereduktionsfaktoren ρ_{haz} .

Hvis der kun svejses ganske lidt vil faktoren k_{haz} nærme sig 1,0, og reduktionsfaktoren k_2 burde derfor gå imod 1,0 for alle værdier af det relative slankhedsforhold λ .

Ved at multiplicere søjlereduktionsfaktoren χ fra grundkurven for ikke svejste profiler med svejsereduktionsfaktoren k_2 fås følgende stabilitetskurver for symmetriske opsvejste profiler med langsgående svejsesømme, se Figur 2.42.

$$f_s = \chi k_2$$



Figur 2.41 Stabilitetskurver for symmetriske opsvejsede profiler.

Søjlekurver i Eurocode 9 viser i dette tilfælde stigende stabilitetsbæreevne for en forøgelse af søjlens slankhed i området $\lambda = 0 \sim 0,3$. Dette vil betyde, at f. eks. en lang søjle inden for dette slankhedsinterval vil have en større bæreevne end en kort søjle.

Ovennævnte problematik er påpeget overfor en af forfatterne til dette afsnit i Eurocode 9.

Denne forfatter har efterfølgende gennemgået det teoretiske baggrundsmateriale og finder på den baggrund ikke anledning til at foreslå ændringer i designreglerne.

2.11 EKSTRUDERING / EKSTRUDEREDE PROFILER

2.11.1 INDLEDNING

Stangpresning, eller "ekstrudering", (afledt af det engelske extrude) er en typisk bearbejdningsmetode for "ikke-jernmetaller" og specielt aluminium. Materialet presses i opvarmet og blødgjort, men ikke smeltet tilstand gennem en matriceåbning i samme form, som det profil, man ønsker at fremstille. For aluminium ligger ekstruderingstemperaturen på mellem 400 og 500°C, hvor smeltetemperaturen til sammenligning ligger på ca. 650°C.

Fordelene ved ekstrudering er, at man på en nem og billig måde kan fremstille mere eller mindre komplicerede profilformer, både åbne og lukkede. Ekstrudering er derfor en meget anvendelig teknik, som er i stærk fremgang. Alle gængse legeringer kan i princippet anvendes til ekstrudering, men ikke alle med lige godt resultat. Oftest benyttes de varmhærdende 6000 legeringer (AlMgSi legering). Se rubrik 1.2.4 om varmhærdning.

Da værktøjsomkostningerne ved ekstrudering er forholdsvis lave, typisk 65.000 til 225.000 kr., kan det ofte betale sig at få fremstillet mindre serier af specialprofiler..

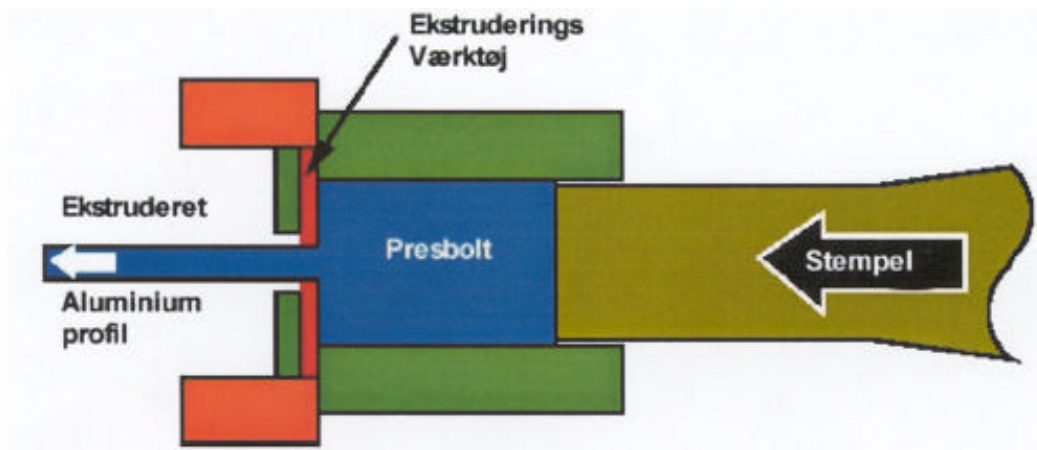
Ekstruderede profiler behøver næsten ingen efterbearbejdning, og ofte er en afskæring til den rette længde alt, der behøves, for at få en færdig komponent. Et betydeligt mere moderne begreb ligger derfor for hånden, nemlig "*near-net shape*".

Desuden er der store muligheder for at indbygge funktioner som f.eks. skruekanaler, forberedelse til svejsning, hængsel- og klipsefunktioner etc. i profilet, hvorved der yderligere opnås en væsentlig reduktion i udgifterne til fremstilling af det færdige produkt.

2.11.2 EKSTRUDERINGSTEKNOLOGIER

Direkte ekstrudering:

Den mest almindelige metode til ekstrudering er den såkaldte "direkte ekstrudering", hvor det bløde aluminium – den såkaldte "presbolt" (eller på engelsk: "billet") – presses gennem et ekstruderingsværktøj (matrice), der giver emnet sin facon – se Figur 2.42.



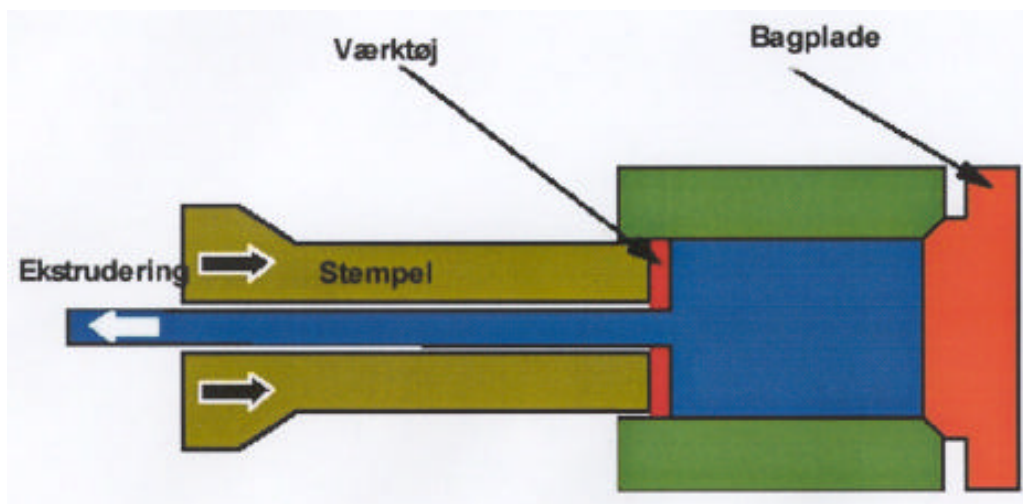
Figur 2.42 Direkte ekstrudering

Den direkte ekstrudering er en billig proces og har desuden den fordel, at presboltens overfladeurenheder bliver tilbage i presboltresten (den del af presboltten, der er tilbage, efter at stemplet er presset i bund).

Ulemper er, at der er en stor friktionskraft imod containervæggen (engelsk: "liner").

Indirekte ekstrudering:

En lidt anden metode til ekstrudering er den såkaldte "indirekte ekstrudering". I stedet for at presse presboltten igennem et ekstruderingsværktøj bliver denne så at sige stående, og i stedet presses ekstruderingsværktøjet ind i presboltten – se Figur 2.43.



Figur 2.43 Indirekte ekstrudering

Fordelen ved denne metode er, at der overføres en stor specifik kraft fra stemplet til materiale, da der ikke er nogen friktionskraft imellem containervæg og presbolt, som skal overvindes.

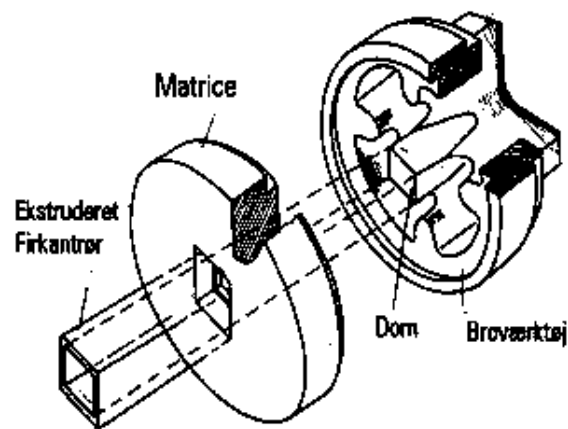
Ulemperne er, at processen er dyr, og at der skal bruges et langt stempel eller meget korte presbolte med tidskrævende ilægning.

Rørekstrudering:

Ved ekstrudering af rør anvendes to forskellige metoder, der begge er afledt af den direkte ekstruderingsmetode: Ekstrudering ved hjælp af broværktøj og ekstrudering omkring en indre dorn.

Ved broværktøjsmetoden består ekstruderingværktøjet af to dele, der passer ind i hinanden: En ydre matrice, der giver emnet sin ydre facon, og et såkaldt broværktøj med en kort dorn, der rækker ind gennem den ydre matrice. Dornen er fastholdt til broværktøjet vha. strømlinieformede broer. Under ekstruderingen flyder det bløde aluminium rundt om broerne og sammensvejses igen på bagsiden – se Figur 2.44.

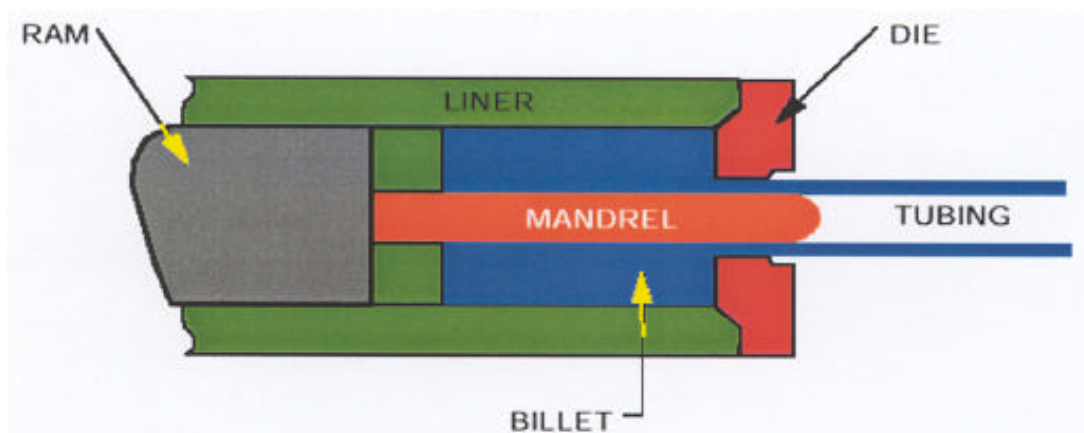
Broværktøjsmetoden er den mest almindelige metode til fremstilling af ekstruderede rør og hulprofiler.



Figur 2.44 Broværktøjsmetoden til fremstilling af hule profiler

Ved ekstrudering over en dorn – se Figur 2.45 – er der monteret en dorn (engelsk: "mandrel") på det bevægelige stempel. Dornen går gennem matricen (engelsk: "die"), og danner derved den indre facon.

Produktiviteten er ca. 50% lavere end ved broværktøjsmetoden, og er derfor ikke særlig udbredt.



Figur 2.45 Ekstrudering over en dorn

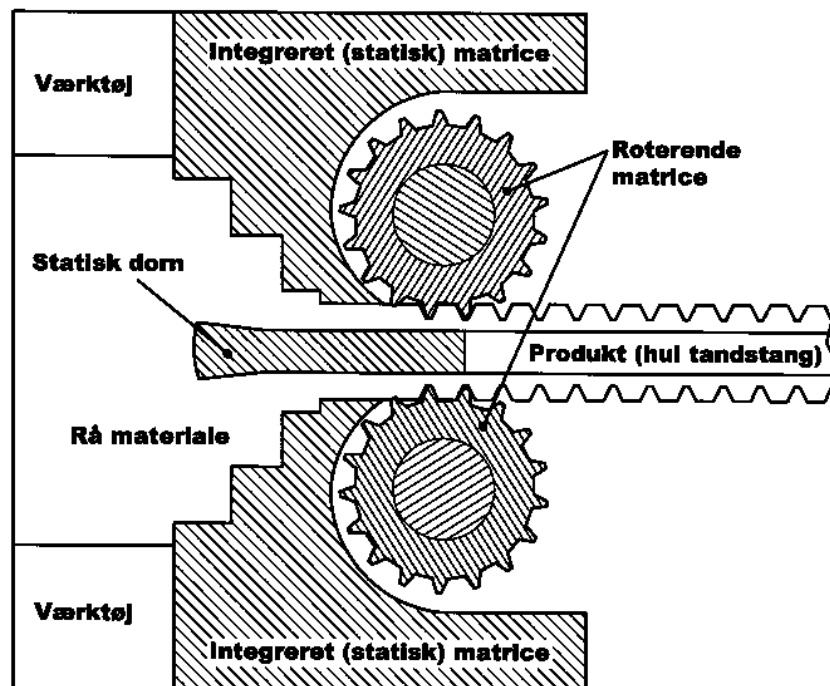
3-D Ekstrudering

Et nyt tiltag indenfor ekstruderings teknologien er den såkaldte 3-D ekstrudering, hvor der anvendes et system af henholdsvis roterende og faste matricer.

Man kan sammenligne 3-D ekstrudering med direkte ekstrudering og ekstrudering med broværktøj, blot med den forskel, at den endelige ydre form skabes i 2 trin.

Den faste matrice (engelsk: "integrated static die") giver emnet sin forløbige ydre form, hvorefter de roterende matricer ("rotating dies") færdiggør i arbejdet – se Figur 2.46.

Fordelen ved metoden er, at man f.eks. kan ekstrudere en færdig tandstang eller en riflet overflade.



Figur 2.46 Eksempel på 3-D ekstrudering, Markram [20].

2.11.3 EKSTRUDERINGSSVEJSNING

Ekstruderings svejsning er en sammenføjning af to berøringsoverflader i ekstruderingsprocessen. Svejsningen sker udelukkende via det høje tryk og de efterfølgende store deformationer, der opstår i matricerne, men uden at metallet smelter.

Der findes to former for ekstruderings svejsninger:

1) "Charge weld"

Charge weld er svejsning af to på hinanden følgende presbolte, dvs. mellem det resterende metal i værktøjet efter afskæring af presboltresterne og den nye presbolt. Svejsningen påbegyndes, når profilet

er kommet et stykke forbi stopmærket. På grund af det uhomogene metalflyd i værktøjet, vil der ske en udstrækning langs profilet. Charge weld opstår både i lukkede og åbne ekstruderinger.

I en "charge weld" svejsning kan der forekomme reducerede materialeegenskaber i et vist område langs profilet – det såkaldte "CW-område". Mens den maksimale brudstyrke kun reduceres perifert, påvirkes egenskaber såsom modstandsevne mod, og i specielle tilfælde, hvor der stilles meget høje krav til udmattelsesstyrken af det færdige profil, er det derfor nødvendigt at fraskære en del af CW-området. Normalt fraskærer man ikke CW-området, hvis profilet udelukkende er statisk belastet.

2) "Seam weld"

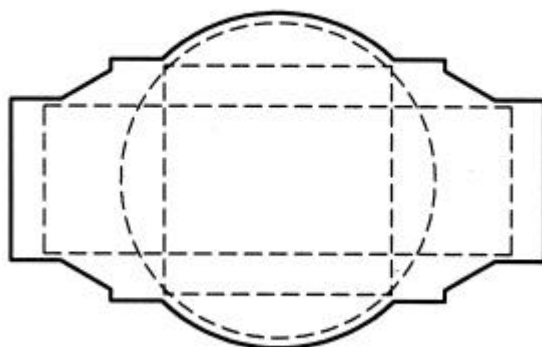
"Seam weld" – sømsvejsning opstår, når der ekstruderes over et broværktøj. "Seam welden" løber over hele ekstruderingslængden.

2.11.4 BEGRÆNSNINGER I STØRRELSEN AF EKSTRUDEREDE PROFILER

Afhængig af valg af ekstruderings leverandør vil der optræde nogle begrænsninger i udformningen af et ekstruderet profil både hvad angår den ydre geometri og hvad angår størrelsen af eventuelle hulrum i ekstruderingen.

I Figur 2.47 vises et eksempel på en begrænsningskurve fra en aluminiumsleverandør til brug ved udformning af et konkret tværsnit. Omridset angiver den maksimale mulige ydre geometri af en ekstrudering, de interne linier i samme figur angiver den maksimale størrelse af mulige indre hulrum i en ekstrudering af henholdsvis cirkulær, kvadratisk eller rektangulær form.

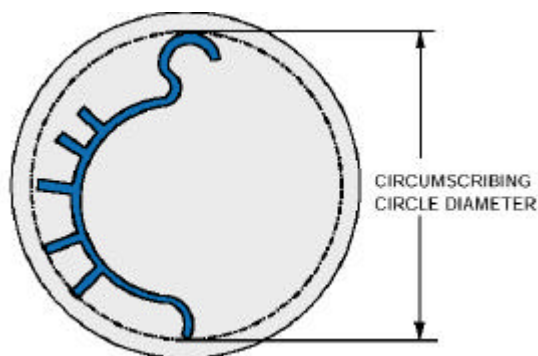
De største ekstruderinger, der kan fremstilles i dag, er omkring 600 x 200 mm, men 450 x 150 mm er mere almindeligt.



Figur 2.47 Eksempel på begrænsningskurve for ekstrudering.

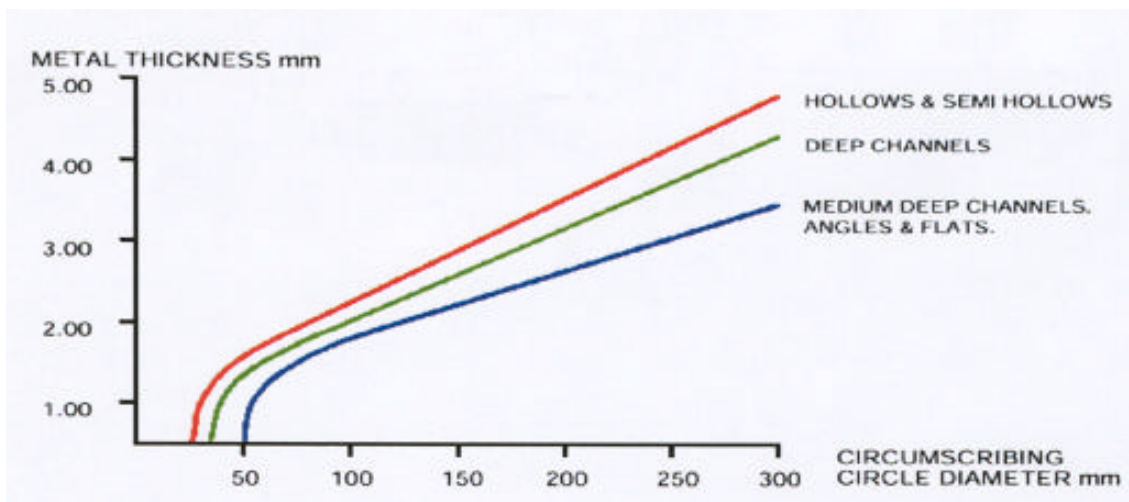
OCD-cirkelforhold:

Den omskrevne cirkeldiameter – OCD (Circumscribing Circle Diameter, CCD) – er et udtryk for profilets størrelse og virker derfor bestemmende for valg af godstykkelse, tolerance og prisfastsættelse. Det er idag muligt at ekstrudere profiler med en OCD fra 2 mm og op til ~800 mm.



Figur 2.48 OCD-cirkelforhold.

Afhængig af den omskrevne diameter er der en vis minimums vægtykkelse af ekstruderingen. Dette forhold er illustreret på Figur 2.49.



Figur 2.49- Forholdet mellem min. vægtykkelsen og den omskrevne diameter.

Vægten af et ekstruderet profil kan variere fra under 0,03 kg/m til over 300 kg/m

2.11.5 DESIGN AF EKSTRUDEREDE PROFILER

Et tværsnit er nemmere at ekstrudere hvis det:

- har identiske vægtykkelser
- har simple bløde former – rundt i stedet for skarpe vinkler
- er symmetrisk
- har en lille omskrevne cirkel
- ikke har dybe og smalle fordybninger

Der skelnes mellem 3 forskellige profiltyper:

- 1) **Lukkede profiler:** Massive stænger med vilkårlig udvendig form og ingen kritiske tungeforhold.
- 2) **Halvåbne profiler:** I princippet et lukket profil, men med kritiske tungeforhold. Forholdet mellem arealet på kammeret og kvadratet på

åbningen i profilet afgør om profilet kaldes et lukket eller et halvåbent profil.

- 3) **Hulprofil:** En tilfældig form, men materiale hele vejen rundt, så værktøjet kræver en broopbygning, hvorved der opstår en svejsning (seam weld).

2.11.6 ANVENDELSESOMRÅDER FOR EKSTRUDEREDE ALUMINIUM PROFILER

Ekstruderingsprocessen frembyder mange muligheder for former og indbyggede funktioner. Ekstruderede aluminium profiler anvendes derfor også i mange forskellige produkter og industrisegmenter:

Byggeindustrien til døre, vinduer facader og glastage m.m samt markiser, flagstænger, stiger, indretningsdetaljer og møbler.

Elektronikbranchen bruger ekstruderede aluminiumprofiler til køleprofiler, indkapslinger og frontpaneler.

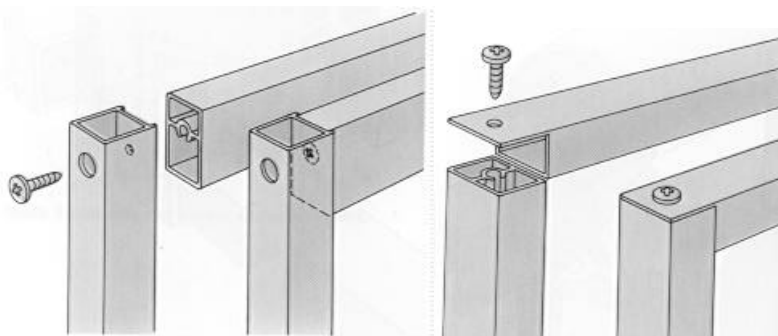
Fritidssektoren finder man profiler anvendt til bl.a fodboldmål og andre redskaber til udendørs idræt, tennis, golf og fritidsbåde.

Transportindustrien er et stort segment, her findes profiler til lastbiler, busser, personbiler, tog, offshoreindustrien og skibe, netop her vil forbruget af ekstruderede aluminium profiler stige i takt med kravene om lettere køretøjer med lavere energiforbrug.

2.11.7 INDBYGGEDE FUNKTIONER

En af de store fordele ved ekstruderede profiler er, at der kan indbygges forskellige funktioner, der f.eks. letter den efterfølgende samlingsproces.

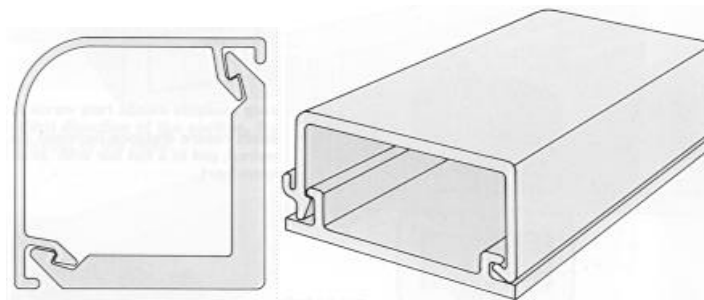
Skruespor som vist på Figur 2.50 er et egnet konstruktionselement for opbygning af eksempelvis hjørneforbindelser. Billedet viser nogle eksempler på hvorledes der er indlagt skruespor i profilet. Det modstående profil er udført med et spor således, at de ikke kan vride sig i forhold til hinanden. Man får altså i tilgift en vridningsstiv forbindelse med bare een skrue. Skruen er en selvskærende pladeskrue, det er derfor ikke nødvendigt et skære gevindhullet. Dette er medvirkende til at forenkle monterings arbejdet, og dermed medvirke til et billigere produkt.



Figur 2.50 Skruespor.

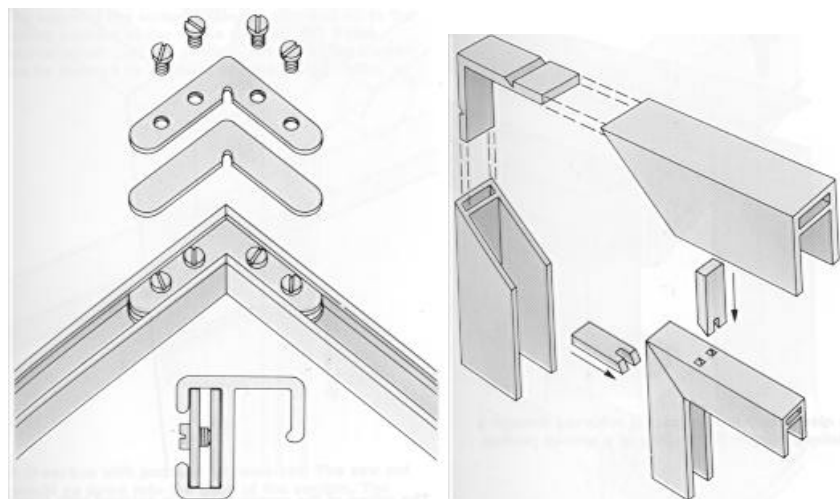
Snappås eller klipsesamling som vist på Figur 2.51, er en anden måde at opbygge en profil konstruktion på. Det sker ved at udnytte aluminiums gode elastiske egenskaber. Således kan et låg lægges på en kabelbakke. Ved at opbygge kabelbakken som vist kan den klipses sammen uden

nogen form for skruer eller anden form for sammenføjnings metode. Klipse løsninger kan udformes på mange forskellige måder, afhængigt om de skal kunne fungere som fleksible sammenføjn timer eller ej.



Figur 2.51 Klipsesamling.

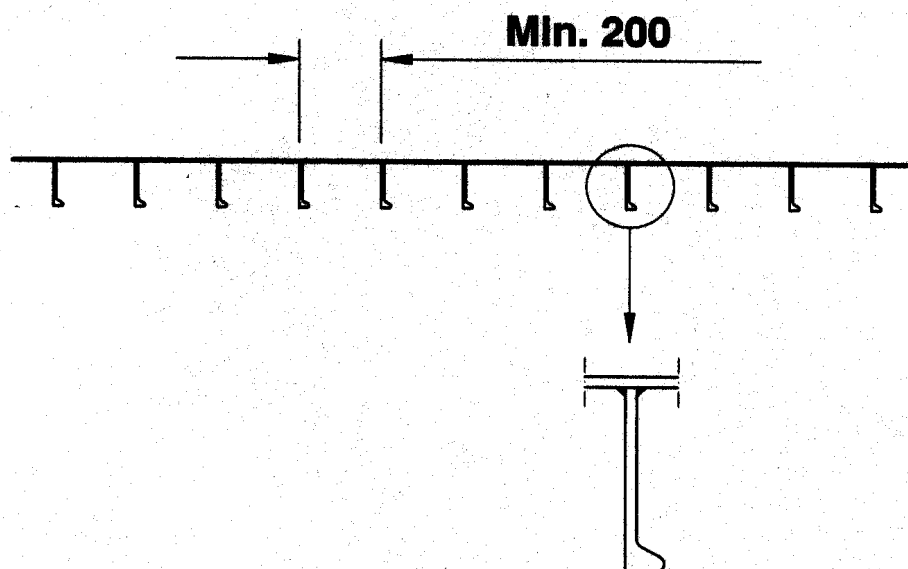
Ved lidt kraftigere hjørneforbindelser kan man anvende forskellige former for hjørnekodser. Her er vist en løsning er et afkortet specialprofil. De i gering skårede profiler bliver så ført ind over disse. Hjørneprofilerne kan selvfølgelig have forskellige udformninger, alt efter hvad de skal bruges til. For en simpel tavleramme kan vinkler udført i plademateriale være tilstrækkelig.



Figur 2.52 Hjørneforbindelse.

2.11.8 PLADEPANELER SAMLET AF EKSTRUDEREDE PROFILER

Traditionelt fremstilles store planpaneler ved at svejse profiler på plader f.eks. som vist på Figur 2.53.



Figur 2.53 Snit i panel opsvejt af plader og profiler.

Et opsvejt panel skal geometrisk udformes med en passende indbyrdes afstand mellem profilerne afhængig af profilhøjden for at tilgodese adkomsten både hvad angår påsvejsningen af profilerne, samt hvad angår udførelsen af diverse svejsedetaljer ved krydsende elementer eller ved endeforbindelser.

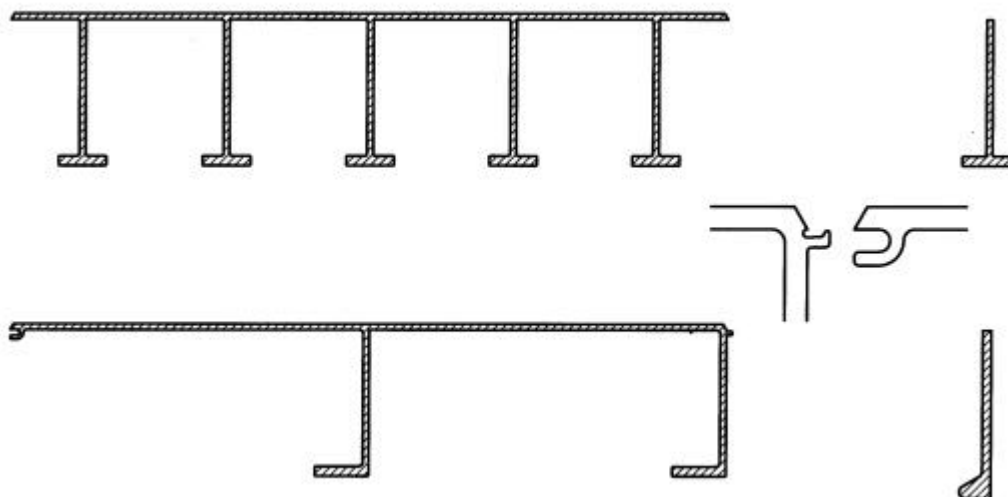
På grund af kravet til minimumsafstand mellem profilerne og dermed en relativt stor belastningsbredde for selve pladen, vil det opsvejste panel typisk ende op med en relativt tyk og dermed tung dæksplade.

Den ensidige påsvejsning af profiler på pladerne vil give anledning til krumning af selve aluminiumspanelet. Denne tendens kan dog modvirkes f.eks. ved påhæftning af den primære afstivning før fuldsvejsning af den sekundære afstivning, men det betyder efterfølgende en reduceret mulighed for anvendelse af svejseautomatik i forbindelse med påsvejsning af profiler.

Planpaneler fremstillet af sammensvejste ekstruderede profiler udgør et meget attraktivt alternativ til de traditionelt opsvejste paneler.

I stedet for at skulle svejse profiler på en plade kan man ekstrudere en plade med integrerede profiler, og selv om profilerne typisk ikke vil være mere end 450 mm brede, spares der totalt set mange svejsemeter.

De forskellige aluminiumsleverandører har hver især et standardprogram af ekstruderede profiler / paneler, der umiddelbart vil kunne anvendes til fremstilling af planpaneler, og Figur 2.54 viser et par eksempler på et sådanne profiler.



Figur 2.54 Eksempler på ekstruderede profiler til skibsbygning.

Alternativt kan disse eksempler på meget forskellige typer af ekstruderinger danne basis for inspiration for designeren i dennes udformning af et optimalt tværsnit for et konkret problem. Den valgte udformning af ekstruderingen bør efterfølgende forelægges for og diskuteres med leverandøren for at sikre, at det er muligt at udforme en matrice til det aktuelle tværsnit uden for stor økonomisk omkostning.

Ved udformningen af et panel baseret på sammensvejsning af ekstruderede profiler er det vigtigt at have fokus på både den konstruktion, som panelet skal indbygges i, og på fremstilling- og indbygningsprocessen for panelet. Det planlagte tværsnit skal derfor have en sådan udformning at det tilgodeser både ekstruderingsprocessen, selve sammensvejsningen af de ekstruderede profiler samt den endelige funktion.

Ved standardisering af profilet er det muligt at industrialisere fremstillingen, noget som medfører kortere produktionstid, mere ensartet kvalitet og lavere omkostninger. Det endelige design bliver således et kompromis mellem hvad der er optimalt angående design og legeringsvalg, og hvad der er optimalt rent fremstillingsmæssigt.

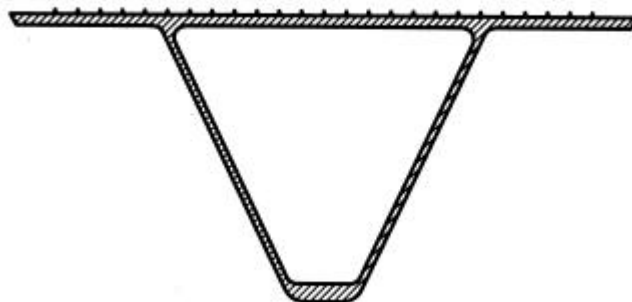
Det er vigtigt at udforme panelløsninger på et tidligt stadium i projekteringen for at kunne tilpasse øvrige dele af konstruktionen til den valgte panelløsning.

I nedenstående eksempel Figur 2.55 og Figur 2.56 er tværsnittet optimeret til brug i vogndæk på katamaran bilfærger. Således er tykkelsen øget, hvor der er behov, f.eks. i dækspladen og bundflangen, og endvidere er overfladen tilføjet riller for at sikre en passende friktion mellem aluminiumsdækket og hjulene på bilerne.

Det ekstruderede panel kan designes optimalt med udgangspunkt i den givne belastning. I eksemplet er "dæksaftryks"-arealet fra bilerne dimensionsgivende for dækspladen, og ved at reducere afstanden mellem siderne i hulprofilet til f.eks. bredden på aftryksarealet reduceres tykkelsen af dækspladen.

Endvidere kan det ekstruderede profil tilføres detaljer der tilgodeser den videre fremstillingsproces, f.eks. "fjer og not", der tillader ensidig sammensvejsning af ekstruderede paneler.

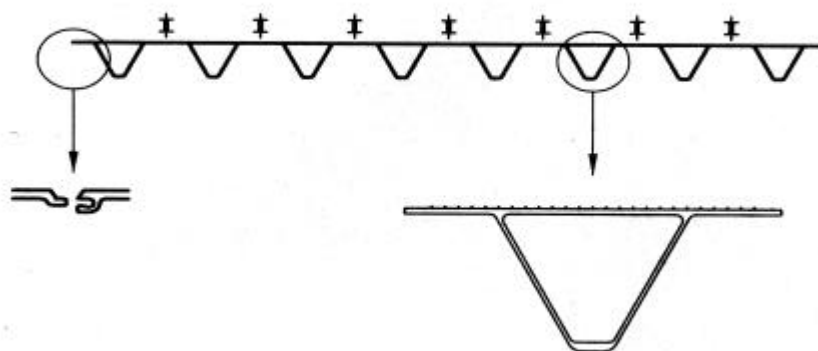
Ved at benytte et lukket tværsnit til det ekstruderede profil opnås fordele i form af bedre torsionsstivhed og dermed en større kontrol med tolerancer og planhed, men på den anden side også svejsetekniske problemer, når panelerne skal sammensvejses i længderetningen, og det er nødvendigt at lave nogle specielle konstruktive tiltag for at sikre styrken i overgangszonen.



Figur 2.55 Typisk vogndæksprofil fra en katamaran bilfærge.

I forhold til et traditionelt opsvejst panel erstattes 2 x 9 kantsømme af 7 stumpsømme mellem de ekstruderede profiler.

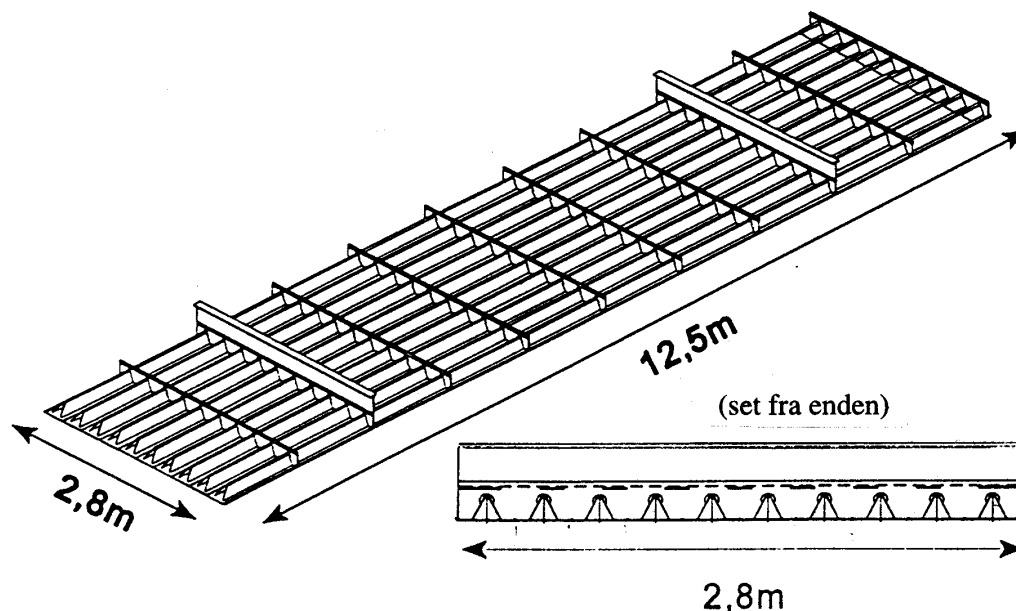
Ganske vist er der mulighed for at anvende afbrudt svejsning ved påsvejsning af profilerne i det traditionelle panel, men omvendt er der gode muligheder for at anvende en højt automatiseret svejseproces ved sammensvejsning af de ekstruderede profiler.



Figur 2.56 Snit i typisk panel opbygget af ekstruderede profiler.

Det ekstruderede panel kan med fordel fremstilles f.eks. af aluminiumsleverandøren i en fast opstilling under anvendelse af den nyeste svejseteknologi, f.eks. Friction Stir welding, for senere indbygning i et givet dæksektion, herved fremstillingstiden af sektionen reduceres markant.

Af hensyn til den videre transport fra fremstillingsværksted til byggested samt håndteringen ved opstillingen er det ofte nødvendigt at påsveje dele af den primære afstivning for at sikre en passende stivhed af panelet – se Figur 2.57.



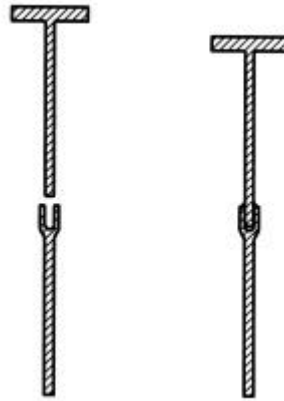
Standard modulariseret panelsystem for DANYARD Seajet 250 (set fra undersiden)

Figur 2.57 Typisk vogndækspanel fra en katamaran.

Primær afstivning

På grund af begrænsningen i størrelsen af ekstruderede emner er det ikke altid muligt at ekstrudere den primære afstivning i ét stykke, men som alternativ til et opsvejst element kan der opbygges en løsning baseret på sammensvejsning af to ekstruderede profiler som vist i Figur 2.58.

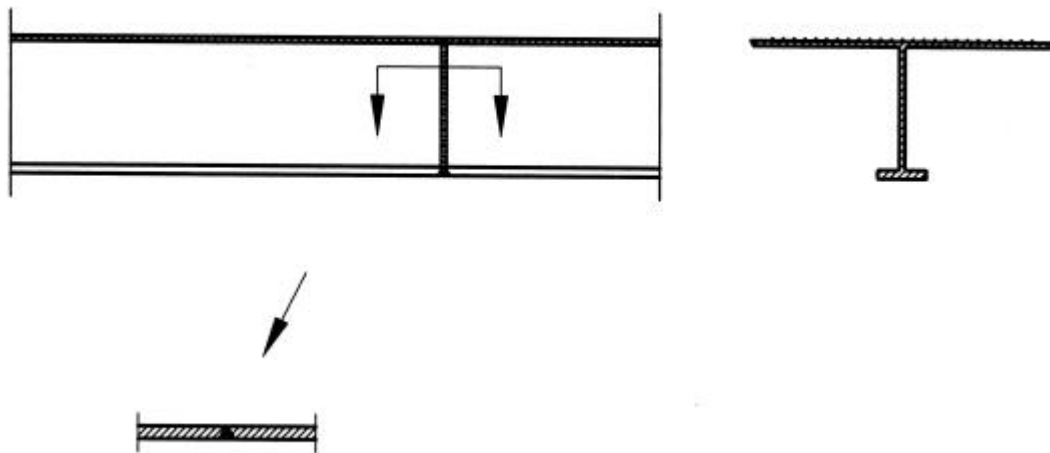
En af fordelene ved en sådan løsning er at HAZ-zonen placeres i et spændingsneutralt område af elementet, og at de usvejste styrkeegenskaber derfor kan lægges til grund for dimensioneringen. En anden fordel er at udkappene i dragersystemet for den sekundære afstivning udelukkende sker i underparten, hvorimod den indbyrdes tilpasning mellem den primære afstivning fortrinsvis sker i topparten.



Figur 2.58 Eksempel på todelt primær afstivning.

2.11.9 SAMMENSVEJSNING AF EKSTRUDEREDE PROFILER

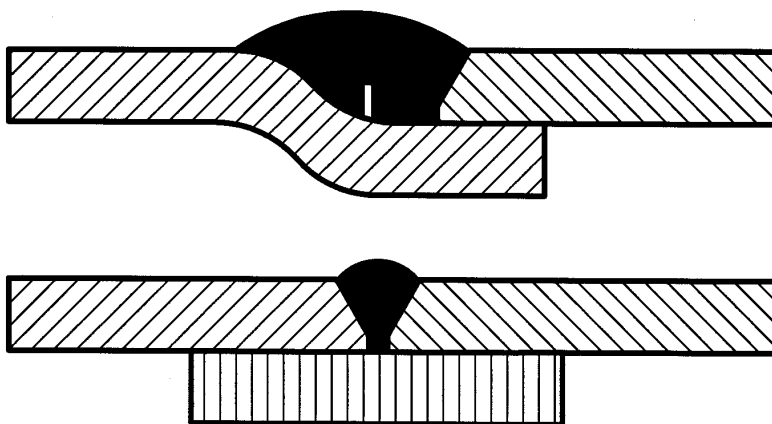
Ved sammensvejsning i længderetningen af paneler opbygget af ekstruderede profiler vil det afhængig af om der er anvendt åbne eller lukkede tværsnit til ekstruderingen, være nødvendigt at anvende helt forskellige løsninger. Endvidere bør de tværgående svejsesømme placeres således at den varmepåvirkede zone (HAZ) bliver anbragt i et område, hvor bøjningsspændingerne i den sekundære afstivning er så tæt på nul som muligt.



Figur 2.59 Sammensvejsning af åbne profiler, der kun er skærpede i svejsesømmen.

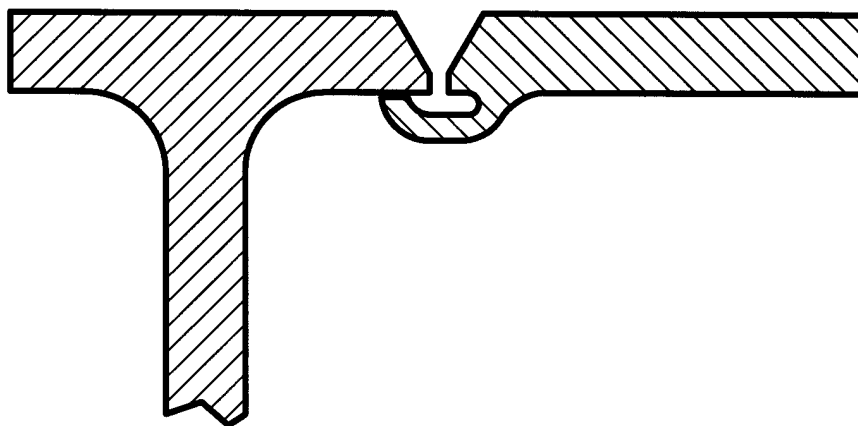
Ved sammensvejsning i langsgående retning er det i mange tilfælde nødvendigt at benytte et modhold. Modhold ved stumpsømssvejsning kan være en skinne af kobber eller rustfri stål. For X-fuger kan kraftig rustfri ståltråd bruges. Almindeligt brugt er også selvklæbende glasfiberbånd forstærket med aluminiumsfolie. Ekstruderede backing-profiler med notgang bruges også.

Benyttes et modhold uden not kan oxid-hinden ikke strømme væk, hvilket fører til bindingsfejl, henholdsvis mangelfuld gennembrændning af svejsesømmen, se Figur 2.60



Figur 2.60 Oxid kær og bindingsfejl ved svejsning med modhold uden not.

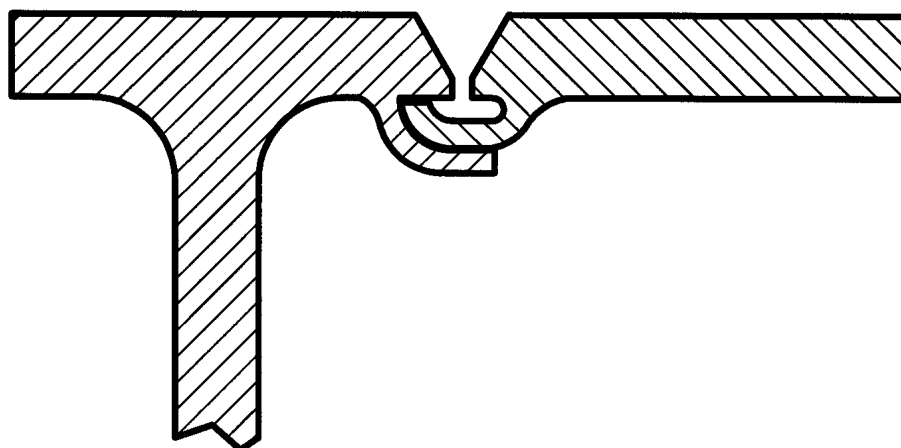
Sammensvejsningen af ekstruderede profiler kan lattes ved at den langsgående svejsekant laves med backing profil som en del af emnet. Se Figur 2.61.



Figur 2.61 Ekstruderet profil med indbygget modhold og notgang.

For at opnå en ens varmfordeling omkring svejsesømmen bør der være samme mængde materiale til at optage varmen på begge sider af sømmen som illustreret i Figur 2.61.

Profilene kan endvidere ekstruderes så de på langsiderne har en han-, henholdsvis en hun-side, som passer ind i hinanden. Hermed sikres ud over rigtigt modhold, også korrekt opligning i lodret og vandret retning, dvs. samme overkants niveau og fugedimension. Princippet er illustreret i Figur 2.62.

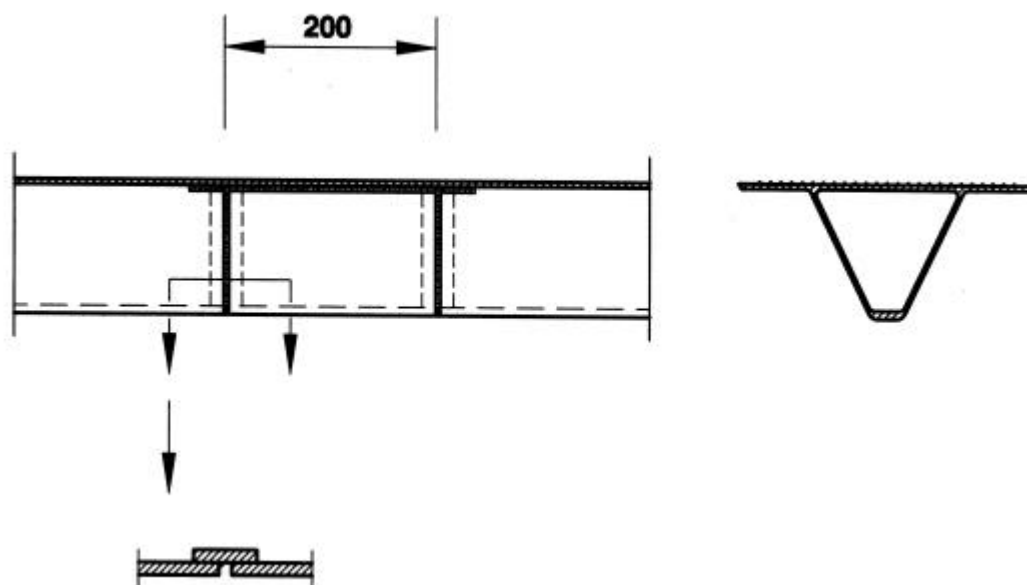


Figur 2.62 Modhold og notgang som letter fuldautomatisk sammensvejsning.

Ved sammensvejsning af paneler opbygget af ekstruderede profiler med lukket tværsnit er det nødvendigt med en betydelig mere kompliceret løsning for at sikre en rimelig stærk svejseforbindelse. Ved at introducere et lukkeprofil med en passende længde og ved at indsvejse noget aluminiumsfladprofil i enden af de ekstruderede profiler er det muligt både at etablere en passende strukturel kontinuitet samt at opnå en passende styrke af det enkelte ekstruderede profil, der skæres over af svejsestødet.

Skal løsningen være helt optimal bør backing-profilerne have en fræset not – jævnfør ovenstående bemærkninger vedrørende oxid-kærv og bindingsfejl.

Den absolut minimale længde af et indsat stykke er 200 mm – som vist på Figur 2.63 – men 300 mm må anbefales.



Figur 2.63 Sammensvejsning af lukkede profiler.

Det kan give visse problemer at anvende lukkede profiler i forbindelse med tværgående vandtætte inddelinger som f.eks. i skibe.

En mulig løsning er at skære en rille i det lukkede profil for passage af den tværgående vandtætte inddeling, men så vil det lukkede profil kun blive én-sidigt svejst uden backing.

En anden løsning kan være at stoppe det lukkede profil et stykke (f.eks. 50 mm) fra hver side af den vandtætte inddeling, og så etablere en kontinuitet vha. knæ på begge sider.

Adkomstforhold ved svejsning

Uanset hvilken profiltype – lukket eller åben – man vælger, er det vigtigt at tænke på adkomstforholdene for svejsning. Det kan være fristende at designe ekstruderede pladepaneler med tætsiddende, dybe profiler for at optimere vægt/styrke forholdet, men for at undgå problemer ved svejsningen bør afstanden mellem profilerne som hovedregel ikke være mindre end profilernes højde.

2.11.10 CASE STORY OVER PRODUKTIONSTEKNISKE ERFARINGER

I afsnit 2.14.4 om produktionstekniske erfaringer er der beskrevet en case story i forbindelse med brug af ekstruderede profiler i kølecontainere.

2.12 DESIGNREGLER FOR UDFORMNING AF KONSTRUKTIONSDETALJER

2.12.1 GENERELT

Groft sagt dimensioneres alle konstruktioner ud fra 2 hovedkriterier:

- Konstruktionen skal med en rimelig sikkerhedsmargin kunne holde til de maksimale belastninger, den udsættes for (dimensionering efter spænding, deformation og stabilitet).
- Konstruktionen skal kunne holde i en vis forudbestemt levetid (dimensionering mod udmattelse).

Det første kriterium bestemmer i princippet den overordnede geometriske udformning af konstruktionen og dimensioneringen af hovedelementerne.

Denne dimensionering vil som oftest blive foretaget efter normer og regler, og er beskrevet i afsnit 2.3 og 2.5.

Det sidste kriterium (udmattelseskriteriet) bestemmer design og udførelse af detaljerne.

Taler vi levetid, taler vi hovedsageligt om udmattelsesrevner forårsaget af gentagne belastninger/aflastninger af konstruktionen.

Teorien er, at første gang en konstruktion belastes og herefter aflastes, dannes der en mikroskopisk revne, der herefter vil udbrede sig eksponentielt ved efterfølgende gentagne belastningsvariationer, hvorved konstruktionen løbende svækkes.

I begyndelsen er der tale om revner, der ikke kan detekteres visuelt, og hvor udbredelseshastigheden vil være meget ringe.

Når revnerne først har nået en størrelse, hvor de kan ses, vil udbredelseshastigheden være kraftigt forøget, og ved trækpåvirkede konstruktioner vil der normalt ikke gå lang tid, før konstruktionen bryder sammen, fordi det resterende intakte materiale ikke længere er i stand til at overføre de kræfter, der optræder i konstruktionen ved normalt brug.

I trykpåvirkede konstruktioner vil der derimod ofte ske det, at revnen løber ind i et ukritisk område, og går i stå af sig selv, hvorved konstruktionen nok er svækket, men ikke i kritisk grad.

De fleste strukturelle skader, der opstår i et skib eller anden konstruktion med tidsvarierende belastninger, er forårsaget af udmattelse. Udmattelsesrevner initieres normalt i områder med lokalt høje spændinger f.eks. pga. diskontinuiteter. Kvaliteten af detaljeudformningen bliver således afgørende for konstruktionens levetid.

Erfaringen fra hurtiggående fartøjer af aluminium viser, at mange ”normale” detaljer hentet fra stålbygning ofte har en vis tilbøjelighed til udmattelsesbrud, når de udføres i aluminium. De detaljer, der anvendes i en aluminiumskonstruktion, skal altså udformes mere omhyggeligt med bløde, jævne overgange og skærpnings.

Udmattelsesstyrken af aluminium er den samme uanset om der er tale om normal eller højstyrke aluminium. Spændingsniveauet og dermed også spændingsvariationerne er imidlertid højere ved

anvendelse af højstyrke aluminium hvilket betyder, at detaljeudformningerne må udføres tilsvarende omhyggeligt.

(Det gælder i øvrigt også for højstyrke stål i forhold til normal-styrke stål.)

2.12.2 HOVED DESIGNREGLER:

Ved udformningen af detaljer i aluminiumskonstruktioner gælder en række hovedregler, der vil blive gennemgået i det følgende.

De første 6 regler er generelle, de næste 6 gælder svejste konstruktioner.

Tænkes der over disse regler i designfasen vil levetiden af en konstruktion kunne øges væsentlig – ofte uden at produktionsomkostningerne stiger.

Har designeren gjort sit arbejde ordentligt, vil det være væsentlig lettere at sikre en ordentlig arbejdsudførelse i produktionen.

For korrekt udførelse af svejsninger, valg af svejserækkefølge etc. henvises til de relevante afsnit.

Generelle regler

1. Undgå hårde punkter.
2. Sørg for strukturel kontinuitet og forløb i konstruktionen.
3. Placer udkap på steder, hvor de gør mindst mulig skade.
4. Understøt knæklinier.
5. Begræns relativ deformation.
6. Forebyg korrosion i designfasen.

Regler for svejste konstruktioner

7. Udform konstruktionen, så den kan svejses i god kvalitet.
8. Undgå om muligt at svejse på tværs af hovedspændingsretningen.
9. Undgå svejseophobninger.
10. Undgå om muligt at svejse i geometriske hot-spots.
11. Placer svejsningerne, hvor de forringede materialeegenskaber i den varmepåvirkede zone gør mindst mulig skade.
12. Brug stumpsvejsninger i hårdt belastede områder i stedet for kantsømme.

Det er selvfølgelig optimalt, hvis alle konstruktioner kunne udformes, så man ikke forsynder sig mod nogen af reglerne, men i praksis kan det sjældent lade sig gøre.

Som regel vil der være tale om kompromiser, hvilket de efterfølgende eksempler også vil vise.

2.12.3 DESIGNREGEL 1: - UNDGÅ HÅRDE PUNKTER

Hårde punkter "hot-spots" er den væsentligste årsag til udmattelsesbrud.

Det skyldes, at enhver geometrisk diskontinuitet vil give anledning til et lokalt forhøjet spændingsniveau, og jo højere spændingsniveau, jo lavere levetid.

At det forholder sig sådan er velkendt viden fra stålkonstruktionen, men hvor man med stål i mange tilfælde kan slippe godt fra mindre optimale, men til gengæld billige løsninger, betyder aluminiums større kærvelsomhed, og den reducerede materialestyrke omkring svejsninger, at man generelt må være mere omhyggelig med detaljeløsningerne.

Spændingen i de hårde punkter " $\sigma_{\text{hot-spot}}$ " kan udtrykkes som:

$$\sigma_{\text{hot-spot}} = \sigma_{\text{nominel}} \cdot k$$

hvor: σ_{nominel} er den nominelle spænding

k er en spændingskoncentrationsfaktor, der kan opdeles i to led: $k = k_g \cdot k_w$

k_g er den geometriske spændingskoncentrationsfaktor

k_w er spændingskoncentrationsfaktoren for "alt-det-andet" dvs. svejsning, de lokale geometriske forhold omkring selve svejsningen etc.

For at reducere spændingsniveauet mest muligt, bør man forsøge at reducere begge spændingskoncentrationsfaktorer.

k_w lader sig reducere ved at svejse så omhyggeligt som muligt med en pæn blød konkav overflade uden "grøfter" i siderne. Det er i den forbindelse vigtigt, at detaljerne designs netop med henblik på at kunne svejses i god kvalitet (hensyntagen til pladsforhold).

k_g kan reduceres ved et fornuftigt design af detaljeløsningerne med bl.a. "bløde" ender.

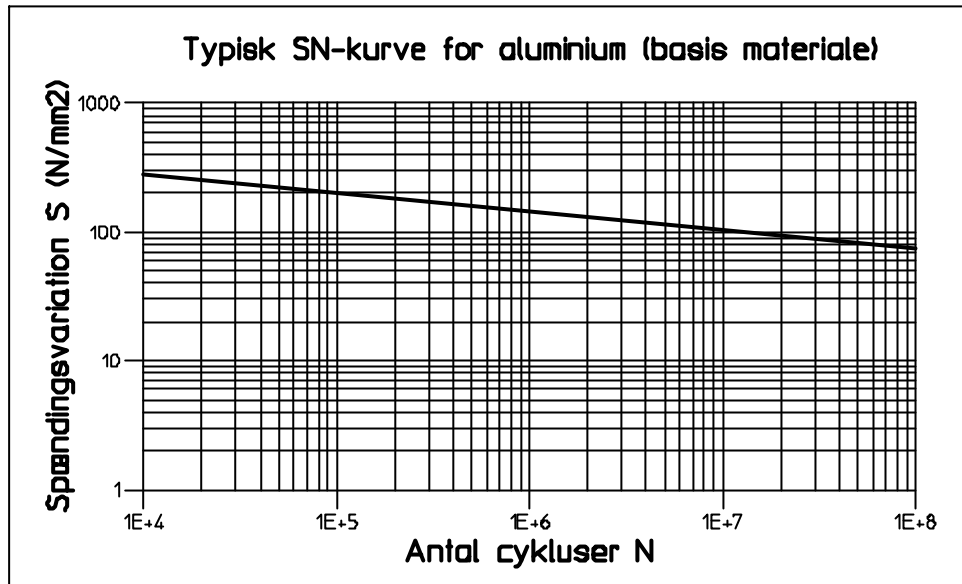
Det værste, man kan have, er hårde punkter, der er umulige at svejse ordentligt!!!

Hårde punkter og SN-kurver

Som beskrevet i afsnittet om udmattelse hænger en konstruktions levetid sammen med de såkaldte SN-kurver, der beskriver materialets udmattelsesegenskaber.

Figur 2.64 viser et typisk udseende af en sådan SN-kurve, hvor "S" står for spændingsvariationen og "N" for antallet af belastninger/aflastninger (cykler).

SN-kurven vil variere afhængig af, om der er tale om det rene grundmateriale, materialet i svejst tilstand, materialet udsat for korrosivt miljø eller en kombination af svejsning og korrosivt miljø. Derfor skal kurven i Figur 2.64 kun vise tendensen!



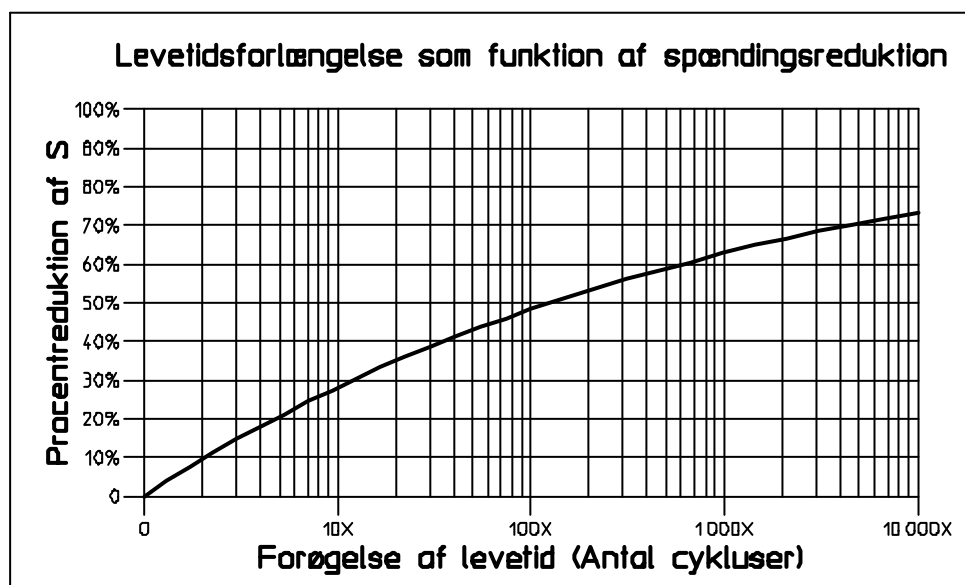
Figur 2.64 Typisk SN-kurve for aluminium.

Kender man størrelsen af spændingsvariationerne, kan man ved at gå ind på kurven aflæse hvor mange cykler, materialet sandsynligvis kan tåle.

Man kan også bruge kurven til at beregne, hvor stor en levetidsforlængelse man kan forvente, hvis spændingsniveauet kan reduces.

Optegnes denne levetidsforlængelse som funktion af den procentvise reduktion i spændingsniveauet, kan man få en kurve som vist på

Figur 2.65. Kurven vil selvfølgelig variere afhængig af hvilken SN-kurve, der danner basis.



Figur 2.65 Levetidsforlængelse som funktion af spændingsreduktion.

Som det ses, vil en reduktion af spændingsniveauet i de kritiske punkter (hot-spot spændingen) på ca. 30 % i dette eksempel betyde en 10-dobling af levetiden.

Det er interessant, fordi beregninger har vist, at små detaljeændringer, som f.eks. at opbløde et knæ med en afrunding på de mest kritiske steder, kan give reduktioner i "hot-spot" spændingen i visse belastningstilfælde på op til ca. 60%, [SASAK-RAP-DE-AKS-KEH-0010-01].

I følge diagrammet skulle det alt andet lige kunne give en levetidsforlængelse på 600 gange, men naturligvis kan man ikke regne med, at det er tilfældet i praksis.

Dels gælder den store spændingsreduktion kun et ganske bestemt belastningstilfælde, og dels vil en reduktion af spændingerne i ét punkt som regel blot betyde, at andre punkter vil blive "det svage led".

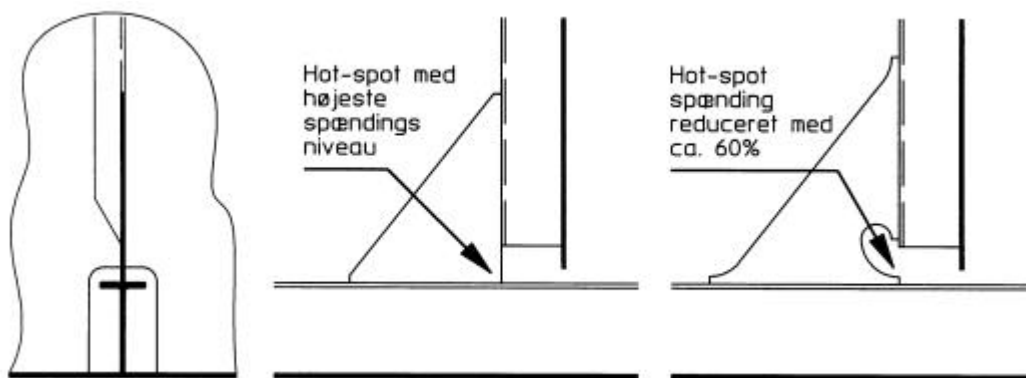
Hårde punkter i forbindelse med krydsende elementer og profiludkap

Figur 2.66 viser et eksempel på en forbedring af en typisk profilgennemføring med en knæforbindelse.

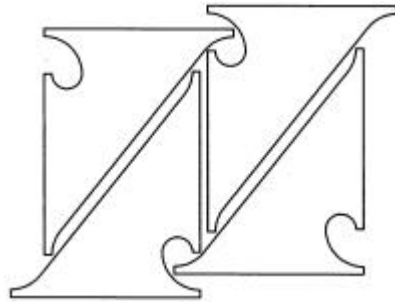
Den første løsning har et meget hårdt punkt, der desuden er svært at svejse ordentligt.

Dette punkt kan blødes op ved at lave en udskæring som vist til højre. Det gør det ikke nemmere at svejse det kritiske punkt, men konsekvenserne af dårlig svejsning vil selvfølgelig være reducerede i kraft af det reducerede spændingsniveau.

Umiddelbart kan det "avancerede" knæ virke dyrt at producere, men det kan faktisk "nestes" fornuftigt på en plade, se Figur 2.67. (Nesting er optimal udnyttelse af en plade).



Figur 2.66 Reduktion af hot-spot spændingen ved detaljeforbedring.



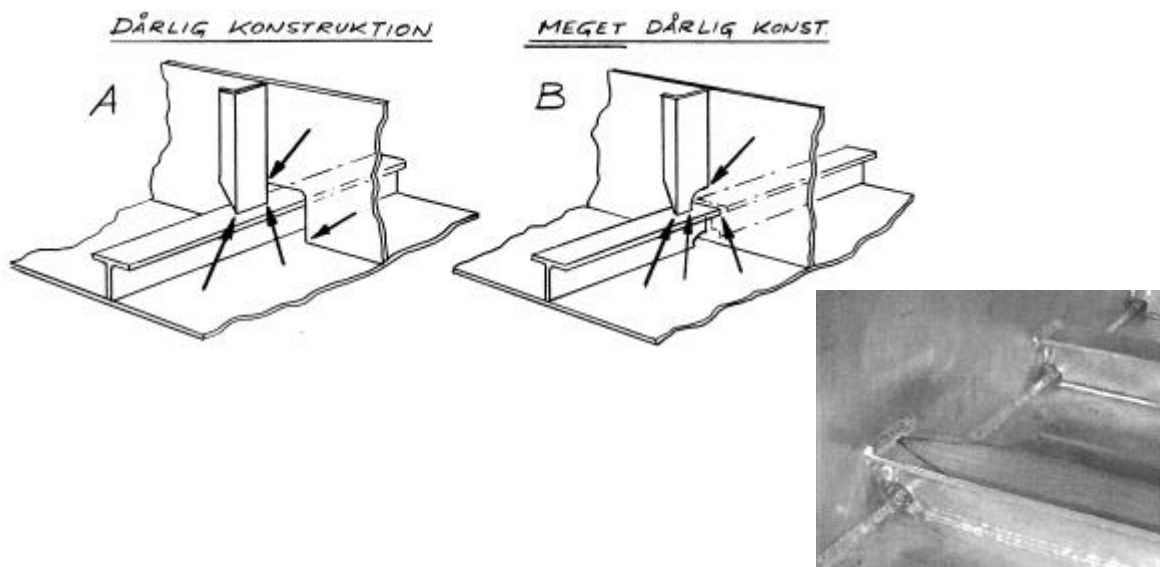
Figur 2.67 Eksempel på nesting af avanceret knæ

De følgende skitser viser andre eksempler på kritiske hårde punkter i forskellige konstruktioner, og forslag til løsninger, der kan nedbringe hot-spot spændingsniveauet betydeligt, og dermed give en væsentlig forøgelse af levetiden.

Meningen med skitserne er ikke at vise et komplet katalog over gode og dårlige løsninger, men påpege nogle lærerige problemstillinger, hvorfra der let kan drages paralleller til andre konstruktioner.

Figur 2.68 viser 2 eksempler (A og B) på uheldige konstruktioner. (Pilene viser de hårde punkter.) Specielt detalje B er meget dårlig. Ikke alene reducerer udkappet i den lodrette stiver overførselsarealet, og forøger dermed spændingsniveauet, men det er også i praksis umuligt at svejse indersiden af udkappet tilfredsstillende. Det samme gælder T-profilernes flanger på undersiden. Der er simpelthen ikke plads til svejsepistolen. Desuden er det svært at garantere en perfekt oplining af T-profilerne på hver side af den lodrette plade.

På billedet (taget fra bagsiden af den lodrette plade) kan man tydeligt se, at T-profilets flange er vanskelig at svejse.



Figur 2.68 Eksempler på dårlige konstruktioner.

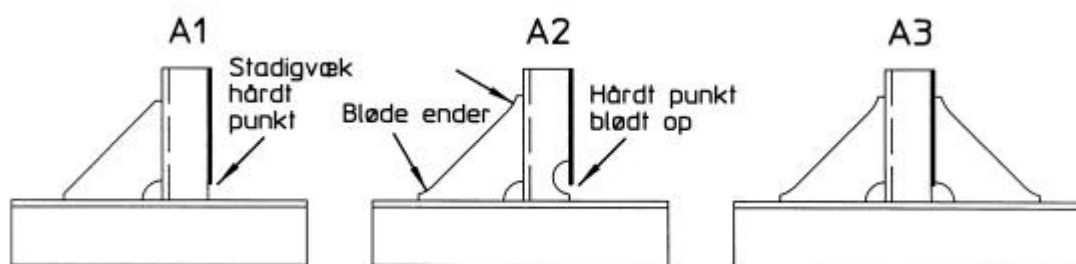
Figur 2.69 viser eksempler på forbedringer af detalje A:

I A1 er der monteret et knæ. Det nedsætter det generelle spændingsniveau, men fjerner ikke det mest kritiske hårde punkt.

I A2 er det hårde punkt blødt op vha. en runding. Det reducerer hot-spot spændingen, men er en produktionsmæssigt relativt dyr løsning.

A3 er optimal, men de 2 knæ er ikke gratis.

Hvilken løsning man vælger, må afhænge af en afvejning mellem fordele og produktionspris.

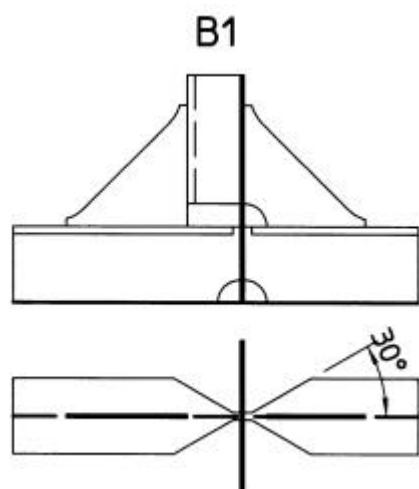


Figur 2.69 Forbedrede løsninger på detalje A.

Figur 2.70 viser et eksempel på, hvordan detalje B kan forbedres. Her er det lodrette profil slet ikke forbundet til det vandrette, hvilket giver en produktionsmæssig besparelse. (Denne løsning kunne også være anvendt i stedet for A3 ovenfor.)

Desuden er flangerne på de vandrette profiler snipet 30° , hvilket gør svejsningen af kroppladerne meget nemmere (jævnfør billedet i Figur 2.68).

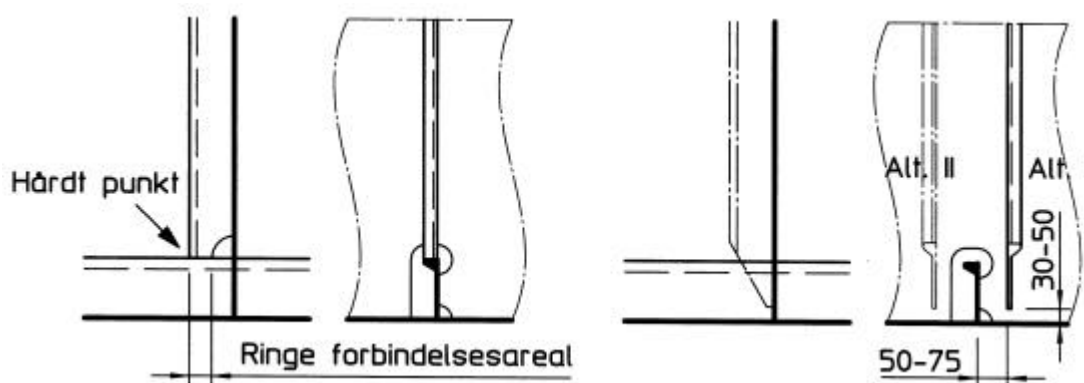
At udkappene er svære at svejse tilfredsstillende har ikke de store styrkemæssige konsekvenser, idet de ikke er placerede på kritiske steder.



Figur 2.70 Forbedring af detalje B.

Den venstre skitse på Figur 2.71 viser endnu en typisk men problematisk forbindelse mellem et vandret profil og en lodret stiver – en krydsning mellem detalje A og B fra Figur 2.68.

På grund af udkappet i den lodrette stiver bliver forbindelsesarealet mellem de to profiler så lille, at det i praksis gør mere skade end gavn. Hvis der ikke er nogen større lateral belastning hverken på den lodrette eller vandrette plade, og dermed ikke de store behov for overførselsarealer, kan man derfor lige så godt forskyde den lodrette stiver i forhold til det vandrette profil og snipe den i enden som vist på skitsen til højre. Derved skabes en fleksibel konstruktion, der har stor udmattelsesstyrke, fordi de hårde punkter er undgået, og som tilmed er langt billigere produktionsmæssigt.



Figur 2.71 Snipet profil i stedet for forbundet.

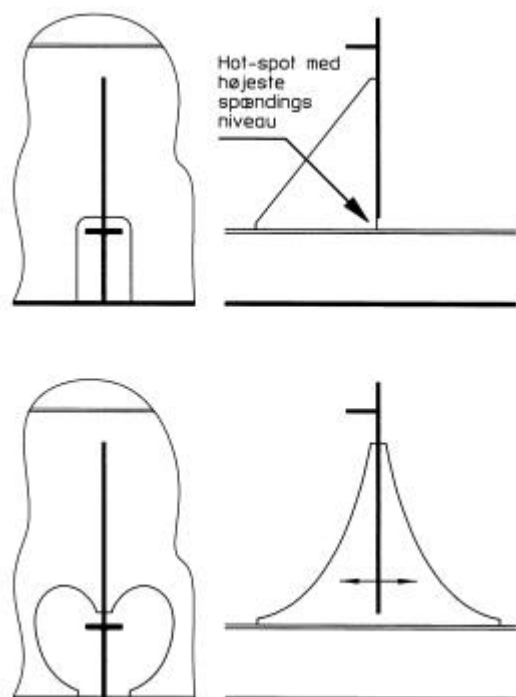
Alternativ I (hvor den lodrette stiver sidder på ryggen af det vandrette profil) er en stærkere konstruktion end alternativ II (hvor stiveren sidder på flangesiden), fordi den lodrette stiver ender i et stivere pladefelt. Ved alternativ II vil der være en uheldig tendens til, at spændingerne i stiverens ende vil forstærke spændingsniveauet i det nederste venstre hjørne af profiludkappet. Til gengæld vil den lodrette stiver i alternativ I vanskeliggøre svejsningen af det vandrette profil til den lodrette plade.

Alternativ II kan forbedres væsentligt ved at forstærke profiludkappet med en brikke (se f.eks. Figur 2.17), der sættes på den modsatte side af stiveren for lettest mulig svejsning.

Figur 2.72 viser en lidt anden profilgennemføring, hvor den øverste traditionelle løsning giver et hårdt punkt.

I den nederst løsning er udkappet æbleformet og knæet slidset igennem pladen.

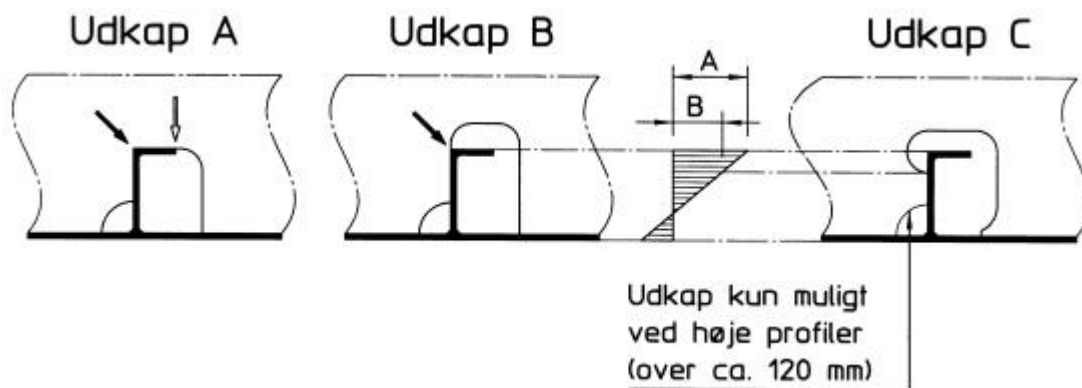
Denne løsning er dyrere at producere, men giver også et langt bedre spændingsflow.



Figur 2.72 Alternativ profilgennemføring.

Rigtigt valg af udkaptype er i det hele taget meget vigtig ved profilgennemføringer.

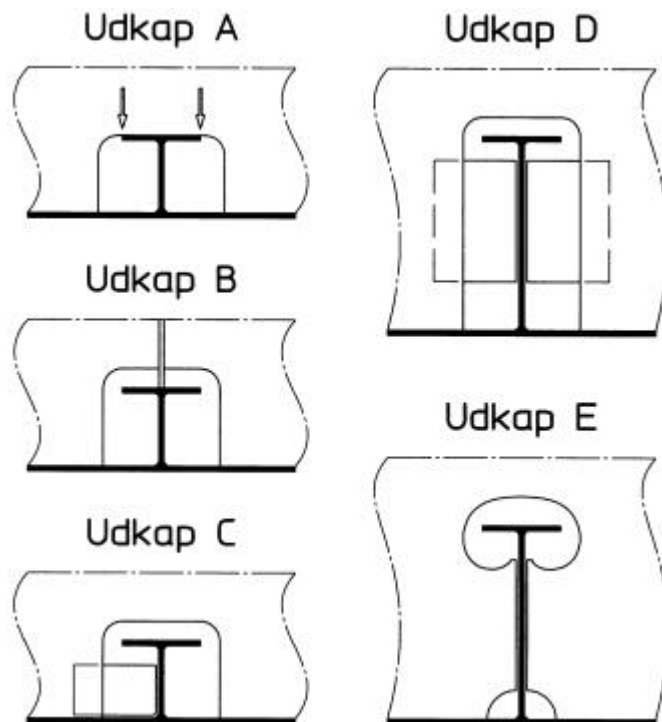
Figur 2.73 viser 3 forskellige typiske udkap for vinkel-profiler.



Figur 2.73 Udkap for vinkel-profil.

Ved type A opstår der et meget kritisk hårdt punkt ved den "fede" pil. Det kombinerede spændingsniveau fra de lodrette forskydningspændinger i vinklens kropplade og normalspændingerne i flangen er meget højt, og optræder lige ved en geometrisk diskontinuitet.

Desuden opstår der et mindre hårdt punkt ved den "lyse" pil.



Figur 2.74 Udkap for T-profiler.

Svejsningen på tværs af flangen og dermed på tværs af hovedspændingsretningen er også uheldig og betyder desuden, at man må dimensionere profilet efter de svejste (og dermed muligvis forringede) materialeegenskaber.

Type B er bedre, men man slipper ikke helt af med det hårde punkt over kroppladen.

Type C er bedst fordi der ikke svejst, hvor normalspændingerne i vinklens flange er størst. Udkappet mod basispladen er kun muligt ved relativt høje profiler over ca. 100-120 mm. Ellers vil der ikke blive ret meget lodret forskydningsareal tilbage. Uden udkap forsynder man sig ganske vist mod reglen om at undgå svejseophobninger, men ved lave profiler er løsningen alligevel at foretrække, idet større forskydningsareal også betyder lavere forskydningspændinger.

Anvendelsen af T-profiler i stedet for vinkler kan have styrkemæssige fordele, men i forbindelse med profilgennemføringer er det ofte et problem at overføre de lodrette forskydningskræfter, fordi det er vanskeligt at "få fat i" kroppladen.

Figur 2.74 viser forskellige almindelige udkap.

Type A ligner type A for vinkel-profiler, men der opstår ikke det hårde punkt over kroppladen. De knap så hårde punkter i flangens sider (markeret med pile) er normalt ikke kritiske.

De lodrette kræfter fra profilet overføres til den tværgående plade gennem svejsningen på tværs af profilets flange, hvilket i lighed med vinkel-profilerne er meget uheldigt.

I type B overføres kræfterne i stedet gennem et langsgående knæ, hvilket (specielt hvis det udføres som vist i Figur 2.72) er en bedre, men væsentlig dyrere løsning.

I C overføres forskydningskræfterne gennem en eftermonteret brikke. Denne løsning er for så vidt udmærket, men relativt dyr at producere.

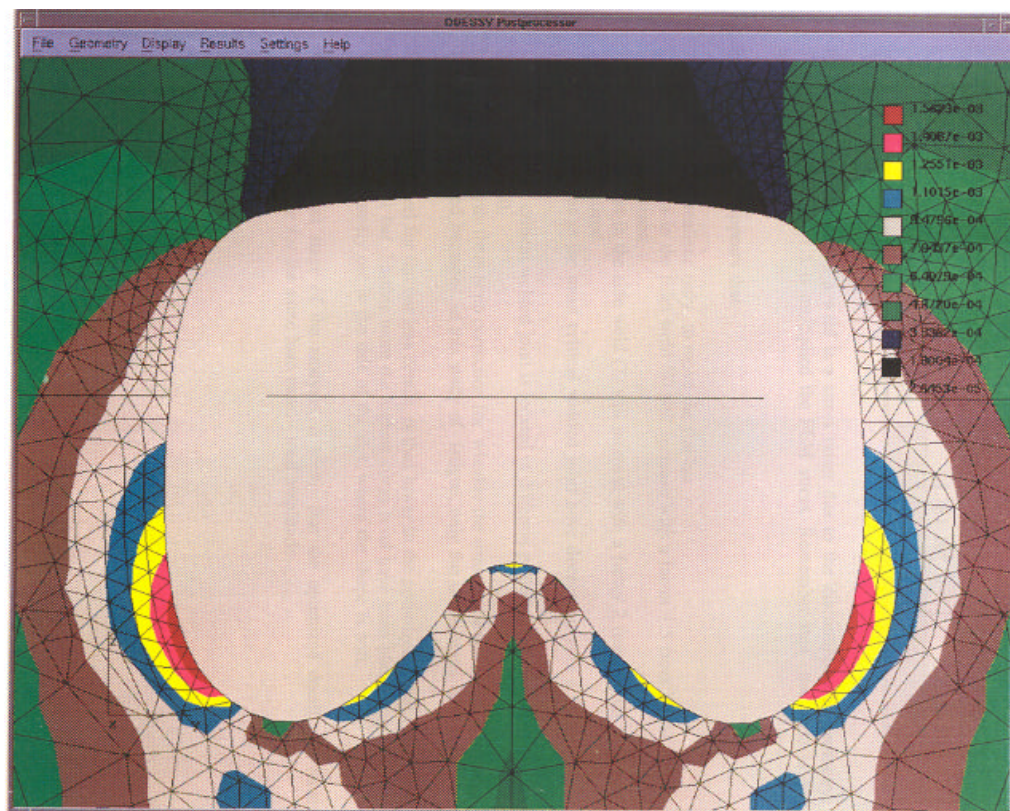
Udkap D ligner C, men T-profilet er højere, så det er lettere at eftermontere brikkerne.

Hvis det er muligt at stikke profilet igennem den tværgående plade i stedet for at skulle sænke pladen ned over profilet, kan løsning E være en mulighed.

(Pga. sin form kaldes løsningen et "æbleudkap". Der henvises iverigt til et patent vedr. Kawasaki's Apple Slot, med lignende udformning).

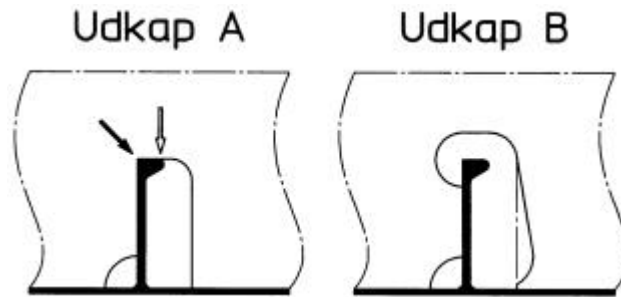
Fordelen ved denne løsning er en meget fin kraftoverførsel, men der kan dannes ret store tværgående svejse-spændinger langs de lodrette svejsninger af kroppladen.

Figur 2.75 viser resultatet af en FEM spændingsanalyse omkring et sådant udkap, og det ses tydeligt, at der ikke dannes noget hårdt punkt med høje spændinger i toppen af svejsningen langs kroppladen. Faktisk opstår de højeste spændinger i udkappets rundinger, der derfor burde have noget større radier.



Figur 2.75 Strukturelt optimeret udkap i webramme ved gennemførelse af langsgående stiver, [6].

Profilgennemføringer for bulb-profiler ligner gennemføringer for vinkel-profiler, men bulb'erne er som regel lidt højere end de tilsvarende vinkler, hvilket giver et smallere udkap og mere lodret forskydningsareal. Udkap type A – se Figur 2.76 – lider af de samme svagheder som type A for vinkler. Type B bør foretrækkes.



Figur 2.76 Udkap for bulb-profiler.

Der kan være nogle produktionsmæssige problemer med de mere avancerede udkap.

Hvis der anvendes NC styrede skære maskiner vil forskellen i udskæringstiden være insignifikant, men ved produktionsmetoder , der bygger på savning, boring og logning, må der påregnes op til den dobbelte produktionstid, bl.a. fordi opmærketiden øges kraftigt.

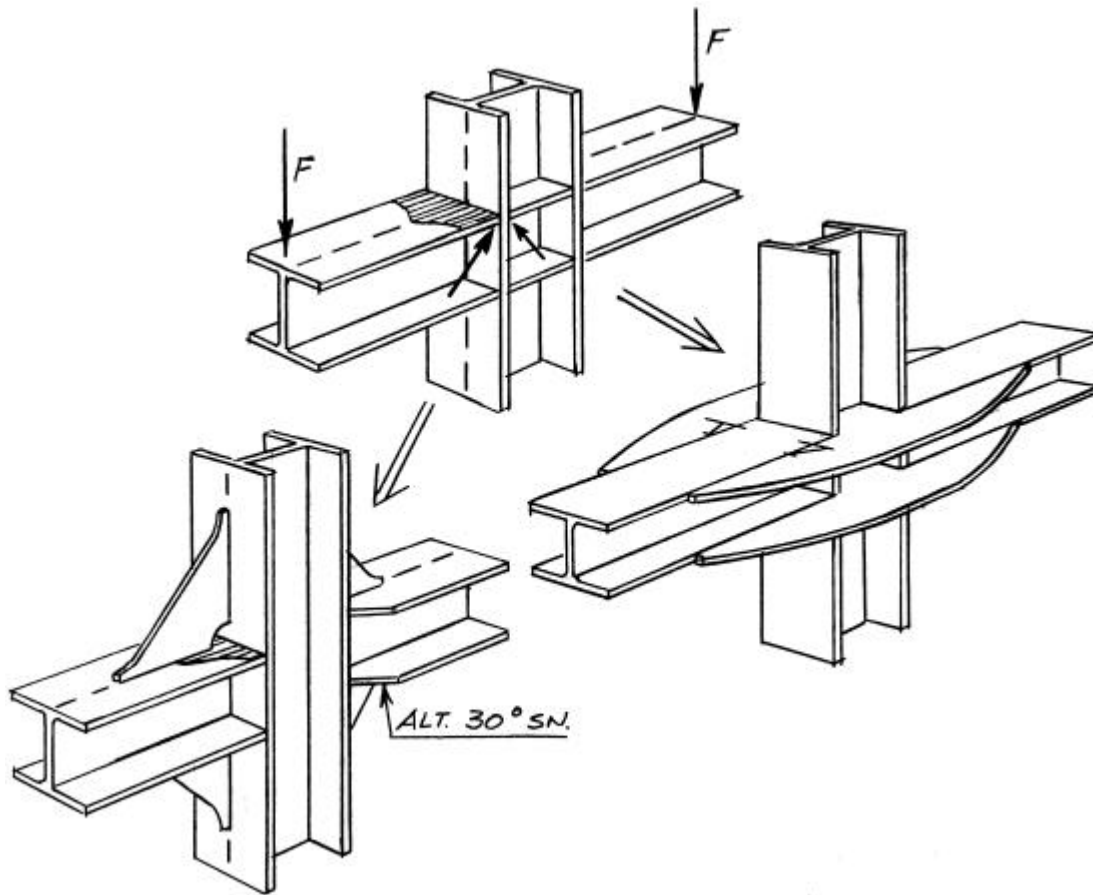
Dette bekræftes ud fra arbejdet med store aluminiums modeller i SASAK-RAP-MO-AKS-KEH-001-03].

Et godt udkapdesign, er altså et design, der både er let at producere og opmærke, men som også giver et lavt spændingsniveau.

Ligeud savning er naturligvis altid en billig løsning, men er dog ikke uden ulemper, da savning dels tager forholdsvis lang tid, og dels laver “savespor” i kanterne. Ved meget grove savespor og dårlige overgange til f.eks. rundinger kan levetiden nedsættes, da kærve vil kunne initiere revner.

Plasma skæring give fine kanter, dog må aluminium ikke skæres i det samme vand som bruges til stål, da jernoxiderne vil gå i forbindelse med aluminium'et.

Ved krydsende profiler f.eks. hvor en drager hænges op på en søjle, vil der i mange tilfælde dannes hårde punkter. Figur 2.77 viser et sådant typisk eksempel.



Figur 2.77 Drager, der er ophængt på en søjle.

Den øverste løsning er for så vidt ikke så dårlig, men de markerede punkter er svære at svejse uden ”grøfter”. Der vil næsten altid dannes små geometriske diskontinuiteter. Desuden vil der uundgåeligt dannes høje varmespændinger.

En bedre løsning er vist nederst til venstre, men det kræver selvfølgelig, at der er plads til knæene. Om dragernes flanger svejses til søjlen eller snipes 30° betyder egentlig ikke så meget, fordi søjlens flanger ikke er 100% stive og dermed vil give sig lidt, så varmespændingerne udlignes.

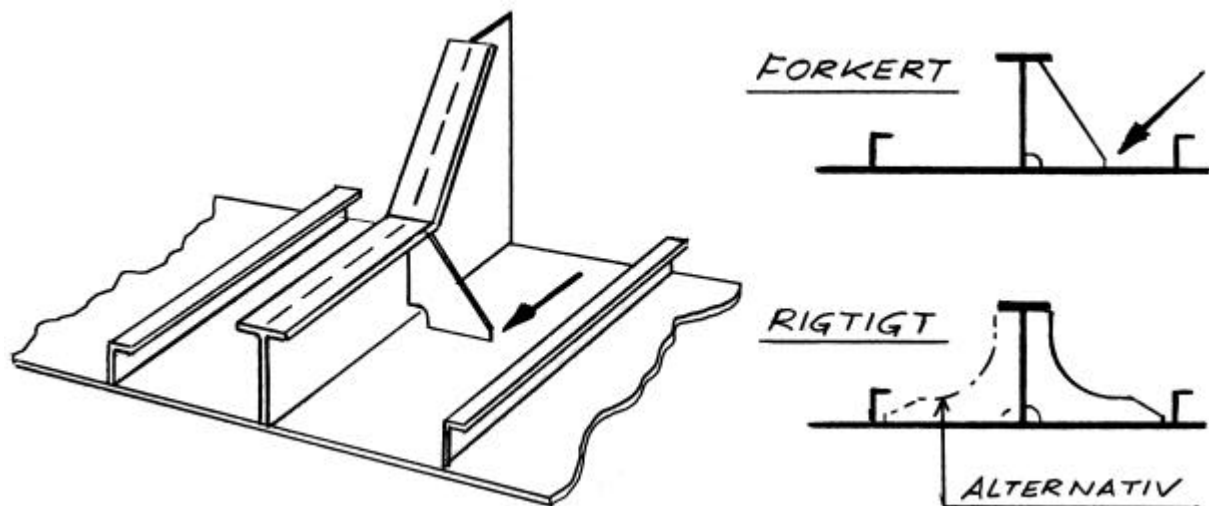
Hvis knæ af pladshensyn ikke kan accepteres, kan de hårde punkter i den oprindelige konstruktion fjernes ved i stedet for de små brikker at montere større vandrette knæ som vist nederst til højre. Disse knæ overfører normalspændingerne i flangerne, og har desuden den fordel, at dragerens modstandsmoment lokalt vil blive forøget, så spændingsniveauet yderligere nedsættes.

Hårde punkter ved uregelmæssigheder af membraner

Generelt kan langt de fleste pladepaneller opdeles i ”membraner” dvs. pladefelter understøttet langs kanterne. Sådanne membraner kan sammenlignes med et trommeskin. Grunden til at det kan tåle så voldsomme belastninger er den rene cirkulære form kombineret med de fuldstændig homogene randbetingelserne hele vejen rundt uden nogen form for geometriske diskontinuiteter. Hvis alle pladefelter var lige så regulære i faconen, ville mange udmattelsesproblemer kunne undgås.

En hovedregel der hænger godt sammen med ovenstående trommeskins analogi er, at et knæ aldrig må ende midt i et pladefelt – det ødelægger hele den regulære membranfacon og den homogene kantindspænding.

Figur 2.78 viser et sådant uheldigt eksempel, hvor et knæ er monteret for at understøtte en knæklinie. Uheldigvis ender dette knæ midt i et pladefelt.



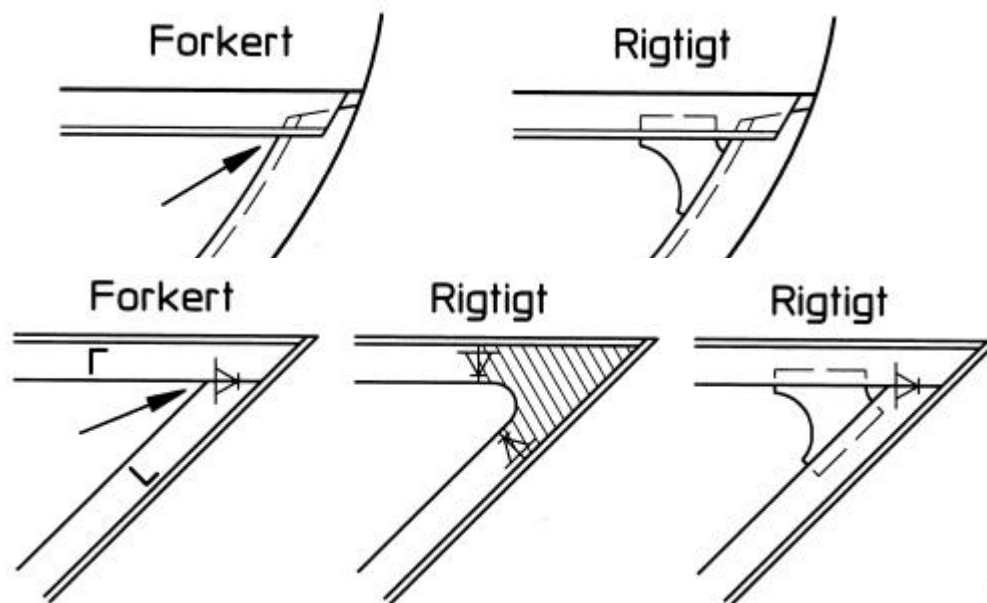
Figur 2.78 Eksempel på knæ der ender midt i et pladefelt.

Figuren nederst til højre viser hvordan knæet burde være udformet. I de fleste tilfælde bør det være tilstrækkeligt at understøtte knækpunktet med et knæ til den ene side. Det viste alternativ med 2 knæ er kun nødvendigt ved hårdt belastede konstruktioner.

Hårde punkter ved spidse vinkler

En anden generel hovedregel er, at spidse vinkler bør undgås, fordi der altid dannes et hårdt punkt.

Figur 2.79 viser typiske eksempler på en spidse vinkler, der bør ”opblødes”.

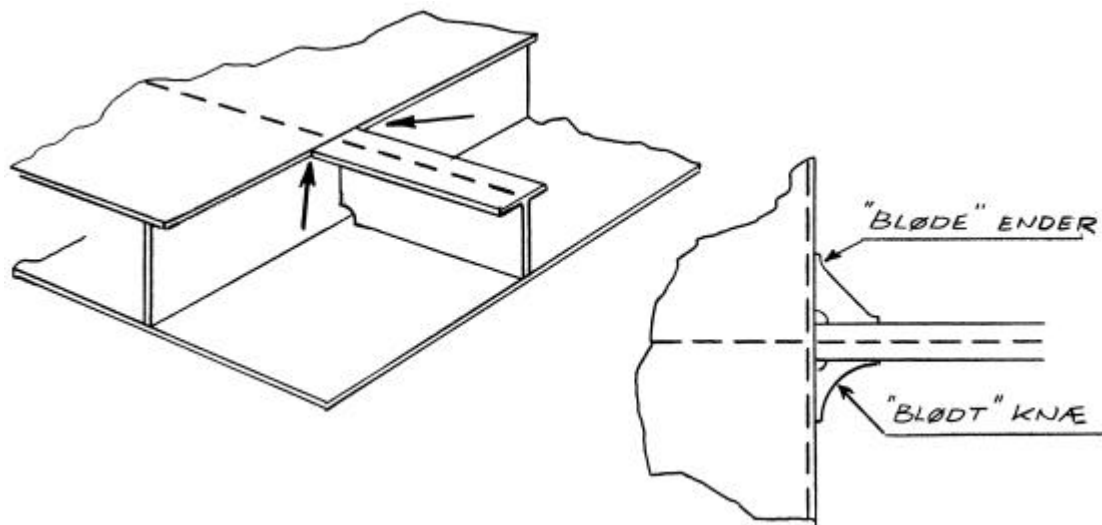


Figur 2.79 Hårde punkter i spidse vinkler.

Hårde punkter ved geometriske diskontinuiteter

Hårde punkter opstår typisk i forbindelse med pludselige spring i geometrien – geometrisk diskontinuitet.

Figur 2.80 viser et sådant eksempel på hårde punkter, der bør ”opblødes” vha. knæ.

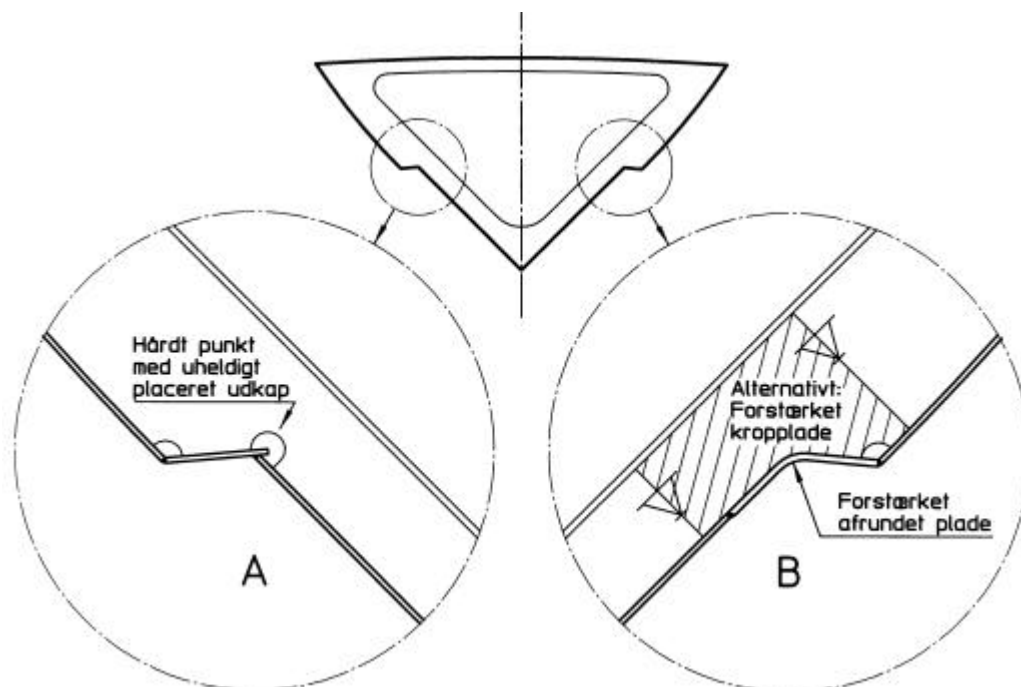


Figur 2.80 Hårdt punkt ved geometrisk diskontinuitet.

Figur 2.81 viser et eksempel på hårde såkaldte "chines" i forskibet af et hurtiggående fartøj – en typisk detalje, der ofte har givet problemer.

I A vil der opstå en kraftig spændingskoncentration omkring det uheldigt placerede udkap.

I B er der indsat en kraftig afrundet plade, og udkappet er fjernet. Denne løsning er selvfølgelig langt bedre. Er der tale om meget høje belastninger kan spændingerne yderligere nedsættes ved at kroppladen forstærkes.



Figur 2.81 Hårde "chines" i forskibet af et hurtiggående fartøj.

2.12.4 DESIGNREGEL 2: - SØRG FOR STRUKTUREL KONTINUITET OG FORLØB I KONSTRUKTIONEN

Designet af strukturen i en given større aluminiums konstruktion bør udføres således, at den strukturelle kontinuitet tilgodeses i videst muligt omfang.

God kontinuitet betyder, at de spændinger, der optræder i ét element altid vil kunne videreføres jævnt og blødt ind i det næste.

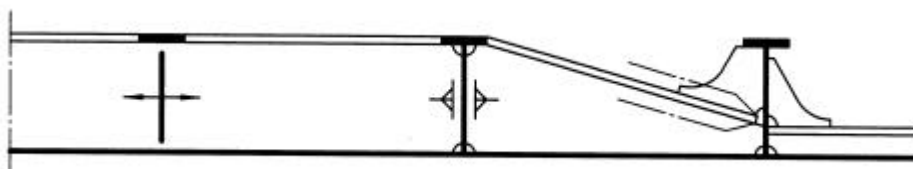
Det er vigtigt at fastlægge de væsentlige ydre belastninger på den givne konstruktion og dermed afgøre hvilke elementer, der i et givet område bør være gennemgående og for hvilke det gælder, at bratte ændringer af tværsnit eller forløb samt detaljer med høje spændingskoncentrationer bør undgås.

(For et skib gælder f.eks. generelt, at de langskibs elementer bør være gennemgående i forhold til de tværskibs elementer på grund af hensynet til den overordnede struktur - selve skrogbjælken.)

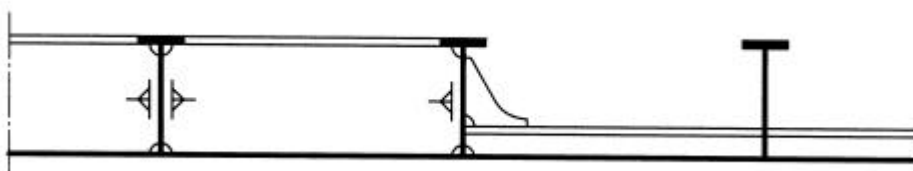
Strukturel kontinuitet ved afslutning af dragere

Afslutninger for primære kontinuerte styrkeelementer bør "blødes op" ved hjælp af lange overgangselementer som vist på Figur 2.82.

Afslutningen i Figur 2.83 kan være acceptabel, hvis spændingsniveauet i det konkrete område er passende lavt.



Figur 2.82 Afslutning af kontinuerte dragere.

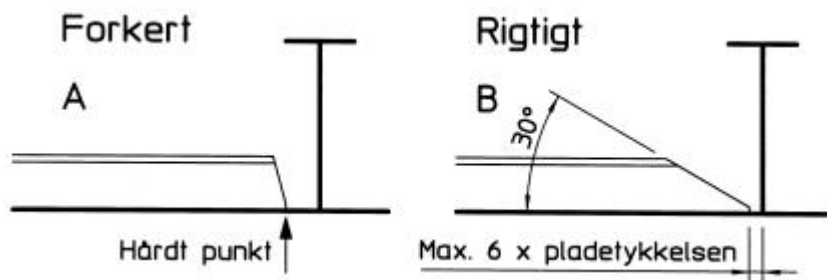


Figur 2.83 Afslutning af lokal drager.

Strukturel kontinuitet ved afslutning af profiler

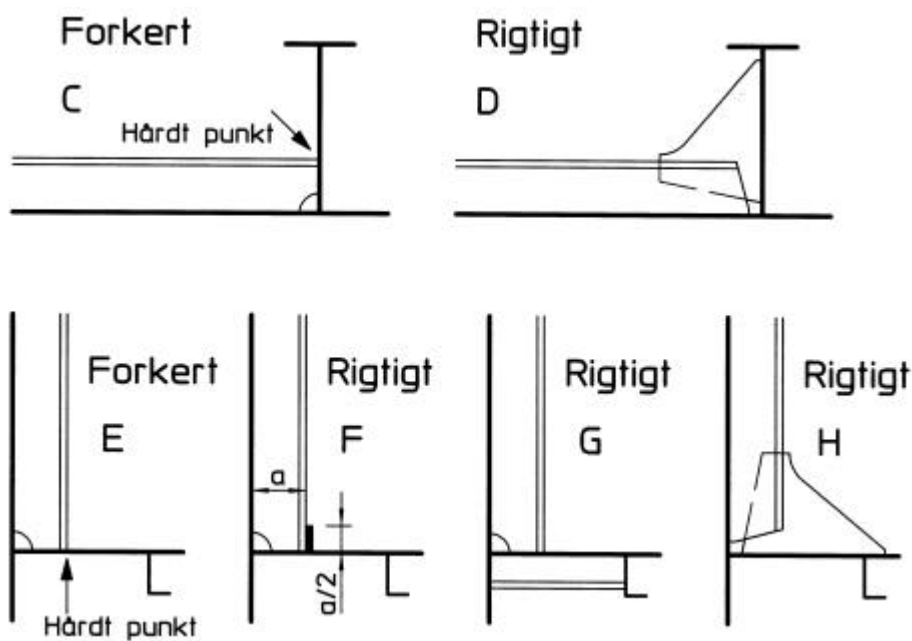
Ved afslutning af profiler, der kun har til formål at afstive en plade, og hvor der ikke er store laterale belastninger, er det som regel ikke nødvendigt at forbinde profilet til den nærliggende struktur. Men ved snipning af et profil skal man altid sørge for en blød og jævn nedtrapping (taper). Figur 2.84 "B"

viser hvordan det skal gøres. På figur "A" er profilet skåret alt for "hårdt" af samtidig med, afstanden fra enden til drageren er for stor.



Figur 2.84 Afslutning af profiler hvor der ikke er behov for forskydningsareal.

Figur 2.85 viser dårlige og gode eksempler på afslutninger af profiler, hvor der er behov for forskydningsareal.



Figur 2.85 Afslutning af profiler hvor der er behov for forskydningsareal.

"C" og "E" er dårlige løsninger, fordi der opstår hårde punkter hvor profilernes flange ender midt ude i et pladefelt.

"D" og "H" viser den helt ideelle afslutning, hvor der er monteret "bløde" knæ. Knæet i "H" er så langt, at det rækker 30 – 50 mm ud over profilet under pladen.

Er der tale om en række profiler, f.eks. spanter på en skibsside, kan løsning "F" anvendes, hvis knæ som vist i "H" under ingen omstændigheder kan accepteres f.eks. af pladshensyn. Her er der monteret et langsgående fladprofil, der forbinder alle profilerne og sikrer en jævn lastfordeling. Den "rendesten", der opstår, bruges som regel til at dræne kondensvand væk. Ved små stivere er løsningen

dårlig, fordi det vil være næsten umuligt at svejse bagsiden ad fladprofilen ordentligt. Til gengæld vil behovet for forskydningsareal som oftest være lille ved små stivere.

Løsning "G" er en væsentlig bedre løsning end "F", men den kræver præcis oplining mellem den lodrette stiver og det vandrette profil under pladen.

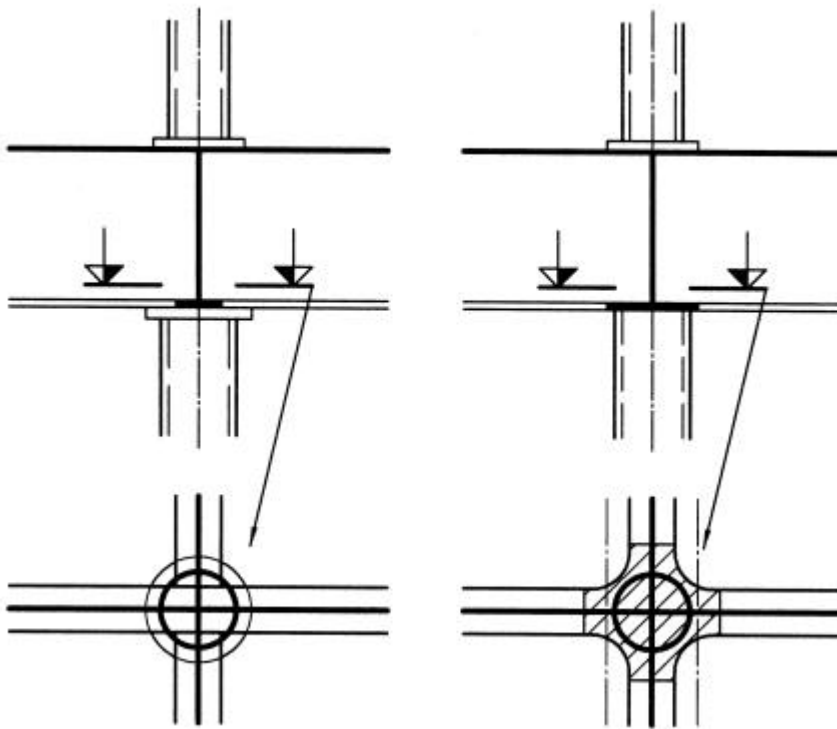
Strukturel kontinuitet af søjler

Søjler og lignende støtte strukturer skal placeres i samme vertikale linie, hvor dette er muligt. Hvis en perfekt "oplining" ikke er mulig, skal understøtningen udformes således, at det er muligt at overføre de vertikale kræfter på en tilfredsstillende måde mellem søjlerne.

Et typisk problem er runde, hule søjler, der skifter dimension på hver side af et dragerkryds. Figur 2.86 viser en sådan situation, hvor dragerkrydsets flanger tilmed er smallere end diameteren af den nederste søjle. I denne situation er det meget vanskeligt at skabe en perfekt kontinuitet, fordi spændingerne i den runde søjle skal overføres til et kryds og derefter tilbage til en rund søjle igen. Løsningen vil ofte være at forsyne søjlerne med nogle relativt tykke cirkulære doblingsplader. Disse plader fordeler spændingerne over et større kantareal af dragernes webplader, og jo tykkere doblingsplade, jo større fordeling.

Dobblingspladen på den nederste søjle skal svejses under et flangekryds, der ofte ikke er helt plant, hvilket kan give nogle problemer. Derfor må det anbefales at indsætte en diamantplade i flangekrydset.

Er der tale om gentagne støtter på en drager, vil det, selv om det styrkemæssigt ikke er nødvendigt, ofte kunne betale sig i stedet for diamantplader at øge bredden af flangen, så den bliver større end søjlernes diameter, fordi man derved opnår en produktionsmæssig fordel.



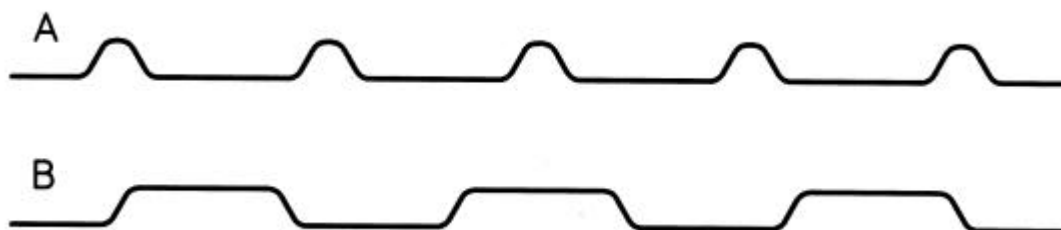
Figur 2.86 Runde hule søjler ved dragerkryds.

Det må understreges, at hule søjler og doblingsplader under ingen omstændigheder må bruges i tanke pga. risikoen for væskeindtrængen.

Doblinger er heller ikke velegnede, hvis der ud over et rent søjletryk også skal overføres et bøjningsmoment.

Strukturel kontinuitet af korrugerede pladepaneler

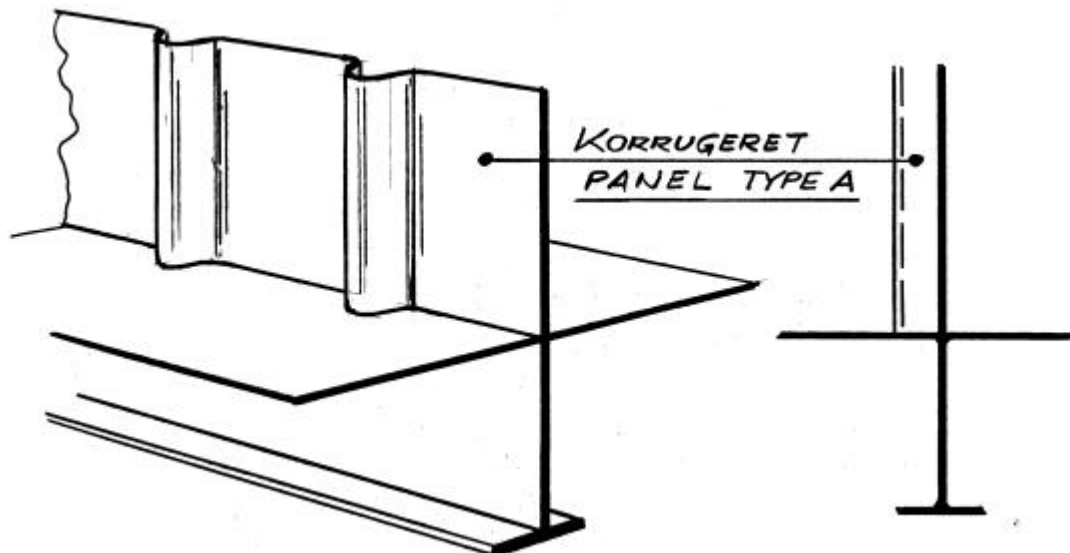
Korrugerede pladepaneler fremstilles typisk i to udgaver som vist på Figur 2.87.



Figur 2.87 Korrugerede pladepaneler.

Ved indsvejsning af korrugerede pladepaneler skal der skabes kontinuitet med den omkringliggende struktur.

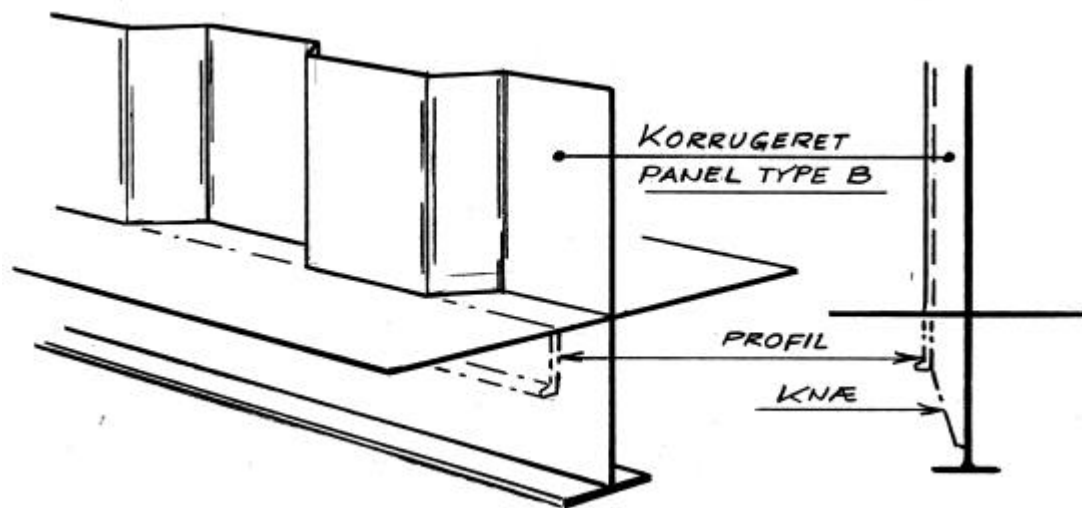
Ved korrugerede paneler af type A ("pressede bølger") vil man normalt line basispladen af det korrugerede panel op med den omkringliggende struktur og se stort på, at "bulerne" ikke får nogen direkte understøtning – se Figur 2.88. Normalt betyder det ikke så meget, fordi "bulerne" er blødt afrundede, og der derfor ikke skabes hårde punkter.



Figur 2.88 Kontinuitet mellem korrugering type A og den omkringliggende struktur.

Ved korrugeringer af type B er situationen vanskeligere. Hvis den ene side (den ene halvdel) lines op efter den omkringliggende struktur, vil den anden side (den anden halvdel) ikke have nogen fornuftig understøtning og dermed kraftoverførsel.

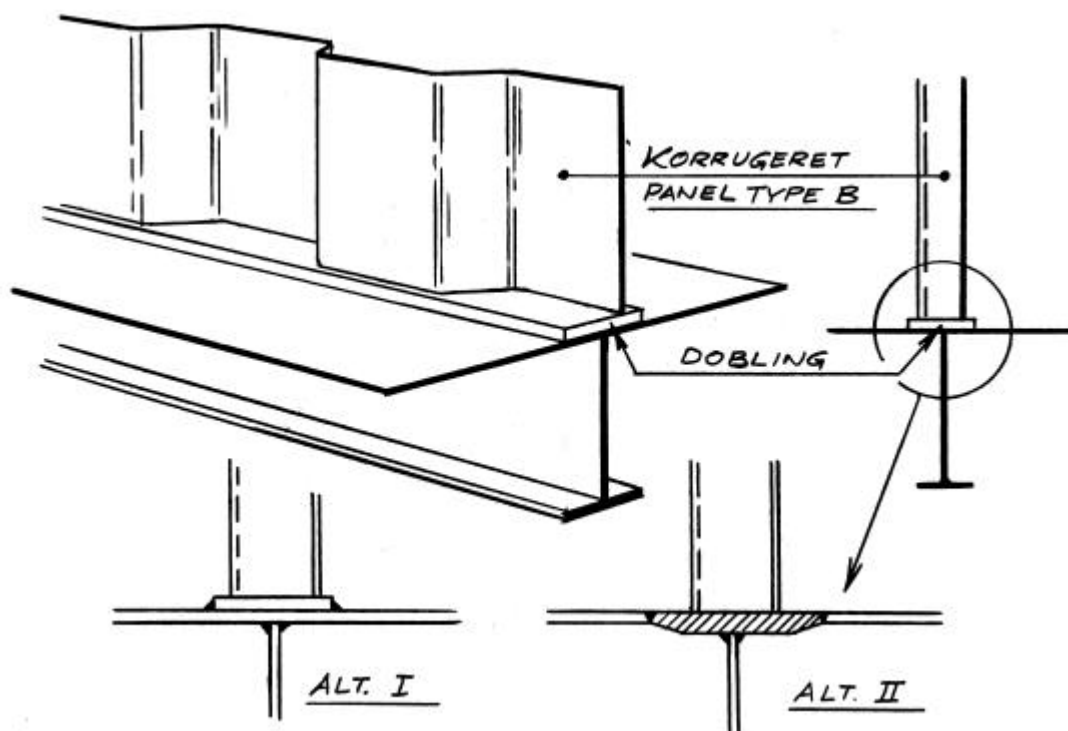
Figur 2.89 viser situationen. En mulig løsning kunne være at montere et profil under den vandrette plade i linie med den anden flange af korrugeringen, og overføre kræfterne via dette profil gennem nogle knæ til dragerens kropplade.



Figur 2.89 Kontinuitet mellem korrugering type B og den omkringliggende struktur.

Denne løsning giver nogle produktionsmæssige vanskeligheder, fordi korrugeringsdybden ofte kun vil være 60 – 100 mm.

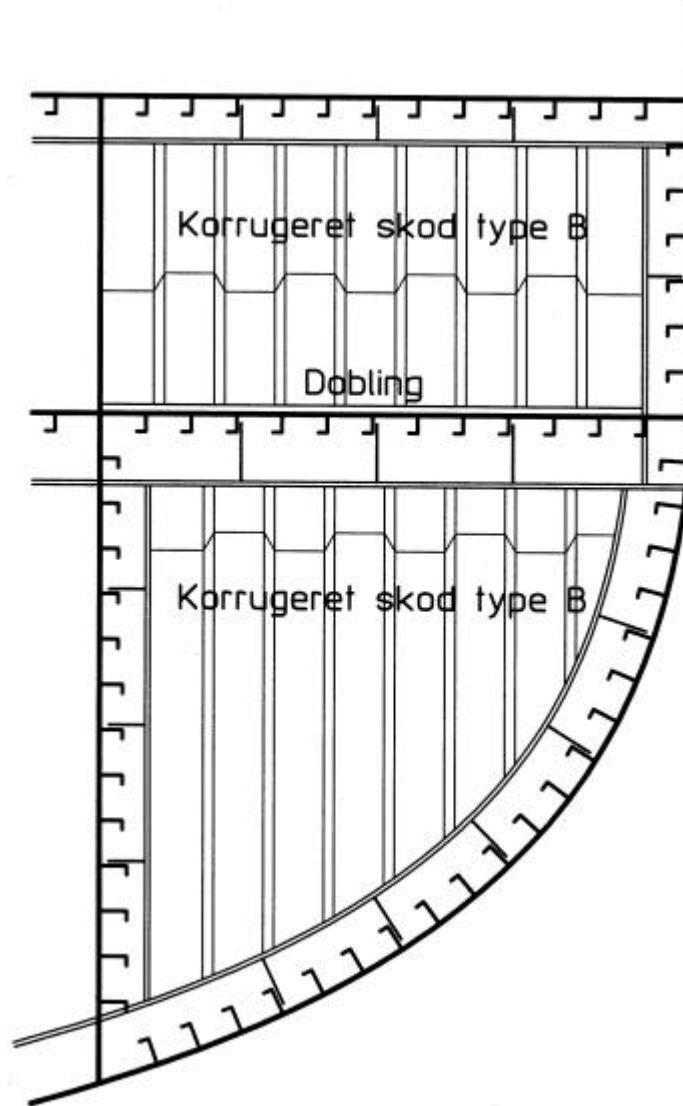
Alternativt til denne løsning vælger man derfor ofte at montere et doblingsprofil på den korrugerede plade og montere midten af denne dobling over dragerens kropplade som vist på Figur 2.90 – Alt. I.



Figur 2.90 Montering af korrugeret pladepanel på dobblingsprofil.

Så længe der fortrinsvis er tale om lodrette kræfter i det korrugerede panels plan, er løsningen med en dobbling oven på den vandrette plade udmærket, men hvis der er tale om betydelige laterale kræfter på det korrugerede panel må man nok erkende, at kraftoverførslen gennem en dobbling ikke er 100% optimal. I den forbindelse vil det være langt bedre at indsejse dobblingen i den vandrette plade som vist på figuren – Alt. II.

Ideen med at afslutte et korrugeret panel af type B på et fladprofil (dobbling) bruges hyppigt i skibsbygning. Figur 2.91 viser et typisk eksempel. Tilpasning af det korrugerede panel til profilerne i dæk og klædning ville være alt for kompliceret og tidskrævende. I stedet anvendes det korrugerede panel kun som ”udfyldning” i felterne mellem en traditionel dragerstruktur. Det giver nogle produktionsmæssige fordele, fordi korrugeringerne kan udføres optimalt i forhold til belastningerne, uden at de nødvendigvis skal passe til modulerne i den omkringliggende struktur.



Figur 2.91 Typiske korrugerede skodder i skibsbygning.

Strukturel kontinuitet af krydsende elementer

Hvor elementer krydser hinanden (se Figur 2.92), gælder følgende regler for, hvilket element, der skal være gennemgående. Reglerne er opstillet i prioritetsorden:

1. Elementet med den højeste materialekvalitet (højstyrke aluminium)
2. Elementet med trækspændinger
3. Elementet med det højeste spændingsniveau
4. Det tykkeste element

Selvfølgelig skal en perfekt opstilling af det brudte element på begge sider af det gennemgående tilstræbes, men en vis forsætning må i praksis altid påregnes.

Er det brudte element et sekundært element, der kun har betydning for den lokale struktur, vil en forsætning på op til en 1/2 pladetykkelse normalt være acceptabel uanset tykkelsen af det gennemgående element.

For et primært element, må forsætningen ikke overstige den mindste af følgende to værdier:

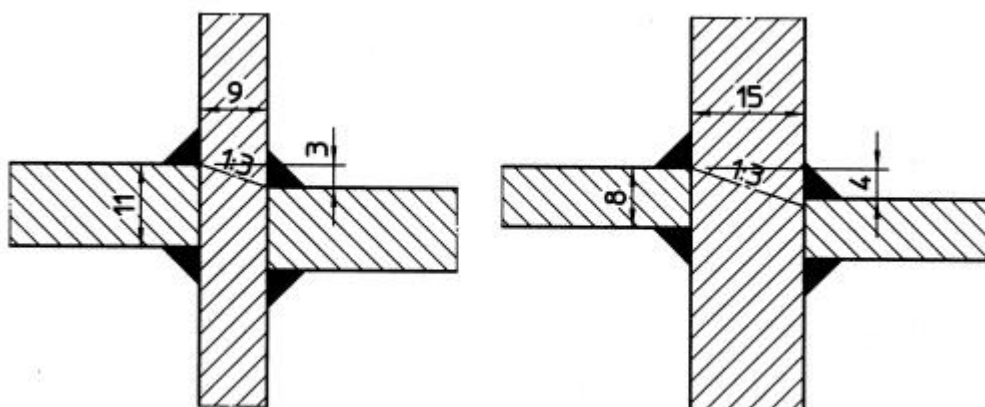
1. 1/3 af den gennemgående plades tykkelse
2. Halvdelen af den brudte plades tykkelse

Svejses f.eks. to 11 mm tykke plader til hver sin side af en 9 mm plade, må forsætningen ikke overskride den mindste af følgende to værdier:

$$9/3 = 3 \text{ mm eller } 11/2 = 5,5 \text{ mm} - \text{altså max. 3 mm (se Figur 2.92).}$$

Svejses f.eks. to 8 mm plader til hver side af en 15 mm plade, vil den maksimale forsætning være den mindste af følgende værdier:

$$15/3 = 5 \text{ mm eller } 8/2 = 4 \text{ mm} - \text{altså max 4 mm.}$$



Figur 2.92 Forsætning af elementer.

Overgange (taper) mellem elementer med forskellig styrke

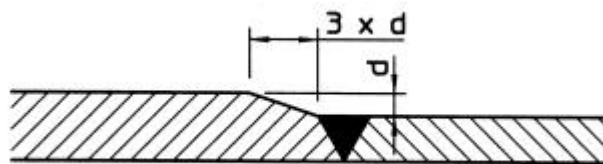
Når to elementer med forskellig styrke og/eller stivhed skal forbindes, er det på grund af aluminiums lave udmattelsesstyrke og i visse tilfælde risikoen for spændingskorrosion i højt belastede områder meget vigtigt, at der etableres en blød og jævn overgang.

Den generelle hovedregel er, at aftrapning (dvs. aftrapning i tykkelse eller bredde fra ét element til et andet) ikke må være hårdere end 1:3.

Ved sammensvejsning af to plader bør forskellen i pladetykkelse fra den tykkeste plade til den tyndere desuden ikke være større end ca. -30%.

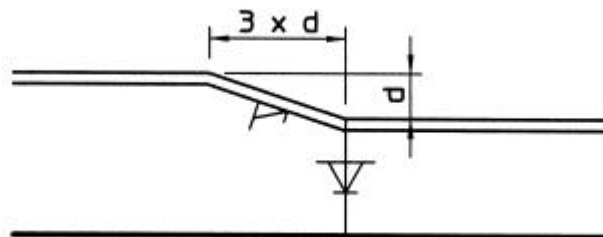
En 10 mm plade kan altså fornuftigt stumpsvejses til plader på mellem ca. 7 og 14 mm.

For samling af plader med en tykkelsesforskel på mere end 2 mm, skal den tykkeste plade normalt affases med en taper, der generelt ikke overstiger 1:3 – se Figur 2.93.



Figur 2.93 Taper mellem to plader med forskellig tykkelse.

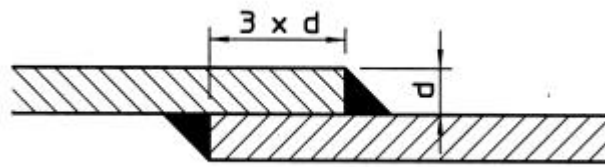
For samling af profiler af forskellig højde, skal det højeste profil tilsvarende nedfases med en taper, der ikke overstiger 1:3, se Figur 2.94.



Figur 2.94 - Overgang mellem to elementer med forskellig stivhed.

Ved overlaps samlinger gælder de samme principper.

Længden af overlappet skal ligge mellem 3 og 4 gange pladetykkelsen af den tyndeste plade, se Figur 2.95.



Figur 2.95 Overlaps samling.

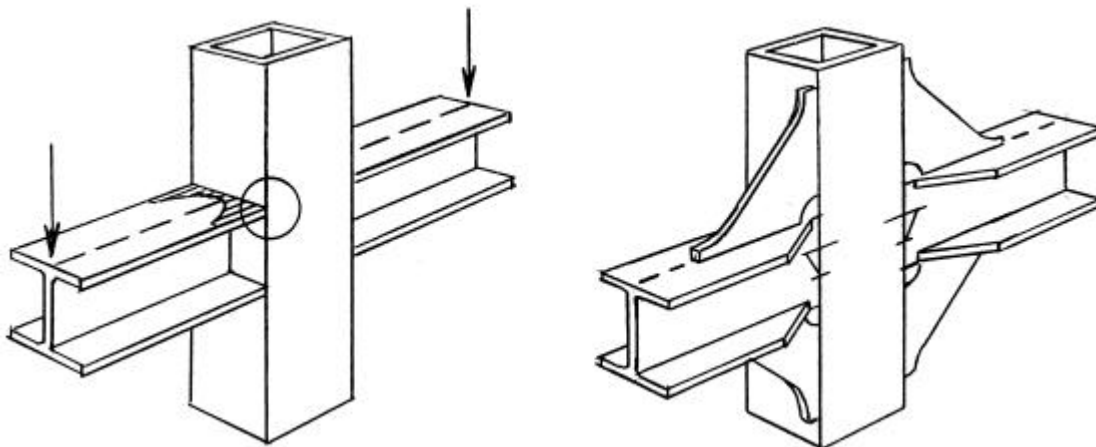
Diskontinuiteter

Diskontinuiteter skal undgås i videst muligt omfang.

Spændingerne skal naturligt kunne flyde fra et element ind i det næste.

At dette ikke altid er tilfældet viser eksemplet i Figur 2.96. Her er en I-drager båret af en hul RHS-søjle, og som det ses på figuren til venstre, skal alle kræfterne overføres gennem et meget lille område – vist som en cirkel.

Løsningen kunne f.eks. være at forskyde drageren og søjlen i forhold til hinanden, så kroppladen i drageren passer med den ene side i søjlen.



Figur 2.96 I-drager, der bæres af RHS-søjle.

2.12.5 DESIGNREGEL 3: - PLACER UDKAP PÅ STEDER HVOR DE GØR MINDST MULIG SKADE.

Ofte ses eksempler på udkap, der er placeret meget uhensigtsmæssigt - simpelthen fordi "sådan har man altid gjort".

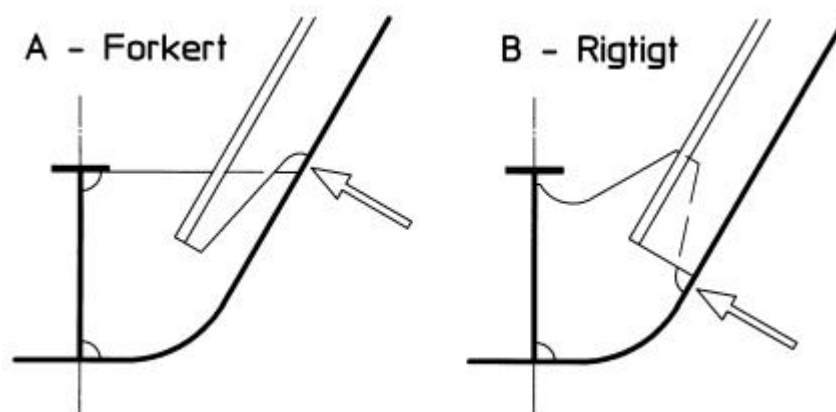
Med lidt omtanke kan mange af de problemer, der optræder med revner i udkappene fuldstændig undgås.

Følgende eksempler viser, hvorledes en konstruktion med en meget uheldig placering af udkap kan forbedres kraftigt ved små design ændringer.

Figur 2.97 viser 2 forskellige løsninger på forbindelsen mellem spanterne i siden af et skib og center bæreren.

A viser en meget udbredt, men ikke særlig god løsning, hvor udkappet ved pilen er placeret på det dårligt tænkelige sted – netop der, hvor der er størst behov for forskydningsareal og modstandsmoment.

I B er spantet ført lidt længere ned og knæet ændret lidt i faconen. Dermed er udkappet blevet placeret på et helt neutralt sted, hvor det ikke forringer styrken.

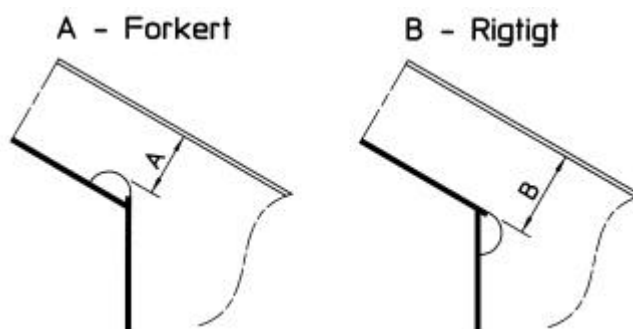


Figur 2.97 Forkert og rigtig placering af udkap.

Figur 2.98 viser et eksempel på hvorledes valget af gennemgående elementer kan have betydning for, om et udkap vil kunne udformes rigtigt.

I A vil udkappet begrænse forskydningsarealet og skabe en spændingskoncentration.

I B forstyrrer det ikke spændingsflow'et.



Figur 2.98 Forkert og rigtig udformning af udkap.

2.12.6 DESIGNREGEL 4: - UNDERSTØT KNÆKLINIER.

Når to elementer sammensvejses i et knæk, vil der opstå bøjespændinger i knæklinien, hvis der i elementerne optræder spændinger vinkelret på knæklinien.

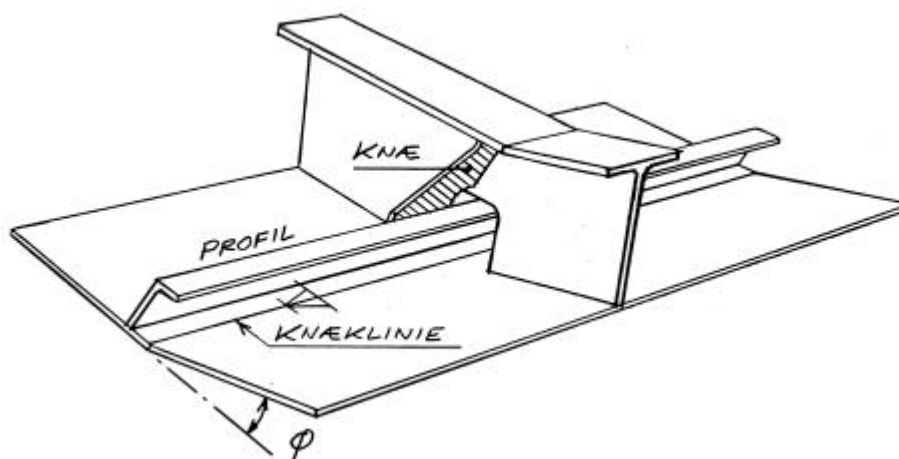
Der vil desuden dannes en kraftkomponent ud af planet i vinkelhalveringslinien, som kan give anledning til instabilitet.

Hovedreglen er derfor, at knæklinier skal understøttes med parallelle elementer, hvis knækvinklen ϕ (afvigelsen fra en ret linie) er mellem 10° og 60° .

Disse elementer bør ikke sidde længere væk fra knækket end $5 \times$ pladetykkelsen.

Ved vinklen $> 60^\circ$ vil knækket være selvafstivende.

Nedenstående skitse Figur 2.99 viser eksempler på knæklinier, der bør understøttes.



Figur 2.99 Understøtning af knæklinier.

En variant af knæklinier er radier.

For elementer, der ændrer retning i en blød runding, gælder, at rundingen ligesom et knæk vil give årsag til instabilitet, og derfor bør understøttes mod kæntring.

2.12.7 DESIGNREGEL 5: - BEGRÆNS RELATIV DEFORMATION

Hvis to parallelle elementer deformeres forskelligt, tales der om relativ deformation imellem elementerne.

Er de to elementer forbundne med tværgående elementer, kan denne relative deformation være årsag til meget store spændinger i de tværgående elementer.

Figur 2.100 viser et eksempel, hvor et pladefelt er afstivet med relativt lange (bløde) bjælker.

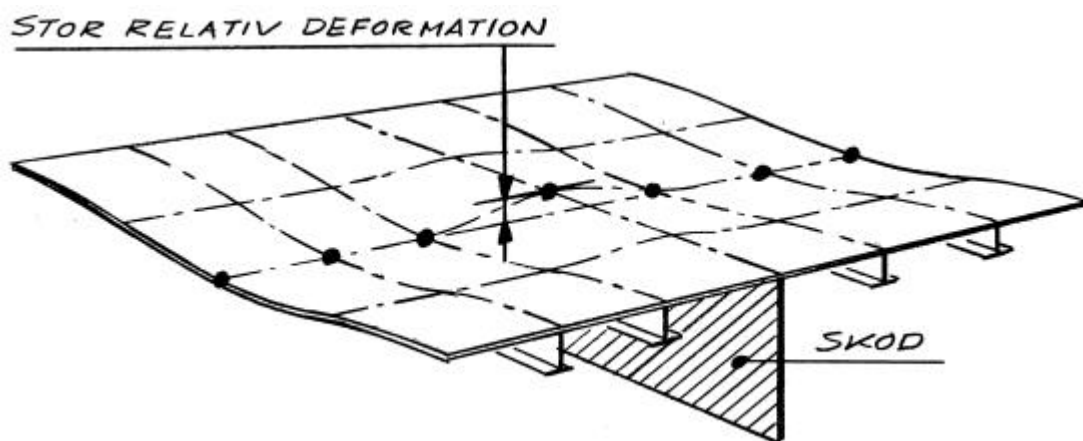
På visse steder er der i stedet for bjælker stive skodder.

Når pladefeltet belastes fjedrer bjælkerne ned, mens skodderne ikke deformeres.

Forskellen i deformation (den relative deformation) mellem to nabobjælker er minimal, mens forskellen i deformation mellem en bjælke og et skod er stor.

Derfor vil der opstå store trækspændinger i pladefeltet mellem bjælken og skoddet.

Løsningen vil være, at begrænse den relative deformation, enten ved at indlægge en drager eller ved at øge dybden (og dermed begrænse deformationen) af de to nabobjælker på hver side af skoddet.



Figur 2.100 Relativ deformation mellem bløde bjælker og et stift skod.

2.12.8 DESIGNREGEL 6: - FOREBYG KORROSION I DESIGNFASEN.

For at kunne forebygge korrosion i designfasen er det først og fremmest nødvendigt at kende de forskellige former for korrosion af aluminium og deres årsager.

Ud fra kendskabet til konstruktionens driftmiljø og kendskabet til korrosionsårsagerne kan man så tage sine forholdsregler i form af rigtigt valg af designløsninger, legering og overfladebehandling. Emnet Korrosion behandles yderligere i Kapitel 6 Levetid.

Driftmiljø

Driftmiljøet er et spørgsmål om:

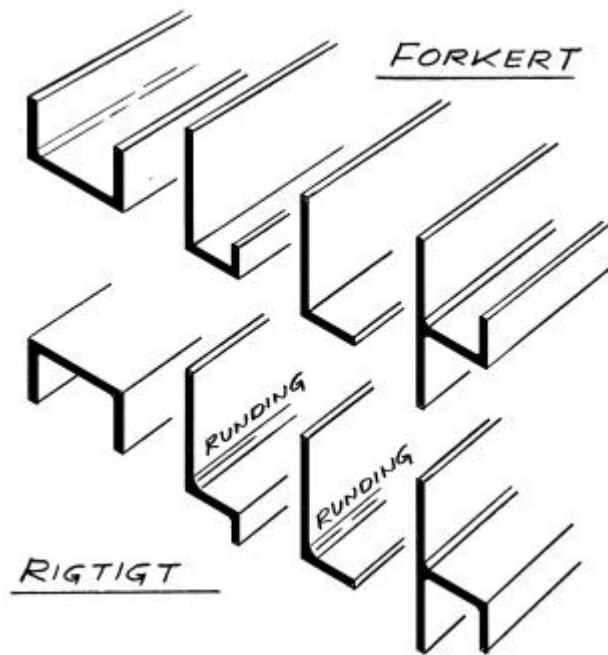
- Korrosivt miljø
- Håndtering af korrosive produkter
- Slidbelastning, der ødelægger den beskyttende oxidhinde
- Fugt og kondensvand
- Varmepåvirkning

Nogle faktorer i driftmiljøet kan minimeres, mens andre blot må tages til efterretning.

Skal en konstruktion bruges i udpræget korrosivt miljø eller anvendes til håndtering af korrosive produkter, er der selvfølgelig ikke noget at gøre ved det; men det er måske muligt at reducere en evt. slidbelastning ved f.eks. at montere slidlister.

Dannelse af kondensvand vil ofte være et problem ikke mindst pga. aluminiums gode varmeledningsevner. Muligvis kan man isolere sig ud af problemerne, men er dette ikke muligt, må konstruktionen udformes, så der ikke kan ophobes ”søer” af vand, og specielt skal man undgå den yderst uheldige kombination af ”skidt samlere” og dårlige drænforhold.

De nedenstående eksempler Figur 2.101 viser, hvordan profiler bør udformes og vendes.



Figur 2.101 Eksempler på gode og dårlige profil løsninger.

Et af problemerne med at tilvejebringe ordentlige drænforhold er, at vandløbshuller typisk skal placeres i hjørner, men at udkap disse steder ofte vil være uheldige af styrkemæssige årsager. Med lidt omtanke kan det dog som regel lade sig gøre at skabe fornuftige drænforhold uden at svække konstruktionen væsentligt.

Når der bores drænhuller i profiler skal diameteren af hullerne være mindst 8 mm. Ellers bliver vandet liggende pga. overfladespændingen.

Korrosionsformer og deres forebyggelse

De mest almindelige former for korrosion i aluminium er:

- Galvanisk korrosion
- Pitting (grubetæring)
- Spaltekorrosion
- Spændingskorrosion

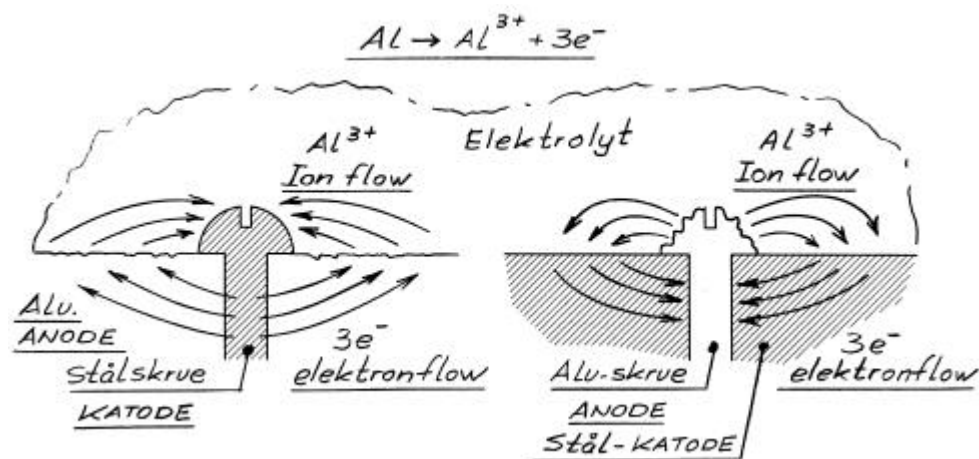
Galvanisk korrosion:

Galvanisk korrosion kan opstå, når forskellige metaller er i kontakt med hinanden samtidigt med, at der er en elektrolyt(væske) til stede, som kan danne bro mellem de to metaller.

Det mest "uædle" eller "elektro-negative" metal – anoden – korroderer, mens det mest "ædle" eller "elektro-positive" metal – katoden – beskyttes mod korrosion.

En lille katode og en stor anode giver kun svag korrosion, mens der omvendte vil kunne give meget hurtig nedbrydning.

Figur 2.102 viser et eksempel med henholdsvis en stålskrue i en aluminiumsplade og omvendt.



Figur 2.102 Galvanisk korrosion.

Aluminium er et meget uædelt metal. Faktisk er kun zink og magnesium mere uædle. Derfor vil kontakt med stort set alle andre metaller f.eks. kobber og stål give anledning til galvanisk korrosion, hvis der samtidigt er fugtighed til stede.

Selv kombinationen af galvaniseret stål og aluminium vil kunne give problemer. I begyndelsen beskytter zinken ganske vist aluminium'et, men når zinken først er tæret væk, kan den blotlagte ståloverflade forårsage angreb.

Når aluminium skal forbindes med f.eks. stål skal det gøres rigtigt, hvis galvanisk korrosion skal undgås - mere om dette i afsnit 2.12.15 om specielle detaljeløsninger ved samlinger mellem stål og aluminium.

Katodisk beskyttelse kan udføres på to måder:

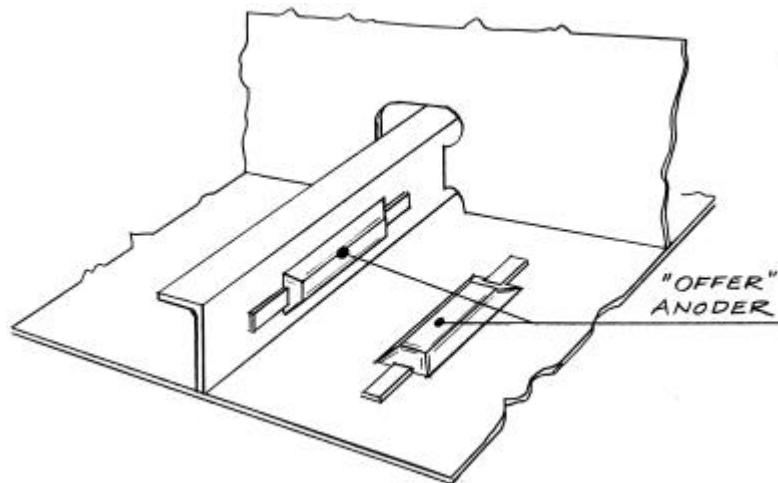
- Montering af såkaldte "offer anoder", dvs. klodser af zink, i mekanisk og god elektrisk kontakt med aluminium'et.

Klodserne vil tæres (ofres) i stedet for aluminium'et, fordi zink er mere elektronegativt end aluminium.

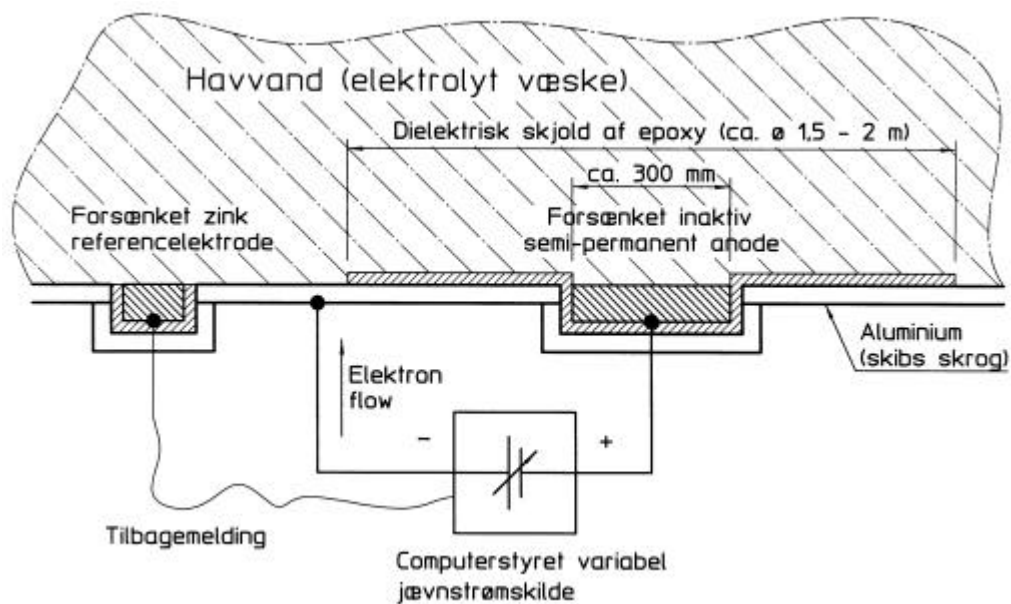
Figur 2.103 viser eksempler på offer anoder i en ballasttank i et skib.

- Påtrykke en variabel lav-volt jævnspænding, med den negative pol tilsluttet til aluminium'en og den positive pol til en inaktiv, semi-permanent anode f.eks. fremstillet af en oxid dækket plade af titanium eller niobium.

Figur 2.104 viser princippet for en typisk installation i et skib.



Figur 2.103 Katodisk beskyttelse vha. offeranode.



Figur 2.104 Princip for katodisk beskyttelse vha. påtrykt spænding.

I forbindelse med saltvand vil tilstedeværelsen af selv små mængder rustfrit stål eller endnu værre kobber (kabler, rør, rørfittings, udrustning etc.) kunne få voldsomme konsekvenser i form af meget hurtig korrosion. Er mængden af kobber (katoden) væsentlig i forhold til mængden af aluminium (anoden), vil katodisk beskyttelse vha. offeranoder ofte ikke være tilstrækkelig, og der må direkte påtrykkes en elektrisk spænding for at undgå korrosion.

Ved rørssystemer med strømmende væske må aluminiumsrør aldrig anvendes efter (set i strømningens retning) rør i mere elektropositive materialer f.eks. kobber.

Det omvendte giver normalt ikke korrosion, men som hovedregel skal man være meget forsigtig med at blande aluminium med mere ædle materialer i rørsystemer.

Galvanisk korrosion ses også hvor stålsprøjt fra skæring med vinkelsliber rammer en aluminiumsoverflade. Dette sprøjt kan være så fint, at det ikke umiddelbart ses, men i løbet af kort tid vil der med garanti dannes rust uanset hvor godt, der males.

Ligeledes af galvaniske årsager må skæreværktøj (save og skæreskiver) til aluminium ikke indeholde kobber, fordi der uundgåeligt vil blive afsat kobberpartikler i skærefladerne.

Pitting (grubetøring):

Pitting er en hyppig form for korrosion, der opstår under indflydelse af en elektrolyt. Lokale angreb af klorid-ioner skaber små huller i den beskyttende oxidhinde, hvorved korrosionen kan få fat i den underliggende ubeskyttede aluminium. Derved dannes små tragtformede huller (eller gruber), der trænger lidt ind i materialet, men som ikke nedsætter styrken væsentligt.

Pitting modvirkes vha. katodisk beskyttelse og effektive dræn, så der ikke står vand.

Spaltekorrosion:

Hvor to aluminiumsoverflader ligger tæt sammen, kan der i forbindelse med fugtighed, der trænger ind imellem fladerne, dannes såkaldt spaltekorrosion som følge af forskellen i iltkoncentration i overfladerne og i fugtigheden i spalten.

Spaltekorrosion forekommer ikke kun i færdige konstruktioner, men også ved transport og lagring af aluminium, hvis der trænger regn- eller kondensvand ind mellem f.eks. stablede profiler. Den bedste måde at forhindre spaltekorrosion er helt at undgå revner, men kan dette ikke lade sig gøre, kan revnerne tætnes med en fugemasse.

Spændingskorrosion:

Spændingskorrosion er en meget speciel form for korrosion, hvor samspillet mellem længere tids trækspændinger, korrosivt miljø og metallurgiske forhold kan danne revner, der kan forringe styrken af en konstruktionsdel.

Visse aluminiumslegeringer er mere følsomme end andre. Det gælder først og fremmest de hårde modningshærdbare højstyrkelegeringer f.eks. AlZnMg-legeringer i kloridholdigt miljø.

Denne type korrosion forekommer ikke ved de almindelige AlMgSi-legeringer.

Designeren skal derfor være specielt opmærksom på konstruktionsdele med vedvarende høje trækspændinger og specielle miljøbelastninger, og i disse områder anvende en egnet legering og overfladebehandling.

Maling og overfladebehandling:

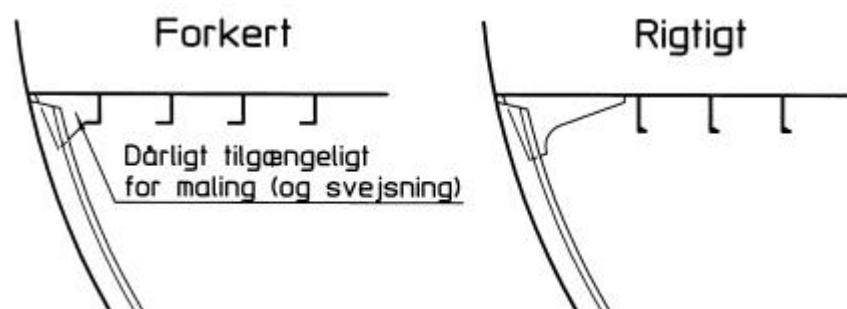
Skal en konstruktion males som led i korrosionsbeskyttelsen, må der på designstadiet tages hensyn til, at dette kan lade sig gøre med tilfredsstillende resultat.

Kombinationen af snævre rum og uhensigtsmæssigt valg af profiler kan betyde, at maling stort set ikke er mulig.

Bredflangede lave vinkler kan i praksis være umulige at male på undersiden af flangen. T-profiler med smalle flanger eller endnu bedre bulb-profiler vil være et meget bedre valg.

Man må også gøre sig klart, at en forudsætning for at maling kan binde på kanter af profiler, udkap og huller er, at kanterne er reifede til en rundingsradius på mindst 1,5 mm, hvilket produktionsmæssigt er dyrt.

Figur 2.105 viser et eksempel på en meget uhensigtsmæssig konstruktion, der er umulig at male, samt et langt bedre alternativ.



Figur 2.105 Uhensigtsmæssigt og rigtigt valg af profiler og konstruktioner i snævre rum.

Alternativet til overhovedet at male snævre lukkede rum vil være at sænke luftfugtigheden tilstrækkeligt til, at kondensvand ikke kan dannes.

Som regel vil der være tale om meget beskedne krav til affugtningsanlægget og dermed også energiforbruget.

I mange tilfælde vil en affugtningsløsning derfor i længden være billigere end maling og løbende vedligeholdelse.

Desuden vil det være meget nemmere at detektere begyndende revner, samt billigere at reparere.

2.12.9 DESIGNREGEL 7: - UDFORM KONSTRUKTIONEN, SÅ DEN KAN SVEJSES I GOD KVALITET.

At opnå en tilfredsstillende svejse kvalitet ved svejsning af snævre detaljer i aluminium er betydeligt vanskeligere end i stål af to årsager:

- Aluminium kan ikke svejses med tynde og evt. bukkede beklædte elektroder (svejsespinde), men må svejses med væsentlig mere pladskrævende svejsepistoler med beskyttelsesgas, og ved svejsning af 90° kantsømme kan kvaliteten kun forventes at blive tilfredsstillende, hvis pistolen kan holdes i en vinkel på max. +/- 10° fra den optimale vinkel på 45°.
- Aluminium har den for svejsning uheldige egenskab, at varmeledningsevnen er meget høj (3 – 4 gange ståls) hvilket betyder, at en stor del af varmen forsvinder ud i omgivelserne, hvis der svejses med lave svejseparametre (lav hastighed og lav strøm). Det betyder igen, at svejsezonen bliver for kold, og at det derfor vil være vanskeligt at opnå en tilfredsstillende indtrængning. Problemet er især stort ved pladetykkelser over 7-8 mm (tykke plader køler bedre end tynde), og hvis der anvendes ren argon som beskyttelsesgas.

Manuel svejsning af snævre detaljer er desværre netop karakteriseret ved lave svejseparametre. Tilsætning af helium til beskyttelsesgassen vil forbedre både indtrængning og udflydning af svejsningen, men helium er dyrt.

Disse forhold må der tages hensyn til ved design af detaljeløsninger.

Det er utopi at tro, at alle detaljer kan svejses perfekt, men når man først har erkendt det, kan man tage sine forholdsregler.

Princippet er, at enten skal der være plads til at detaljerne kan svejses i ordentlig kvalitet, eller også må man sørge for, at en uundgåelig dårlig kvalitet ikke får indflydelse på udmattelsesstyrken.

Det er afgørende vigtigt at ”spotte” de kritiske steder, hvor der vil være et meget højt spændingsniveau og koncentrere sig om, at disse steder under alle omstændigheder kan udføres perfekt.

Endelukninger

Ved endelukninger forstås kantsømme, der forløber rundt om f.eks. en ende af et knæ eller gennem et udkap fra den ene side til den anden side.

Endelukninger er i princippet nødvendige i to tilfælde:

- Hvor der er tale om våde eller fugtige omgivelser for at undgå risikoen for spaltekorrosion, hvis fugtighed kan akkumuleres i de tynde sprækker mellem elementerne.
- Hvor der dannes et hårdt punkt med høj spændingskoncentration.

Hvis der er tale om lavt belastede dele, der blot endelukkes af hensyn til fugtighed, vil kvaliteten af den færdige svejsning ikke have den store betydning. I princippet kunne man lige så godt have lukket med fugemasse.

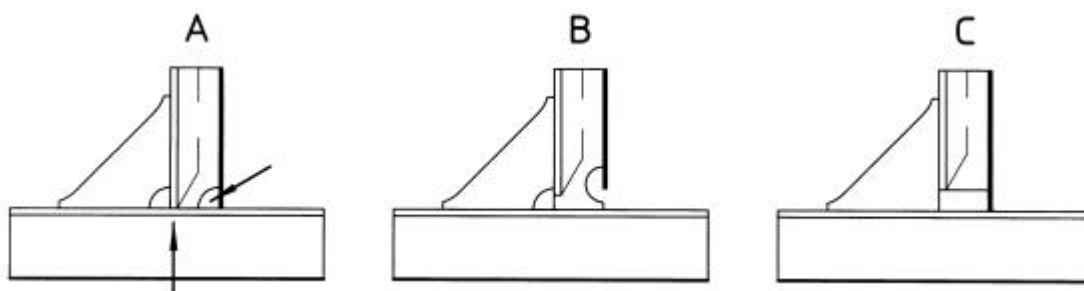
Er der derimod tale om endelukninger i hårdt belastede "hot-spots" må man virkelig være på vagt, idet de geometriske forhold omkring en evt. ujævn svejseoverflade og kærsvirkninger ved f.eks. indbrændinger vil medføre en yderligere forhøjelse af spændingsniveauet, og dermed reduktion af levetiden. Det har vist sig, at der i praksis kan være en forskel i levetiden på mere end 3 gange mellem en relativt middelmådig og en perfekt udført og evt. slebet svejsning.

Nedenstående Figur 2.106 - A viser et eksempel på en knæforbindelse med detaljer, der er vanskelige at svejse med tilfredsstillende resultat, fordi der ikke er plads til svejsepistolen (pilene markerer de kritiske punkter).

Det gælder dels udkappet i det lodrette profil, og dels punktet, hvor den snippede flange lander på den vandrette profil.

Løsning B er bedre. Det lodrette profil kan svejses fra den modsatte side af den lodrette plade, og er samtidigt "blødt op", så spændingsniveauet er reduceret. Den snippede flange stopper desuden ca. 10 mm over det vandrette profil, så den vandrette svejsning mellem de to profiler kan udføres i en god kvalitet.

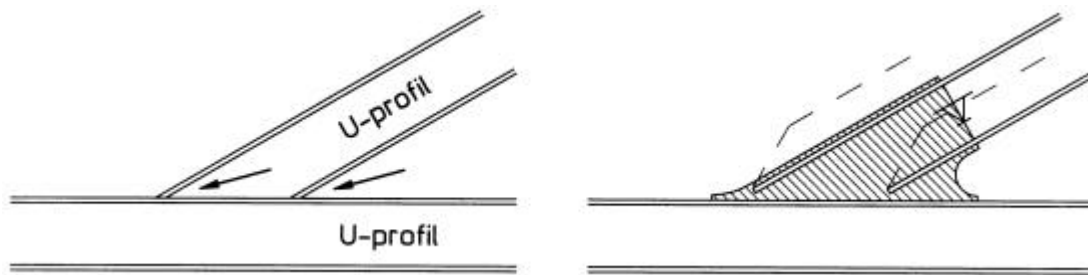
Løsning C er et produktionsvenligt alternativ.



Figur 2.106 Vanskelig adkomst for svejsning.

Figur 2.107 viser to U-profiler, der er svejst mod hinanden i en spids vinkel. Pilene viser de kritiske steder, der i praksis er umulige at svejse med et acceptabelt resultat. Desuden opstår der et meget hårdt punkt i den spidse vinkel.

En god løsning er vist til højre. Det stødende U-profils flanger er snippede 30° og det sidste stykke af kroppladen erstattet af en godt udformet og evt. lidt kraftigere plade (vist skraveret). Denne løsning er enkel at svejse, og kræfterne fra det stødende profil overføres jævnt og blødt.

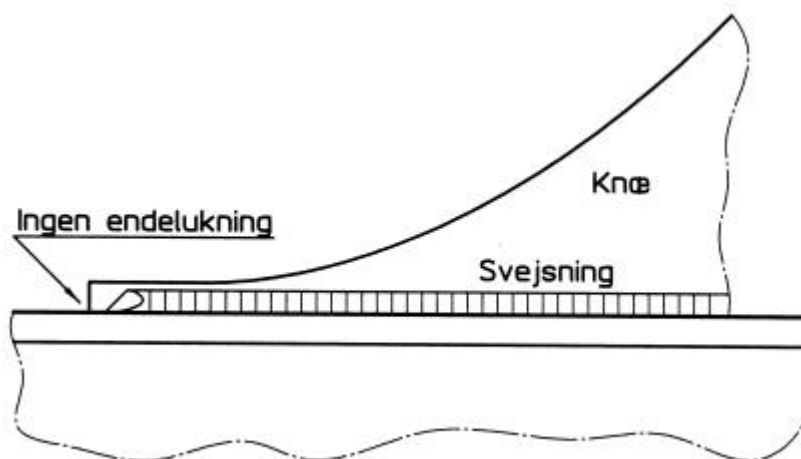


Figur 2.107 Dørlige adkomstforhold for svejsning af 2 profiler.

Meget ”bløde” ender

Spændinger kan kun opstå, hvis der er noget til at overføre dem. Dette umiddelbart indlysende udsagn er værd at tænke over, når endefslutninger af konstruktionsdetaljer udformes. Det er i princippet muligt at blødgøre enderne i en sådan grad, at svejskvaliteten ved den bløde ende vil være af mindre betydning.

Figur 2.108 viser et ekstremt eksempel.



Figur 2.108 Ekstremt blød ende.

Set fra enden af knæet starter svejsningen i et område, der er så blødt, at der ikke kan overføres kræfter af betydning. Derfor burde kraterrevner uden problemer kunne accepteres. Efterhånden som svejsningen når ind i det stive område af knæet, hvor spændingsniveauet stille og roligt begynder at stige, er svejskvaliteten blevet perfekt og derfor i stand til at overføre de nødvendige kræfter.

Et af problemerne med elementer med meget tynde og bløde ender er håndteringen, fordi enderne nemt bukket.

Et andet problem er, at de bløde ender er dyrere at fremstille, og at materialespildet f.eks. ved nestning af knæ på en plade vil være større.

Til praktisk brug vil man derfor ikke udføre endefslutningen helt så ekstremt som vist på skitsen.

Case stories

I afsnit 2.14 er der beskrevet 3 case stories, der alle handler om problemerne med svejsning af aluminiumskonstruktioner. Ved at gennemlæse disse vil aspekter som adkomstforhold, svejse- og samlingsrækkefølge samt svejsedeformationer blive belyst.

2.12.10 DESIGNREGEL 8: - UNDGÅ OM MULIGT AT SVEJSE PÅ TVÆRS AF HOVEDSPÆNDINGSRETNINGEN.

Svejsning på tværs af hovedspændingsretningen giver næsten altid anledning til potentielle startpunkter for revnedannelse af 2 årsager:

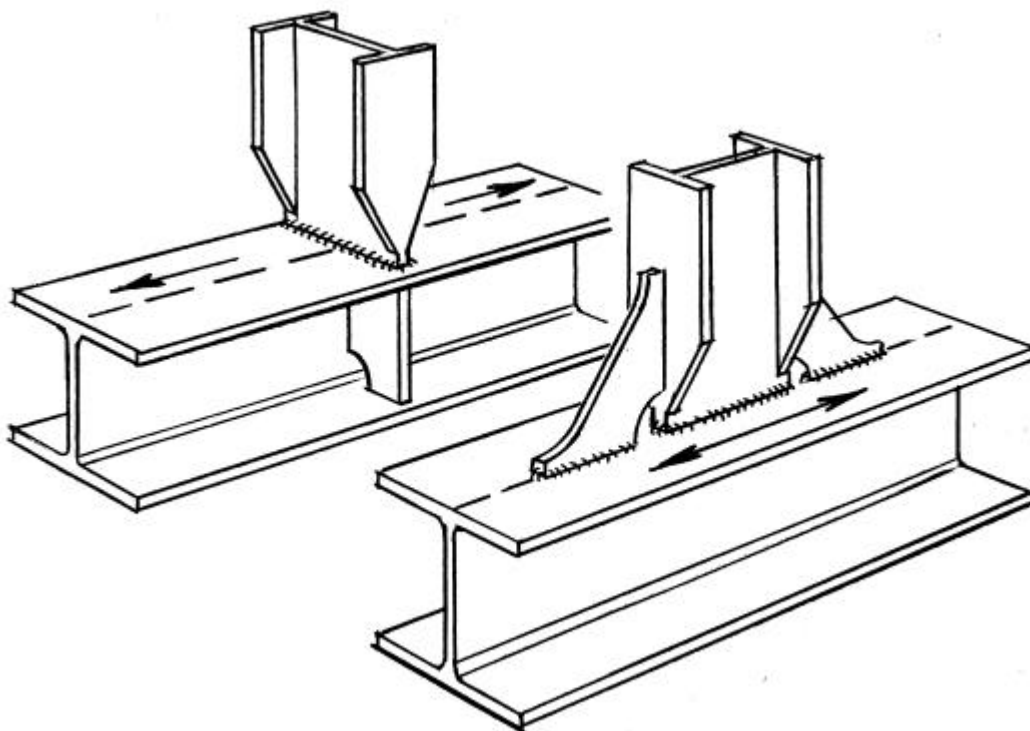
- Kantsømme danner i sig selv en geometrisk diskontinuitet med hårde punkter, hvorved spændingerne lokalt vil blive forøget.
- Materialet er svækket i den varmepåvirkede zone, hvis der har været anvendt deformations- eller modningshærdede legeringer.

De tidligere viste eksempler Figur 2.73 og

Figur 2.74 viser profilgennemføringer (type A), hvor der er svejst på tværs af hovedspændingsretningerne, og hvor dette kan undgås ved en ændring af konstruktionen.

Svejsning på tværs kan naturligvis ikke altid undgås, men det vigtige er bare at tænke over, hvad, der er hovedspændingsretningen, og så vurdere, om man kan undgå at svejse på tværs af denne retning.

Figur 2.109 viser et eksempel på svejsning på tværs og på langs af hovedspændingsretningen.



Figur 2.109 Svejsning på tværs og på langs af hovedspændingsretningen.

2.12.11 DESIGNREGEL 9: - UNDGÅ SVEJSEOPHOBNINGER

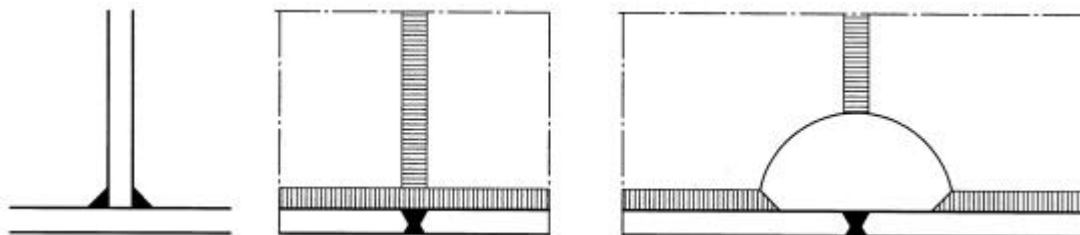
Man taler om svejseophobninger når mange svejsninger mødes i det samme punkt.

Dette er generelt uheldigt, fordi der altid vil være residualsændinger (varmesændinger) i svejsninger, og når flere svejsninger mødes fra forskellige retninger, vil det samlede reference spændingsniveau blive højt.

Der tales i den forbindelse også om 3-akset spændingstilstand, dvs. situationen hvor f.eks. en stumpsvejsning af to plader foruden spændinger i pladernes plan også oplever trækspændinger ud af planet fra strukturen, der er svejst på tværs af stumpsvejsningen. (I den forbindelse betyder det mindre om spændingerne optræder pga. brugsbelastning eller er residualsændinger.)

Svejseophobninger eller 3-akset spændingstilstand øger risikoen for udmattelsesbrud.

Figur 2.110 viser et eksempel på svejseophobninger, og hvordan problemet kan løses ved et udkap, hvis konstruktionen ikke behøver at være vandtæt.



Figur 2.110 Svejseophobninger.

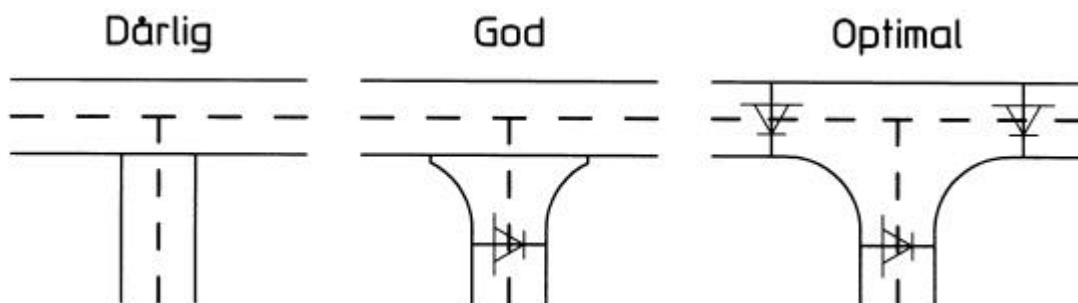
2.12.12 DESIGNREGEL 10: - UNDGÅ OM MULIGT AT SVEJSE I GEOMETRISKE HOT-SPOTS

Geometriske hot-spots er punkter, hvor geometrien i sig selv er årsag til en spændingskoncentration.

Et eksempel på sådanne geometriske hot-spots er hjørnerne i et firkantet hul eller situationen hvor en smal flange svejses direkte ind mod en pladekant som vist på Figur 2.80.

Geometriske hot-spots vil i sig selv betyde et kraftigt forhøjet spændingsniveau, så hvis det er muligt, bør man undgå at forværre situationen yderligere ved også at svejse i disse punkter.

Nedenstående Figur 2.111 viser et andet eksempel, hvor én flange er svejst vinkelret ind mod en anden.



Figur 2.111 Sammensvejsning af flanger.

I detaljen til venstre er flangen på den tværgående drager slet og ret svejst ind mod den gennemgående flange. Det er selvfølgelig den billigste løsning, men der skabes nogle hårde punkter i hjørnerne, og erfaringsmæssigt ser man mange dårlige svejsninger netop på dette sted – specielt på undersiden.

Hvis konstruktionen er udmattelsespåvirket, må det derfor anbefales at indsætte et ”trompet-stykke” som vist på skitsen i midten. (Alternativt kan der indsættes et normalt ”blødt” knæ på begge sider af den stødende flange.) Det bliver ikke lettere at svejse undersiden ordentligt af den grund, men betydningen af svejsefejl reduceres betydeligt pga. det nedsatte spændingsniveau.

Detaljen til højre viser den helt optimale løsning, hvor der er indsat en strømlinieformet såkaldt diamantplade i den gennemgående flange for denne er svejst til kroppladen.. Det sikrer en optimal kvalitet af de gennemgående elementer og et perfekt spændingsflow. Desuden er der slet ikke svejst i det kritiske hjørne punkt!

Løsningen er imidlertid produktionsmæssig kostbar, og den kun vil være aktuell i meget hårdt belastede områder f.eks. ved motorfundamenter og lugehjørner i skibe.

Man kunne måske med en vis ret hævde, at en ulempe ved den optimale løsning er, at der svejses på tværs af hovedspændingsretningen, men da svejsningen er udført under optimale forhold, mister man normalt mindre end man tjener. Desuden vil det sikkert i praksis være nødvendigt at sammensvejde den gennemgående flange af flere stykker.

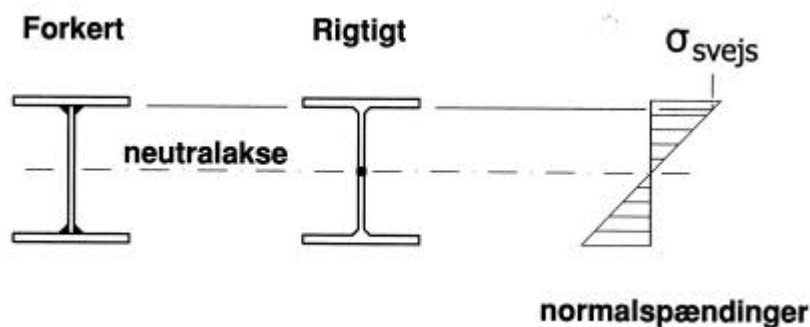
2.12.13 DESIGNREGEL 11: - PLACER SVEJSNINGERNE, HVOR DE FORRINGEDE MATERIALEEGENSKABER I DEN VARMEPÅVIRKEDE ZONE GØR MINDST MULIG SKADE.

Ved stålkonstruktioner er det stort set ligegyldigt hvor svejsningerne placeres, idet styrken i og omkring svejsningerne ikke er forringet (ved god svejsestandard).

Ved aluminiumskonstruktioner i deformations- eller modningshærdede legeringer er materialet i den varmpåvirkede zone (HAZ = Heat Affected Zone) omkring svejsningerne imidlertid reduceret til en styrke som om materialet ikke var hærdet.

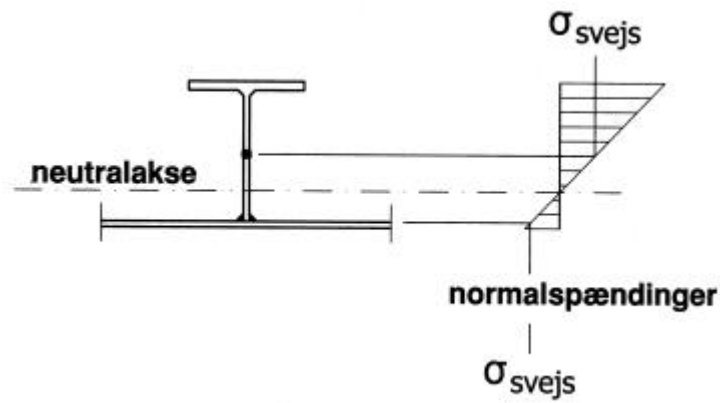
For designeren af en aluminiumskonstruktion er det således vigtigt, at være opmærksom på placeringen af svejsningerne, både i det konkrete tværsnit samt i konstruktionen som helhed, for at kunne udnytte de usvejste styrkeegenskaber i videst muligt omfang.

Figur 2.112 viser et eksempel på, hvorledes uheldigt placerede svejsesømme i et I-profil opbygget af 2 flanger og en kropplade kan erstattes af en uskadelig svejsning i neutralaksen, ved i stedet at sammensvejse 2 T-profiler.



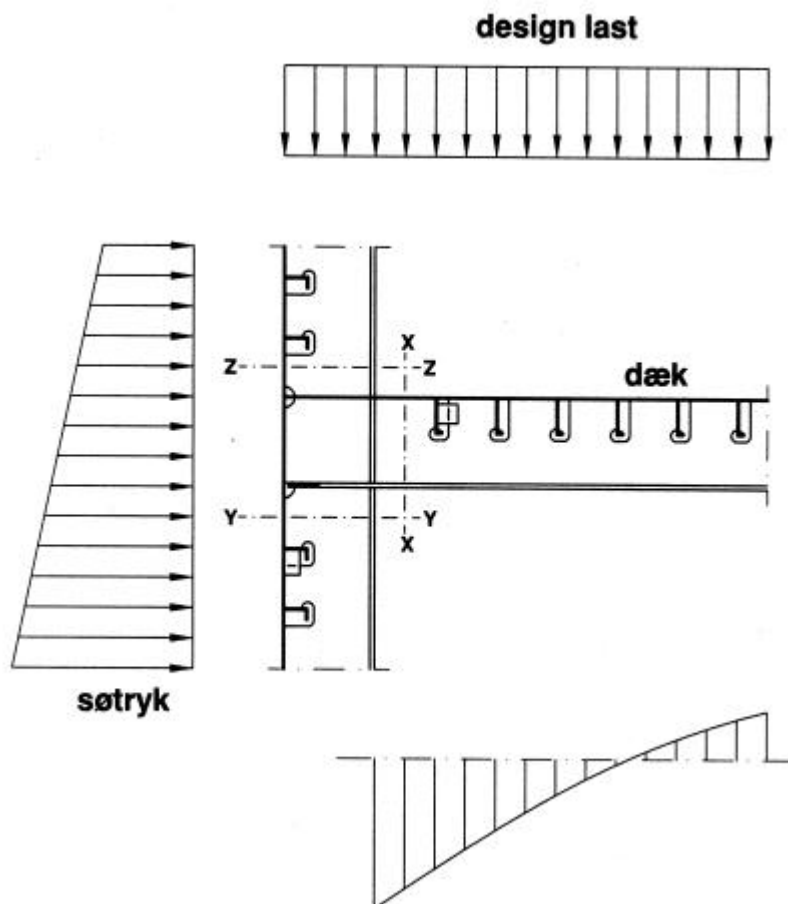
Figur 2.112 Placering af svejsesømme I-profil.

Ved et dragersystem med byggede I-profiler (f.eks. i et skib), hvor pladeflanger (den effektive del af basispladen) indeholder et større areal end den frie flange, vil bøjningsspændingen i pladeflangeren være tilsvarende lavere end i den frie flange, se Figur 2.113. Derfor vil det være acceptabelt at placere en dobbelt kantsøm mod pladeflangeren. Styrken af drageren kan altså beregnes på basis af de usvejste egenskaber i den frie flange og de svejste egenskaber i pladeflangeren.



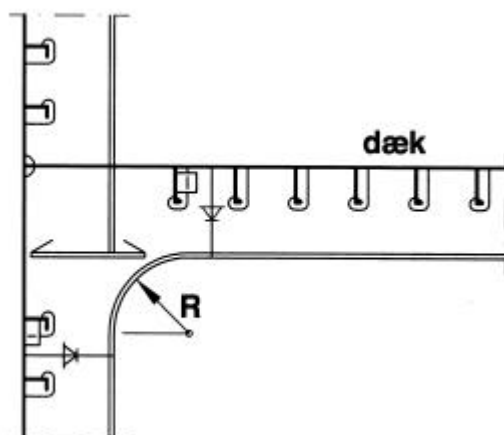
Figur 2.113 Placering af svejsesømme i asymmetrisk I-profil.

Figur 2.114 viser et typisk udsnit af et dragersystem i en aluminiums katamaran, hvor sammensvejsningen af de enkelte dele af rammesystemet giver anledning til HAZ-zoner, netop hvor bøjningspændingerne er størst (se snit x-x, y-y og z-z).



Figur 2.114 Udsnit af tværskibs rammesystem med belastninger og momentkurver.

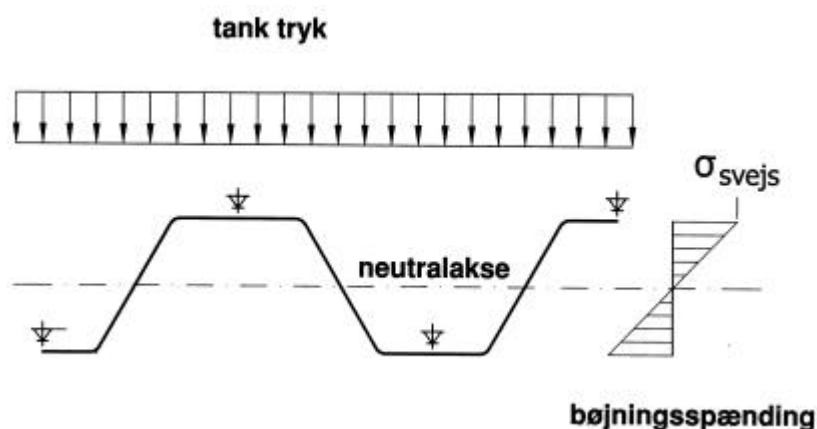
Problemet kan reduceres ved at redesigne hjørnesamlingen f.eks. ved at fremstille hjørnet separat med lokalt øgede dimensioner og anbringe svejsestødene i områder med reducerede eller minimale bøjnings- og/eller forskydnings spændinger, se Figur 2.115 nedenfor.



Figur 2.115 Forbedret ramme design.

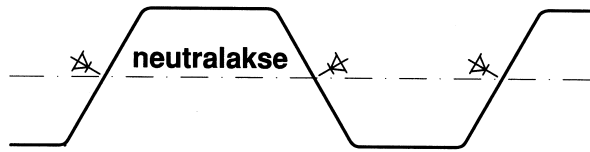
Ved placering af svejseømme i en given konstruktion er det nødvendigt at tage hensyn til både globale og lokale spændingsfordelinger.

I et korrugeret skod af stål er det f.eks. normalt at anbringe svejsestødene som vist nedenfor i Figur 2.116, men når vi taler om et korrugeret skod af aluminium er det nødvendigt at overveje sagen grundigere for at opnå et optimalt design, hvor hensynet til dimensionerne vejes af over for de rent produktionsmæssige hensyn.



Figur 2.116 Snit i korrugeret skod med tilhørende belastning og momentkurve.

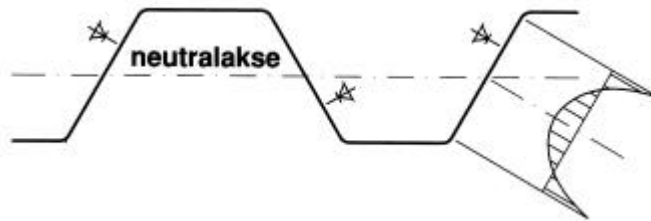
Hvis vi vil forbedre designet af det korrugerede skod set ud fra et aluminiums aspekt, så kunne et design som vist på Figur 2.117 være et godt bud. Her er svejsestødene placeres i neutralaksen for de globale spændinger, og vi er således i stand til at anvende de usvejste styrke egenskaber ved beregning af korrugeringen som profil.



Figur 2.117 Forslag til forbedret design.

Men når vi beregner pladetykkelsen som funktion af tanktrykket og dermed vurderer de lokale spændinger, er det nødvendigt at tage hensyn til den uheldige placering af HAZ-zonen midt i pladefeltet.

Et mere optimalt design rent spændingsmæssigt er vist i Figur 2.118. Her er der taget hensyn til både lokale og globale spændinger ved placeringen af svejsestødene, men rent produktionsmæssigt ville dette design give anledning til en række ulemper, der må afvejes mod de styrkemæssige fordele.



Figur 2.118 Optimalt design.

2.12.14 DESIGNREGEL 12: - BRUG STUMPSVEJSNINGER I HÅRDT BELASTEDE OMRÅDER I STEDET FOR KANTSØMME.

Kantsømme giver i modsætning til stumpsømme hårde punkter med forhøjede spændingsværdier pga. den geometriske diskontinuitet.

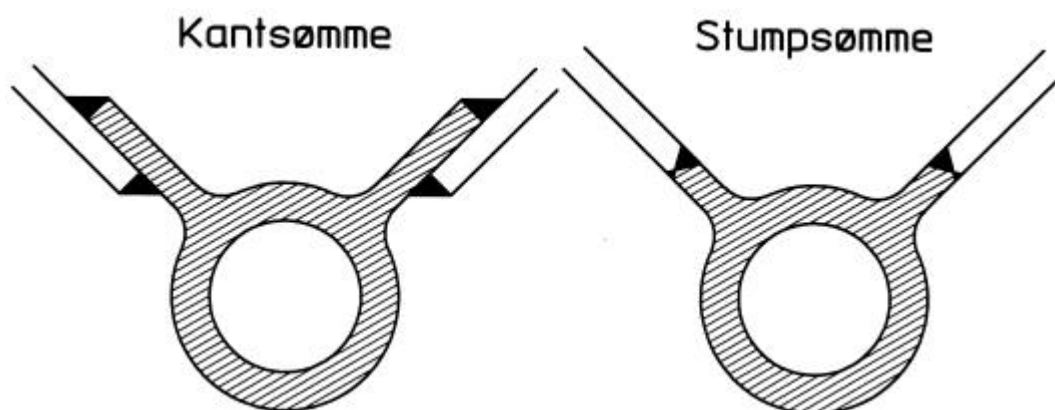
Rent svejseteknisk vil afkølingen under svejsning af en kantsøm være større og mere uens end ved en stumpsøm, fordi der er mere materiale til at lede varmen væk.

Desuden vil der, når to kantsømme ligger tæt ved hinanden som på eksemplet Figur 2.119 opstå store svejse-spændinger, fordi den første svejsning forhindrer den anden i at trække sig sammen under afkølingen.

Derfor vil det alt andet lige være en fordel at anvende stumpsømme i hårdt belastede områder.

Desværre vil der i mange tilfælde være en vis konflikt mellem denne designregel og ønsket om billig produktion, fordi kantsømme generelt er billigere at udføre end stumpsømme. Så fordele må vejes op mod ulemper i de enkelte tilfælde.

Figur 2.119 viser et eksempel på en udmattelsesbelastet maskindel, der er ophængt i den omkringliggende struktur med henholdsvis kantsømme og stumpsømme. Det sidste kræver dyrere tilpasning, men vil udmattelsesmæssigt være en langt bedre løsning.



Figur 2.119 Kantsømme kontra stumpsømme.

2.12.15 SPECIELLE DETALJELØSNINGER VED SAMLINGER MELLEM STÅL OG ALUMINIUM

På grund af risikoen for galvanisk korrosion (som tidligere omtalt) skal samlinger mellem f.eks. stål og aluminium altid udføres omhyggeligt.

I princippet er der tre muligheder:

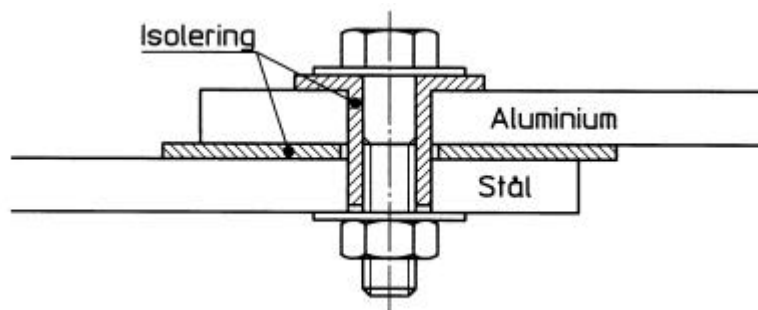
- Boltesamlinger
- Samlinger med sprængplaterede overgangsstykker
- Limsamlinger med specielle elastiske lime

Bolte samlinger

Boltesamlinger har indtil opfindelsen af de sprængplaterede overgangsstykker været den mest anvendte metode, og den anvendes stadig i udbredt grad, selv om den lider af visse svagheder.

Princippet er, at der sørges for fuldstændig elektrisk adskillelse mellem stål og aluminium vha. en isolering bestående af plast pakninger/bøsninger – se Figur 2.120.

På grund af isoleringen kan samlingens styrke ikke sammenlignes med en normal boltesamling stål-mod-stål, fordi den ikke i samme grad kan overføre kræfter vha. friktion.



Figur 2.120 Typisk isolering af boltesamling med plastbøsning og isoleringsbånd.

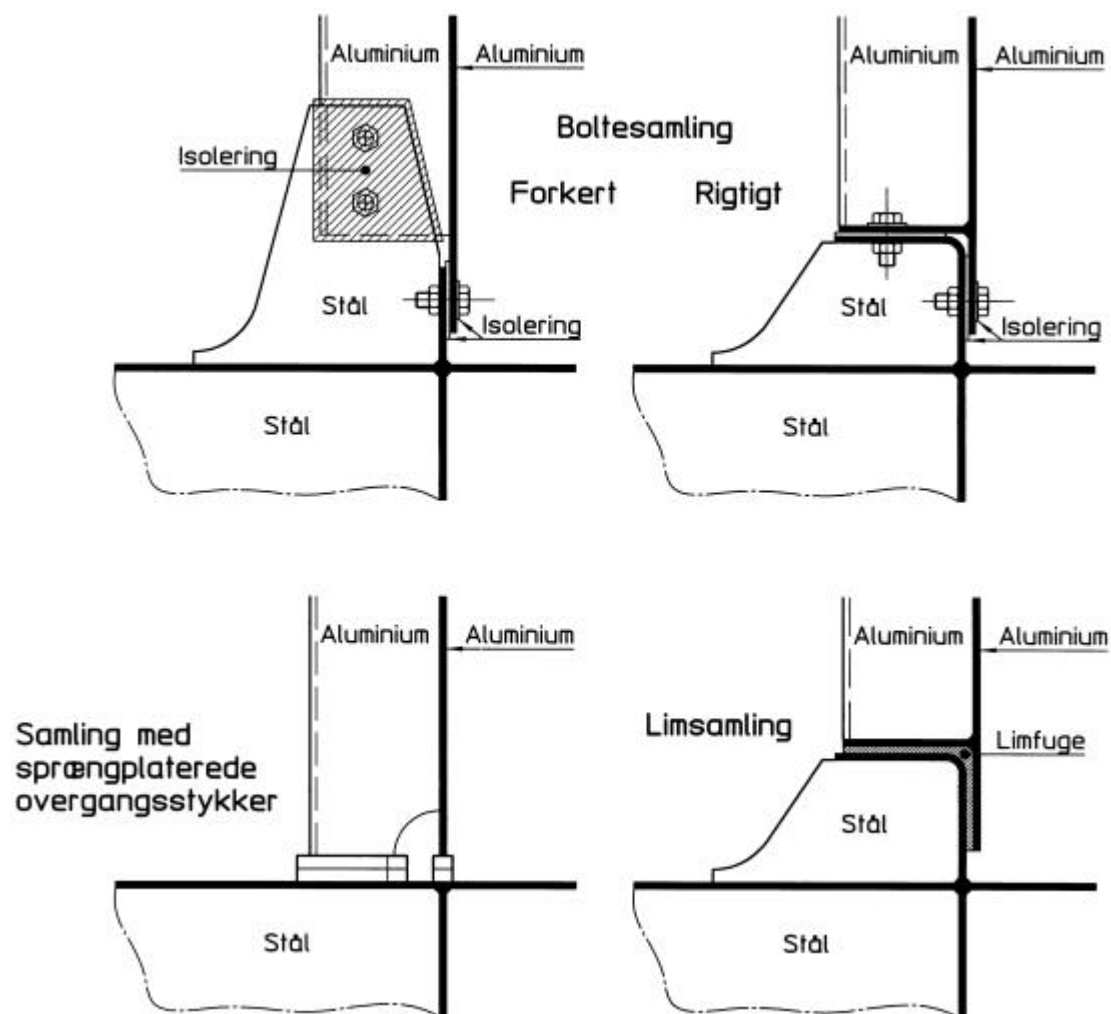
Skal en isoleret boltesamling overføre væsentlige kræfter, skal den udformes rigtigt.

Det vigtige er, at kræfter optages i stødfalder vinkelret på kraftretningen og ikke som forskydningskræfter i boltesamlingerne.

Figur 2.121 viser to boltesamlinger mellem et stålskibsskrog og en overbygning i aluminium. I samlingen til venstre skal de lodrette kræfter overføres som forskydningskræfter gennem boltesamlingen, hvilket er en dårlig løsning, fordi isoleringsbøsningerne efter al sandsynlighed vil blive ødelagt efter kort tid, så samlingen dermed bliver løs og utæt. Herefter vil der trænge vand ind til fladerne, der efter at bøsningerne er ødelagte, vil være i elektrisk kontakt med hinanden, og så starter korrosionen.

I samlingen til højre kan kræfterne (både de vandrette og de lodrette) optages gennem de store stødflader. Det nødvendige fladeareal skal beregnes ud fra den valgte isoleringstypes bæreevne, og der skal ved denne beregning tages hensyn til, at belastningen både består af et bidrag fra brugslasten men også af et bidrag fra boltspændingerne, og at fordelingen af dette bidrag afhænger af stivheden af flangerne, og derfor ikke nødvendigvis vil være helt jævnt fordelt.

Da boltene i princippet udelukkende skal holde konstruktionen sammen, men ikke overføre større forskydningskræfter, vil isoleringsbøsningerne holde meget længere.



Figur 2.121 Boltesamlinger og alternative samlinger med sprængplaterede overgangsprofiler eller limfuger.

Samlinger med sprængplaterede overgangsprofiler

Alternativt til boltesamlinger kan der anvendes de såkaldte sprængplaterede overgangsprofiler (også kaldet bimetals profiler) – se Figur 2.121 og Figur 2.122.

Profilerne, der er en slags sandwich elementer med stål på den ene side og aluminium på den anden, fremstilles enten i en én trins proces eller i en to trins proces.

I én trins processen placeres en stålplade på en præpareret sandbanke. Oven på denne plade lægges en plade i ren aluminium og oven på den igen en aluminiumsplade i f.eks. 5086 eller 5083 kvalitet. De tre plader oplægges med en bestemt indbyrdes afstand vha. afstandsstykker.

Sprængstof lægges derefter på den øverste plade, og antændes fra den ene ende. Detonationen går som en bølge over pladen, og sammenføjnngen sker successivt på meget kort tid (mikrosekunder) under meget højt tryk (500.000 – 1.000.000 atm.).

Sammenføjnngsprocessen danner jetstråler mellem pladerne i detonationsretningen, hvorved overfladerne renses for oxider og andre forureninger umiddelbart inden sammenføjnngen sker. Ved det høje tryk opstår der en interatomar binding, der er stærkere end det svageste af de sammensatte materialer (pladen af ren aluminium).

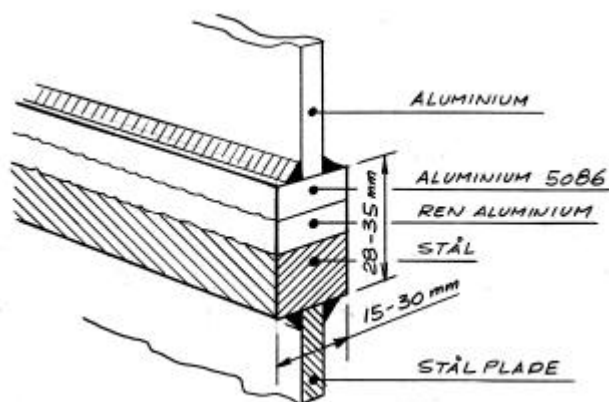
Herved får man altså en plade, der består af 3 lag: stål, ren aluminium og 5086 aluminium.

Samlingen mellem stål og aluminium bliver så tæt, at der ikke er plads til en elektrolyt mellem lagene, hvilket udelukker spaltekorrosion, men da stål og aluminium trods alt ligger klods op ad hinanden, bør siderne som hovedregel korrosionsbeskyttes med maling.

Ved én trins processen kan der opstå problemer med laminering og fejl i bindingerne. Derfor fremstilles pladerne også i en to trins proces, hvor først stålpladen og pladen i ren aluminium sprænges sammen, hvorefter aluminiumsoverfladen slibes og topaget i f.eks. 5086 aluminium sprænges på.

Ved bestilling af sprængplaterede profiler vil det altså være rimeligt ud over prisen at forespørge, om profilerne er fremstillet i en én trins eller en to trins proces!

Den færdige sprængplaterede plade har normalt en total tykkelse på 28 – 35 mm. Heraf udgør stålpladen normalt 15 – 20 mm. Tykkelsesforholdet mellem de to aluminiumslag varierer derimod en del fra fabrikat til fabrikat. Den færdige plade, der typisk vil have et brugbart areal på ca. 1300 x 3800 mm, kan herefter skæres ud efter kundens behov, men normalt vil den blive strimlet op i smalle 15 - 30 mm brede profiler, der altså maximalt kan leveres ca. 3800 mm lange.



Figur 2.122 Sprængplateret forbindelse mellem stål og aluminium.

Styrkedataene for profilerne kan variere lidt fra fabrikat til fabrikat, så det er vigtigt at få de nøjagtige tal fra den valgte leverandør.

Typiske garanterede brudstyrkeværdier for den sprængplaterede samling vil være:

Trækspænding: 75 N/mm^2

Forskydningsspænding: 55 N/mm^2

I praksis vil de fleste profiler vil dog have data, der er mindst 15 – 20 % bedre.

Ud fra disse tal kan det beregnes, hvor store overførselsarealer og dermed hvor brede profiler, der skal anvendes i en given situation.

En hovedregel er dog, at profilets tykkelse skal være mindst 3,5 x tykkelsen af den aluminiumsplade, der svejses til profilet, hvis der er tale om sekundære elementer med lave spændingsniveauer, og 4 x tykkelsen hvis der er tale om primære elementer med relativt høje spændingsniveauer.

I tilfælde af, at styrken af de normale profiler ikke er tilstrækkelig, findes der profiler, hvor laget i ren aluminium er erstattet af titanium. Det har bl.a. den fordel, at temperaturen i grænselaget under svejsningen kan være op til 350° C mod maksimalt 300° C , hvis der anvendes ren aluminium. Disse profiler er noget dyrere, men styrken er også en del højere – typisk ca.:

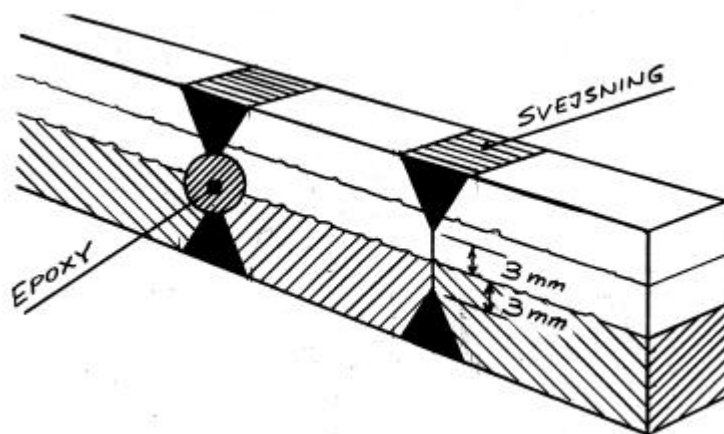
Trækspænding: ca. 130 N/mm^2

Forskydningsspænding: ca. 100 N/mm^2

Sprængplaterede profiler findes også i rustfri udførelse. Disse profiler er f.eks. lavet af 20 mm rustfast stål AISI 316L, 1,5 mm titanium gr.1 og 10 mm 5083 aluminium.

Hvis sprængplaterede -profiler skal anvendes til at forbinde stål og aluminium over lange stykker, f.eks. hvis der svejses en aluminiums overbygning på et skibsskrog i stål, må profilerne nødvendigvis svejses sammen, og det giver nogle svejsetekniske problemer hvor aluminium og stål mødes, fordi der under ingen omstændigheder må svejses på tværs af overgangen mellem de to materialer.

Figur 2.123 viser hvordan sammensvejsningen bør udføres. Princippet er, at man undlader at svejse 3 mm på begge sider af overgangsfladen. Denne usvejste del kan herefter hamres eller loddes tæt, hvis 100% tæthed er nødvendig. Alternativt kan der efter svejsningen bores et 8 – 10 mm hul, der herefter udfyldes med tætningsmasse eller epoxy.



Figur 2.123 Samling af to sprængplaterede profiler.

Det må anbefales at påsvejsede de tilstødende plader i stål eller aluminium midt over profilet som vist på Figur 2.122. Det giver den bedste fordeling af kræfterne og den bedste fordeling af varmen under svejseprocessen. Hvis det af arkitektoniske årsager er nødvendigt at holde den ene side plan, anbefales det at reducere spændingsniveauet.

Pga. denne lidt komplicerede sammensvejsning med efterfølgende hamring kan det ofte være en fordel at erstatte skarpe hjørner med radier.

Minimumsbøjningsradius ved bukning af sprængplaterede profiler skal være mindst 10 x tykkelsen (eller højden) af profilet i bøjepånet. Et profil, der har en vandret tykkelse på f.eks. 20 mm og en lodret højde på 35 mm, kan altså bukes til en radius på minimum 200 mm i vandret plan og 350 mm i lodret.

Når der anvendes sprængplaterede profiler kan reglerne for arbejdets udførelse opsummeres som følger:

- Svejs aldrig på tværs af grænselaget mellem stål og aluminium.
- Bøj aldrig profilerne skarpere end beskrevet og bøj dem altid koldt.
- Forvarm aldrig profilerne før svejsning eller bukning.
- Sørg for at temperaturen i grænselaget aldrig overstiger 300 °C (350 °C ved titanium), dvs. svejs aldrig tættere på grænselaget end 3 mm, og brug aldrig større kantsømme og dermed varmeinput end nødvendigt.
- Forsøg aldrig at gasskære profilerne (undtagen plasma under vand). Profilerne skal altid saves over eller skæres med skæreskiver.
- Undgå at overstresse profilerne ved f.eks. at svejse dem ned mod en ujævn overflade eller ved at trække en dårligt tilpasset plade ind til at fastsvejs profil.

Limsamlinger

Den sidste mulighed er limsamlinger med specielle elastiske udfyldende limtyper.

(Typisk 1-komponent polyuretan lime, der hærdet ved luftens fugtighed.)

Disse typer klarer at udfylde mellemrum mellem 1 og 5 mm (i visse tilfælde op til 20 mm) uden væsentlige tab af styrke.

Fordelene ved at bruge lim er, at samlingerne er tætte, fleksible, elektrisk isolerende og har stor styrke med meget jævn spændingsfordeling. Desuden betyder de udfyldende egenskaber, at der ikke stilles så store krav til rethed og tilpasning mellem elementerne.

Ulemperne er, at samlingerne ikke tåler særlig høje temperaturer (et problem ved brand), og at de stiller ret store krav til forbehandling og rensning af limfladerne. En anden ulempe er, at indtil limen er hærdet, har samlingen ingen styrke og elementerne må fikseres i forhold til hinanden. Det kan fordyre produktionen sammenlignet med boltning eller svejsning, hvor samlingerne er brugsklare øjeblikkeligt.

Boltesamlingen som vist på Figur 2.121 øverst til højre kunne med fordel erstattes med en limsamling som vist nederst til højre.

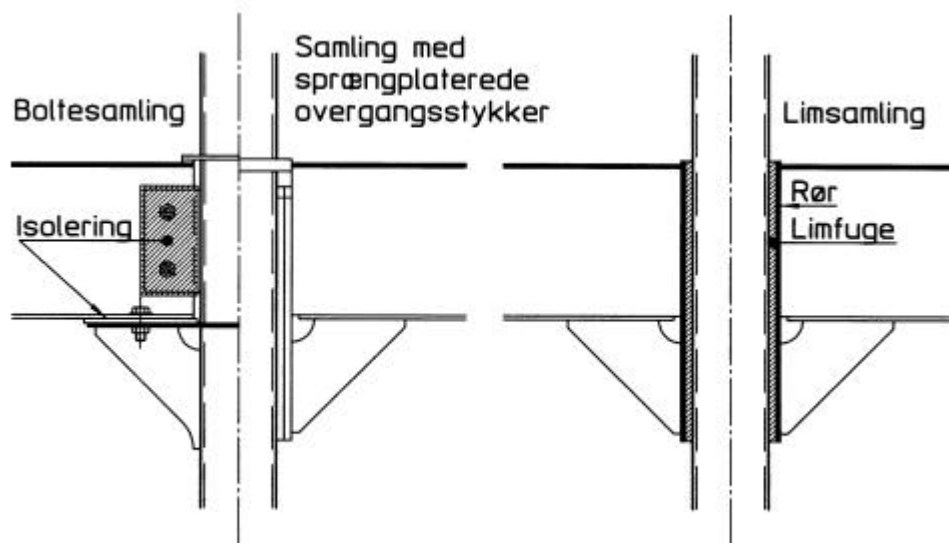
Lim giver mulighed for alternative løsninger. Et eksempel på mulighederne er vist på Figur 2.124, hvor aluminiumsstrukturer er ophængt på en rund søjle af stål.

I stedet for at skulle montere bæreknae og lukkekraver etc. eller sprængplaterede overgangsstykker kan man f.eks. indsvejsede et rør i aluminiumsstrukturen med en indre diameter, der er ca. 10 mm større end den ydre diameter af stålsøjlen. Ved at udfylde mellemrummet med lim klæres styrke og tætning i en operation.

Ulempen er, at konstruktionen ikke tåler særligt høje temperaturer, og det er uheldigt, hvis stålstøtten netop er monteret af brandtekniske årsager.

Selvfølgelig kan kraftig termisk isolering afhjælpe problemet, men en langt mere elegant løsning vil være, at påsvejsede en stålkraue på stålstøtten ca. 5 mm under aluminiumsrørets afslutning. Denne kraue vil ikke have nogen bærende funktion til dagligt, men i tilfælde af brand, vil det udvendige rør kun kunne falde et lille stykke ned hvis limen svigter, før kragen vil stoppe faldet (og i den situation vil det selvfølgelig være fuldstændig ligegyldigt, at der så vil optræde galvanisk kontakt).

For yderligere information om limning som sammenføjningsmetode henvises til Kapitel 4 i håndbogen.



Figur 2.124 Eksempler på ophængning af aluminiumsstrukturer på søjler af stål.

2.13 BRANDTEKNISKE ASPEKTER VED ANVENDELSE AF ALUMINIUM

2.13.1 INTRODUKTION

Brand er en ulykke som kan forårsage stor skade på strukturer og mennesker. Inden for teknikken er brand en ulykkeslast som bør medtages i en analyse af de strukturelle egenskaber. I forbindelse med brand er der fire vigtige ting som er betegnende for aluminium.

- A. Aluminium er ikke brandbart og vil derfor ikke øge en evt. brand, dvs. virke som forbrændingsmateriale.
- B. Aluminium smelter ved 580 – 660 °C.
- C. De fleste aluminiums legeringer har omkring 50% af deres oprindelige styrke ved 180 – 250 °C.
- D. Aluminiumstrukturer som skal kunne modstå brand, skal normalt isoleres.

Brandbeskyttelse og brandisolerende skotter og dæk er meget vigtige inden for det maritime område i forbindelse med beskyttelse af passagerer, besætningsmedlemmer og udrustning. Materialer, som bruges inden for skibsbygning skal opfylde en række regler, som definerer bestemte egenskaber, der skal overholdes/opfyldes.

Typisk findes reglerne i Safety of Life at Sea (SOLAS [7]) konventionen og High Speed Craft (HSC) koden, som er vedtaget af FN's internationale søfartsorganisation (International Maritime Organization – IMO). Helt overordnet findes der regler for:

- E. Brug af ikke-brændbare materialer til brug ved flugtveje og for brandbeskyttelse af struktur.
- F. Materialer, som forhindrer ilden i at sprede sig (brandhæmmende materialer).
- G. Materialer, som ikke afgiver giftige gasser ved antændelse..
- H. Maksimale tilladelige overfladetemperatur som resultat af opvarmning på bagsiden.

For at imødekomme disse krav er der udviklet en del forskellige isoleringsmaterialer og –typer, hvoraf nogle vil blive omtalt i dette kapitel.

For en nærmere omtale af reglerne i SOLAS-konventionen og HSC-koden se afsnit 2.13.3.

2.13.2 KURVER OG BEREGNINGSMETODER FOR TEMPERATURSTIGNING VED BRAND

Myndighederne har regler for brandmodstand. Brandmodstanden er defineret som den tid i minutter en konstruktion kan modstå en standardiseret varmebelastning og samtidig vedblive med at have sin

krævede karakteristiske styrke. Endvidere fastlægger myndighederne standard brandtest som skal følges for at opnå myndighedsgodkendelse af et produkt eller isoleringsmetode.

En standardiseret varmelast er i ISO 834 givet som:

$$T - T_0 = 345 \log(8t + 1)$$

hvor

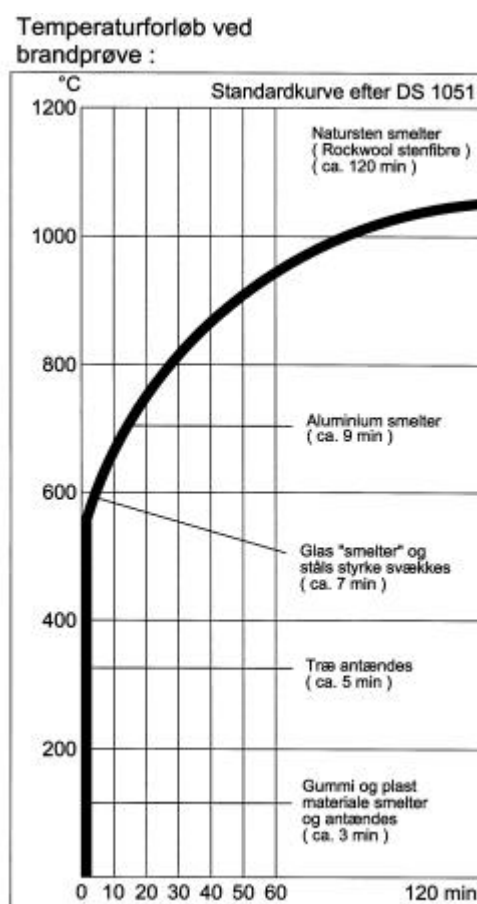
T = Brandtemperaturen

T₀ = Initiale temperatur

t = tid i minutter

For standardtest procedurer henvises til litteraturen f.eks. ISO 834, [8]

Kurver for standard varmebelastningen kan ses i Figur 2.125:



Figur 2.125 Temperaturforløb ved standard brandprøve.

Olieindustrien definerer en anden standard varmebelastning ved oliebrand, den såkaldte HC-brand (hydro carbon brand). Denne kurve stiger til 1100°C i løbet af den første halve time, med et næsten lodret forløb i begyndelsen op til ca. 800°C.

En brandprøve udført efter foreskrifterne skal normalt dokumentere følgende tre krav:

Bæreevne

Isoleringsevne

Uskadthed (tæthed over for flammer, gas og røg)

2.13.3 EKSISTERENDE LOVE & REGLER

Eurocode 9

DS/ENV 1999-1-2 (Eurocode 9) [9] er en typisk standard som omhandler brandtekniske dimensioneringsaspekter ved aluminiums konstruktioner. Standarden beskriver bl.a. materialeparametre og giver simple beregningsmodeller til beregning af brandmodstanden for forskellige typer elementer. Endvidere har "koden" et afsnit om temperaturberegning for ubeskyttet og beskyttet aluminium sammen med aluminiumsstrukturer.

SOLAS-konventionen

SOLAS-konventionen [7] har i kapitel II-2 regler for Konstruktion – brandsikring, opdagelse og slukning af brand. For et skib gælder bl.a. følgende overordnede principper:

- Inddeling af skibet i lodrette og vandrette zoner ved hjælp af konstruktioner, der er modstandsdygtige i varme og styrkemæssig henseende,
- adskillelse af apleringsrum fra den øvrige del af skibet med konstruktioner, der er modstandsdygtige i varme og styrkemæssig henseende,
- begrænset brug af brændbare materialer;
- opdagelse af enhver brand i den zone, hvor den opstår;
- afgrænsning og slukning af enhver brand i rummet, hvor den opstår;
- beskyttelse af evakueringsveje og adgangsveje for brandbekæmpelse;
- let tilgængelighed til brandslukningsudstyr; og
- begrænsning af muligheden for antændelse af brændbare dampe fra lasten til et minimum.

I henhold til SOLAS-konventionen er der af styrkemæssige årsager ret strenge krav til den bærende struktur. Det betyder at aluminium i et skib, hvor der er rum med brandrisiko, generelt skal isoleres på begge sider, idet brandmodstandsevnen for skottet mellem to rum som regel angives med en enkelt værdi, som gælder i alle tilfælde, dvs. på begge sider af skottet.

SOLAS-konventionen definerer tre inddelingsklasser: *A*, *B* og *C*:

Klasse »A«-inddelinger består af skotter og dæk, der opfylder følgende krav:

- .1 De skal være bygget af stål eller andet tilsvarende materiale,
- .2 de skal være passende afstivet,
- .3 de skal være isoleret med godkendte ikke-brændbare materialer, således at gennemsnitstemperaturen på den ikke-udsatte side ikke stiger mere end 140°C over begyndelsestemperaturen, og således at temperaturen ikke på noget punkt, herunder en samling, stiger mere end 180°C over begyndelsestemperaturen inden for de nedenfor anførte tidsrum:

Klasse »A-60«	60 minutter
Klasse »A-30«	30 minutter
Klasse »A-15«	15 minutter
Klasse »A-0«	0 minutter
- .4 de skal være således konstrueret, at de kan forhindre gennemtrængning af røg og flammer indtil udløbet af en standardbrandprøvning på 1 time,
- .5 Administrationen har krævet, at der foretages en prøvning af prototypen af et skot eller et dæk i henhold til »Fire Test Procedure Code« for at sikre, at det opfylder ovennævnte krav om mekanisk modstandsevne og temperaturstigning.

Klasse »B«-inddelinger består af skotter, dæk, lofter eller garneringer, der opfylder følgende krav:

- .1 De skal være konstrueret af godkendte ubrændbare materialer, og alle materialer, som er anvendt i konstruktionen monteringen af klasse B-inddelinger, skal være ubrændbare med den undtagelse, at brændbare finerer må anvendes, forudsat de opfylder andre anvendelige krav i dette kapitel;
- .2 de skal have en sådan isolationsevne, at gennemsnitstemperaturen på den ikke-udsatte side ikke stiger mere end 140°C over begyndelsestemperaturen, og at temperaturen ikke på noget punkt, herunder en samling, stiger mere end 225°C over begyndelsestemperaturen inden for de nedenfor anførte tidsrum:

Klasse »B-15«	15 minutter
Klasse »B-0«	0 minutter,
- .3 de er konstrueret, så de forhindrer gennemtrængning af flammer indtil udløbet af den første halve time af standardbrandprøvningen; og
- .4 Administrationen har krævet, at der foretages en prøvning af prototypen på en inddeling i henhold til »Fire Test Procedure Code« for at sikre, at den opfylder ovennævnte krav om mekanisk modstandsevne og temperaturstigning.

Klasse »C«-inddelinger er inddelinger konstrueret af godkendte, ikke-brændbare materialer. De behøver hverken opfylde krav med hensyn til gennemtrængning af røg og flammer eller begrænsninger af temperaturstigningen. Anvendelsen af brændbart finer er tilladt, forudsat at det opfylder andre krav i dette kapitel

Den omtalte ”Fire Test Procedure Code” er nærmere beskrevet neden for.

SOLAS-konventionen indeholder også en definition af stål eller andet tilsvarende materiale:

»**Stål eller andet tilsvarende materiale**« betyder et ikke-brændbart materiale, som i sig selv eller ved anvendelse af isolation besidder egenskaber, der svarer til stålets egenskaber i henseende til holdbarhed og mekanisk modstandsevne ved afslutningen af den foreskrevne standardbrandprøvning (f.eks. en passende isoleret aluminiumslegering).

HSC (High Speed Craft) koden

Af speciel interesse, når det gælder anvendelsen af aluminium i forbindelse med skibskonstruktioner, er koden for højhastighedsfartøjer (HSC koden). Denne kode, som fik virkning fra 1. januar 1996, er blevet gennemgribende revideret i 2000. Den reviderede udgave (kaldet HSC 2000) ventes at træde i kraft 1. juli 2002.

HSC 2000 klassificerer rummene i fartøjet efter brandrisikoen:

- A Rum, der frembyder større brandrisiko
- B Rum, der frembyder moderat brandrisiko
- C Rum, der frembyder mindre brandrisiko
- D Kontrolrum
- E Udskibningssteder og udvendige evakueringsveje
- F Åbne dæksarealer.

I henhold til HSC 2000 kan der være forskellige brandbeskyttelsestider angivet for hver side af et skot eller dæk, og bestemt på grundlag af brandrisikoen.

FTP (Fire Test Procedure) koden

Materialiegenskaber og brandprøvning af materialer skal være i overensstemmelse med IMO's Fire Test Procedure, dvs. resolution MSC.61(67) – International Code for Application of Fire Test Procedures. Dette gælder såvel for skibe bygget i henhold til SOLAS som for fartøjer bygget i henhold til HSC koden.

EU-Direktiv om udstyr på skibe

Materialer som anvendes i forbindelse med brandsikring på såvel skibe som HSC fartøjer skal være afprøvet i henhold til Rådets direktiv 96/98/EF af 20 december 1996 om udstyr på skibe, med senere ændringer, samt "Ratmærket" i overensstemmelse med direktivets krav. De aktuelle materialer og konstruktioner som dette gælder for er angivet i et bilag A.1 til direktivet.

Landbaserede bygninger

For landbaserede bygninger anvendes en anden brandklassebetegnelse end de ovenfor listede.

I bygninger opereres med brandceller. En brandcelle er et eller flere rum, som er adskilt med mindst Brand Døj-bygningsdel 60 fra tilstødende rum eller bygninger, dog med mindst BD-bygningsdel 30

mod uudnyttelige tagrum. Brandcellen må højst være i 2 etager. Etagearealet af en brandcelle i 2 etager må højst være 150 m²

Brandsektion

En brandsektion er én eller flere brandceller, som er adskilt med mindst BS-bygningsdel 60 fra tilstødende brandsektioner eller bygninger.

BD-30

Branddrøj bygningsdel, der kan opfylde de stillede krav i 30 minutter. Må gerne indeholde brændbare materialer.

BS-60

Brandsikker bygningsdel, der kan opfylde de stillede krav i 60 minutter. Må kun bestå af ubrændbare materialer.

F-30

Flammestoppende bygningsdel, der kan opfylde de stillede krav i 30 minutter.

Klasse A materiale

Brændbart – svagt antændeligt byggemateriale – klassificeret efter DS 1065.1.

Klasse B materiale

Brændbart – normalt antændeligt byggemateriale – klassificeret efter DS 1065.1.

Ubrændbart materiale

Byggemateriale, der kan klassificeres som ubrændbart efter DS 1057.1.

Klasse 1 beklædning

Beklædning af klasse A materiale – der i mindst 10 min. giver beskyttelse mod antændelse af bagved liggende materiale samt brand i eventuelle hulrum. (DS 1065.2)

Klasse 2 beklædning

Beklædning af klasse B materiale – der i mindst 10 min. giver beskyttelse mod antændelse af bagved liggende materiale samt brand i eventuelle hulrum. (DS 1065.2)

2.13.4 ISOLERINGSTYPER OG DERES EGENSKABER

Beskyttelse mod brand og virkningerne deraf kan være passive og aktive.

Passiv brandbeskyttelse af struktur betyder at strukturen er isoleret på en sådan måde at temperaturstigningen i materialet og/eller den fri side af strukturen er lavere end den maksimale

tilladelige temperatur. Som isoleringsmateriale for passiv brandbeskyttelse af strukturen kan følgende materialer benyttes

- Traditionel mineraluldsisolering (Rockwool)
- Calcium Silikate plader
- Vermiculite plader
- Gips plader
- Intumescente materialer (kemisk produkt som ved opvarmning giver god isolering pga. porøsitet (fås som maling, plader og sprøjte materiale)
- Letvægts isolering
- Præfabrikerede isoleringselementer

Som et dyrt special produkt som ligger uden for de alment benyttede produkter er keramiske fibre.

Fordelen ved passiv brandbeskyttelse er at systemet altid er intakt og altid har sin beskyttende virkning. Hvis systemet er beskadiget kan det også relativt let opdages.

Aktiv brandbeskyttelse er beskyttelse som bliver aktiveret når en brand starter. Aktive systemer kan være automatiske slukningsanlæg, kølesystemet, alarm systemer etc.

Formålet med den aktive brandbekæmpelse kan være:

at slukke ilden

sprinkler anlæg

skum

pulver

CO₂

at afgrænse ilden

røg evakuerings system

vand gardin

at køle stukturen

oversvømmelsessystem

røg evakueringsystem

at alarmere folk

detektionssystem

stoppe ilden i at udvikle sig

f.eks. stop for brændstofførslen

Normalt bruges et automatisk detektionssystem sammen med en eller flere af de ovenfor nævnte systemer.

2.13.5 ISOLERINGSTYPER OG DERES NØGLETAL

De vigtigste tekniske egenskaber for et godt isolerings materiale er:

- Termisk konduktivitet
- Specifik varmekapacitet
- Massefylden
- Krystalvand (kemisk bundet vand)

De ovennævnte egenskaber varierer alle med temperaturen. Generelt stiger den termiske ledningsevne for amorfe materialer når temperaturen stiger. For krystallinske og metalliske materialer falder den termiske ledningsevne, hvorimod den specifikke varmekapacitet stiger med stigende temperatur. For de fleste isoleringsmaterialer er massefylden konstant i det aktuelle temperatur interval. Dette gælder imidlertid ikke for kalsium silikat plader da det kemisk bundne vand ved den endoterme proces (opvarmning) vil afgives hvorefter massefylden vil sænkes. Ved denne omdannelsesproces er temperaturen konstant. Dette "vandplateau" eksisterer i ca. 3/4time hvorefter temperaturen stiger igen, men med en lavere gradient da materialet har opnået dårligere varmeledningsevne da vandet er blevet erstattet af luft. Denne virkning er som brandisolator ønskelig.

I nedenstående gennemgang af isoleringsmaterialer er ikke medtaget mineralulden "glasuld" som ved lave temperaturer har gode isolerende egenskaber, men et smeltepunkt som er sammenligneligt med aluminiums, dvs. omkring 600 °C.

Rockwool

Rockwool eller stenuld er som navnet antyder lavet af sten som udsættes for så kraftig varme at de smelter og slynges derefter op i luften. Inden stenmassen rammer jorden igen, har luftens afkøling forvandlet stenene til uld. Under den industrielle proces bindes de fremkomne fibre med phenol. Ulden (fibrene) presses til forskellige massefylder, der for kommercielt stenuld varierer fra 30 kg/m³ op til 1000 kg/m³. De tungeste typer laves som tavler og de letteste leveres oftes som måtter. Stenuld til passiv brandbeskyttelse har normalt en massefylde mellem 100 og 300 kg/m³. Afhængigt af stensulds typen er servicetemperaturen 250 – 750 °C. Stensuldsfibrene kan ikke brænde men de smelter ved ca. 1000 °C

Det betyder at f.eks. en brand, som i løbet af få minutter når op på mere end 600 grader, vil kunne stoppes eller forsinkes i spredning. Det giver tid til at redde menneskeliv og værdier.

En stor fordel ved mineraluld er at det er fleksibelt.

Producenter i Danmark:

Rockwool A/S, 2640 Hedehusene

Isover A/S, 6580 Vamdrup (glasuld)

Calsium silikate isolerings plader

Disse plader er lavet af calsium oxid og silika, SiO_2 (som f.eks. kvarts). Der findes forskellige typer af disse plader på markedet. Massefylden er normalt mellem 200 og 900 kg/m^3 . Denne type plader bruges også som isolering i skorstene, ovne, kedler, regeneratore og andre forbrændingsanlæg. Kombinationen af lav vægt, høj service temperatur og let tilpasning gør calsium silikat plader meget anvendelige som brandbeskyttelse i mange situationer. Service temperaturen er op til 1100 °C.

Producenter i Danmark:

Skamol A/S, 7900 Nykøbing Mors (produkt navn SKAMOL SUPER PRO)

Vermiculit

Vermiculit er godt til isolering af overflader i ildfaste konstruktioner og som foring i alle typer af industrioovne, incineratorer og andre forbrændingsanlæg. Vermiculit forener god isolering med mekanisk styrke og høj temperaturmodstand. Vermiculite sælges oftes i plader men findes også i blokke som mursten.

Producenter i Danmark:

Skamol A/S, 7900 Nykøbing Mors (produkt navn SKAMOL V1100)

Sprøjte og støbe masse

Som et alternativ til vermiculate plader er sprøjte og støbe masse. Materialet kan støbes eller sprøjtes op hvilket gør det velegnet til brug ved specielt svært tilgængelige steder. Opsætningen kan således gøres hurtigt og effektivt og kan derfor være økonomisk fordelagtig.

Service området er mellem 850°C til 1100°C, afhængig af massefylde, ledningsevne og kompressionsstyrke.

Producenter i Danmark:

Skamol A/S, 7900 Nykøbing Mors (produkt navn Vermicast)

Keramiske fibre

Keramiske fibre har et højt indhold af lerjord (alumina) og silika som hovedkomponenter. Længden af fibre varierer fra produkt til produkt. Materialet presses sammen, og graden af sammentrykning giver densiteten. Densiteten varierer fra 60 til 500 kg/m^3 . Materialet kan anvendes ved temperaturer omkring 1200 °C og smeltepunktet for fibre er 1750 °C. Keramiske fibre er som regel meget dyre.

2.13.6 ALUMINIUM OG BRAND

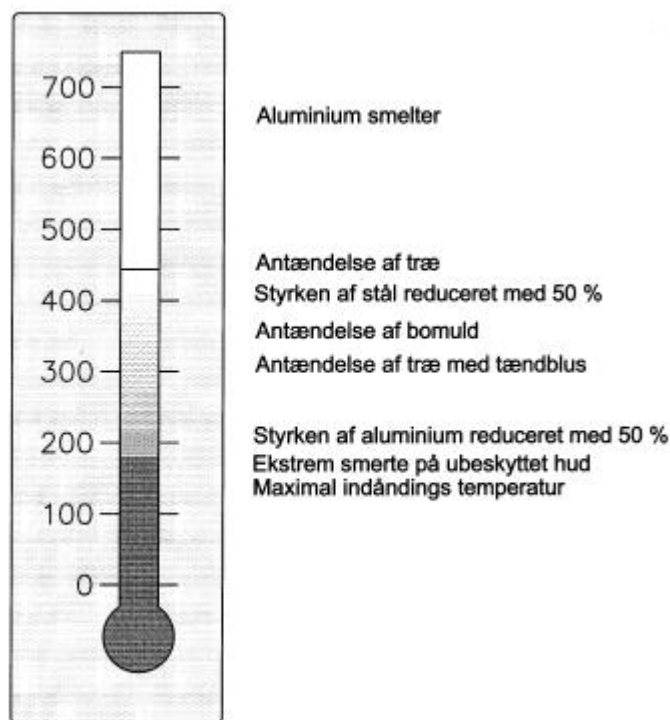
De fysiske og mekaniske egenskaber for aluminiumslegeringer ændres når de udsættes for høje temperaturer. Styrken falder som funktion af temperaturen, og afhængig af legering, varmebehandling og temperatur er faldet i styrke permanent også efter at materialet er afkølet. De fysiske egenskaber ændres også med temperaturen, se afsnit 3.13 om styrketab ved varmepåvirkning.

Under hensynstagen til risikoen for brand kan egenskaberne for aluminiumslegeringer summeres til:

- I. Aluminium er et ikke brandbart materiale
- J. Styrken af aluminium er reduceres med 50% mellem 150 og 300 °C
- K. Aluminium smelter ved 600 til 650 °C

De fleste brandulykker sker pga. giftige gasser og mangel på ilt før temperaturen bliver kritisk. Ved 160 °C begynder mennesket at føle smerte på ubeskyttede dele af huden og efter kort tids påvirkning (sekunder) forbrændes huden. 150°C er den maksimale indåndningstemperatur hvis luften er tør. Hvis luften er fugtig sænkes den kritiske indåndningstemperatur.

Når først aluminiums strukturer har nået deres kritiske temperatur er temperaturen i området så høj at et menneske ikke kan overleve der. De kritiske temperaturer for personer og materiel er illustreret i nedenstående Figur 2.126:



Figur 2.126 Kritiske temperature for mennesker og materialer.

Brug af ubeskyttet aluminium i et brændende rum giver altså ikke nogen ekstra risiko for personers sikkerhed, da det ikke kan brænde. Mange andre materialer er brandbare og vil bidrage til forbrændingen og dermed også med eventuelle giftige gasser,

Strukturelle krav (i maritimt brug A-0) gør dog at aluminium oftes skal brandbeskyttes. Brandbeskyttelsen kan enten være passiv som isolerings materiale eller aktiv som kølevand. Ved

kølevandsmetoden vil en struktur have en temperatur på under 100°C så længe der er en vandfilm på strukturens overflade.

2.13.7 RISIKO ANALYSE.

Der er situationer hvor regler ikke dækker den aktuelle sag. Hvor der er mulighed for at diskutere et givent krav, er en risikoanalyse en brugbart værktøj.

Et eksempel er givet nedenfor.

Evakueringstrappetårne på olie boreplatforme i Nordsøen er eksempler, hvor brug af risikoanalyse førte til en beslutning om at bruge ubeskyttet aluminium.

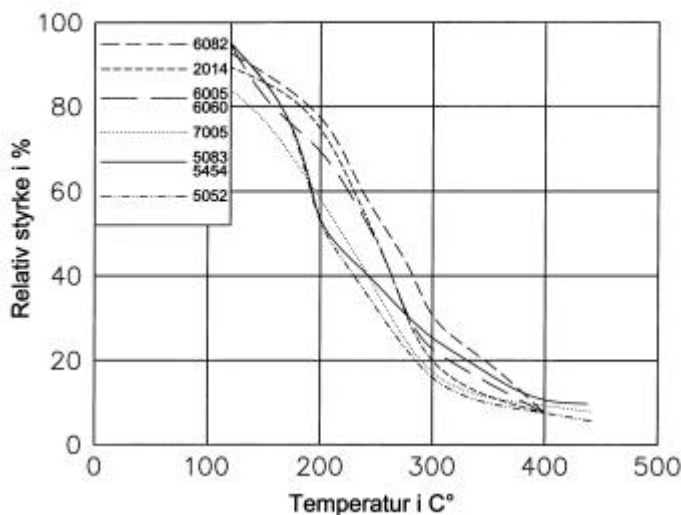
Input'et til risiko analysen bestod af data for de fysiske materiale egenskaber for det benyttede aluminium, brand scenariet, inkluderet den termiske last og udviklingen af giftige gasser, røg etc., lay-out af flugt vejene og de miljø mæssige aspekter.

Konklusionen af risikoanalysen var at hvis flugttrappen blev lavet i aluminium og blev fyldt med røg, giftige gasser eller flammer var den ikke brugbar og farlig som flugtvej længe før styrken af aluminiumet ville være væsentligt nedsat, og et kollaps af trappen kunne forekomme. Lay-out'et af flugtveje skal altid sikre at der er mindst en sikker flugtvej.

2.13.8 KURVER OVER ALUMINIUMS STYRKE SOM FUNKTION AF TEMPERATUREN.

Styrken af aluminium er højest ved det absolute nulpunkt og aftager med stigende temperatur op til smeltepunktet. Den absolutte værdi af styrken varierer med legeringstypen og varmebehandlingen. Til praktisk dimensionering er det styrkevariationen mellem 0°C og 500°C som er vigtig. Figur 2.127 viser temperaturens indflydelse på styrken af forskellige aluminiums legeringer.

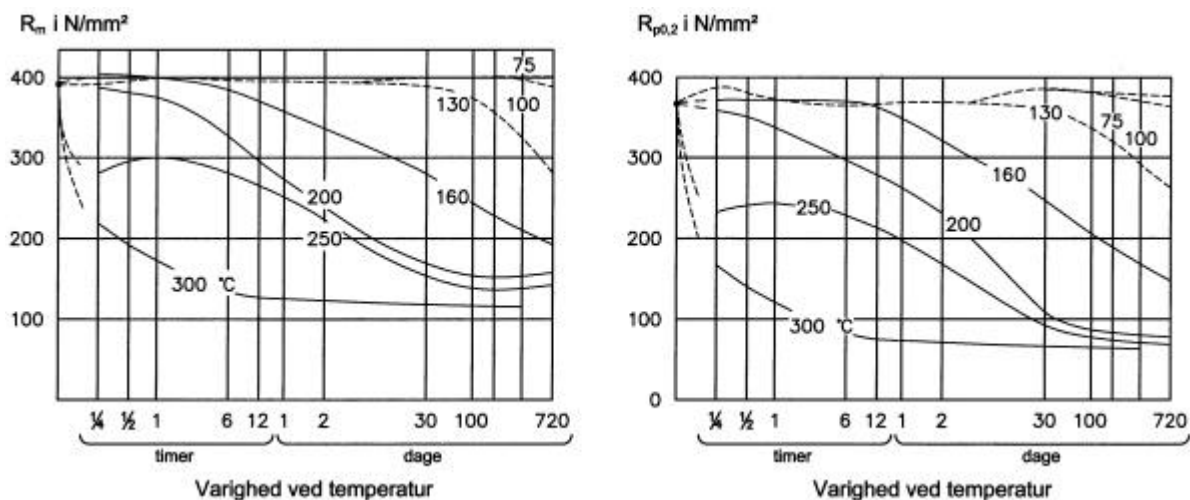
Styrken af aluminiumslegeringer ved stigende temperatur



Figur 2.127 Relativ styrke for aluminiums legeringer ved høje temperaturer.

Stivheden (E-modulet) falder naturligt med samme hældning som styrken.

Det er ofte interessant at kende udbredelsen af skaden ved en aluminiumskonstruktion udsat for kraftig varmepåvirkning. Hvis man kender den maksimale temperatur og varigheden af påvirkningen, kan den permanente styrkereduktion beregnes. Figur 2.128 viser den ultimative styrke og flydespændingen for AA6082 legeringen efter forskellige tids- og temperaturpåvirkninger.



Figur 2.128 Ultimativ styrke og flyde spænding for AA 6082 efter langtidspåvirkning ved forskellige temperaturer, [10].

Nedenstående Tabel 2.3 over reduktionen i flydespændingen er taget fra Eurocode 9 (ENV 1999-1-2) [9].

Tabel 2.3. Reduktion i flydespændingen ved forskellige temperaturer og tilstande, [9].

Legering EN AW	Tilstand	Legerings temperatur							
		20	100	150	200	250	300	350	550
3003	O	1,00	1,00	0,90	0,79	0,64	0,46	0,38	0
3003	H14	1,00	1,00	0,76	0,51	0,26	0,16	0,10	0
5052	O	1,00	1,00	0,96	0,82	0,68	0,48	0,23	0
5052	H34	1,00	1,00	0,92	0,52	0,33	0,22	0,13	0
5083	O	1,00	1,00	0,98	0,90	0,75	0,42	0,22	0
5083	H113	1,00	1,00	0,80	0,60	0,31	0,16	0,10	0
5086	O	1,00	1,00	0,89	0,78	0,63	0,47	0,29	0
5086	H112	1,00	1,00	0,99	0,91	0,73	0,46	0,30	0
5454	O	1,00	1,00	0,96	0,88	0,50	0,32	0,21	0

5454	H32	1,00	1,00	0,92	0,78	0,36	0,23	0,14	0
6061	T6	1,00	1,00	0,92	0,79	0,62	0,32	0,10	0
6063	T6	1,00	1,00	0,90	0,74	0,38	0,20	0,10	0
6082	T6	1,00	1,00	0,80	0,69	0,42	0,29	0,11	0
7075	T6	1,00	1,00	0,79	0,43	0,24	0,16	0,10	0

2.13.9 BEREGNINGSMETODER

Ved design af aluminiums strukturer for brand, er det første trin at beregne metallets temperatur. Derefter kan den reducerede styrke bestemmes. Værdien af denne reducerede styrke checkes med kravene til brandmodstand givet ved nationale regler og standarder.

At beregne styrkeforringelse af en aluminiums struktur udsat for stigende temperatur er forholdsvist simpelt hvorimod temperatur analysen er knap så simpel da den afhænger af isoleringsmaterialets fysiske egenskaber.

Temperatur beregning af ubeskyttet aluminium

For uisolerede aluminiums konstruktioner med homogen temperatur fordeling i tværsnittet gælder at temperatur stigningen ΔT i løbet af tiden Δt kan bestemmes af :

$$\Delta T = \frac{1}{c_{al} \rho_{al}} \frac{A}{V} h^* \Delta t$$

hvor

c_{al} er den specifikke varmekapacitet for aluminium [J/kg K]

ρ_{al} er massefylden [kg/m³]

A er det eksponerede areal for det aktuelle emne pr længde [m²/m]

V er emnets volumen [m³]

A/V er sektionens faktor for det aktuelle tværsnit [m⁻¹]

h^* er design værdien af varmefluxen per enheds areal [w/m²]

Δt er tidsintervallet [s]

Beregningen af h^* er beskrevet i ENV 1991 del 2 – 2 [11]:

$$h^* = g_{n,c}^* h_{net,c}^* + g_{n,r}^* h_{net,r}^*; \quad \gamma_{n,c} = \gamma_{n,r} = 1.0 \text{ i de fleste tilfælde.}$$

Denne ligning kan alternativt skrives som

$$h^* = a_c (T_g - T_s) + \Phi e_{res} 5,67 \cdot 10^{-8} [T_r^4 + T_s^4]$$

hvor

α_c varmeoverføringskoefficienten ved konvektion [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

T_g er gastemperaturen [K]

T_s er overfladetemperaturen [K]

Φ er en konfigurations faktor [-]

ϵ_{res} er den resulterende emissivitet [-]

T_r er strålingstemperaturen. Oftes lig T_g [K]

$5.67 \cdot 10^{-8}$ er Stefan Boltzmann's konstant i $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4$

Den resulterende emissivitet, ϵ_{res} defineret som:

$$\epsilon_{res} = \epsilon_f \epsilon_m$$

hvor

ϵ_f er emissiviteten relateret til det brændende rum, normalt lig 0.8

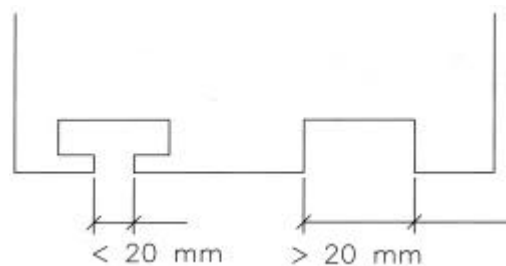
ϵ_m er emissiviteten relateret til materialets overflade hvor følgende værdier kan benyttes

$\epsilon_m = 0.3$ for rene udækkede overfalder

$\epsilon_m = 0.7$ for malede og tildækkede (f.eks. af sod) overfalder

ENV 1991-2-2:1995 [11] sætter følgende begrænsninger ved brug af ovenstående tilnær med formel: Δt bør ikke være mere end 5 sekunder og sektionfaktoren (A/V) bør ikke være lavere end 10 m^{-1} .

Ved beregning af den eksponerede overflade, A , skal indhak med et gab på mindre end 20mm ikke inkluderes, se eksemplet i Figur 2.129.

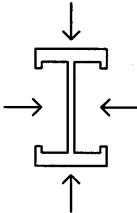
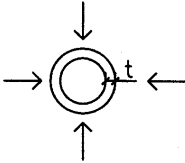
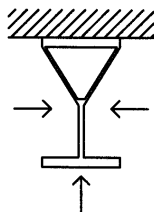
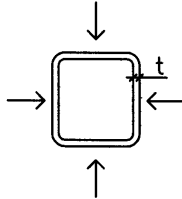
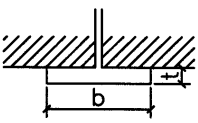
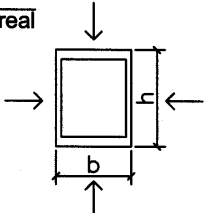
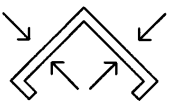
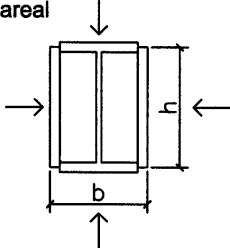
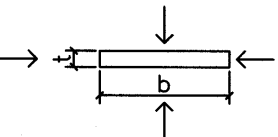
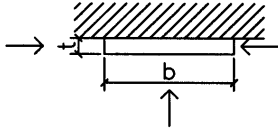


Figur 2.129 Beregning af det eksponerede overflade når denne har huller.

Designværdier for sektionfaktoren for bart aluminium er givet i Figur 2.130.

Dimensionerne indsættes i meter.

e = emne

<p>Åben sektion udsat for brand på alle sider :</p> $\frac{A_o}{V} = \frac{\text{omkreds}}{\text{tværsnits areal}}$ 	<p>Rør udsat for brand på alle sider :</p> $\frac{A_o}{V} = \frac{1}{t}$ 
<p>Åben sektion udsat for brand på tre sider :</p> $\frac{A_o}{V} = \frac{\text{overflade udsat for brand}}{\text{tværsnits areal}}$ 	<p>Hul sektion med ens tykkelse udsat for brand på alle sider :</p> <p>Hvis $t \ll b$: $A_o / V = 1 / t$</p> 
<p>I sektion flange udsat for brand på tre sider :</p> $A_o / V = (b + 2t_r) / (b t_r)$ <p>Hvis $t \ll b$: $A_o / V = 1 / t_r$</p> 	<p>Boks sektion udsat for brand på alle sider :</p> $\frac{A_o}{V} = \frac{2(b + h)}{\text{tværsnits areal}}$ 
<p>Vinkel udsat for brand på alle sider :</p> $A_o / V = 2 / t$ 	<p>I sektion med forstærkning udsat for brand på alle sider :</p> $\frac{A_o}{V} = \frac{2(b + h)}{\text{tværsnits areal}}$ 
<p>Flad profil udsat for brand på alle sider :</p> $A_o / V = 2(b + t) / (b t)$ <p>Hvis $t \ll b$: $A_o / V = 2 / t$</p> 	<p>Flad profil udsat for brand på tre sider :</p> $A_o / V = (b + 2t) / (b t)$ <p>Hvis $t \ll b$: $A_o / V = 1 / t$</p> 

Figur 2.130 Sektionsfaktorer for ubeskyttet aluminium, [11].

2.13.10 TEMPERATUR ANALYSE FOR ISOLERET ALUMINIUM.

For isolerede aluminiums konstruktioner med en jævn temperatur fordeling i tværsnittet gælder at temperaturstigningen ΔT i løbet af tiden Δt kan bestemmes af :

$$\Delta T = \frac{I_i}{c_{al} \rho_{al} d_i} \frac{A_i}{V} \left[\frac{1}{1 + \frac{j}{3}} \right] (T_t - T_{al}) \Delta t - \left(e^{\frac{j}{10}} - 1 \right) \Delta T_{(t)}, \quad \Delta T \geq 0$$

$$f = \frac{c_i \rho_i}{c_{al} \rho_{al}} d_i \frac{A_i}{V}$$

hvor

c_{al} er den specifikke varmekapacitet for aluminium [J/kg K]

c_i er den specifikke varmekapacitet for isoleringsmaterialet [J/kg K]

d_i er tykkelsen af isoleringsmaterialet

ρ_{al} er massefylden af aluminium [kg/m^3]

ρ_i er isoleringsmaterialets massefylden [kg/m^3]

A_i er arealet af den indre overflade af det isolerende materiale pr. længde [m^2/m]

V er emnets volumen pr længde [m^3/m]

A_i/V er sektionens faktor for det aktuelle isolerede emne [m^{-1}]

h er design værdien af være fluxen pr enheds areal [w/m^2]

Δt er tidsintervallet [s]

T_g er gastemperaturen [K]

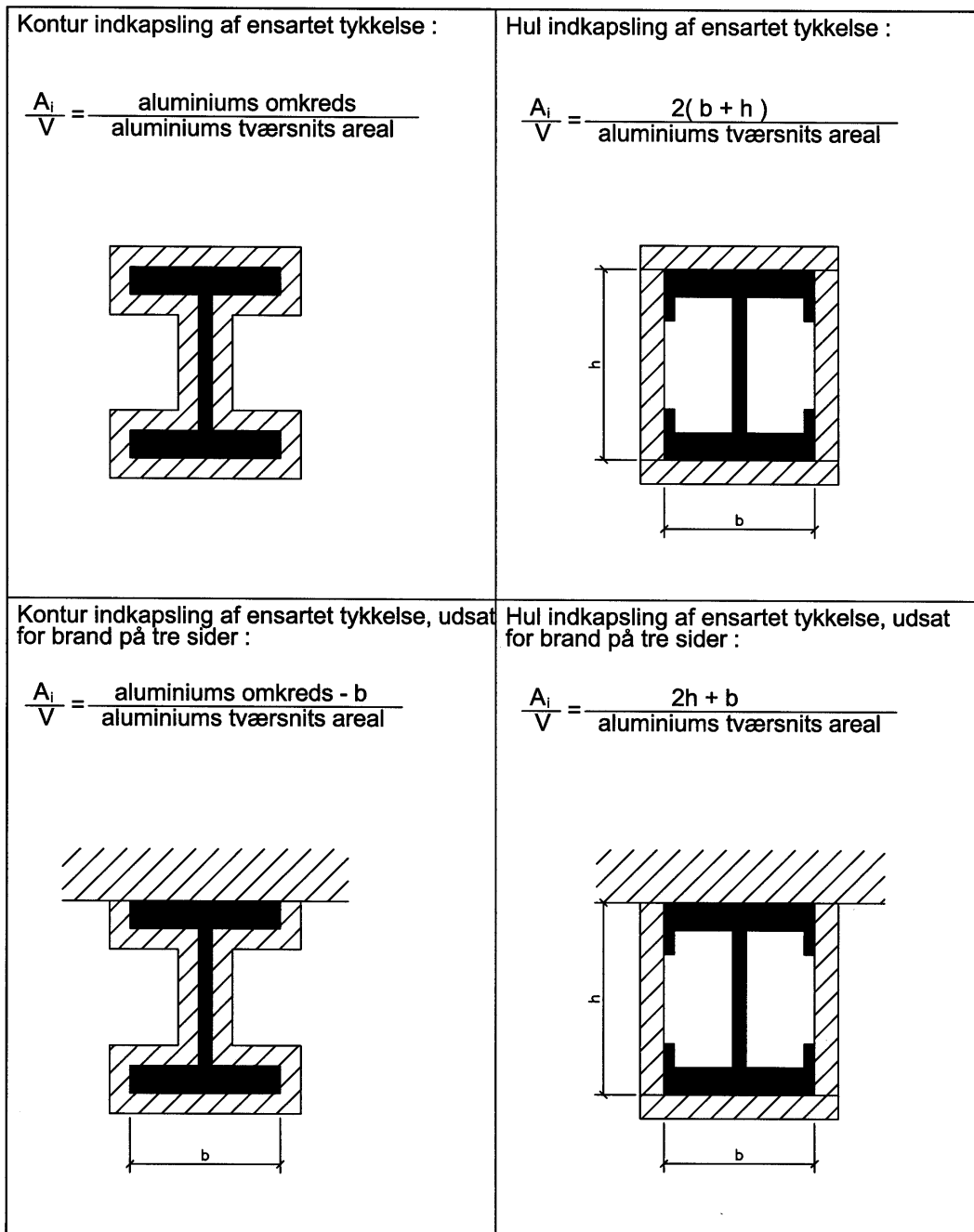
$\Delta T_{al(t)}$ er temperaturen af aluminium til tiden t [K]

$\Delta T_{(t)}$ er temperatur forskellen. [K]

λ_i er varmeledningsevnen [W/mK]

Pga. formeltilnærmelser bør Δt ikke være større end 30 sekunder, jvf [11].

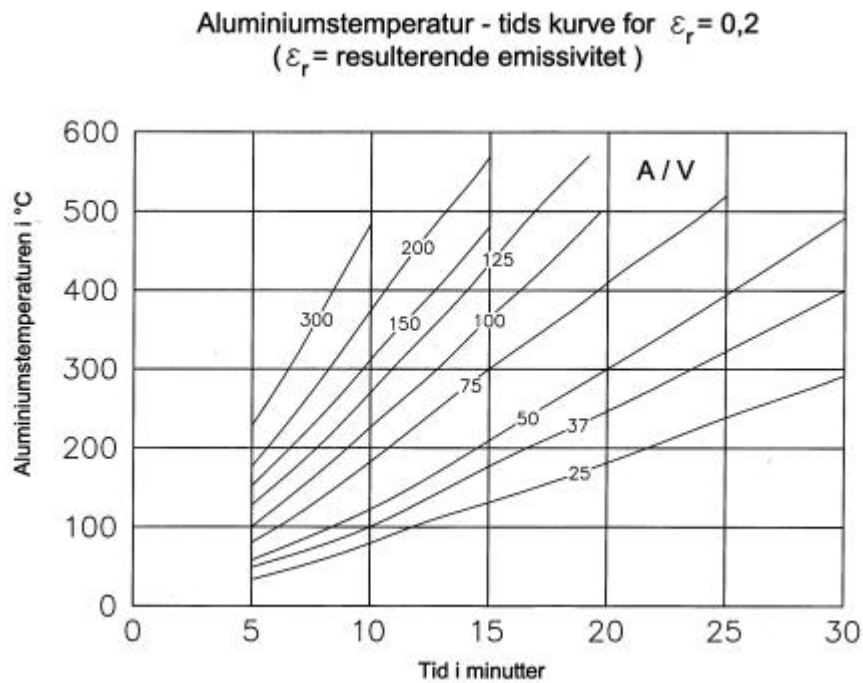
Design værdier for sektionensfaktoren A_i/V for isolerede aluminiumstrukturer er givet i Figur 2.131.



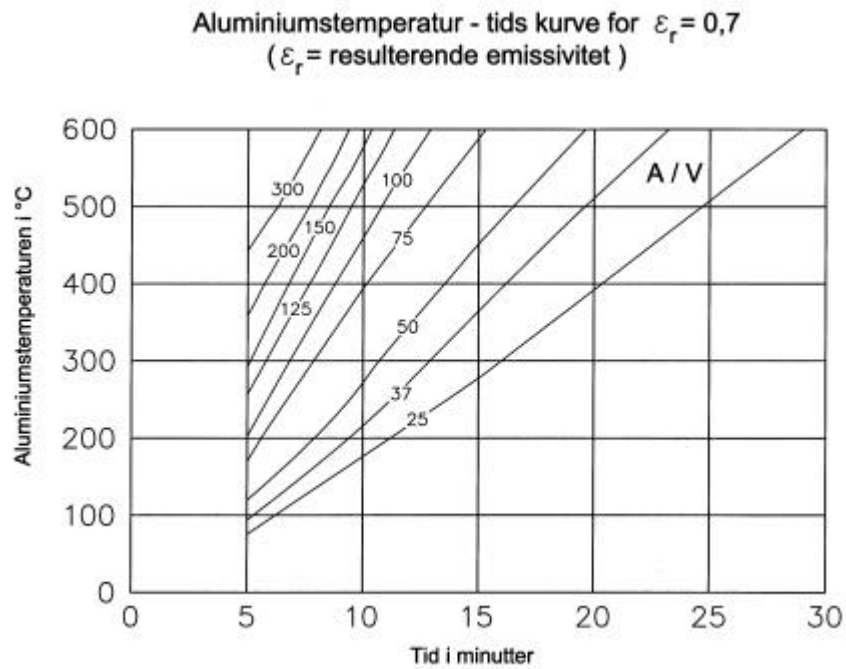
Figur 2.131 Sektionsfaktorer (A_p/V) for forskellige aluminiums elementer isoleret med brandbeskyttende materiale, [9].

Ved kombination med aktive brandhæmmere f.eks. vandspray/tåge og brandhæmmende isolering kan $\Delta T_{al(t)}$ modificeres da opvarmningstiden forsinkes når aluminiumstemperaturen når 100°C. Denne forsinkelse kan bestemmes ud fra regler i diverse standarder f.eks. Annex C i ENV 1991-2-2 (Eurocode 1), [11].

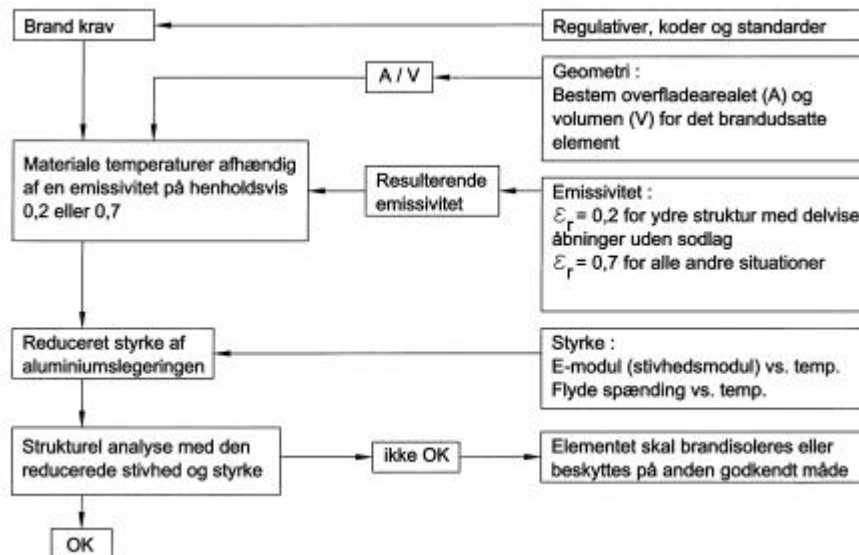
2.13.11 KURVER OVER MATERIALE TEMPERATUREN FOR UBESKYTTET ALUMINIUM



Figur 2.132 Aluminiumstemperatur, tidskurver for $\epsilon_r = 0,2$, [10].



Figur 2.133 Aluminiumstemperatur, tidskurver for $\epsilon_r = 0,7$, [10].



Figur 2.134 Rute diagram for design af uisoleret aluminium.

2.13.12 KURVER OVER TEMPERATUREN FOR ISOLEREDE ALUMINIUMS STRUKTURER

Da der findes mange forskellige typer af isolering med forskellige varmeledende egenskaber skal en ækvivalent isoleringstykkelse beregnes som

$$t_{\text{ækv}} = C \cdot t$$

hvor

C = isolerings korrektions faktoren

t = isolerings tykkelsen

Isoleringsfaktorer for forskellige isoleringstyper kan findes i Tabel 2.4:

Tabel 2.4 Isolerings korrektions faktorer.

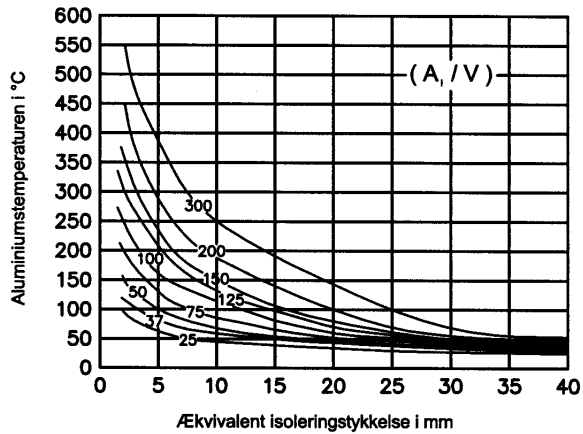
Isolerings materiale	Massefylde [kg/m ³]	Korrektions faktor
Rockwool måtter	30-40	0,45
Rockwool måtter	100-120	1,00
Rockwool måtter og plader	150-170	1,15
Rockwool plader	280-320	1,50
Calsium Silikat plader	400-900	1/625 A _i /V + 0,8
Vermiculit plader	400-900	1/625 A _i /V + 0,8
Gips plader	700-1000	1/160 A _i /V + 0,5

Herudover finder der også forskellige keramiske fibre og som tidligere nævnt er dette et specielt produkt der er relativt dyrt.

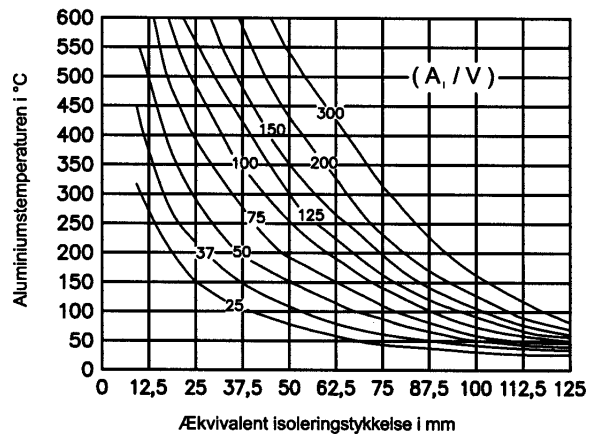
Ved praktisk dimensionering beregnes den ækvivalente isoleringstykkelse og sektionens forholdet A_i/V . Eksponerings tiden for et standard brandtilfælde fastsættes og metal temperaturen af aluminiumsstrukturen kan da findes ud fra kurverne i Figur 11, afhængigt af den krævede tid til at modstå flammer.

Materiale temperaturen bruges til at beregne E-modulet og flydespændingen (0.2% sand spænding forhold). Disse værdier checkes med den lastbærende kapacitet givet i [9].

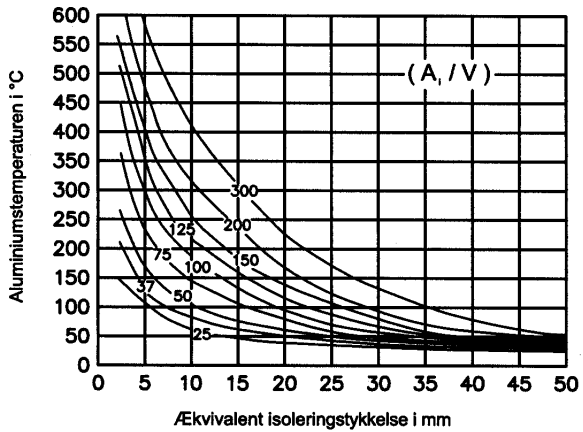
Ækvivalent isoleringstykkelse versus aluminiumstemperaturen for 10 min brandmodstand



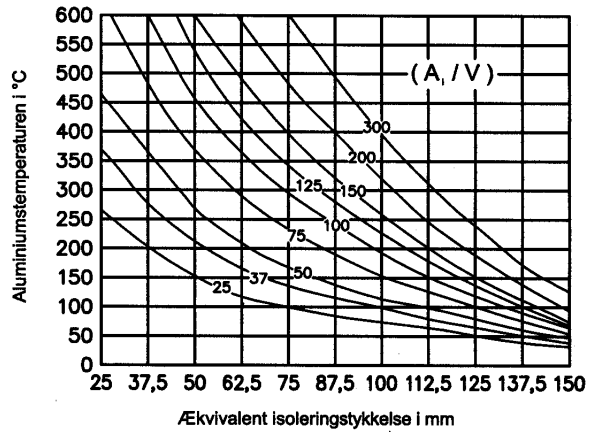
Ækvivalent isoleringstykkelse versus aluminiumstemperaturen for 60 min brandmodstand



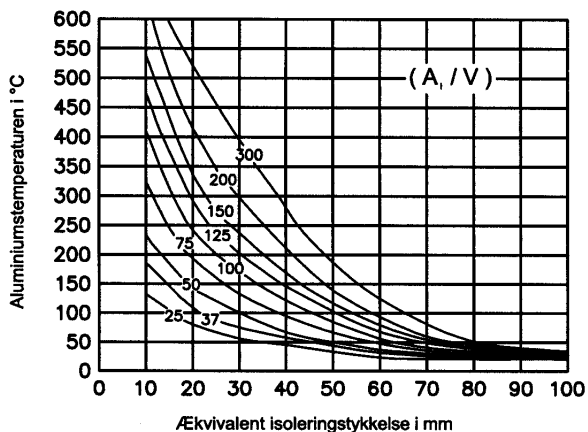
Ækvivalent isoleringstykkelse versus aluminiumstemperaturen for 15 min brandmodstand



Ækvivalent isoleringstykkelse versus aluminiumstemperaturen for 90 min brandmodstand

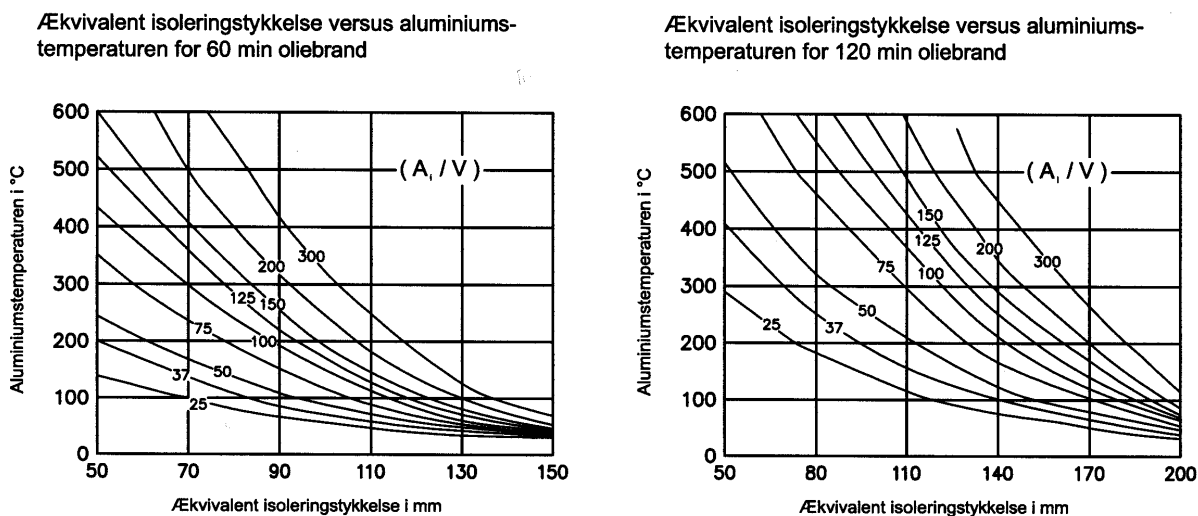


Ækvivalent isoleringstykkelse versus aluminiumstemperaturen for 30 min brandmodstand

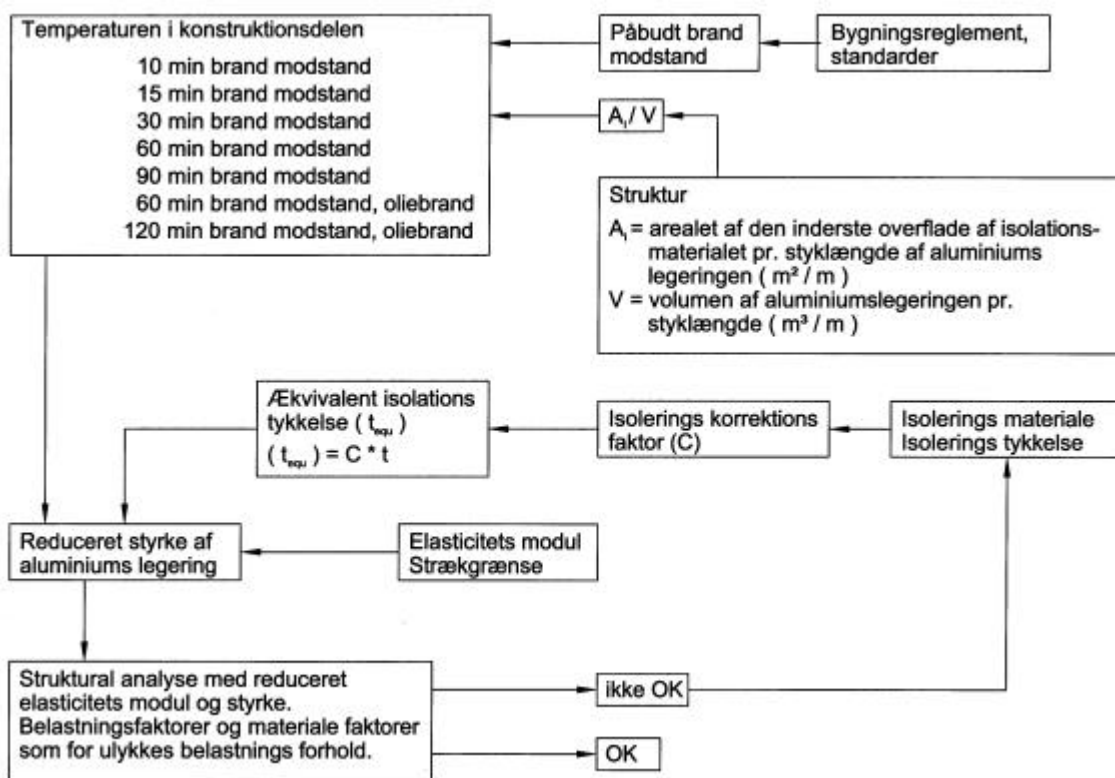


Figur 2.135 Ækvivalent isoleringstykkelse versus materiale temperatur for forskellige brandmodstandstider, [10].

Hvis branden er en kulbrinte brand er belastningen større og kurverne i Figur 2.136 skal bruges.



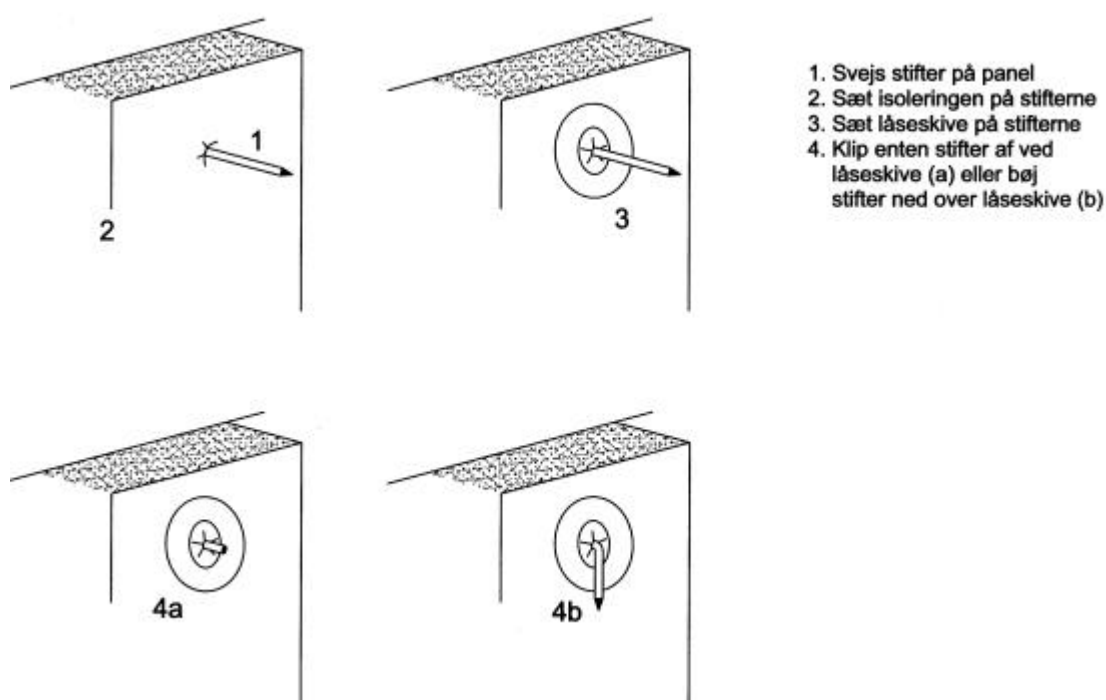
Figur 2.136 Ækvivalent isoleringstykkel versus materiale temperatur for 60min og 120min flamme modstand ved en oliebrand, [10].



Figur 2.137 Rutediagram for design af isolerede aluminiumsstrukturer.

2.13.13 ISOLERINGS TEKNIKKER

Isoleringen skal altid opsættes på den eksponerede side af aluminiumet, dvs. på den side hvor der er risiko for brand, evt. på begge sider. Isoleringen skal naturligvis opsættes så dette ikke falder ned under en evt. brand. Til at fastspænde almindelig -tør- isolering til aluminium bruges bimetal stifter. Disse stifter er lavet af rustfrit stål med aluminium i den ene ende, og kan således umiddelbart modstandsvejses på aluminiums strukturen, f.eks. et skod. Isoleringen hænges op på stifterne på en sådan måde at stiften går gennem isoleringsmaterialet, som fastlåses med en skive som sættes ind over stiften eller sømmet. I hjørner og andre dårligt tilgængelige steder hvor det er svært at fæstne isoleringen tæt til kan f.eks. stål net bruges. Stålnet eller hønsenet bruges også hvor isoleringen i sig selv ikke har tilstrækkelig stabilitet. Figur 2.138 viser princippet.



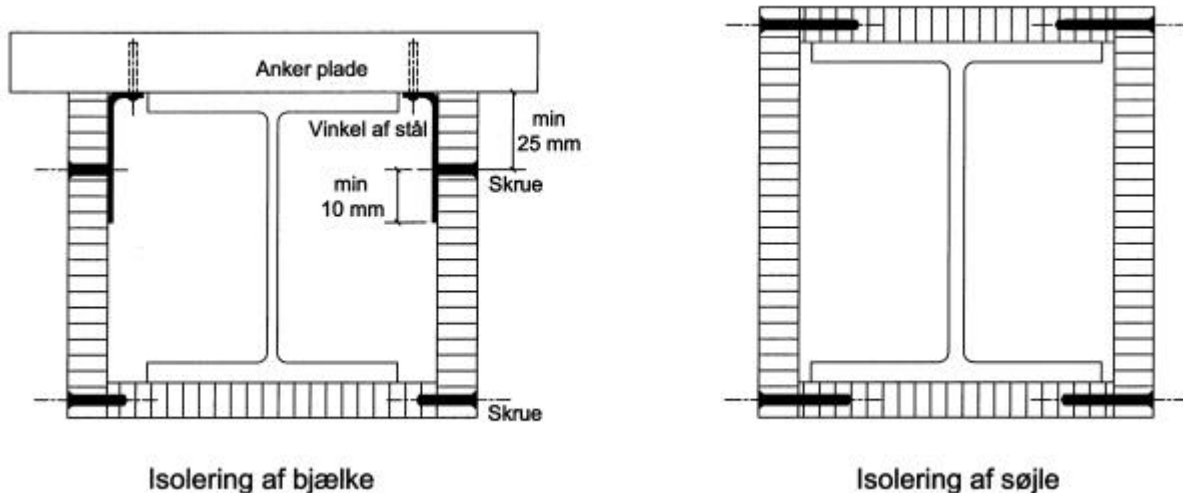
Figur 2.138 Opsætningsprincip for isolering ved brug af stifter.

Faste isoleringsplader (skodder) kan også opsættes i skinner. Disse skinner udgør en ramme som omslutter og derved ind fæstner pladen.

Forsænkede lofter er andre eksempler på ”modul opbygget” isolering.

Da mange isoleringsmaterialer krymper ved opvarmning er det vigtigt at lægge isoleringen med dobbelt overlap. Navnlige ved overgang fra vindue eller dør til skod skal specielle forholdsregler tages.

Ved opsætning af faste isolerings plader kan også bruges vinkelbeslag og skruer, illustreret i Figur 2.139.



Figur 2.139 Typisk fastspændingsmetode for faste isoleringsplader.

2.13.14 EKSEMPLER

Fritstående isoleret søjle med brandbelastning på alle sider

Søjlen står frit i en salon på en hurtigfærge. Søjlen er en sekundær støtte hvorfor kravet til brandmodstand er 10 min. Dimensionen er $\text{Ø}100$ med godstykkelse på 10 mm. Søjlen er 3000 mm høj og antages simpelt understøttet i begge ender. Der er ikke svejst på søjlen andet end ved enderne, søjlen har således en homogen styrke gennem hele sin længde og tværsnit.

Legering og tilstand er EN AW 6082 T6. Det antages at søjlen er malet og tillige tilsodet så ϵ_r sættes til 0,7.

Belastningen er:

Permanent last 45 kN

Spidsbelastning 100 kN

Jvf. Eurode 9 skal sikkerhedsfaktoren for permanent last være lig $\gamma_G = 1.1$ og for variabel last $\gamma_Q = 1.5$.

Inertimomentet af søjlen omkring en tværgående akse er:

$$I_y = \frac{\rho}{4}(r_y^4 - r_i^4) = 2.898 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

Brud lasten ved normal temperatur beregnes til:

$$N_{b,Rd} = \frac{pEI}{l^2} = 222 \text{ kN}$$

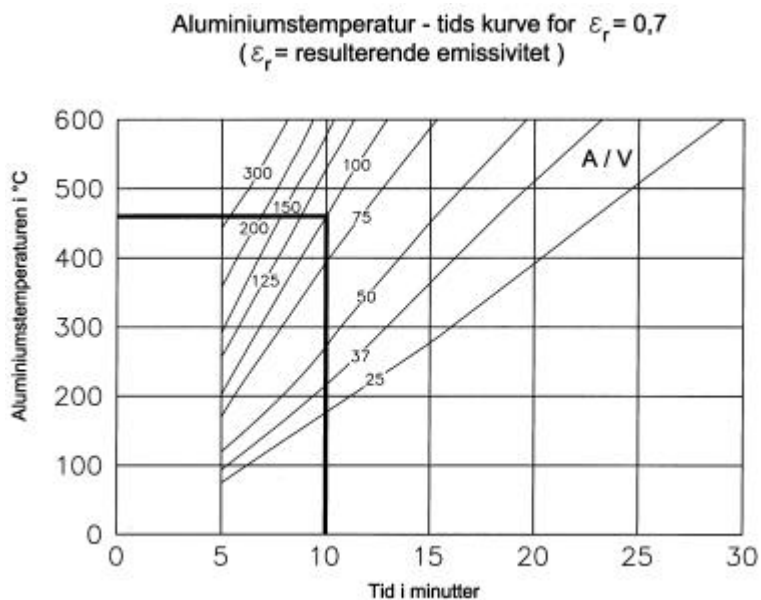
Design belastningen er:

$$N = 1.1 \cdot 45 \text{ kN} + 1.5 \cdot 100 \text{ kN} = 199.5 \text{ kN}$$

Jvf. Figur 6 er sektionens faktoren:

$$A/V = 1/t = 1/0.01\text{m} = 100/\text{m}.$$

Figur 2.133 med $\epsilon = 0.7$ (tilsødet overflade) og 10 min opvarmning



Figur 2.140 Temperatur i strukturen (som Figur 2.133)

Søjle's temperatur efter 10 min er 470 °C. Ved extrapolation i Tabel 2.3 fås at flyde-spændingen er:

$$\text{Reduceret flydespændings faktor} = k_{0,2} = 0,11 \frac{0,11 - 0}{200} 120 = 0,044.$$

Design bøjningsmodstanden af søjlen efter 10 min. brandpåvirkning er jvf. ENV 1999-1-2, 4.2.2.4, [9] incl. sikkerhedsfaktorer

$$N_{b,fi,t,Rd} = k_{0,2} N_{b,design} \frac{g_{M1}}{1.2 g_{M,fi}} = 0,044 \cdot 222 \text{ kN} \cdot 1,1 / (1,2 \cdot 1,0) = \underline{8.1 \text{ kN}}$$

hvor underindeksene har følgende betydning:

b er bøjning

fi er brand

t er tiden (her 10 min)

Rd er design modstand

$\gamma_{M,1}$ er sikkerhedsfaktor brugt ved ultimativ styrke (afsnit 5.1.1 i [12])

$\gamma_{M,fi}$ er materiale sikkerhedsfaktor ved brand (afsnit 2.3 i [9])

Design belastningen i en brandsituation (ulykkes situation) er:

$$N_{brand, design} = 1,00 \cdot 45 \text{ kN} + 1,00 \cdot 100 \text{ kN} = \underline{145 \text{ kN}}$$

Det ses således tydeligt at hvis søjlen skal stå frit og den påvirkes direkte af flammer skal søjlen brandbeskyttes.

Isoleret fritstående søjle.

Søjlen fra foregående eksempel isoleres nu med 50 mm Rockwool rørisolering. Kravet til brandmodstand sættes samtidig op til 30 min.

Sektions faktoren A/V er arealet af den indre isoleringsoverflade divideret med volumet af aluminiums strukturen per enheds længde. $A/V = 100 \text{ m}^{-1}$, som i eksempel før.

Korrektionsfaktoren for isoleringstypen er givet i Tabel 2.4 til 1 for rockwool med en massefylde på ca. 120 kg/m^3 . Den ækvivalente isolerings tykkelse er da

$$t_{\text{ækvivalent}} = C \cdot t = 1,00 \cdot 50 \text{ mm} = 50 \text{ mm}.$$

hvor C er isoleringens korrektionsfaktor og t er isoleringstykkelsen.

Jvf. Figur 2.135 for 30 min kurven er materiale temperaturen $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Ved denne temperatur er reduktionen i styrke 1,00, jvf. Tabel 2.3.

Design bøjningsmodstanden for søjlen efter 30 min ild påvirkning er

$$N_{b,fi,t,Rd} = k_{0,2} N_{b,design} \frac{g_{M1}}{1.2 g_{M,fi}} = 1,00 \cdot 222 \text{ kN} \cdot 1,1 / (1,2 \cdot 1,0) = 203,5 \text{ kN}$$

da

$$N_{b,fi,10,Rd} = 203,5 \text{ kN} \geq N_{brand, design}$$

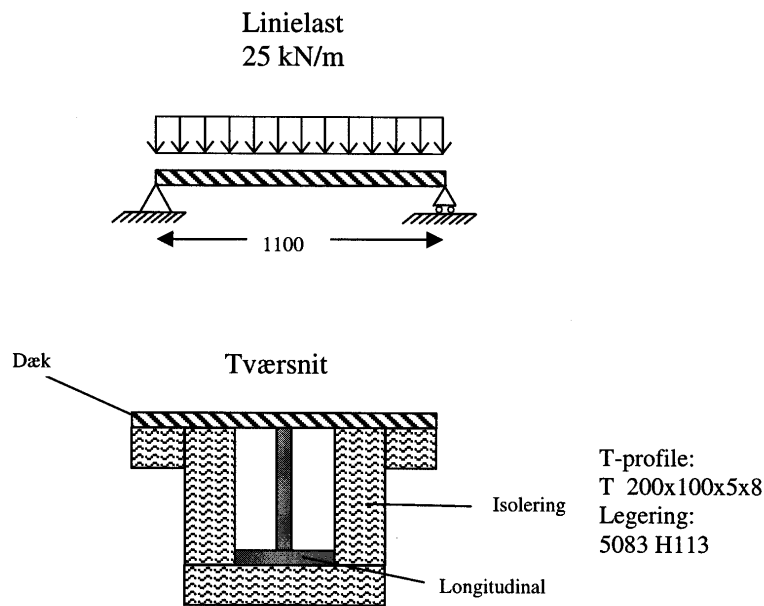
overholder den isolerede søjle nu kravet til brandmodstand på 30 min.

Isoleret bærende bjælke på underside af vogndæk

Underside af vogndækket på en hurtigfærge er tænkt isoleret med 75 mm Rockwool til en A-60 klasse med alufolie på overfladen. Massefylden er 150 kg/m^3 . De lukkede rum under vogndækket er altid installeret med en aktiv brandbekæmper som f.eks. CO_2 anlæg.

Isoleringen er lagt op under vogndækket som måtter der også omslutter longitudinalerne. Longitudinalerne er T profiler med flange på 100×8 og krop på 200×5 , alle mål i mm. Spanteafstanden er 1100 mm.

Den tværgående afstand er 250 mm. Øverste flange (dækket) regnes fuldt effektivt. Legeringen er 5083 H113. ($R_{p0,2} = 145 \text{ MPa}$).



Figur 2.141 Skitse af et isoleret T-profil (longitudinal) under et dæk.

Tværsnitsdata:

$$I = 8.14 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W = 55.7 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Lasten er

- Permanent last 5 kN/m
- Spidsbelastning 20 kN/m

Partialkoefficienterne (sikkerhedsfaktoren) for permanent last er $\gamma_G = 1,1$ og for variabel last $\gamma_Q = 1,5$.

Det designmæssige bøjnings moment ved stue temperatur er

$$M_d = \frac{1}{8} p l^2 = 1/8 (1,1 \cdot 5 \text{ kN/m} + 1,5 \cdot 20 \text{ kN/m}) (1,1\text{m})^2 = 5,37 \text{ kNm}$$

Kravet til nedbøjning er ikke medtaget her.

I en brandsituation sættes partialkoefficienterne lig 1.0

$$M_d = \frac{1}{8} p l^2 = 1/8 (1,0 \cdot 5 \text{ kN/m} + 1,0 \cdot 20 \text{ kN/m}) (1,1\text{m})^2 = 3,78 \text{ kNm}$$

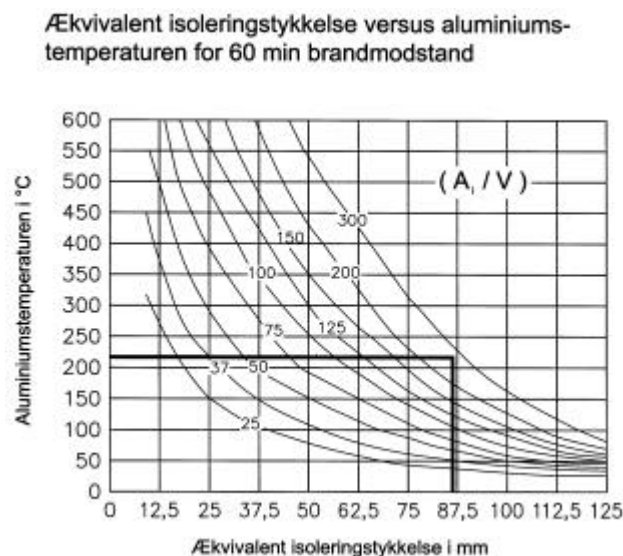
Sektionfaktoren er

$$\frac{A}{V} = \frac{2 \cdot 0,2\text{m} + 0,1\text{m}}{0,2\text{m} \cdot 0,005\text{m} + 0,1\text{m} \cdot 0,008\text{m}} = 278$$

Fra Tabel 2.4 ses at isolerings faktoren for Rockwool med en massefylde på 150 kg/m^3 er 1,15. Den ækvivalente tykkelse er da

$$t_{\text{ækv}} = 1,15 \cdot 75 \text{ mm} = 86,25 \text{ mm}$$

Materiale temperaturen aflæses på Figur 2.135 til $220 \text{ }^\circ\text{C}$, illustreret i Figur 2.142.



Figur 2.142 Ækvivalent isoleringstykkelse versus materiale temperatur for 60 min. brandmodstand.

Den reducerede styrke for legering 5083 H113 ved $220 \text{ }^\circ\text{C}$ er jvf. Tabel 2.3 ekstrapoleret til 0.48.

Styrken af materialet efter 60 min. brand er

$$\sigma_{0,2} = 0,48 \cdot 145 \text{ MPa} = \underline{70,2 \text{ MPa}}$$

Bøjningsspændingen er

$$\sigma_b = \frac{M}{W} = \frac{3,78 \text{ kNm}}{55700 \text{ mm}^3} = \frac{3780 \text{ Nm}}{5,57 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3} = \underline{67,8 \text{ MPa}}$$

Da bjælkens reducerede styrke er større end den faktiske bøjningsspænding ($\sigma_{0,2} = 70,2 \text{ MPa} > \sigma_b = 67,8 \text{ MPa}$) kan bjælken modstå en brand under dækket i mindst 60 min.

Isoleret bærende bjælke på underside af vogndæk udsat for brand

Det forudsættes nu at der opstår en brand i en bil på vogndækket. Oversiden af vogndækket (dørken) er ikke isoleret. Skodder og dæk (loft) er isolerede. Vogndækkets tykkelse er 8 mm. Det antages at kun en mindre del af varmeenergien virker nedefter. En tommelfingerregel siger at brand spreder sig i sekunder opefter, i minutter til siden og i timer nedefter.

Vogndækket er afstivet som i foregående eksempel og med de samme laster. Kravet til brandmodstand er A-60.

Sektions faktoren er jvf. Figur 2.130:

$$\frac{A}{V} = \frac{1}{t} = \frac{1}{0,008} = 125$$

Ved at bruge Figur 2.133 med følgende input

- 60 min brand modstand
- Emissivitet = 0.7, der antages tilsodet overflade
- $A/V = 125$

fås en temperatur som er langt over 600 °C (gælder kun til 30 min!).

Et vogndæk skal derfor aktivt brandbekæmpes med vand, således temperaturen kan holdes på omkring 100°C. Der er naturligvis tillige krav til dræn systemet. Ved denne kombination af aktive brandhæmmere kan materialetemperaturen modificeres da opvarmningstiden forsinkes når aluminiumstemperaturen når 100°C – faseskiftet fra vand til damp.

Isoleringen kan også ligge ovenpå dørken, som f.eks. flydende dørk.

2.13.15 KOMBINATION AF BÆRENDE ELEMENTER I STÅL OG SEKUNDÆR STRUKTUR I ALUMINIUM

I praksis kan man ikke altid isolere sig ud af kravene til brand. Derfor ses ofte støtte søjler af stål i aluminiums konstruktioner. Aluminium og stål skal galvanisk adskilles med f.eks. en gummi membran pga. korrosion. Der henvises til 2.12.15 vedrørende specielle detaljeløsninger for samling stål og aluminium.

2.14 PRODUKTIONSTEKNISKE ERFARINGER - CASE STORIES

Følgende afsnit består af fire case stories, der beskriver erfaringer med produktion af forskellige aluminiumskonstruktioner.

De første 3 case stories er opbygning af industri relevante modeller, som er designet i SASAK regi.

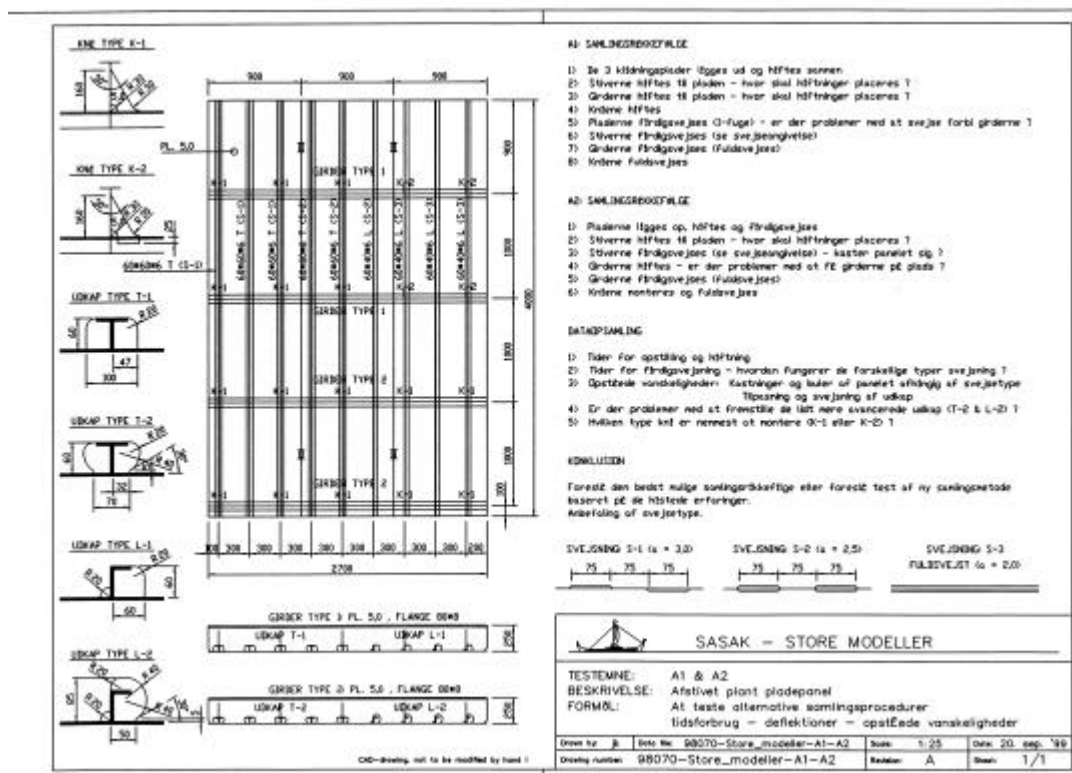
Modellerne er produceret hos HMK BILCON under ledelse af en svejsemester samt to skibsbyggere/svejsere fra BILCON. Disse skibsbyggere har erfaring i opbygning og svejsning af SEAJET-katamaranfærgerne.

Den sidste case story beskriver anvendelse af ekstruderede profiler i kølecontainere fra Maersk Container Industri.

2.14.1 CASE STORY I – AFSSTIVET PLANT PANEL

Et afstivet panel samles på to forskellige måder. Den første metode A1, er hvor plader, stivere, girdere og knæ hæftes op og således låser sektionen. Dernæst færdigsvejses pladerne, stiverne, girderne og til sidst knæene i den nævnte rækkefølge. Den anden metode A2, er hvor alle delelementer hæftes og færdigsvejses med det samme, i rækkefølgen; plader, stivere, girdere og knæ. Udover svejserækkefølgen er også selve svejsningen vekslende fra zig-zag og afbrudt svejsning til fuldsvejsning.

Emnerne skal forestille at være en del af en dobbelt bund eller sideklædning til et mindre aluminiums fartøj.



Figur 2.143 Tegning af det afstivede pladepanel.

Formål

Foreslå den bedst mulige samlingsrækkefølge eller foreslå evt. test af ny samlingsmetode baseret på de opnåede erfaringer. Anbefaling af svejsemetode.

Dataopsamling

Opstilling/hæftning

Hæftelængder for fugen i pladerne er 40 – 60 mm med en afstand på 150 mm. Stiverne hæftes med en længde på 20 mm og en afstand på ca. 300 mm. Girderne hæftes med en længde på 20 mm og en afstand på 150 mm. Hæftninger var på nogle emner ensidig og på andre dobbeltsidet.

Alle knæ hæftes i alle ender/hjørner med en hæfte længde på 5 mm.

Der ses en tendens til at lave mindre hæftninger, hvis emnerne skal fuldsvejses umiddelbart efter.

Hvad angår antallet af hæftninger er dette oftest større for aluminiums konstruktioner end for stål, da stivheden for aluminium er ca. 1/3 af ståls, hvilket nødvendiggør, at emnerne skal holdes bedre fast i forhold til hinanden. Pladetykkelsen har naturligvis en stor effekt for indspændingen.

Generelt er opstillingstiden længere for A1 end for A2.

Svejning

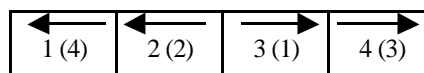
V-fugen til samling af pladepanelerne er skærpet i 90° med en rodnæse på 2 mm og en 0,5 mm skærpnings på bagsiden. Som backing er benyttet en jernbjælke.

Alle kantsømme har a-mål på 4,5 – 5.0 mm, hvilket er over det specificerede på 2,5 – 3 mm. Et realistisk a-mål med det benyttede apparatur (MIG-puls ESAB 400, manuel er nok minimum 3,5 mm – ved maskinel svejsning kan a-mål 2,5 mm opnås).

Svejsparametrene er nogenlunde de samme for de 2 modeller dog med et minimalt større varmeinput for model A2, hvor trådhastigheden er større.

Mht. svejsehastighed er aluminiums svejsning kendetegnet ved at MIG generelt er tre gange så hurtig som ”stål” svejsning (MAG) i alle stillinger, da materialet flyder anderledes og mere gunstigt end stål.

Procestiden (tilrigning, lysbuetid, svejsetid og flytning) for model A1, hvor alt er hæftet op på forhånd, er længere end den er for A2.



Svejserækkefølgen er indefra og ud dvs. 3,2,4,1.

Erfaringen har vist, at det tager ca. 25 min. for svejsning og efterbearbejdning af et knæ, med den fornødne kvalitet.

Hvad angår langsømmene var disse, som før nævnt, svejst med metallisk backing. En mere formbar backing, som kunne tilpasses den aktuelle fuge, ville kunne reducere eller evt. helt eliminere efterbearbejdning. (Ved tidligere bygning af katamaranskrog på BILCON blev keramisk backing brugt i vid udstrækning ved opsvejsning af lige stræk eller små krumninger). Formbar backing kunne f.eks. laves af nylon. Se endvidere afsnit 2.11.9 om sammensvejsning af ekstruderede profiler.

Svejserens mest generelle kommentar var, at målene mellem stiverne ikke passede. Dette skyldes, at der var mærket op til stivernes placering før de 2 langsømme var svejst. På grund af krympning passede målene ikke efter svejsningen af langsømmene. Opmærkning skal derfor altid foretages umiddelbart inden den aktuelle svejsning påbegyndes.

Deformation

Vinkelknækket er betydeligt mindre for model A2 svejst ”successivt” end for A1. Hæftningernes indflydelse på vinkelknækket er her svær at afgøre. Svejsemetodens indflydelse ses tydeligt, da længde krympet er lineært afhængig af varmeinputtet. Således er længdekrympet for stiverne på A1 svejst med zig-zag 2.0 mm, med dobbeltsidet afbrudt hæftning 4.0 mm og for fuldsvejsning 4.0 mm. De tilsvarende tal for A2 er 1.9 mm, 4.0 mm og 5.0 mm. Tværkrympet viser ikke noget entydigt billede for model A1 eller A2, men størrelses ordenen er 1 mm. A1 panelet viser generelt mindre pilhøjde end A2.

Billeder fra produktionen

I det følgende er vist billeder taget under produktionen af de store modeller.



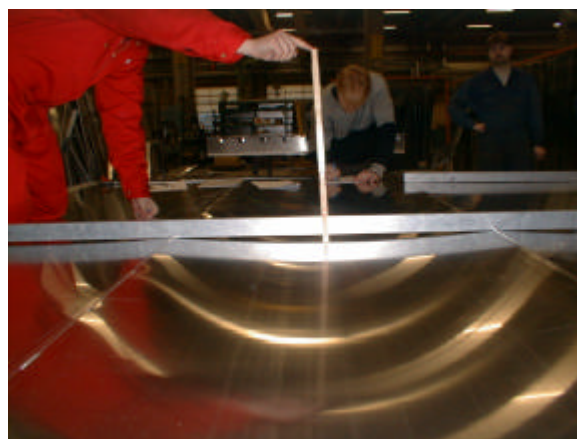
Figur 2.144 Fugeforberedelse. Råpladerne gøres klar til samling ved fræsning af V-fuge på 45° med 2 mm rodnæse. Et panel samles af 3 plader.



Figur 2.145 Ca. 60 mm hæftning med 150 mm mellemrum. Ved girdere længere hæftninger, 70-80 mm. MIG svejst.



Figur 2.146 Spræl i pladepanelet efter stumpsømssvejsning. Manuel MIG puls svejsning med ESAB 400. U=21,3 V, I=196 A, Svejseshastighed 11,3 m/min, gasflow 20 l/min. Tilsats OK 18.16 Autrod ø 1.2



Figur 2.147 Måling af vinkelknæk, 18mm.



Figur 2.148 Udsavede cut-outs i girder.



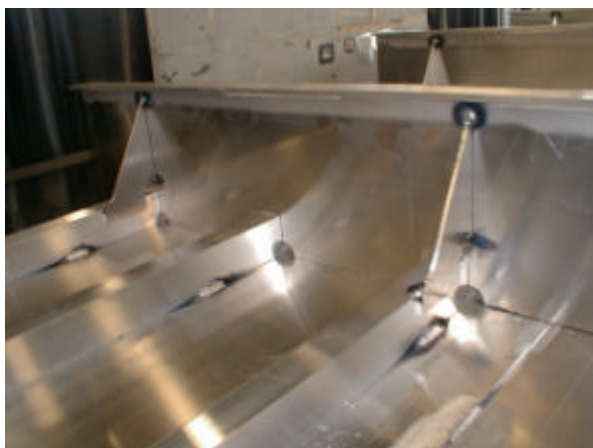
Figur 2.149 "Fræsning" af start/stop hæftninger. Ved reparation bruges vinkelsliber og fræser.



Figur 2.150 Tosidet svejsning af girder.



Figur 2.151 Knæ på T-profil.



Figur 2.152 Knæ på L-profil.

Hovedkonklusion

Ideen i at svejse det meste af en sektion på én gang er nærliggende, da varmen derved kan tilføjes materialet på én gang. Denne metode ville også være fordelagtig deformationsmæssigt, hvis sektionen ikke havde så stor en indspændingsgrad (tilstrækkeligt afstivet og hæftet) som tilfældet er her.

Længdekrymp, vinkelknæk, svejsetid og opstillingstid er alle lavere for A2 end for A1. Kun pilhøjden ser ud til at mindskes hvis A1-metoden benyttes.

I produktions og kvalitets øjemed er det naturligvis også vigtigt at få så mange uafbrudte svejsemetre som muligt.

De avancerede udkap krævede flere håndteringer end de simple, da den benyttede produktionsmetode baserede sig på en kombination af rundsavning og logning. Hvis der var anvendt NC styrede maskiner ville udskæringstiden være insignifikant.

Opmærketiden for udkap kan reduceres, hvis alle rundinger har samme centrum. Det sparer produktionstid, men er ikke helt optimalt rent styrkemæssigt. Fremstillingstiden var dobbelt så lang for de avancerede udkap som for de traditionelle. Ligeud savning er naturligvis altid det produktionsmæssige mest interessante, men generelt tager savning lang tid, er relativt svær at håndtere og så laver savning "savespor" ved kanterne, hvilket kan nedsætte levetiden, da kærve vil initiere revner. Plasma skæring giver fine kanter, dog må aluminium ikke skæres i det samme vand som bruges til stål, da jernoxiderne vil gå i forbindelse med aluminium'et. Hvis samme vand bruges, skal emnerne rengøres med rent vand.

Af knæene er det K-1 knæet som placeres midt på flangen, der er lettest at montere. K-2 knæet, som sidder på siden af L-profilet, har dårlige adkomst forhold for den kantsøm, som ligger langs nederste "katete" og oftest skal den svejses under-op. Den vanskelige tilgængelighed gør, at der ofte er meget efterbearbejdning f.eks. i form af slibning, da svejsningen "ikke ligger rigtigt".

A1-metoden er naturligvis fordelagtig hvis der ikke findes pinol-oplæg således, at det er afstivningen som giver den udvendige form.

Alt for mange afbrudte svejsninger skal undgås, da der ved enhver start/stop situation er fare for at introducere kærve som f.eks. kraterrevner, hvilket kan nedsætte udmattelseslevetiden. Afbrudte svejsninger vil give et dårligere kvalitet, end hvis der var svejst kontinuert. Derfor skal alle start/stop steder gøres så "arbejdsvenlige" som muligt, hvilket samtidigt gør det lettere at slibe svejsningen.

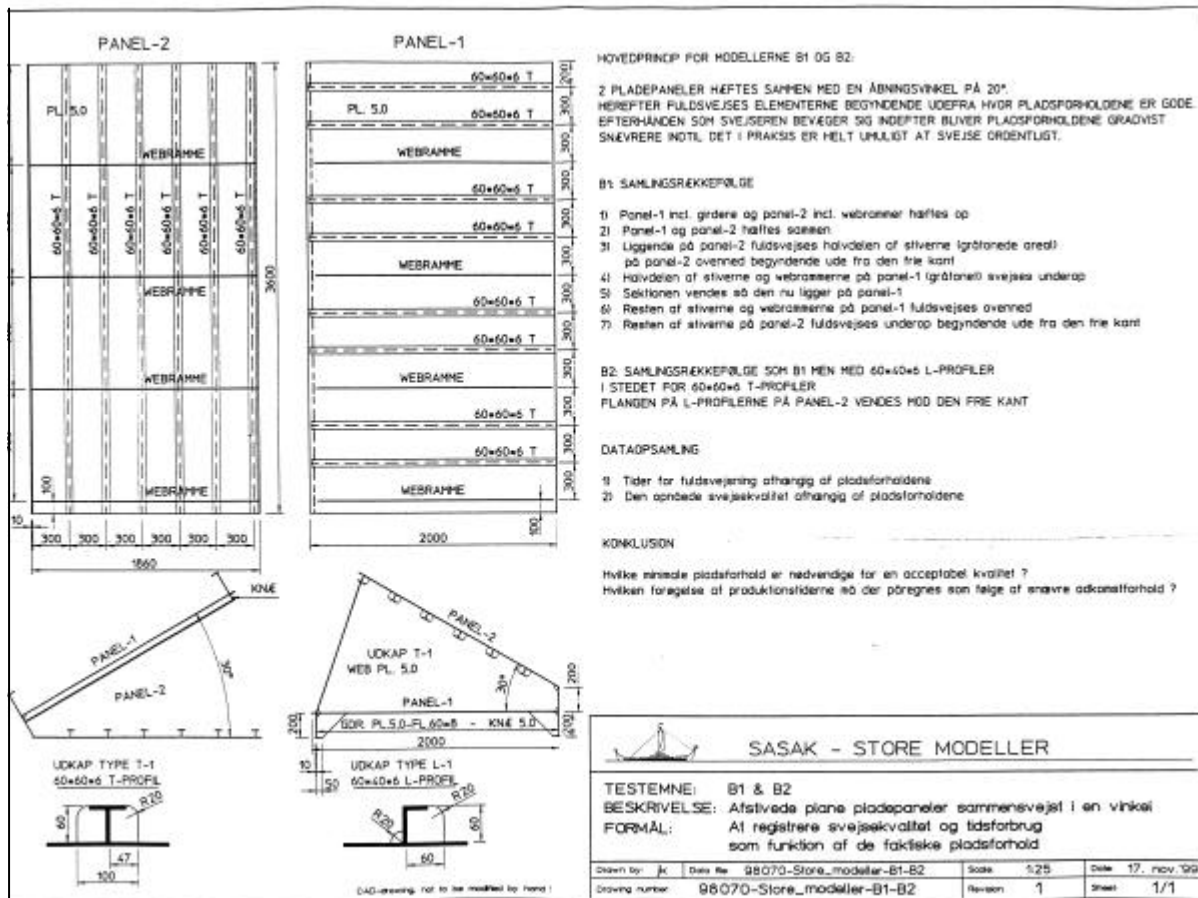
Konklusionen er, at model A-2 i kvalitetsmæssig forstand er den bedste.

Stumpsømme skal så vidt muligt svejses på automat, da der herved fås en bedre svejsning med mindre efterbearbejdning.

A-målet som angivet på tegningen er med specielt håndvejsning med MIG meget svære at opnå (2 mm-3 mm). En håndregel er, at a-målet sættes til 0.8 x pladetykkelsen for en dobbelt kantsøm. Overlapknæ (type K2) skal så vidt muligt undgås, idet de giver produktionsmæssige problemer.

2.14.2 CASE STORY II – AFSTIVEDE PLANE PLADEPANELER SAMMENSVEJST I EN VINKEL

Hovedprincippet for de 2 modeller er at to pladepaneler hæftes sammen med en åbningsvinkel på 30°. Herefter fuldsvejses elementerne begyndende udefra hvor pladsforholdene er gode. Efterhånden som svejseren bevæger sig indefter bliver pladsforholdene gradvist snævrere, indtil det i praksis er umuligt at svejse ordentligt. Vinkel var oprindeligt sat til 20° men denne ville give alt for dårlige adkomstforhold, hvilket produktionen ikke ville acceptere!



Figur 2.153 Tegning af de afstivede paneler sammensvejet i en vinkel.

Formål

Formålet med modellerne er primært at undersøge de minimale pladsforhold som er nødvendige for at få en acceptabel kvalitet, og at undersøge hvilken forøgelse af produktionstiderne, der må påregnes som følge af snævre adkomstforhold.

Dataopsamling

Samplingsrækkefølgen

Over- og underpanel incl. webrammer hæftes op og panelerne hæftes sammen. Halvdelen af stiverne svejses oven-ned og halvdelen svejses under-op.

Under produktionsforløbet er der logget produktionstider og svejseparametre og vanskeligheder med udførelse er i videst muligt omfang noteret.

Hæftninger

Webrammerne er hæftet 3 steder mellem hvert udkap, i hjørnerne og i midten. Hver hæftning er 15 mm lang, og hæfteafstanden er ca. 150 mm. Knæene er hæftet i hver hjørne med 5 mm hæftninger. Girdere og stivere er hæftet med 15 mm lange hæftninger og med 100 mm mellemrum. Alle hæftninger er foretaget fra enden og ind med MIG-puls.

Svejsninger

Alle svejsninger er lavet med MIG-puls på en ESAB luc 400 med tilsatsmateriale OK 18.16 ø1.2. Svejsparametrene er de samme for de 2 modeller.

Da adkomstforholdene ikke var "helt umulige" tog det i snit blot 2 min. længere at svejse de inderste stivere, end det tog at svejse de øvrige. Der er ingen forskel i svejsetiderne for T- og L profiler.

I princippet kan der være en produktionsmæssig fordel ved anvendelse af L-profiler, da disse har en "lige" side som gør montering af stag etc. let. En anden fordel er, at malearbejdet er lettere da der er færre "skjulte" hjørner. Det er dog langt fra altid det er nød vendigt af korrosionsmæssige årsager at male aluminium, hvilket eliminerer denne fordel.

I grove træk tager en under-op svejsning ca. en halv gang længere tid end en oven-ned, men kvaliteten styres naturligvis meget lettere med oven-ned svejsning.

Hvis et profil (T eller L) skal stødes op mod et skod er det vigtigt at alle svejsefuger er tilgængelige. Det kan være nødvendigt at snipe flangen ind mod skodet for at svejsning er muligt – se f.eks. Figur 2.160. Hvis der er specificeret en brændervinkel på f.eks. 80°, er det vigtigt, at denne holdes. Dårlig brænder vinkel giver dårlig kvalitet. Udkap i webs for stivere bør være store nok til at nødvendige forhold er i orden. 60 x 60 udskæring er generelt for små.

A-målet skal tilstræbes holdt så lavt som muligt pga. varmedeformation.

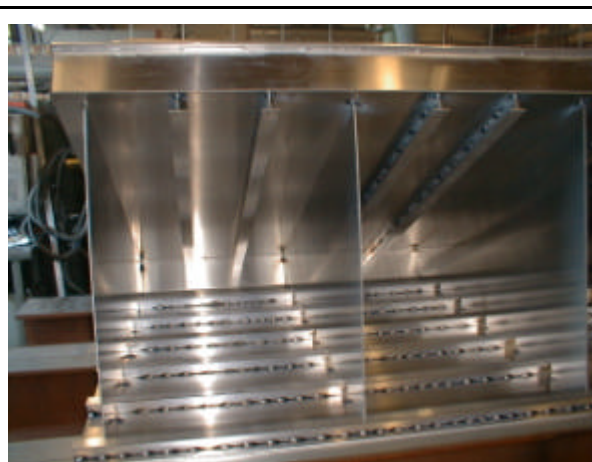
Adkomstforhold

På trods af at procestiden eller lysbuetiden er kortere for aluminiumssvejsning end for svejsning i stål, er den totale svejsetid ofte længere når der arbejdes med aluminium. Dette skyldes, at aluminium har mindre stivhed og derfor skal afstives mere og tættere, hvilket naturligt fører til snævre rum og dermed dårligere adkomstforhold.

Ved elektrodesvejsning i stål kan elektroden knækkes i ønskede vinkler, hvilket således gør elektrodesvejsning i stål meget mere fleksibel, så der kan svejses under dårligere adkomstforhold. Da aluminiumssvejsning ikke kan udføres med elektroder, findes denne fleksibilitet ikke. En håndregel er, at svejseudstyret skal kunne komme ind mod fugen i en 45° vinkel til svejsestedet, og endvidere skal man kunne få hovedet næsten helt frem til svejsningen. Dette skulle sikre, at der er rimelige pladsforhold. til at udføre svejsningen.

Ofte er en MIG svejsepistol monteret med udsugningsslange, da traditionel udsugning monteret på f.eks. skoddet med en magnet ikke er muligt i aluminium.

Billeder fra produktionen af spidspanelerne.



Figur 2.154 Hele model B1 ophæftet.



Figur 2.155 Slibning i vanskelig tilgængeligt område.



Figur 2.156 Dårlig adkomst i spidsen i en 30° vinkel, svejsning af den anden inderste longitudinal.



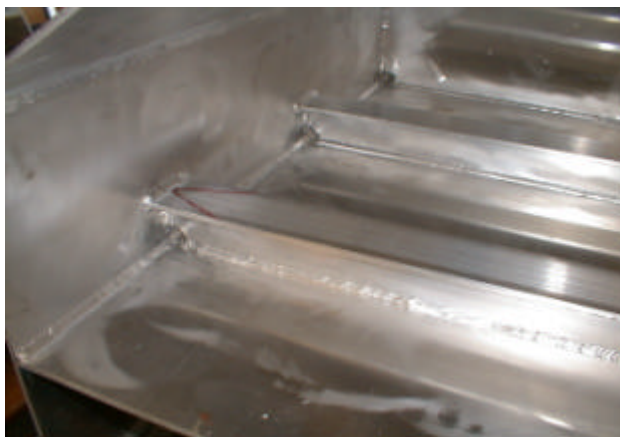
Figur 2.157 Svejsning af inderste longitudinal. Bemærk den korte afstand fra ansigt til lysbue.



Figur 2.158 Dårlig adgang for pistolen med fast monteret udsugningsrør. Svejsningen ligger ikke optimalt i forhold til pistolen. Man kan ikke se svejsningen. Adkomstforhold ved en typisk spacing på 300mm. Profilet svejses til girderen.



Figur 2.159 De snævre adgangsforskelde forhindre svejseren i at komme i den rette synsvinkel til svejsningen, da der ikke er plads til hjelmen.



Figur 2.160 T-profil forbindelse til skod. Meget dårligt resultat. Enderne på topflangen burde være snippede for at få bedre tilgængelighed. (markeret på billedet).



Figur 2.161 Pilhøjde for side-profil, sagging situation.



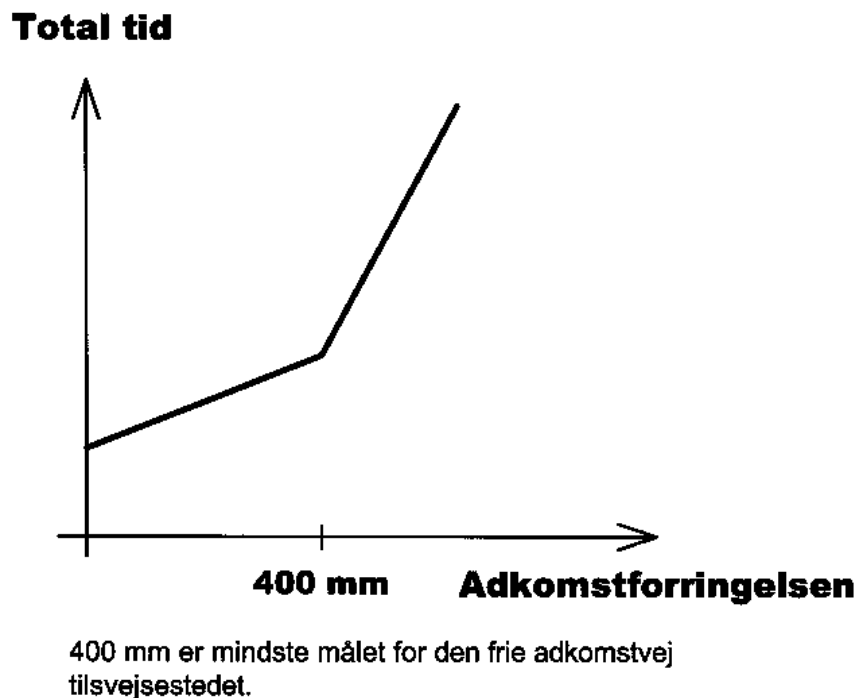
Figur 2.162 Pilhøjde af sidegirder. Hogging situation. På grund af krympe kræfterne langs den fuldsvejste søm, vil profilet bøje, da svejsesømmen trækker sig sammen. Bemærk forskellen fra Figur 2.161, som bøjer opad pga. svejsningen i toppen.

Hovedkonklusion

I designfasen bør adkomstforholdene altid inddrages, da disse er afgørende for slutkvaliteten.

For at få så optimale adkomstforhold som muligt, kan man bruge "håndreglen" med at man skal kunne få hovedet frem til stedet, som skal svejses. Ved reparation skal der bruges mere plads da vinkelslibere etc. er sværere at manøvrere med. Den frie plads foran svejsestedet skal i en lige linie være ca. en halv meter.

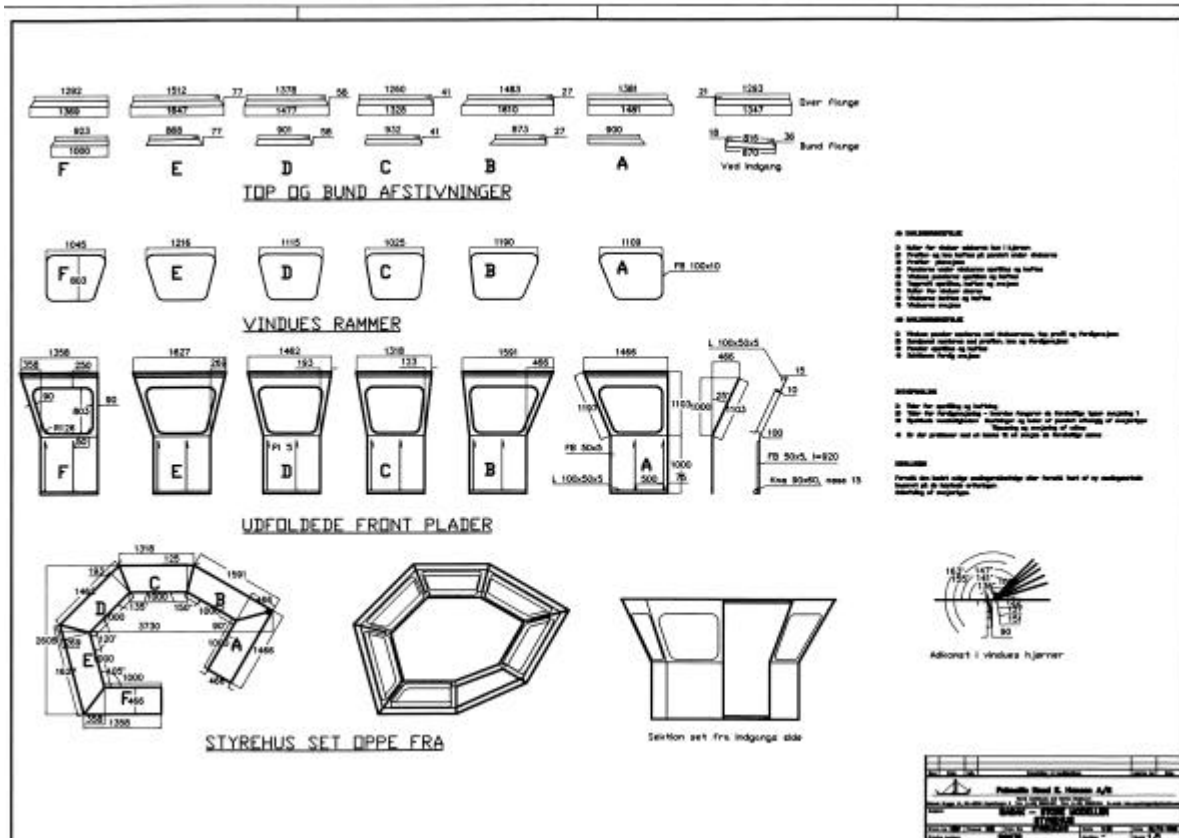
Svejsetiden (totaltid) vil stige med adkomst forholdene som illustreret på neden stående kurve. Adkomstforholdene vægter mest mht. den totale svejsetid.



Figur 2.163 Adkomstforholdenes betydning for svejsetiden.

2.14.3 CASE STORY III – MODEL AF ET STYREHUS

Et styrehus er en konstruktion, som nødvendigvis må have relativt store udskæringer til vinduer. Disse udskæringer er forholdsvis lette at lave i aluminium med en "almindelig" sav, rundsav eller stiksav. Netop pga. af disse store udskæringer kan der opstå problemer med stabiliteten af pladefeltet, navnlig i forbindelse med svejsedeformationer. For at klarlægge samlings- og deformationsproblemerne er der fremstillet to produktionsmæssige forskellige modeller – C1 og C2.



Figur 2.164 Tegning af styrehus.

Formå

Foreslå den bedst mulige samlingsrækkefølge eller foreslå test af ny samlingsmetode baseret på de opnåede erfaringer.

Dataopsamling

Produktionsmetoden/samlingsrækkefølgen

Samlingsmetode for model C1:

1. Vinduerne udskæres kun i hjørnerne.
2. Profiler og knæ hæftes på panelet under vinduerne
3. Profiler påsvejses
4. Profilerne under vinduerne opstilles og hæftes
5. Vindues panelerne opstilles og hæftes
6. Topprofil opstilles, hæftes og svejses
7. Huller for vinduer skæres
8. Vinduer isættes og hæftes
9. Vinduerne svejses.

Det andet styrehus model C2 produceres som følgende:

1. Vindues panelerne monteres med vinduesrammer, top profil og færdigsvejses
2. Bundpanel monteres med profiler, knæ og færdigsvejses
3. Paneler opstilles og hæftes
4. Sektionen færdig svejses

Opstilling/hæftning

I opstillingen af styrehus-elementerne er der benyttet hjælpebeslag i stor udstrækning. Der går naturligvis tid med udskæringen af disse beslag, men denne tid indhentes igen pga. hurtigere opstilling og tilpasning.

Ideen er altså her at undersøge det produktionsmæssige optimale tidspunkt for udskæring/bortskæring af et større pladefelt samt at finde den mest produktions egnede samlingsmetode.

Der ligger reelt ikke noget tidsbesparelse i hvornår udskæringen laves.

Svejsning

De to modeller er svejst med samme svejseparametre, med ESAB 400 med tilsats OK 18.16 ϕ 1.2. Som forsøg er svejst med 30% AR og 70% HE ved svejsning af vinduesrammernes ind- og udvendige side samt påsvejsning af topprofilet på styrehuset. Denne gasblanding gør det muligt at svejse med stor hastighed, hvilket giver et relativt lavt varmeinput og dermed lille deformation. Udbyttet dvs. tilsatsen og nedsmeltningen er som regel ikke noget problem i aluminiums svejsning, hvor det ofte er hastigheden som sætter begrænsningen.

På model C1 hvor vinduesrammerne sættes i efter at styrehus skodderne er oprejst, er det kun muligt at svejse disse rammer fra ydersiden på de steder hvor vinduerne støder op mod hinanden i et hjørne – dette gælder for det aktuelle styrehus ved alle vinduer! På grund af rammen er det ikke muligt at få svejsekoppen i en brugbar vinkel til fugen se Figur 2.167 Figur 2.168 og Figur 2.169.

Vinduesrammen skal derfor isættes på panel stadiet, og samtidigt skal det sikres, at der er tilstrækkeligt med plads mellem rammesiderne (ca. 1,5 svejsekop diameter), således at styrehus skoddene kan svejses i den indvendige fuge.

Billeder fra produktionen af styrehuset.



Figur 2.165 Opstillede og hæftede delpaneler, model C1, Bemærk hjælpe vinkelbeslagene nederst på panelerne.



Figur 2.166 Opstillede og hæftede delpaneler, model C1.



Figur 2.167 Isætning af vinduesrammer i styrehus C1.



Figur 2.168 Vindues rammen kan ikke svejses indefra pga. adkomstforhold.



Figur 2.169 Ikke plads til svejsepistol, pga. hjørnet.



Figur 2.170 Færdigt Styrehus C1, vinduesrammer endnu ikke svejst på indvendige side.



Figur 2.171 Vindues ramme hæftet, bemærk vinkelhjelpebeslagene, model C2.



Figur 2.172 Styrehus paneler (C2) ophæftet. Bemærk hjelpebeslagene, så den rigtige vinkel fås.



Figur 2.173 Styrehus C2 med fuldsvejste vinduesrammer.

Hovedkonklusion

Arbejdet med styrehusene har givet erfaring med opstilling og samlingsmetoder. Endvidere er der eksperimenteret med blandgas svejsning (Ar30HE70), som muliggør højere svejsehastighed og dermed lavere varme input og derfor også mindre deformation.

Adkomstforholdene for en svejsepistol er blevet verificeret.

Det er vigtigt i designet at gøre sig klart hvilken samlingsmetode, der skal bruges, således at arbejdet/samlingen bliver tilrettelagt uden lukkede områder, således at alt kan svejses uden vanskeligheder.

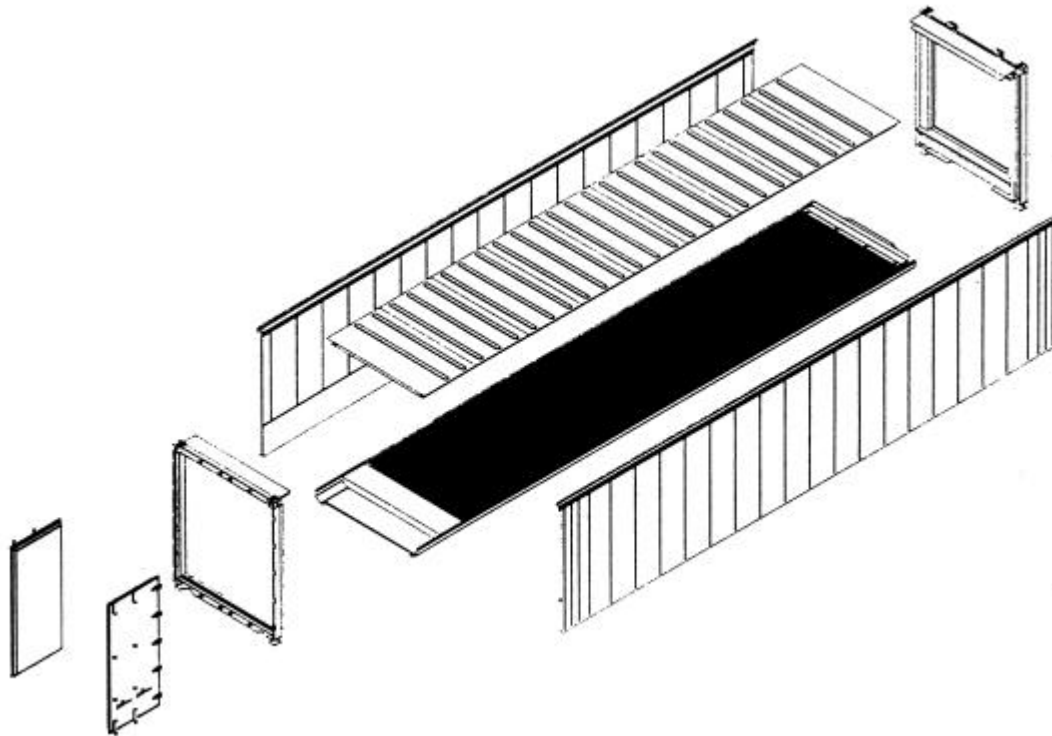
Ved vindues ramme isætning får styrehus C2 en pilhøjde i toppen, da panel og ramme udviser T-profil opførsel. endvidere er panel kanten her den smalleste af de fire kanter.

Styrehus C2 er væsentlig hurtigere at svejse, da der ikke skal laves så mange stillings-svejsninger. Vinduespanelerne laves færdige hver for sig og samles først til sidst.

Den mest produktionsvenlige konstruktion fås således, når vinduerne skæres ud før samling, da stillings-svejsning derved undgås.

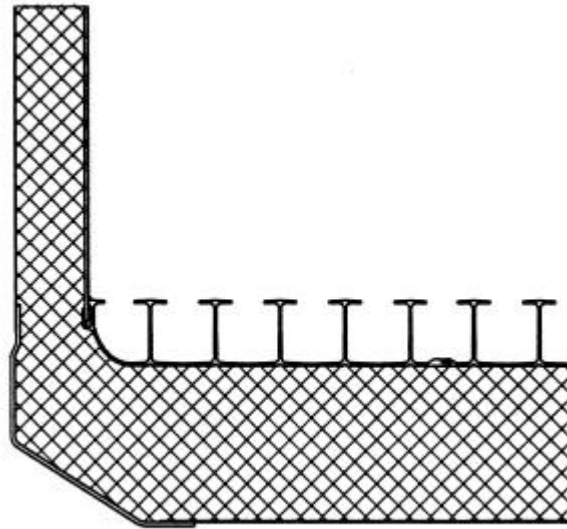
2.14.4 CASE STORY IV - BRUG AF EKSTRUDEREDE PROFILER I KØLECONTAINER

Ved fremstilling af kølecontainere (Figur 2.174) fremstilles det indvendige gulv af ekstruderede aluminiumsprofiler.



Figur 2.174 Kølecontainer.

For at opnå en cirkulation af luften i containeren er gulvet udformet som T-profiler (Figur 2.175), hvorpå lasten placeres.



Figur 2.175 Snit i T-gulv.

Den kolde luft blæses gennem T-profilerne ud under lasten og hives derefter hjem i toppen af containeren.

P.g.a. profilersnes særlige udformning er den eneste hensigtsmæssige fremstillingsmetode ekstruderede aluminiumsprofiler, der svejses sammen

Traditionelt er de indvendige tag- og sidepaneler fremstillet af rustfrit stål, der nittes sammen med hinanden samt med T-gulvet. Dette har imidlertid den konsekvens, at nitterne går løse over tid som følge af de hårde termiske påvirkninger, de bliver udsat for. Går nitterne løse mistes tætheden i samlingen, hvorved fugt kan trænge ind i isoleringen og dermed ødelægge den.

Ved udviklingen af Mærsk Container Industri's kølecontainer blev det besluttet at anvende aluminium overalt indvendigt i containeren for således at kunne svejse alle samlinger. Derved opretholdes tæthed gennem containerens levetid.

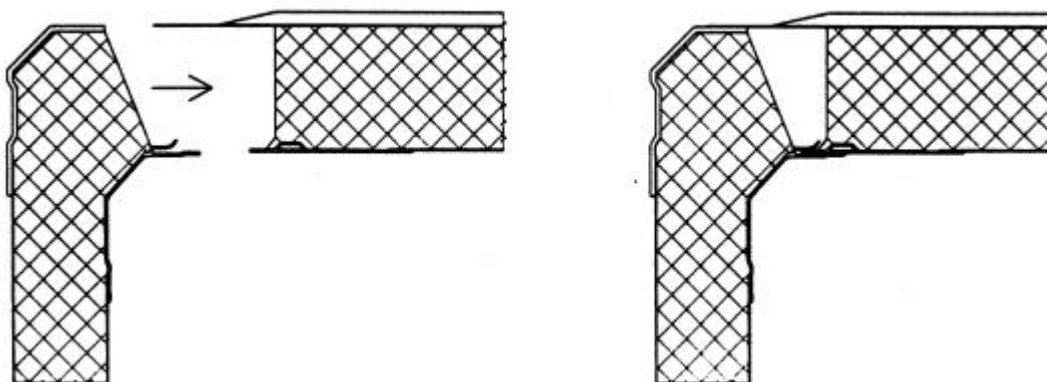
For at muliggøre sammensvejsning mellem de tynde paneler er det imidlertid nødvendigt at påsvejses et tykkere profil til panelet. Til dette formål har det været oplagt at anvende ekstruderede profiler.

En altoverskyggende fordel ved ekstruderede profiler er de næsten ubegrænsede muligheder man har med hensyn til at variere godstykkelse samt udformning af profilet i øvrigt. Ved lange profiler med en stor masse, som f.eks. T-gulvet er det af afgørende vigtighed at godstykkelsen kan optimeres i forhold til spændingerne i profilet så overdimensionering undgås.

Reduceres profilersnes tværsnits areal eksempelvis med 5%, vil det for Mærsk Container Industri betyde en årlig besparelse på over 5.000.000 Dkr.

Samling side / tag

På aluminiumspanelerne, som er henholdsvis 0,9 og 1,2 mm i tykkelsen, svejses et ekstruderet profil – se Figur 2.176.

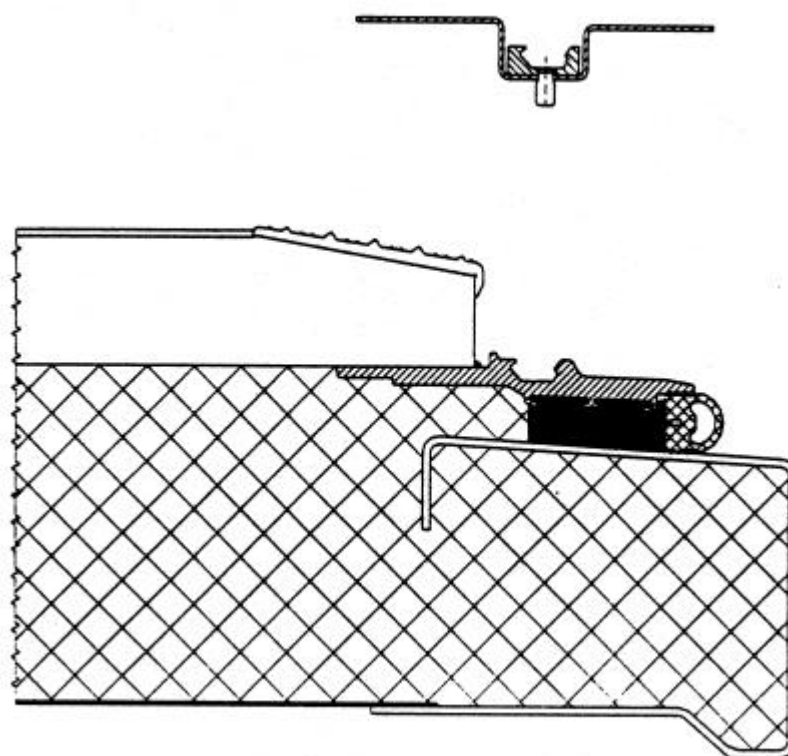


Figur 2.176 Samling af side og tag.

Begge profiler er forsynet med et specielt fang, som letter samlingen af containeren. Derudover er profilet, som er svejst på taget, forsynet med et hulprofil, der ved sammensvejsning beskytter den bagved liggende isolering mod svejsevarmen.

Dørramme

Dørrammen er et godt eksempel på flere funktioner integreret i et profil, således fungerer det viste profil – se Figur 2.177 – både som anlæg for dørpakning, vandspærre, fastgøringselement for indiv. paneler, forankring for fleksibel polyurethan støbning samt er forsynet med integreret ”gardin-spor” for fastgøring af lufttæt ”gardin”



Figur 2.177 Dørramme.

2.15 DIMENSIONERING AF STATISK BELASTEDE SVEJSESAMLINGER I ALUMINIUM EFTER EUROCODE 9

Indledning

Dette afsnit indeholder de krav, der skal opfyldes ved dimensionering af statisk belastede svejsninger efter ENV 1999-1-1: 1998, også kaldet Eurocode No. 9 (aluminiumkonstruktioner). Vi anvender fremover forkortelsen ENV9.

Den nummerering af tabeller m.v., som er anvendt i dette afsnit, er identisk med nummereringen i ENV9. Det er gjort for at lette sporbarheden.

2.15.1 MATERIALER (ENV9 KAPITEL 3)

De materialer, som vi skal beskæftige os med, er angivet i uddrag fra tabel 3.2 a i ENV9.

Uddrag fra tabel 3.2 a Nominelle værdier af 0,2%-spænding $f_{0,2}$ og trækstyrke f_u for aluminiumlegeringer i overensstemmelse med DS/EN 485-2 .

Aluminium- legering	lev.-tilstand	tykkelse	$f_{0,2}$ (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)
EN AW-3103	H14	0,2 - 25	120	140
EN AW-5754	O/H111	0,2 - 100	80	190
EN AW-5754	H24/H34	0,2 - 25	160	240
EN AW 6082	T4	0,4 - 12	110	205
EN AW 7020	T6	0,4 - 12,5	280	350

De nominelle værdier i tabel 3.2 a kaldes karakteristiske værdier.

De må ikke opfattes som tilladelige spændinger i en konstruktion. For at finde de tilladelige spændinger, også kaldet de regningsmæssige spændinger, skal de karakteristiske værdier divideres med en partialkoefficient, γ_M .

Hvor man ved dimensionering skal anvende den regningsmæssige 0,2 %-spænding, $f_{0,2,d}$, i grundmaterialet benyttes partialkoefficienten $\gamma_M = \gamma_{M1}$

$$f_{0,2,d} = \frac{f_{0,2}}{g_{M1}}$$

Hvor man ved dimensionering skal anvende den regningsmæssige brudstyrke, $f_{w,d}$, i svejsemetallet benyttes partialkoefficienten $\gamma_M = \gamma_{MW}$

$$f_{w,d} = \frac{f_w}{g_{MW}}$$

Hvor man ved dimensionering skal anvende den regningsmæssige brudstyrke $f_{a,HAZ,d}$ i den varmpåvirkede zone benyttes grundmaterialets brudstyrke f_u reduceret med faktoren ρ_{HAZ} og partialkoefficienten γ_{MW}

$$f_{a,HAZ,d} = \frac{r_{HAZ} \cdot f_u}{g_{MW}}$$

Hvis man ganger de regningsmæssige spændinger med konstruktionens modstands-egenskab, som f.eks. tværsnitarealet, finder man den regningsmæssige bæreevne.

Samlingselementer

ENV indeholder også materialekrav til diverse samlingselementer som bolte, nitter og elektroder.

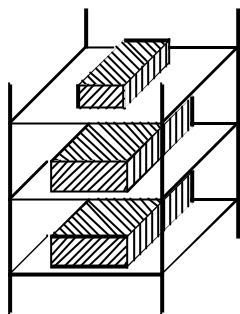
2.15.2 LASTER, KARAKTERISTISKE VÆRDIER

De belastninger, som konstruktionen udsættes for, opdeles i 3 forskellige kategorier:

- Permanente laster (F_p), f.eks. konstruktionens egenlast, udrustning, sekundære onstruktioner og fast udstyr
- Variable laster (F_v), f.eks. nyttelast, vind- eller snelaster
- Ulykkeslaste (A), f.eks. eksplosioner eller stød fra køretøjer.

Lasternes karakteristiske størrelse opgives i en lastnorm. Det må forventes, at ENV9-NAD angiver, at DS 410 skal benyttes.

Som eksempel på permanente og variable laster, kan man tage belastningen fra en lagerreol:



F_v = vægt af fyldning

F_p = egenvægt af reol

Total vægt = $F_p + F_v$

Som permanent last har man vægten af den tomme reol, mens den variable last udgøres af fyldningen.

Ligesom for materialeegenskaberne er der til lasterne også knyttet partialkoefficienter (sikkerhedsfaktorer), hvormed man ud fra de karakteristiske laster kan bestemme de regningsmæssige laster, som er de laster, der skal benyttes ved konstruktionsberegningen.

For de variable laster regnes med en partialkoefficient på 1,3 undtaget de variable naturlaster, hvor det må forventes, at der skal regnes med en partialkoefficient på 1,5.

For de permanente laster benytter man, afhængig af situationen 1,0 eller 0,85 som partialkoefficient. Vi vil her kun benytte 1,0.

Ulykkeslaster vil vi ikke beskæftige os med.

For den belastede reol er den totale regningsmæssige last:

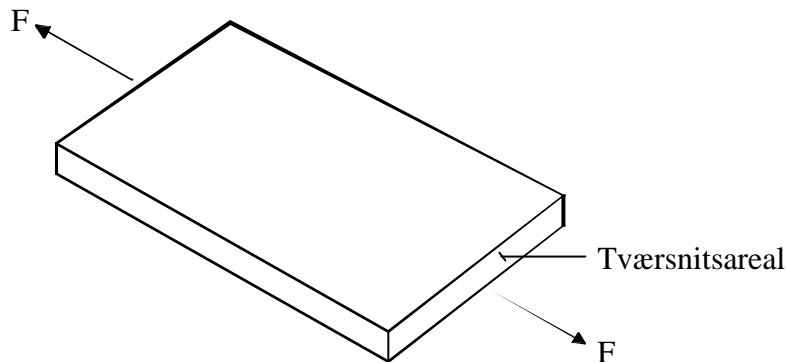
$$F_d = \gamma_{F,p} \cdot F_p + \gamma_{F,v} \cdot F_v = F_p + 1,3 \cdot F_v$$

hvor $\gamma_{F,p}$ og $\gamma_{F,v}$ er partialkoefficienterne for henholdsvis permanent- og variabel last.

2.15.3 BEREGNINGSMÆSSIGE KRAV FOR GRUNDMATERIALE

Når en konstruktion skal dimensioneres i henhold til ENV9 er kravet, at den regningsmæssige last ikke må overskride den regningsmæssige bæreevne.

Eksempel: Plade udsat for trækraften F.



Krav:

$$F \leq \frac{A \cdot f_{0,2}}{\gamma_{M1}} = N_{t,Rd}$$

hvor $N_{t,Rd}$ er den regningsmæssige bæreevne.

Udtrykket kan omskrives til:

$$s = \frac{F}{A} \leq \frac{f_{0,2}}{\gamma_{M1}}$$

Dvs. den beregnede spænding σ skal være mindre end eller lig materialets 0,2 %-spænding divideret med partialkoefficienten γ_{M1} .

Husk, at hvis kraften F indeholder både en karakteristisk permanent del, F_p , og en karakteristisk variabel del, F_v , der ikke er en naturlast, da er kravet:

$$F = F_p + 1,3 \cdot F_v \leq \frac{A \cdot f_{0,2}}{\gamma_{M1}}$$

2.15.4 BEREGNINGSMÆSSIGE KRAV FOR DEN VARMEPÅVIRKEDE ZONE HAZ

Ved svejsning i aluminiumslegeringer, der er styrkeøget ved valsning eller hærkning, forekommer der et styrketab i den varmpåvirkede zone.

I ENV9 tages der hensyn til dette ved at indføre en såkaldt "softening factor", ρ_{HAZ} .

Denne faktor ganges med udgangsmaterialets styrke for at finde den varmpåvirkede zones karakteristiske styrke.

ρ_{HAZ} er angivet i uddrag fra tabel 5.2 i ENV9

Uddrag fra tabel 5.2: HAZ Softening factor (ρ_{HAZ})

Aluminium legering	lev.-tilstand	f_u (N/mm ²)	$\rho_{HAZ, MIG}$	$\rho_{HAZ, TIG}$
EN AW-3103	H14	140	0,6	0,6
EN AW-5754	O/H111	190	1,0	1,0
EN AW-5754	H24/H34	240	0,8	0,8
EN AW 6082	T4	205	1,0	--
EN AW 7020	T6	350	0,8 (1,0)	0,6 (0,8)

2.15.5 STATISK DIMENSIONERING AF SVEJSESAMLINGER (ENV9 KAPITEL 6)

Bestemmelserne i ENV9 vedrørende svejsesamlinger gælder for:

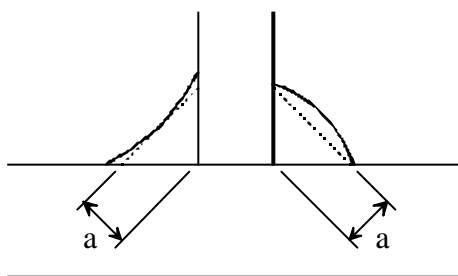
- Svejselige aluminiumlegeringer, der opfylder de tidligere omtalte materialekrav.
- MIG (Metal Inert Gas)-svejsning i alle godstykkelser.
- TIG (Tungsten Inert Gas)-svejsning i indtil 6 mm godstykkelse.

Ved statisk dimensionering af svejsesamlinger indgår svejsetilsatsmaterialets karakteristiske styrke f_w , der er angivet i uddrag fra tabel 6.8 i ENV9

Uddrag fra tabel 6.8: svejsetilsatsmaterialets karakteristiske styrke f_w

Aluminium legering	lev.-tilstand	TILSATSMATERIALETS STYRKE f_w	
		5356	4043 A
EN AW-3103	H14	-	95
EN AW-5754	O/H111	220	-
EN AW-5754	H24/H34	220	-
EN AW 6082	T4	210	190
EN AW 7020	T6	260	(210)

Kantsømme



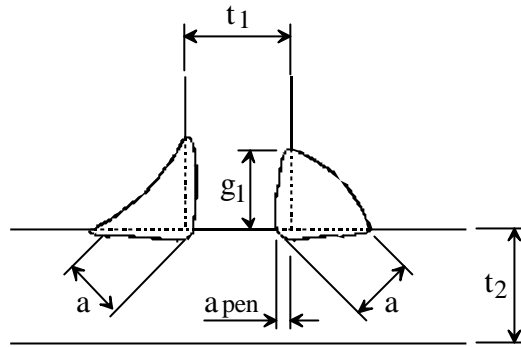
Figur 2.178 Sømtykkelse af kantsøm.

Sømtykkelsen, eller a -målet, af en kantsøm defineres som højden af den største trekant, der kan indlægges inden for svejsefladerne og svejseoverfladen, målt vinkelret på yderside af denne trekant, se figur ovenfor.

For at en kantsøm regnes fuldt bærende over hele længden, må kantsømmens længde mindst være 8 gange a -målets størrelse.

Skal en koncentreret kraft overføres gennem en kantsøm, må kantsømmens længde ikke overstige 100 gange a -målet i beregningsmæssig sammenhæng.

Hvis der kan dokumenteres en sikker indtrængning i grundmaterialet, må denne medtages i a -målet, se Figur 2.179.



Figur 2.179 Sømtykkelse af kantsøm med stor indtrængning.

For en kantsøm fremstillet ved en automatisk svejsning kan sømtykkelsen forøges med den mindste værdi af enten 20 % eller 2 mm uden forudgående prøvning.

Kantsømmes bæreevne

En kantsøms regningsmæssige kombinationsspænding σ_c må ikke overskride svejsemetallets regningsmæssige styrke:

$$\sigma_c \leq \frac{f_w}{\gamma_{MW}}$$

Hvor kombinationsspændingen σ_c er givet ved udtrykket

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)}$$

f_w = karakteristisk styrke af svejsemetallet fra tabel 6.8

γ_{MW} = partialkoefficienten for brudstyrke

σ_{\perp} = normalspænding i svejsemetallet

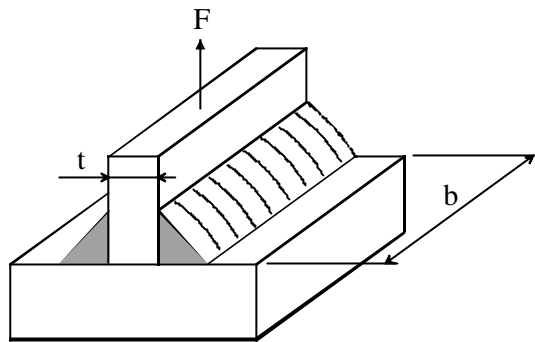
τ_{\perp} = forskydningsspænding i plan vinkelret på svejsemetallets længderetning

τ_{\parallel} = forskydningsspænding i plan parallelt på svejsemetallets længderetning

For en dobbelt kantsømsvejsning belastet vinkelret på svejsningens længderetning fås følgende udtryk for a-målets størrelse:

$$a \geq 0,7 \cdot \frac{S \cdot t}{f_w / g_{mw}}$$

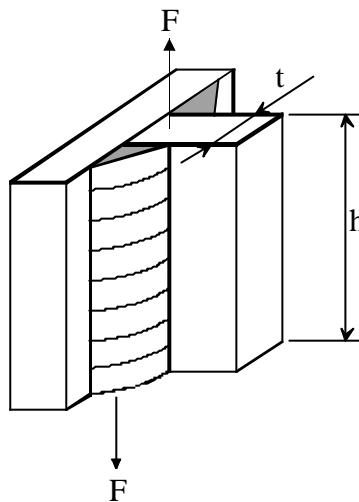
$$\text{hvor } S = \frac{F}{t \cdot b}$$



For en dobbelt kantsømsvejsning belastet parallelt med svejsningens længderetning, “ren forskydning”, fås et tilsvarende udtryk for a-målets størrelse:

$$a \geq 0,85 \cdot \frac{t \cdot t}{f_w / g_{mw}}$$

$$\text{hvor } t = \frac{F}{t \cdot h}$$



F = regningsmæssig kraft

t = pladetykkelsen af den træk-/forskydningspåvirkede plade

b = bredden af den trækpåvirkede plade

h = højden af den forskydningspåvirkede plade

Stumpsømme

En stumpsøm med fuld gennemsvæjsning defineres som en stumpsøm, hvori der er fuld indtrængning og fuld sammensmeltning af svejse- og grundmaterialet i hele samlingens tykkelse.

En stumpsøm med delvis gennemsvæjsning defineres som en stumpsøm med en samlet indtrængning, der er mindre end grundmaterialets fulde tykkelse.

Stumpsømmes bæreevne

Den regningsmæssige normalspænding σ_{\perp} i svejsemetallet i en fuld gennemsvest stumpsøm må ikke overskride svejsemetallets regningsmæssige brudstyrke:

$$s_{\perp} \leq \frac{f_w}{g_{MW}}$$

Endvidere gælder, at den regningsmæssige forskydningsspænding τ i svejsemetallet i en fuld gennemsvest stumpsøm ikke må overskride svejsemetallets regningsmæssige forskydningsstyrke:

$$t \leq 0,6 \cdot \frac{f_w}{g_{MW}}$$

2.15.6 INSPEKTION OG PRØVNING

Der findes intet nationalt anvendelsesdokument i Danmark for inspektion og prøvning, hvorfor retningslinier i Eurocode 9 må følges.

Ved kontrol af færdige svejsesømme i fågangspåvirkede konstruktioner er kvalitetskravet som gældende for sømklasse B i DS 419. (DS 419, 2001 er baseret på forslagene til Eurocode 9).

Det betyder, at man ved en besigtigelse af konstruktionen bør sikre, at alle svejsesømme er udført, og at de er placeret i overensstemmelse med tegningsmaterialet, samt at ingen svejsesømme er behæftet med grove synlige fejl (100% visuel kontrol).

Derudover skal svejsesømmene opdeles i partier, således at der for sømme inden for samme parti ikke forekommer forhold, der vil kunne give anledning til eventuelle forskelle i kvaliteten.

Disse partier skal underkastes en nøjere ikke-destruktiv kontrol, som for svejsesømme i klasse B ved "normal kontrol" omfatter en undersøgelse af mindst 20% af den samlede sømlængde, repræsentativt fordelt. Kvaliteten skal for alle undersøgte dele af sømmene mindst svare til karakter 3 (level C efter DS/EN 30042)

Såfremt der konstateres karakterer lavere end 3, skal kontrollen af det pågældende parti udvides til "fuldstændig kontrol", omfattende sømmene i deres fulde udstrækning. Kvaliteten af sømmene skal herved overalt mindst svare til karakter 3.

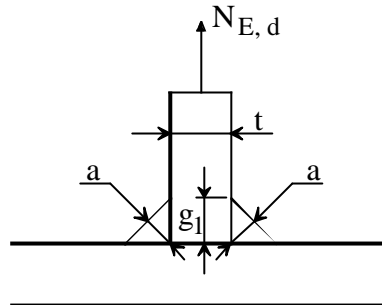
Kravene er opsummeret i følgende tabel:

Tabel 2.5 Kontrol af sømme i klasse B.

Kontrol	Omfang	Karakter	Konsekvens
normal kontrol	20%	≥ 3	godkendt
		< 3	fuldstændig kontrol + reparation
fuldstændig kontrol	100%	≥ 3	godkendt
		< 3	reparation

2.15.7 APPENDIX A: OVERSIGT OVER FORMLER TIL BEREGNING AF STATISK BELASTEDE SVEJSTE SAMLINGER I ALUMINIUM EFTER EUROCODE 9

Dobbelte kantsømme :



Svejsesøm:

$$N_{E,d} = 2 \cdot a \cdot 1 \cdot f_w \cdot \frac{0,7}{g_{MW}}$$

$N_{E,d}$ = regningsmæssig bæreevne

a = sømtykkelse

Varmepåvirket zone i tværsnit i grundmaterialet:

$$N_{E,d} = t \cdot 1 \cdot r_{HAZ} \cdot \frac{f_u}{g_{MW}}$$

l = sømlængde pr. søm

f_w = svejsemetallets brudstyrke

t = pladetykkelse

ρ_{HAZ} = styrkereduktionsfaktor

Bookmark not defined.

f_u = grundmaterialets brudstyrke

g_1 = benlængde i kantsøm

Varmepåvirket zone langs benlængden i kantsømmene:

$$N_{E,d} = 2 \cdot g_1 \cdot 1 \cdot r_{HAZ} \cdot f_u \cdot \frac{0,6}{g_{MW}}$$

A = grundmaterialets tværsnitsareal

$f_{0,2}$ = grundmaterialets 0,2 % -spænding

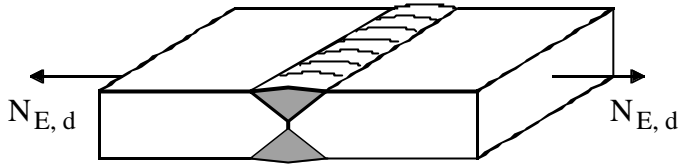
γ_{MW} = partialkoefficient for brudstyrke

γ_{M1} = partialkoefficient for elasticitetsgrænse

Grundmaterialet:

$$N_{E,d} = A \cdot \frac{f_{0,2}}{g_{M1}}$$

Stumpsømme med fuld gennemsvæjsning:



Svejsesøm

For normalkræfter alene:

$$N_{E,d} = A \cdot \frac{f_w}{\gamma_{MW}}$$

Varmepåvirket zone i tværsnit i grundmaterialet:

$$N_{E,d} = t \cdot b \cdot r_{HAZ} \cdot \frac{f_u}{\gamma_{MW}}$$

Grundmaterialets bæreevne:

$$N_{E,d} = A \cdot \frac{f_{0,2}}{\gamma_{M1}}$$

$N_{E,d}$ = regningsmæssig bæreevne

A = grundmaterialets tværsnitsareal vinkelret på kraften

f_w = svejsemetallets brudstyrke

t = pladetykkelse

b = pladebredde

ρ_{HAZ} = styrkereduktionsfaktor

f_u = grundmaterialets brudstyrke

$f_{0,2}$ = det svageste grundmateriales 0,2 %-spænding

γ_{MW} = partialkoefficient for brudstyrke

γ_{M1} = partialkoefficient for elasticitetsgrænse

2.16 REFERENCER

Litteratur

- [1] **Det Norske Veritas**, *Rules for Classification of Ships*, Section 13 “Direct Strength Calculations”.

- [2] **Timoshenko S. P. / Gere, James M.**, *Mechanics of Materials*, Section 10, ISBN 0-442-29996-6.

- [3] **Hudges, Owen F.**, *SNAME, Ship Structural Design*, ISBN 0-939773-04X, John Wiley & Sons, Inc., 1983.

- [4] Værdier og formler udledt fra: **Det Norske Veritas**, *Rules for Classification of High Speed and Light Craft*.

- [5] Formel udledt på basis af: **Lloyds Register**, *Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft*.

- [6] **Andersen, Michael Rye, Birk-Sørensen, Martin, Friis Hansen, Peter**, *Probabilistic Fatigue Damage Analysis of a Shape-Optimized Slot Design*, Marine Technology, Vol. 35, No. 4, October 1998, pp. 219-227.

- [7] SOLAS, Consolidated Edition 2001, International Maritime Organization, London (IMO-110E).

- [8] ISO 834-1975 (E), *Fire Resistance Tests – Elements of Building Constructions*.

- [9] CEN/TC 250/SC 9: ENV 1999-1-2, *Design of Aluminium Structures*, Part 1.2, Structural Fire Design, 1997.

- [10] European Aluminium Association under EU Leonardo da Vinci projektet, *Training in Aluminium Application Technologies TALAT*, CD-ROM Ver. 2.0, EAA, Brussels, 1999.

- [11] CEN/TC 250/SC 1: ENV 1991-2-2, *Basis Design and Actions on Structures*, Part 2.2, Actions on Structures Exposed to Fire, 1995.
- [12] CEN/TC 250/SC 9: ENV 1999-1-1 Design af aluminium structures. Part 1.1. General Rules. 1998.

Supplerende litteratur

- [13] MNC handbook nr. 12, Aluminium Konstruktions- och materiallära, Utgåve 2, december 1989, Metalnormcentralen, SIS, Sverige.
- [14] SAPA, Handbok för konstruktörer, 1995, Sverige.
- [15] SAPA, *Aluminium Extrusion Manual*, 1997, Sverige (engelsk udgave af ref. 14).
- [16] ÅSV Danprofil A/S, Håndbog i aluminiumsprofiler, 1981.
- [17] DTI, *Materialegenskab Aluminium, Al*, 1. udgave, 2. oplag, 1997.
- [18] Alumeco, *Lager-Leveringsprogram*, Aluminium, Odense, 1998.
- [19] **Hval, M**, *Aluminium i hurtiggående skip. Design og fabrikasjonsmetoder*, Hydro Aluminium Maritime, Raufoss, 1996.
- [20] **Jahnsson, Mark**, *3-Dimensional extrusion with the Markram-method*. Markram Development AB, 2000.

Tekniske rapporter

- SASAK-RAP-DE-AKS-KEH-0010-01, *Comparison of Different Types of Welded Joints in Aluminium Structures Using Finite Element Calculations*.
- SASAK-RAP-MO-AKS-KEH-001-03, *Model arbejde*.

3 Svejsning

3.1 SVEJSNING AF ALUMINIUM - INTRODUKTION

Svejseligheden af aluminium og aluminiumlegeringer kan i bred almindelighed siges at være god. Det er dog ikke helt underordnet, hvilken legeringstype, der svejses, eller hvilken svejsemetode, der anvendes.

I det følgende gennemgås svejseligheden for aluminium og dets legeringer. Valg af tilsatsmateriale, svejseprocesserne samt andre svejserelaterede forhold behandles i de efterfølgende afsnit.

3.1.1 SVEJSELIGHED AF RENALUMINIUM SAMT IKKE-MODNINGSHÆRDBARE LEGERINGER

Fælles for renaluminium og de ikke-modningshærdbare legeringer er, at de kun kan opnå en styrkeforøgelse gennem deformationshærdning. Ofte slås disse to grupper også sammen, således at renaluminium betragtes som en ikke-modningshærdbar legering (sometider kaldet ikke-varmhærdbare legeringer). Til dette afsnit hører hovedgrupperne:

- Renaluminium, med varierende indhold af urenheder (over 99% Al, 1000-serien)
- AlMg-legeringer, hvor magnesium er hovedlegeringselement (5000-serien)
- AlMn-legeringer, med mangan som hovedlegeringselement (3000-serien)

Generelt er disse materialer udmærket svejsebare. Styrkeøgningen ved deformationshærdning vil dog i det væsentlige gå tabt i den varmpåvirkede zone, så den ikke er større end i blødgødet tilstand. Dette behandles yderligere i dette kapitels afsnit 3.13.

Al-Mn legeringerne (3000-serien) indeholder normalt omkring 1-1,2% Mn, og er med hensyn til egenskaber de legeringer, der ligner renaluminium mest. Forskellen ligger egentlig kun i forbedret styrke og korrosionsbestandighed. I lighed med renaluminium er svejsbarheden god.

Al-Mg legeringerne (5000-serien) hører til dem, der kan have størst interesse i forbindelse med svejste konstruktioner, idet disse er ret stærke selv i blødgødet tilstand (der kan stadig bibeholdes en rimelig styrke i HAZ). AlMg legeringer benyttes normalt med et Mg-indhold på op til ca. 5%. Ved et Mg-indhold på 2-3% har aluminium en vis tendens til at danne varmrevner, hvorfor det kan være en fordel at anvende en tilsatstråd, der ”trækker” legeringssammensætningen over i et mere gunstigt område. Dette behandles i afsnit 3.3 (tilsatsmaterialer).

Al-Mg-Mn legeringer såsom den til skibe typisk anvendte legering 5083 har i lighed med Al-Mg legeringerne en forholdsvis høj styrke i blødgødet tilstand, hvorfor disse også er velegnede til svejste konstruktioner. Al-Mg-Mn legeringerne indeholder op til ca. 5% Mg og ca. 1% Mn. Normalt tilsættes de mindre mængder Cr og Ti – dermed modvirkes grovkorndannelse og tendens til varmrevner, således at svejseligheden også for Al-Mg-Mn må betegnes som god.

3.1.2 SVEJSELIGHED AF MODNINGSHÆRDBARE LEGERINGER

De modningshærdbare legeringer omfatter:

- 2000-serien (Al Cu)
- 6000-serien (Al MgSi)
- 7000-serien (Al Zn)
- 8000-serien (andre, typisk Li-legerede)

Legeringerne kan tilføres en markant styrkeøgning ved modningshærdning. Denne styrkeøgning går normalt tabt i den varmpåvirkede zone (HAZ). Visse legeringer i 7000-serien kan genvinde det meste af den tabte styrke over en periode ved stuetemperatur, men ellers må man enten affinde sig med styrketabet eller foretage en opløsningsglødning og fornyet modning af emnet efter svejsning, hvis dette er praktisk muligt.

AlCu-legeringerne (2000-serien) kan desværre ikke anses for svejselige på grund af en betydelig varmvnetilbøjelighed. Afsnit 3.3 (tilsatsmaterialer) behandler dog mulighederne for lysbuesvejsning af visse legeringer i 2000-serien.

AlMgSi-legeringerne (6000-serien) indeholder op til 1% Mg og Si. Disse legeringer er meget benyttede til ekstruderende profiler. Disse opløsningsglødes og modnes ved varmluft i forbindelse med ekstruderingsprocessen. Svejsbarheden er god, men der skal generelt anvendes tilsatsmateriale af hensyn til en relativt høj varmvnerisiko (se afsnit 3.3).

AlZnMg-legeringerne (7000-serien) må siges at være interessante attraktive i forbindelse med svejste konstruktioner ud fra et styrkesynspunkt. En stor fordel ved flere af AlZnMg-legeringerne er, at modningen kan ske ved stuetemperatur, således at en betydelig del af den tabte styrke i HAZ kan genvindes. Disse kaldes sommetider selvmodnende eller selvhærdende.

AlZnMg-legeringerne indeholder ca. 4-5% Zn og 1-3% Mg. Små tilsætninger af Mn (størrelsesordenen ca. 0,5%) fremmer styrkeegenskaberne, og forbedrer bestandigheden mod spændingskorrosion (stabiliserer strukturen). Høje trækspændinger i korrosive miljøer er dog ofte disse legeringers "akilleshæl".

3.1.3 SVEJSELIGHED AF STØBELEGERINGER

I almindelighed er støbelegeringerne svejselige. Nemmest at svejse er dog de siliciumlegerede, som bør svejses med 6 til 12% AlSi elektroder. Disse legeringer har et lavt smeltepunkt (silicium virker nedsættende på smeltetemperaturen), og størkningen foregår i et relativt lille temperaturinterval. Krympningerne er ligeledes beherskede.

Styrkemæssigt sker der for de almindelige støbelegeringer ikke nogen reduktion, da strukturen i og ved svejsningen ikke er svagere end den øvrige støbestruktur. Der findes dog støbelegeringer, der er modningshærdbare, og for disse vil en hærdning naturligvis gå tabt ved svejsningen – analogt med de modningshærdbare valselegeringer. Skal styrken genvindes, må hele emnet varmebehandles på ny. I så fald er det formålstjenligt at tilsatsmaterialet ved svejsningen svarer til grundmaterialet i sammensætning, således at man opnår en ensartet styrke overalt.

I støbegods vil der ofte forekomme store tværsnitsændringer og dermed komplicerede spændingsfordelinger. Derfor er det anbefalelsesværdigt at forvarme emnerne før svejsning, samt sørge for en langsom afkøling.

Trykstøbte legeringer er ofte vanskelige eller umulige at smeltesvejses på grund af, at disse materialer er temmelig porøse, hvilket giver store poreproblemer i svejsningerne. Ved anvendelse af Friction Stir svejsning er der opnået gode resultater ved svejsning af temmeligt porøse, trykstøbte legeringer til valselegeringer.

3.1.4 REFERENCER

Supplerende litteratur

- [1] *Successful Welding of Aluminium*
WTIA Technical Note No. 2
Welding Technology Institute of Australia, 1997

- [2] *Welding Aluminum; Theori and practice*
Aluminum Association, 1997

- [3] *Goda råd vid Aluminiumsvetsning*
Svetskommissionen, 1997

- [4] *Schwerßen und Hartlöten von Aluminiumwerkstoffen*
Schoer, Heinz
DVS, 1998.

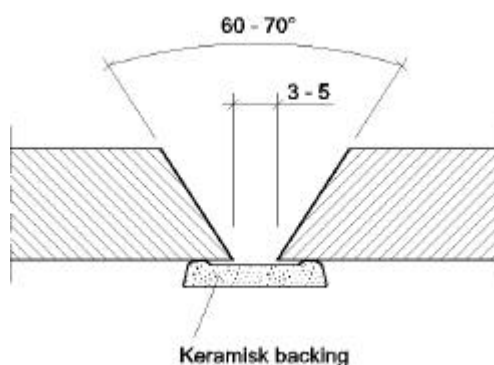
3.2 UDFORMNING AF SVEJSESAMLINGER

3.2.1 UDFORMNING AF SVEJSESAMLINGER MED HENSYN TIL PRODUKTIVITET

De konstruktive og dimensioneringsmæssige aspekter ved udformningen af svejsesamlinger er behandlet i kapitel 2. Når svejsesamlinger skal udformes, vil der imidlertid ofte skulle tages stilling til et dilemma mellem konstruktørens ønske om en "ideel", fuldt gennemsvæjst samling og hensynet til produktivitet.

Ved almindelig lysbuesvejning med TIG og MIG vil følgende forhold generelt gøre sig gældende:

- **Kantsømme** er meget nemme og hurtige at udføre. Tilpasning er typisk ikke noget problem.
- **Overlapsømme** er ligeledes nemme og hurtige at udføre. Blot pladerne kan trykkes mod hinanden, undgås tilpasningsproblemer praktisk talt helt.
- **Stumpsømme** er relativt set de dyreste og sværeste at fremstille. Dette beror ikke mindst på, at bundstrengene relativt set er vanskelige og tidskrævende at udføre.
- Kan der anvendes **backing** (rod støtte) under stumpsømme, lettes svejsearbejdet en del. Der kan både være tale om keramisk backing, som kun indgår som midlertidig rod støtte og herefter fjernes (Figur 3.1), eller blivende backing. Den blivende backing kan være et fladt profil, sådan som det typisk anvendes på stålkonstruktioner, eller en "indbygget", blivende backing (Figur 3.2).

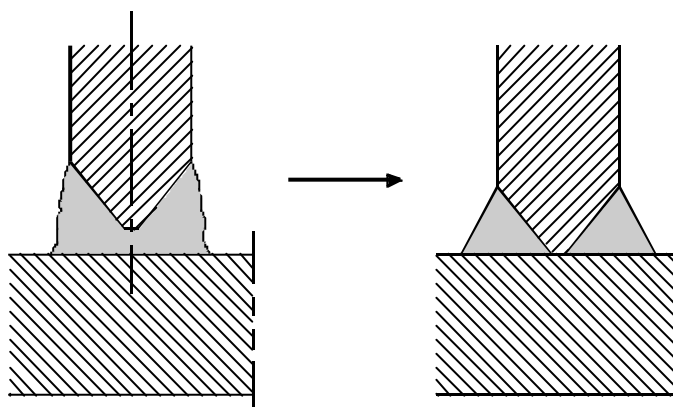


Figur 3.1 Svejsning af stumpsøm mod keramisk backing.



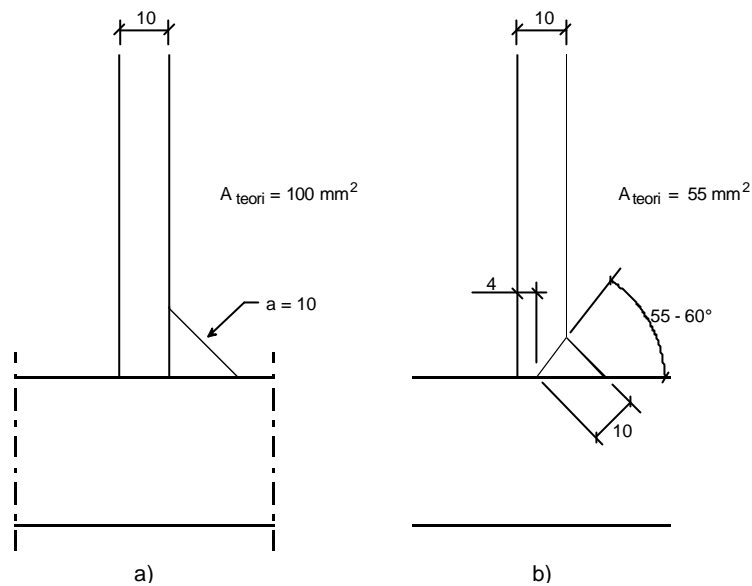
Figur 3.2 Tværsnit af svejsning mellem to ekstruderede profiler med indbygget rodstøtte (T-floor, Mærsk Container Industri A/S).

- Der kan være en stor gevinst ved at anvende **partielt skærpede fuger i stedet for fuldt gennemsvejste sømme**. Et typisk tilfælde er Tsamlinger, hvor bundstrengen er nemmere at svejse, endda med 2-4 gange højere hastighed. Ved 2-sidig svejsning spares desuden en oprensning af rodsiden (Figur 3.3). En sidegevinst er færre spændinger og deformationer som følge af svejsningen.



Figur 3.3 Ved partiel gennemsvejsning lettes opstillingen, bundstrengen kan svejses 2-4 gange hurtigere, og ved 2-sidig svejsning spares en oprensning af rodsiden.

- Ved kantsømme med a-mål over ca. 8 mm bør det ligeledes overvejes at anvende partielt gennemsvejste samlinger i stedet (Figur 3.4). Herved spares ikke så lidt svejsemetal og dermed svejsetid og tilsatsmateriale (typisk 40-50%). Disse gevinster skal holdes op mod omkostningen til den ekstra operation, som skærpingen vil afstedkomme.



Figur 3.4 Ved at ændre kantsømme med a-mål på over ca. 8-10 mm kan der spares en del svejsemetal og dermed svejsetid.

Ønsket om anvendelse af en bestemt svejseproces kan påvirke valget af samlingstype. Dette kapitals afsnit 3.4 (valg af svejseproces) giver en generel oversigt over de forskellige svejseprocessers egnethed i forbindelse med forskellige samlingstyper.

3.2.2 UDFORMNING AF SVEJSESAMLINGER UNDER HENSYNTAGEN TIL ADKOMST

Ud over, at samlingen generelt bør være så nem at svejse som muligt, bør den også være placeret, så adkomstforholdene tillader svejseren at komme til med sin svejsebrænder. Som en hovedregel skal brænderen kunne rettes mod vinkelhalveringslinien af fugeåbningen (for kantsømme: vinkelhalveringslinien mellem de to plader). Dertil skal svejseren kunne komme til med sin arm samt hoved inklusive svejsehjelm.

Ved robotiseret svejsning er der helt faste, fysiske grænser for adkomstforholdene, som dog vil variere fra robot til robot og svejsebrændere imellem. Ofte er der kun én sikker vej til vurdering af, om adkomstforholdene ikke fremtvinger en kollision mellem robotarm og emne, nemlig en computersimulering. Der er udviklet værktøjer til dette formål, som ved samkøring af et CAD-design og forskellige modeller af robotter i simulerede svejseforløb hurtigt kan give informationer om kollisionsrisici og cyklostider.

I kapitel 2 (Dimensionskriterier) samt dette kapitals afsnit 3.18 (Kvalitetssikring) behandles forskellige aspekter vedrørende adkomstforholdene yderligere.



Figur 3.5 Svejsesamlinger bør designes og tilrettelægges, så de tager hensyn til adkomstforholdene. Her er svejseren tydeligvis sat på en hård prøve! Måske kunne stiveren have været svejst på den anden side af pladen, eller måske endda svejst énsidigt fra venstre side?

3.2.3 DETAILUDFORMNINGER AF SVEJSESAMLINGER - FUGEFORBEREDELSE

Forslag til detailudformning af fuger til TIG- og MIG-svejsning findes i dette kapitels afsnit 3.16 (fugeforberedelse).

3.2.4 REFERENCER

Supplerende litteratur

- [5] *Successful Welding of Aluminium*
WTIA Technical Note No. 2
Welding Technology Institute of Australia, 1997.

- [6] *Welding Aluminum; Theory and practice*
Aluminum Association, 1997.

- [7] *Goda råd vid Aluminiumsvetsning*
Svetskommissionen, 1997.

Tekniske rapporter

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0008, *Fugeforberedelse ved svejsning af aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0025, *Økonomiske beslutningsværktøjer ved valg af svejse- og produktionsproces*

SASAK-RAP-MO-AKS-KEH-0001, *Fremstillning af store modeller hos Bilcon*

3.3 TILSATSMATERIALER TIL SVEJSNING AF ALUMINIUM

3.3.1 TILSATSMATERIALER I RELATION TIL PROCESSER

Massiv tråd

Ved svejsning af aluminium anvendes næsten udelukkende tilsatsmaterialer i massiv trådform. Disse indgår i de absolut mest anvendte processer, TIG og MIG. Dette står i nogen kontrast til, hvad mange vil være vant til ved svejsning af stål, hvor brugeren står over for valget mellem en bredere række processer og tilsatsmaterialer.

Massiv tråd på spoler anvendes både til MIG-svejsning og som tilsatsmateriale ved automatiseret TIG-svejsning, plasmavejsning og lasersvejsning.

Til Manuel TIG-svejsning anvendes massiv tråd i stænger, normalt i længder på 900-1000 mm.

I de følgende afsnit vil især forskellige aspekter i forbindelse med massive tråde blive yderligere belyst.

Beklædte elektroder

Den første og mest basale proces, vordende svejsere lærer at kende i forbindelse med svejsning af stål, er lysbuesvejsning med beklædte elektroder. Et meget naturligt og ofte stillet spørgsmål er, hvorvidt der findes beklædte elektroder til aluminium. Der *findes* elektroder med en særlig flusbeklædning, men:

Beklædte elektroder til aluminium må betegnes som en absolut nødløsning, og kan ikke anbefales til almindelige konstruktionsopgaver. Dette skyldes primært, at det er vanskeligt at opnå en tilfredsstillende geometrisk svejse kvalitet.

De beklædte elektroder kan til gengæld have deres (begrænsede) berettigelse i forbindelse med mere eller mindre midlertidige reparationsopgaver, når man er langt fra et værksted – typisk på fiskefartøjer i rum sø.

SASAK rapporten SV-0036 beskriver nogle erfaringer med svejsning med beklædte elektroder.

Pulverfyldt rørtråd

Set i lyset af pulverfyldte rørtrådes store fordele og succes ved svejsning af stålkonstruktioner kan det være nærliggende at stille det spørgsmål, som jævnligt høres: Findes der tilsvarende rørtråde til aluminium?"

Svaret kan gøres kort: Pulverfyldte rørtråde findes *ikke* til aluminium.

Der er flere forklaringer på dette. Rørtråde er kendetegnet ved en ydre metalkappe omkring en pulverkerne, som består af lysbuestabiliserende stoffer, slaggedannere og/eller metalpulver (samme materiale som tråden eller legeringselementer). Allerede hér, ved rørtrådenes udformning og fremstilling, står man overfor to afgørende problemer, som gør rørtråde til aluminium urealistisk med dagens teknologier:

- Den meget tynde kappe ville være meget vanskelig at fremstille, og tråden vanskelig at trække, uden at den går i stykker.
- Skulle det lykkes at fremstille en aluminium rørtråd, ville man herefter stå overfor alvorlige trådfremføringsproblemer på grund af den relativt bløde kappe.

3.3.2 TRÅDDIAMETER

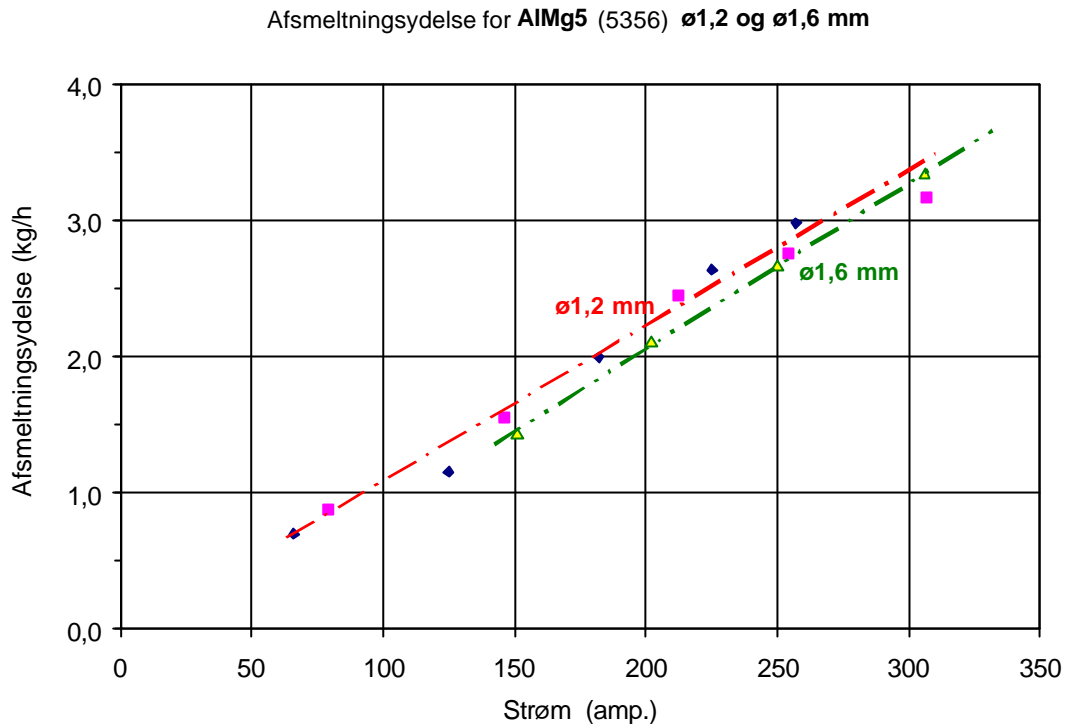
Tråde på spoler findes typisk i diametre fra 0,8 til 2,4 mm.

Der findes producenter, som tilbyder at levere dimensioner ned til $\varnothing 0,6$ mm, men generelt må man være opmærksom på, at trådfremføringen meget nemt kan være et problem i de mindre dimensioner (under $\varnothing 1,2$ mm). For de blødere tråde såsom AISi5 kan selv $\varnothing 1,2$ mm være problematisk, og stille store krav til trådfremføringsudstyr, slangepakker, pistoler og kontaktdyser.

I den øvre ende findes tråde på op til $\varnothing 4$ mm, som anvendes til MIG-svejsning med mekaniseret fremføring i store godstykker. Svejsepistolen fastgøres til en pulversvejsetraktor, og der anvendes store pulversvejsestrømkilder til at levere den nødvendige svejsestrøm på over 1000 ampere. Dette har man blandt andet gjort i England i nogle år, og på et finsk skibsværft anvendes metoden til sammenføjning af 40 mm aluminiumplader (Y-fuge, svagt lodret-stigende).

De dominerende dimensioner til MIG-svejsning er dog 1,2 og 1,6 mm, som dækker opgaver og godstykker, der oftest arbejdes med i aluminium.

Tråde af mindre dimensioner giver en lidt højere afsmeltningsydelse for en given strøm, men forskellen er for aluminiumtråde meget mindre end for stål og især rustfrit stål. Figur 3.6 viser afsmeltningsydelsen ved MIG-svejsning med AlMg5 tråde i henholdsvis $\varnothing 1,2$ mm og $\varnothing 1,6$ mm, baseret på registreringer i SASAK-projektet.



Figur 3.6 Afsmeltningsydelse ved MIG-svejsning med AlMg5 tråde i henholdsvis \varnothing 1,2 mm og \varnothing 1,6 mm.

3.3.3 VALG AF TILSATSMATERIALE LEGERING

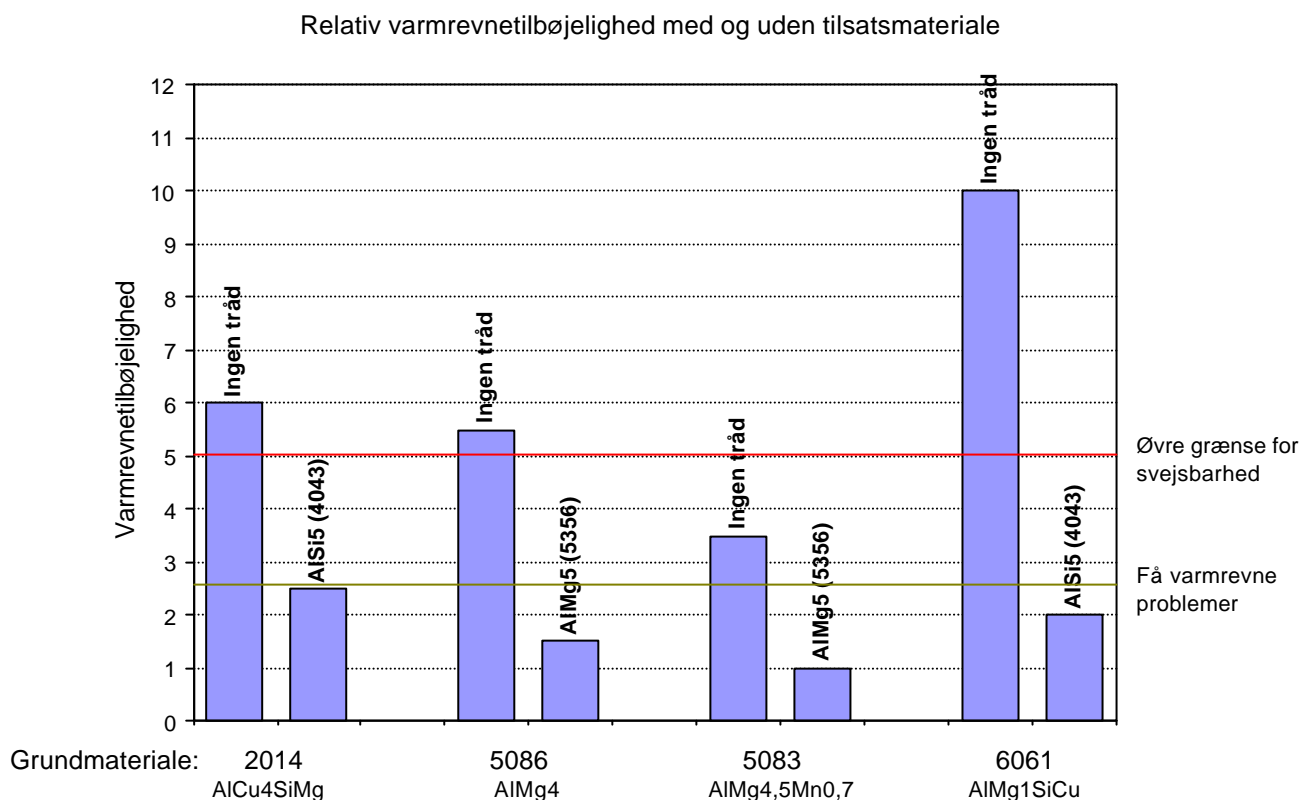
Valg af tilsatsmaterialer til aluminium vil være dikteret af forskellige krav til slutproduktet samt muligheden for at det lykkes at gennemføre svejsningen med godt resultat. Følgende kriterier og krav kan opstilles:

- Styrke
- Duktilitet
- Korrosionsbestandighed
- Egnethed til driftstemperaturer over 65°C (dvs. max. 3% Mg)
- Tendens til varmvævner under svejsning
- Farveoverensstemmelse efter anodisering

Sommetider vil det være nødvendigt at anvende et tilsatsmateriale alene for at undgå varmvævner.

Figur 3.7 viser den relative varmvævnetilbøjelighed ved svejsning af forskellige legeringer henholdsvis med og uden tilsatsmateriale. 6000-legeringer (AlMgSi) vil have en udpræget tendens til at varmvævne, hvis man forsøger at svejse dem uden tilsatstråd (f.eks. TIG eller plasmavejsning af stumpsømme uden skærping). Som så ofte inden for svejsning er forholdene dog ikke helt sort/hvide. Størkningsforhold og indspændingsforhold spiller også vigtige roller, og i SASAK er der produceret

adskillige meter plasmasvejste stumpsømme uden tilsatstråd i blandt andet legering 6061 uden en eneste varmvæne.



Figur 3.7 Relativ varmvænetilbøjelighed ved svejsning af forskellige legeringer med og uden tilsatsmateriale, [2].

Valg af rette tilsatsmateriale kan godt synes temmeligt indviklet ud fra de ovennævnte kriterier. I praksis behøver livet ikke altid være så kompliceret – en lang række opgaver kan endda klares med enten AlMg5- eller AlSi5-tilsatsmaterialer.

Figur 3.8 viser et skema, som er udfærdiget i forbindelse med SASAK. For hver kombination af tilsatsmaterialer gives et all-round ”førstevalg”. I tilfælde af særlige krav og kriterier, som overskygger alle andre, gives alternativer med bedre egenskaber på enkelte punkter. Normalt vil det betyde, at der gives køb på andre områder.

Første grundmateriale legering (inddelt i grupperinger)		Anden grundmateriale legering (inddelt i grupperinger)									
		= Første legering (el. gruppering)	7005	6005A 6060 6061 6063 6082 6351 *)	5154A 5454 5754	5083 5086	5052 5251	5005 5050	3004 3105	3003 3203	2014 2036 2219
AA Int. Reg.	ISO										
1050A	Al 99,5	1100	5356	4043	4043	5356	4043	4043	4043	1100	4145
1100	Al 99,5Cu	4043 (S,K)	4043 (K,C,T)	5183 (S,A)	5356 (S,D,A)		5356 (S,D,A)	5356 (D,A)	5356 (S,D,A)	4043 (S,K)	4043
1080A	Al 99,8(A)			5356 (S,A)	5554 (S,C,D,A)			5183 (D,A)	5554 (A ved T)		4047
1200	Al 99,0							1100 (T,A)			
2014	Al Cu4SiMg	4145	-	4145	-	-	-	4145	4145	4145	
2036	(2,6Cu 0,3Mn 0,5mg)	2319									
2219	Al Cu6Mn	2319	4043	4043	4043	-	4043	4043	4043	4145	
3003	Al Mn1Cu	1100	5356	4043	4043	5356	4043	4043	4043	1100	
3203	(ingen ekv.)	4043 (S,K)	4043 (K,C,T)	5183 (S,A)	5356 (S,D,A)		5356 (S,D,A)	5356 (D,A)	5356 (S,D,A)	4043 (S,K)	
				5356 (S,A)	5554 (S,C,D,A)			5183 (D,A)	5554 (A ved T)		
								1100 (T,A)			
3004	Al Mn1Mg1	4043	5356	4043	5356	5356	4043	4043	4043		
3105	Al Mn0,5Mg0,5	5356	4043 (K,T)	5356 (S,D,A)	5183 (S)	5183 (S)	5183	5356 (S,D,A)			
		5183 (D,A)	5183 (S)	5183 (S,D,A)	4043 (V,T)		5356 (S,D,A)				
		5554 (S,D,A v.T)	5554 (T)	5554 (T)	5554 (T)						
5005	Al Mg1(B)	4043	5356	4043	5356	5356	4043	4043			
5050	Al Mg1,5(C)	5356 (S,D,A)	5554 (T)	5356 (S,D,A)	5183 (S)		5356 (S,D,A)				
			4043 (T)		4043 (V,T)						
					5554 (T)						
5052	Al Mg2,5	5356	5356	5356	5356	5356					
5251	AlMg2	5183 (S)	4043 (T)	5183 (S)	5183	5183 (S)					
		5654 (C,A)	5554 (T)	5654 (C)	5556 (S)						
		5554 (T,A v. T)		5554 (C,T)	4043 (V,T)						
		4043 (V,T)		4043 (V,C,T)	5554 (C,T)						
5083	Al Mg4,5Mn	5183	5183	5356	5356	5183					
		5356 (D)	5356 (D)	5183 (S)	5183 (S)	5183 (S)					
					5554 (C)						
5086	Al Mg4	5356	5356	5356	5356	5356					
		(ellers som 5183)	(ellers som 5183)	(ellers som 5183)	(ellers som 5183)	(ellers som 5183)					
5154A	Al Mg3,5(A)	5356	5356	5356	5356	5356					
		5654 (spec.)	5554 (T)	4043							
5383	(ingen ekv.)	5183	5183	5356	5356	5356					
5454	Al Mg3Mn	5554	5356	5356							
		5183 (V,S)	5183 (S)	4043 (V,C,T)							
			5554 (T)	5654 (C)							
5754	Al Mg3	5554	5356	5356							
		5356 (V,S)		5183							
		5654									
6005A	Al SiMg(A)	4043	5356								
6060	Al MgSi	5183	5183 (S)								
6061	Al Mg1SiCu	5356 (C,D,A)	4043 (T)								
6063	Al Mg0,7Si	5554 (A ved T)	5554 (T)								
6082	Al SiMgMn										
6351 *)	Al Si1Mg0,5Mn										
7005	Al Zn4,5Mg1,5Mn	5356									
		5183 (S)									

Skema til valg af tilsatsmaterialelegering

Forslag til tilsatsmateriale findes ved at gå vandret ud fra første grundmateriale og lodret ned fra andet grundmateriale.

Bemærkninger:

Angivelser med fed skrift er generelle førstevalg

De følgende angivelser er alternativer under følgende forhold:

S = Bedre styrke

D = Bedre duktilitet (evne til deformation)

C = Bedre korrosionsmodstand i ferskvand eller saltvand (max. 65°C)

T = Egnet til temperaturer over 65°C

V = Bedre modstand mod varmvævn under svejsning

A = Bedre farveoverensstemmelse ved anodisering

*) Legeringerne 6101, 6106 og 6261 falder også ind i denne gruppe

Tilsatsmatr. 5356, 5183, 5556 og 5654 egner sig ikke til drifttemp. over 65°C
Det eneste tilsatsmatr. i 5000-serien, der tåler temperaturer over 65°C, er 5554

Figur 3.8 Generelle anbefalinger til valg af tilsatsmaterialer.

3.3.4 LEGERINGSELEMENTER OG LEGERINGSTYPER

Magnesium (Mg):

Magnesium tilsættes i mængder op til ca. 7%. Styrken øges med stigende Mg-indhold. Ved mindre tilsætninger af Mg fås en forhøjet risiko for varmvævner i svejsemetallet (se Figur 3.9 og Figur 3.10).

En ulempe ved Mg i mængder over 3% er, at svejsemetallet bliver følsomt overfor spændingskorrosion ved driftstemperaturer over 65°C i marine atmosfærer. Dette kan eksempelvis være et problem tæt på udstødninger på skibe.

AlMg5 (5356 iht. ISO) er det mest anvendte tilsatsmateriale til aluminium, idet det egner sig godt til en lang række legeringer og opgaver. Ikke-modningshærdbar legering. Et magnesiumindhold på over 3% i svejsemetallet medfører risiko for spændingskorrosion ved driftstemperaturer over 65°C.

Silicium (Si):

AlSi tråde tilsættes fra 4,5% til 12% silicium. Denne tilsætning giver en styrkeforøgelse, som dog *ikke* ændres mærkbart som funktion af siliciummængden inden for dette interval. Silicium-legerede tråde har en tendens til at give et ”varmt” letflydende smeltebad, og giver en god ”wetting” – overgang til grundmaterialet. AlSi-tråde egner sig ikke til emner, som skal anodiseres dekorativt, da svejseoverfladen bliver **mørkegrå ved anodisering**.

AlSi5 (4043 iht. ISO) er en af de ældste og mest anvendte trådlegeringer. Den bruges typisk til at svejse ekstruderede legeringer i 6000-serien. Ikke-modningshærdbar. Legeringen er ganske modstandsdygtig overfor varmvævner.

AlSi12 (4047 iht. ISO) egner sig ved sin relativt lave størkningstemperatur til ”svejselodning” (”MIG-brazing”), hvor grundmaterialet kun i ringe grad eller slet ikke opsmeltes. Dette kan blandt andet være en fordel ved svejsning på tynde dimensioner, som eksempelvis i biler.

Man skal være opmærksom på, at duktiliteten (eksempelvis udtrykt ved brudforlængelsen i en trækprøve) af svejsninger udført med AlSi-tråde er dårligere end for AlMg-tråde.

Trækprøver på svejsninger i 6061-T6 har givet en brudforlængelse på 8% med AlSi5 og 11% med AlMg5 som tilsatsmateriale. [5]

Mangan (Mn):

Mangan gavner styrke og modstandsdygtighed overfor korrosion.

AlMg4,5Mn (5183) indeholder knapt 5% Mg og ca. 0,7% Mn. Legeringen er specielt udviklet til at matche styrkekravene til legering 5083, som typisk anvendes til skibe. Styrken er lidt højere end for AlMg5, som ikke altid kan klare styrkekravene. Udover en høj styrke giver tråden også et svejsemetal med en høj brudsehjed.

Zink (Zn) og Kobber (Cu):

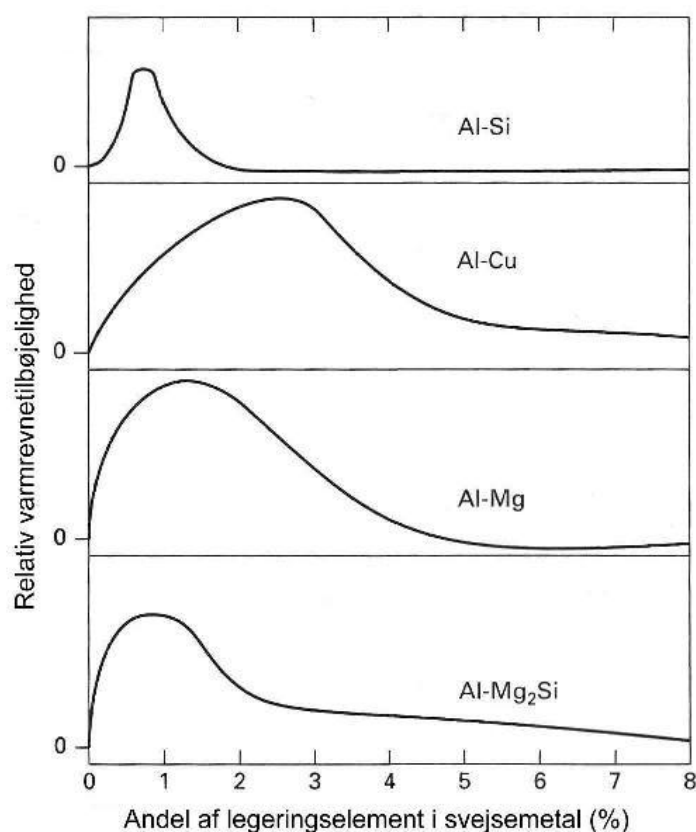
Zink og kobber giver en vis styrkeforøgelse, især efter en varmmodning. Som det fremgår af Figur 3.9, er kobber dog stærkt fremmede for risikoen for varmvæner.

Titanium (Ti):

Tilsættes sommetider som finkornsdanner, for eksempel for at forbedre korrosionsmodstandsdygtigheden.

Zirconium:

Tilsættes sommetider som finkornsdanner for at opnå bedre egenskaber ved bøjeprovning og/eller forbedrede korrosionsegenskaber.

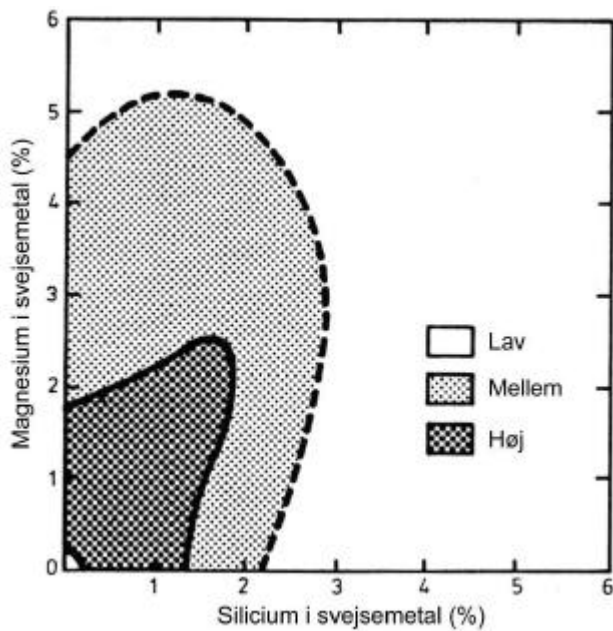


Figur 3.9 Relativ varmvænetilbøjelighed som funktion af indholdet af forskellige legeringselementer i svejsemetallet, [6].

Legeringselementernes indflydelse i kombination med hinanden er naturligvis af betydning.

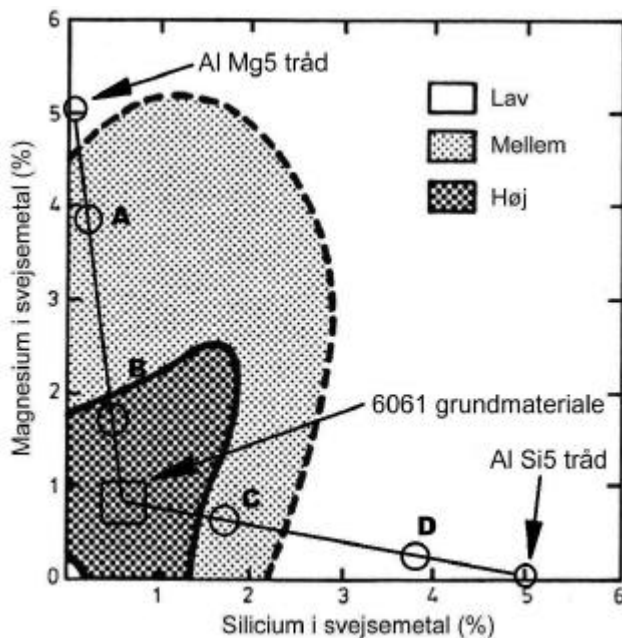
I Figur 3.9 viser den sidste kurve indflydelsen af magnesium og silicium i form af Mg₂Si.

Figur 3.10 viser varmvænetilbøjeligheden afhængigt af variende indhold af magnesium og silicium. Som det fremgår, ville et tilsatsmateriale af en sammensætning, som svarer til de modningshærdbare 6000-legeringer være særdeles følsomt overfor varmvæner.



Figur 3.10 Varmrevnerisiko som funktion af svejsemetallets indhold af magnesium og silicium, [1].

Figur 3.11 viser et eksempel på, hvorledes diagrammet på Figur 3.10 kan anvendes til bedømmelse af risikoen for varmværner ved svejsning af 6061, en typisk ekstruderbar legering. Grundmaterialet 6061 ligger selv inden for et område med stor risiko for varmværner, hvis det bliver svejst autogent, dvs. uden tilsatstråd af anden legering. Ved anvendelse af et AlSi5 tilsatsmateriale og en lav opblanding vil risikoen for varmværner minimeres (punktet D).



Figur 3.11 Eksempel på bedømmelse af varmværnerisiko ved svejsning af 6061 med henholdsvis AlMg5 og AlSi5 tråde, med to forskellige opblandingsgrader.

- A) Svejst med AlMg5-tråd, med ca. 25% opblanding af grundmaterialet (kunne være MIG-svejsning)
- B) Svejst med AlMg5, med ca. 75% opblanding af grundmaterialet (kunne være TIG eller plasma med lidt trådtilførsel)
- C) AlSi5 tråd, ca. 75% opblanding (f.eks. TIG eller plasma)
- D) AlSi5 tråd, ca. 25% opblanding (kunne være MIG)

3.3.5 STYRKE

I tabel 1 gives en oversigt over typiske værdier for den statiske styrke ved henholdsvis træk og forskydningspåvirkning. Værdierne gælder for svejsemetallet alene, uden efterfølgende varmebehandling. De kan give et indtryk af indbyrdes forhold, men der er vel at mærke ikke tale om minimumværdier, så de kan derfor ikke bruges til dimensionering.

Tabel 3.1 Typiske styrkeværdier under henholdsvis forskydning og træk, rent svejsemetal, uden efterfølgende varmebehandling. Legering 2319 kan få en vis styrkeforøgelse ved varmodning, de resterende legeringer er ikke-modningshærdbare, [4], [6].

Tilsatsmateriale legering		Forskydningsstyrke	Typisk trækstyrke
AWS / Int.Reg.	ISO	Mpa	MPa
1100	Al 99.0Cu	52	93
2319	*)	110	258
4043		79	200
5183	Al Mg4,5Mn0,7	128	283
5356	Al Mg5	117	262
5554	Al Mg3Mn	117	230
5556	**)	138	290
5654	***)	83	221

*) ca. 5,2Cu 0,3Mn 0,15Ti 0,01Va 0,12Zr – til svejsning af 2000-serien, særligt 2219

***) ca. 0,7Mn 5,1Mg 0,12Cr 0,012Ti – udviklet til høj styrke ved kantsømme

**) ca. 3,5Mg 0,25Cr 0,010Ti – til særlige, korrosive forhold

3.3.6 MODNINGSHÆRDBART SVEJSEGODS

Som beskrevet tidligere findes der ikke tilsatsmaterialer med samme kemiske sammensætning som de modningshærdbare AlMgSi-legeringer (6000-legeringer), på grund af tendensen til varmvæner. De almindeligt anvendte tilsatsmaterialer er derfor ikke-modningshærdbare, legeret med enten silicium eller magnesium og/eller mangan.

Ved svejsning af 6000-legeringer med en relativt stor opblanding af grundmaterialet kan man opnå en vis styrkeøgning ved en efterfølgende varmodning, jævnfør nedenstående eksempel, som er baseret på TIG-svejste stumpsømme – se Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Typiske mekaniske egenskaber for TIG-svejste stumpsømme før og efter varme-behandling, ved svejsning med AISi5 tilsatstråd (4043), [4].

Grundmateriale	Grundmaterialets Mekaniske egenskaber			Svejsesøm varmebehandling før			Svejsesøm opløsningsglødning og modning efter		
	Rm N/mm ²	R _{0,2} N/mm ²	Forl. %	Rm N/mm ²	R _{0,2} N/mm ²	Forl. %	Rm N/mm ²	R _{0,2} N/mm ²	Forl. %
2014-T6	480	410	13	235	195	4	345	-	2
6061-T4	240	145	22	185	125	8	240 *)	-	8 *)
6061-T6	310	275	12	185	125	8	305	275	5
6063-T4	170	150	22	140	70	12	205	-	13

*) Kun varmmodnet

Der findes dog også enkelte tilsatsmaterialelegeringer, som er **modningshærdbare** i sig selv:

Legering **2319** indeholder 5,8-6,8% Cu, 0,20-0,40% Mn, 0,10-0,20% Ti, 0,05-0,15% Va og 0,10-0,25% Zr. Denne legering er oprindeligt udviklet til at svejse legeringen 2219, som anvendes til flydele og andre højstyrke strukturer – særligt hvor der er behov for styrkeegenskaber ved højere temperaturer og/eller god modstandsdygtighed overfor spændingskorrosion. Legeringen er modningshærdbar ved varmebehandling.

Tabel 3.3 Typiske mekaniske egenskaber for TIG-svejste stumpsømme før og efter varme-behandling, ved svejsning med 2319 tilsatstråd, [4].

Grundmateriale	Grundmaterialets Mekaniske egenskaber			Svejsesøm varmebehandling før			Svejsesøm opløsningsglødning og modning efter		
	Rm N/mm ²	R _{0,2} N/mm ²	Forl. %	Rm N/mm ²	R _{0,2} N/mm ²	Forl. %	Rm N/mm ²	R _{0,2} N/mm ²	Forl. %
2014-T6	480	415	13	300	195	5	415	320	5
2219-T81	455	350	10	240	180	3	380	260	7
2219-T87	500	440	10	255	230	4	385	-	5,5

Legering **4643** indeholder 3,6-4,6% Si og 0,10-0,30% Mg. Den er udviklet til svejsning af visse legeringer, i situationer hvor man kan regne med en temmelig lille opsmeltning af grundmaterialet ind i svejsemetallet. Det vil primært være i kraftigere godstykkelser, eller i tilfælde, hvor man ”svejselodder” med lav opsmeltning i mindre tykkelser. En efterfølgende opløsningsglødning og kunstig ældning kan genskabe en styrke på 90% af den oprindelige trækstyrke for legeringerne **6061**,

6063, 6070 og 6071. Uden efterfølgende varmebehandling er styrken den samme som ved svejsning med 4043 (AlSi5).

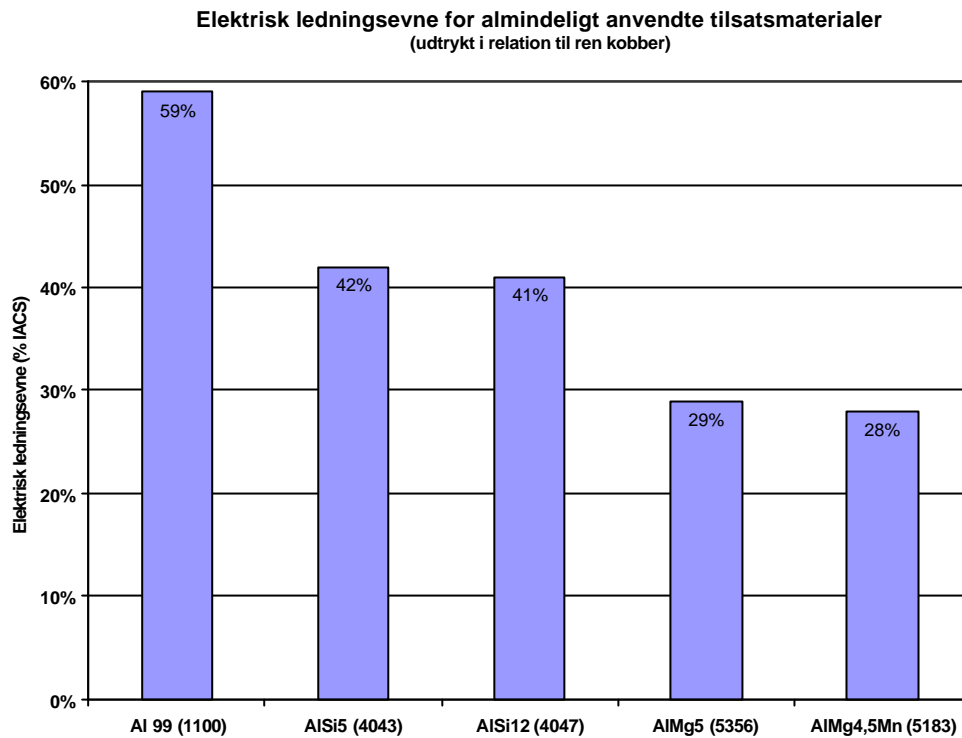
Legering **5180** indeholder 0,20-0,7% Mn, 3,5-4,5% Mg, 1,7-2,8% Zn, 0,06-0,20% Ti og 0,08-0,25% Zr. Den er oprindeligt udviklet af Alcoa til svejsning af legeringerne **7005, 7039 og 7046**. Der er tale om et Al-Zn-Mg materiale, som ved varmebehandling kan opnå en ganske høj styrke.

Ved svejsning med 5180 bliver både svejsemetal og HAZ opløsningsglødet under selve svejseforløbet. Efter normal afkøling i luft sker der en naturlig modning ved stuetemperatur, men hærningen kan accelereres ved kunstig varmmodning.

TIG-svejste stumpsømme i legering 7005 med 5180 som tilsatstråd har givet trækstyrker på 95% af grundmaterialets udgangsstyrke (360 N/mm² efter 6 måneders naturlig modning). Flydegrænsen kom op på 83% af det oprindelige (nåede op på 270 N/mm²). Brudforlængelsen lå vel at mærke "fornuftigt" på 8,5%. Langt den største del af modningen foregår den første måned efter svejsning. Kunstig modning har produceret tilsvarende gode resultater, endda med en lidt højere flydegrænse end før nævnt. [4]

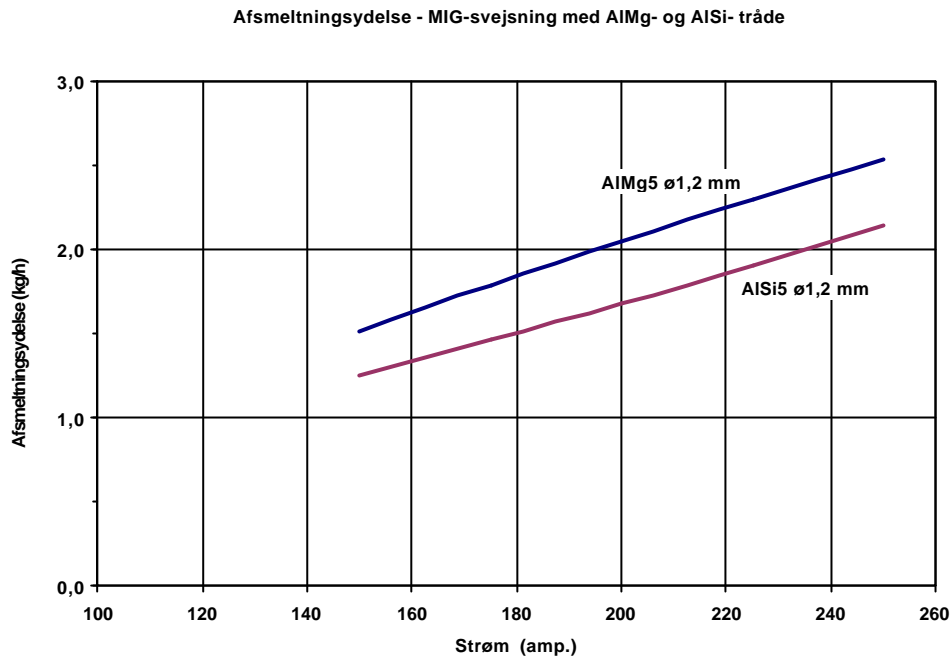
3.3.7 TRÅDLEGERINGENS INDFLYDELSE PÅ SVEJSEDATA

Der er mærkbare forskelle i de forskellige aluminiumlegeringers fysiske karakteristikker. I forbindelse med tilsatsmaterialer til MIG-svejsning (og såmænd også de beklædte elektroder) er den elektriske ledningsevne den parameter, som har den største effekt på svejseparametrene. Den elektriske ledningsevne for legeringerne 5356 (AlMg5) og 5183 er kun den halve af 1100 (Al 99,0Cu) og 30% lavere end for 4043 (AlSi5), se Figur 3.12.



Figur 3.12 Elektrisk ledningsevne for almindeligt anvendte tilsatsmaterialer, udtrykt i %IACS (International Annealed Copper Standard, som er 100% for udglødet, ren kobber ved 20°C).

Forskellen i den ohmske opvarmning i den fri trådende udmønter sig i en forskel i afsmeltningssydelse og dermed tråd hastighed. Figur 3.13 illustrerer forskellen mellem to af de almindeligst anvendte tilsatsmaterialer, AlSi5 og AlMg5.



Figur 3.13 Afsmeltningsydelser ved MIG-svejsning med hhv. AlMg5 og AlSi5 tråde. For samme strøm og spænding giver AlSi5 tråden en ca. 17% lavere trådshastighed, med tilsvarende lavere afsmeltningsydelse.

3.3.8 ALUMINIUMTRÅDENES OVERFLADE - SHAVING

Ved trækningen af aluminiumtråde bliver overfladen beskadiget, og smøremidler fra trækkeprocessen vil infiltrere overfladen (Figur 3.14). Begge dele går ud over lysbue stabiliteten ved MIG-svejsning, og endnu værre: Kulbrinterne fra smøringen og hydrerede overfladeoxider (AlOH) er potentielle kilder til (mange og store) porer i svejsemetallet (Figur 3.15).

Ved "shaving"-processen skræbes det yderste lag af mekanisk, som det sidste trin i fabrikationen. Alle aluminiumtilsatsmaterialer er shavede.

I praksis viser det sig, at en enkelt shaving-trin ikke altid er nok. Enkeltshavede tråde kan stadig give en noget forhøjet tendens til porer, og vil også have en tendens til at svejse mindre stabilt. Derfor tilbyder de fleste fabrikanter dobbeltshavede tråde.

Der findes også tredobbelt shavede tråde, men det kan synes usikkert, hvor meget der egentlig vindes ved den tredje og sidste shaving.

Det er konklusionen i SASAK, at man bør **anvende dobbelt-shavede tråde** af hensyn til processtabilitet og især sikkerhed mod porer.



a)

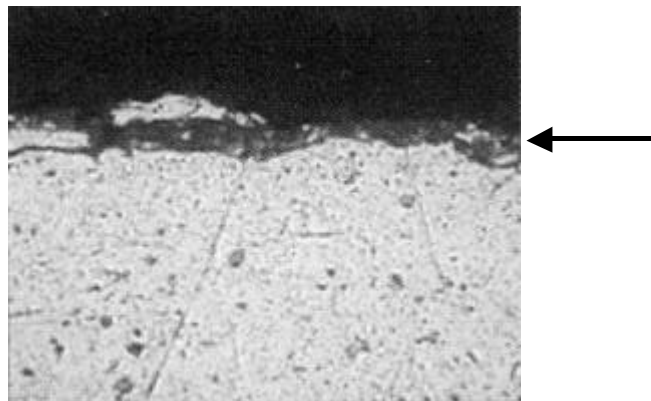


b)

Figur 3.14 Foto af trådoverflader, ca. 100 x forstørrelse, [5].

a) Urenheder og ujævnheder i overfladen.

b) Dobbelt-shavet, ren og jævn overflade.



Figur 3.15 Mikrofoto af snit ned gennem overfladen på en tråd før shaving, [4]. Pilen angiver hydrerede overfladeoxider, som i mangel af en shavingproces ville anledning til porer.

3.3.9 STANDARDISEREDE BETEGNELSER

Tilsatsmaterialer klassificeres normalt efter **AWS A5.10** og/eller **DIN 1732**.

AWS-betegnelserne og AA International Registration Record ligger meget tæt op ad hinanden – idet et "R" eller "ER" før tallet angiver, at der er tale om et trådformet tilsatsmateriale.

DIN-betegnelserne og ISO-betegnelserne ligger tilsvarende ret tæt op ad hinanden.

De mere gængse tilsatsmaterialer er listet i Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Klassifisering af de mere gængse tilsatsmaterialer.

AWS A5.10	DIN 1732	AA Int. Reg. Rec.	ISO
ER 1100	SG Al99,5	1100	Al 99,0 Cu
ER 4043	SG AlSi5	4043	Al Si5
ER 4047	SG AlSi12	4047	Al Si12
ER 5183	SG AlMg4,5Mn	5183	AlMg4,5Mn0,7(A)
ER 5356	SG AlMg5	5356	Al Mg5Cr(A)
ER 5556	AlMg5Mn		
ER 5654	SG AlMg3	5654	(Ingen ækvivalent)

3.3.10 AFPRØVNINGER OG GODKENDELSER

Godkendelse af tilsatsmaterialer

Der vil ofte være et krav om, at tilsatsmaterialer skal være godkendte. I forbindelse med skibsbygning vil klassifikationsselskaberne **DnV, Lloyd's, ABS, Bureau Veritas**, o.a.) typisk stille sådanne krav. Sådanne godkendelser er baseret på prøvesvejsninger efterfulgt af en destruktiv testning, som normalt foregår hos tilsatsmateriale fabrikanten, under overværelse af en repræsentant for klassifikationsselskabet.

Tilsvarende har **Deutsche Bundesbahn** og **TÜV** regler for godkendelse af tilsatsmaterialer til aluminium.

I skrivende stund findes der endnu ikke noget normgrundlag inden for Dansk eller Europæisk standard for afprøvning og godkendelse af tilsatsmaterialer. På europæisk plan ligger der dog et oplæg til en ny standard for dette, **EN 13 479-3**.

Enkel test af svejsetråd for overfladeforurening

Porer i svejsemetallet stammer normalt fra hydrogen (brint), som udskilles under størkning. Dette skyldes, at opløseligheden for hydrogen i smeltet aluminium er betydeligt større end i størknet aluminium. En af de mulige kilder til hydrogen i svejsemetallet hidrører fra overfladen på tilsatsmaterialet, i form af:

- Hydrerede overfladeoxider såsom aluminiumhydroxid ($\text{Al}(\text{OH})_3$), som opstår, når aluminium kommer i forbindelse med vand / fugt. I sjældnere tilfælde kan man komme ud for decideret vandholdige oxider, som hvidrust.

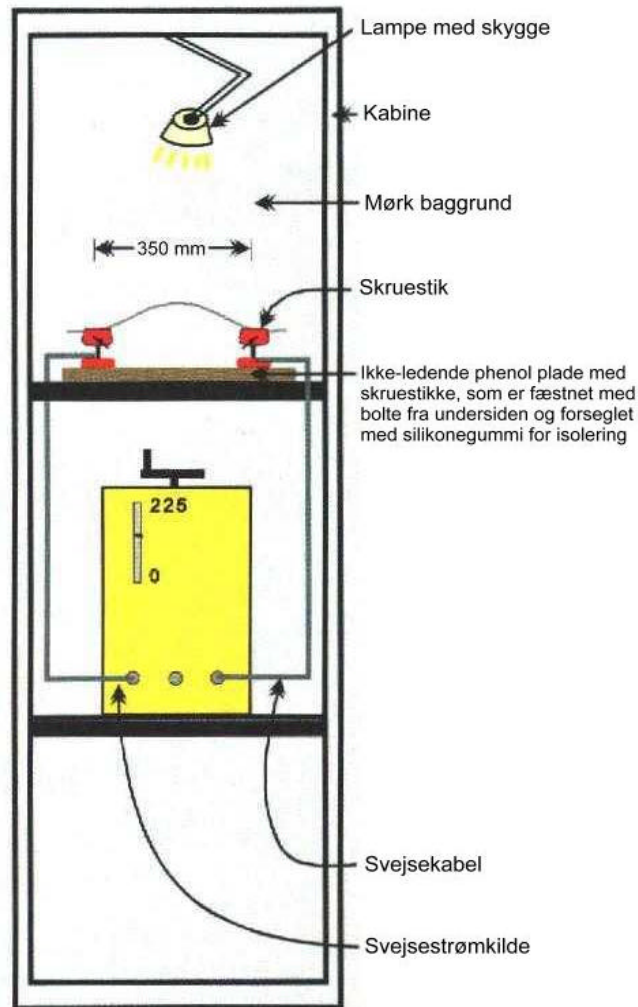
- Materialer indeholdende hydrogen (kulbrinter), såsom trækfedt fra trådfremstillings-processen eller skæreolier fra bearbejdning af emnerne før svejsning.

Tilsatsmaterialet har en meget stor overflade i forhold til volumen, så omfanget af forureninger i overfladen har naturligvis en stor indflydelse på muligheden for at opnå en god svejsekvalitet. En relativ hurtig og billig metode til at teste aluminium svejsetråd for indholdet af forurening fra selv et fingertryk er en ”røgtest”.

Bedømmelse af overfladeforurening ved hjælp af røgtest

”Røgtesten” kan gennemføres på enhver virksomhed, som arbejder med lysbuesvejsning af aluminium. Der er tale om en kvalitativ test, som udføres ved at opvarme et afklippet stykke svejsetråd ved hjælp af en elektrisk modstandsopvarmning. Imens testen udføres, skal tråden visuelt undersøges for røg, som udvikles ved at eventuel forurening på overfladen brænder. Ganske små mængder af forurening som f.eks. et fingeraftryk vil udvikle røg.

Fig. 10 viser en typisk røgtestmaskine. Her vil næsten enhver svejsestrømkilde være tilstrækkelig. Svejsekablerne er forbundet til to hobbyskruestikke. Trådprøven fuldender forbindelsen. Det anbefales at anvende en lampe mod en mørk baggrund for at kunne se eventuel røg udvikle sig. Det er vigtigt, at trådprøven placeres i skruestikken, uden at tråden kommer i kontakt med forurening herunder menneskehænder.



Figur 3.16 Opstilling for røgtestning af svejsetråde, [4].

Et par vigtige forholdsregler:

- Før testen må tråden IKKE røres med hænderne. Der må kun anvendes rene tænger, og tråden bør kun holdes for enderne.
- Rør ikke tråden umiddelbart efter testen, da tråden bliver meget varm.

Tabel 4 anviser forslag til valg af strøm i forhold til legering og diameter på testprøven. Strømmen skal være sluttet til i tilstrækkelig tid til at varme prøven i 3-5 sekunder, så røgen kan observeres.

Tabel 3.5 Forslag til strøm ved røgtest af aluminiumsvejsetråde af forskellige legeringstyper, [4].

Forslag til strøm ved røgtest af aluminiumsvejsetråd (amp.)			
Tråddiameter (mm)	Legeringstype		
	1xxx og 2xxx	4xxx	5xxx
0,8	45	40	40
1,0	50	50	50
1,2	60	60	60
1,6	90	90	90
2,0	140	120	120
2,4	225	225	225

Der er en direkte sammenhæng imellem resultater fra røgtesten og porøsitet i svejsningen:

- Ingen røg afspejler en forsvindende risiko for porer i svejsemetallet på grund af tilsatsmaterialet
- En let røgdvikling afspejler en vis risiko for porer
- En kraftigere røgdvikling er et symptom på en kraftig forurening af tråden og dermed høj risiko for porer i svejsemetallet.

Vridetest

”Vridetesten” eller ”drejetesten” kan afsløre uregelmæssigheder i overfladen af trådformige tilsatsmaterialer til TIG og MIG-svejsning. Den kan også være nyttig til at afsløre, hvordan trådfremføringssystemet og/eller svejsepistolen ”river”, slider eller præger trådoverfladen. En afslidning af trådoverfladen giver anledning til tilstoppede trådledere og kontaktdyser, som igen før eller siden resulterer i uregelmæssig trådfremføring og ”tilbagebrænding” – tråden brænder fast i strømdysen.

For at undersøge svejsetråden for uregelmæssigheder på overfladen udtages en ca. 25 cm lang prøve, som 5 cm inde ved hver ende bøjes i et 90° knæk. Den ene ende drejes 360° 5 eller 6 gange.



Figur 3.17 ”Vridetest” af svejsetråd: Enderne bukkes 90°, og tråden vrides 360° 5-6 gange.

Overfladen på den snoede prøve skal forblive glat. Undersøg for linjer ved køre en fingernegl hen ad det stykke, som er snoet. Metalrester (aluminiumstøv) vil indikere, at trådoverfladen er blevet påvirket af snoningen.

3.3.11 OPBEVARING AF TILSATSMATERIALER

Så længe svejsetråde til aluminium forbliver i ubrudte emballager, er de ganske godt beskyttet. Pakningerne indeholder normalt poser med silikagel, som sørger for at holde en lav fugtighed i pakken.

Ubrudte og især åbnede pakker skal opbevares tørt, helst i opvarmede lokaler eller lokaler med en kontrolleret **relativ fugtighed på maksimum 30-35%**.

Trådspoler, som efter åbning af pakken ligger over længere tid i et almindeligt værkstedsmiljø, kan forventes at give poreproblemer, når man svejser med dem igen.

Tråde i **5000-serien (AlMg) har den største tilbøjelighed til at udvikle hydrogenholdige overfladeoxider** som beskrevet i det foregående afsnit, hvorfor man skal være særligt opmærksom på korrekt lagring af disse.

Man bør ikke lade man tråden sidde på maskinen natten over, især hvis denne ikke står i et tørt, opvarmet værksted. Der findes dog trådbokse med indbyggede varmelegemer, som konstant sørger for en lav relativ fugtighed.

Tråde, der ligger frit fremme vil desuden blive udsat for støv fra værkstedet, som kan tilstoppe trådledere og være skadeligt for svejsekvaliteten. Støvskeerme bør være monteret på trådbokse og andet svejseudstyr.

Nogen gange kan man af den ene eller anden årsag være tvunget til en mindre optimal lagring af trådpakker. Pakken kan eksempelvis enten ligge i et koldt lager eller i en kold bil. Man bør i så tilfælde sørge for at tage tilsatsmaterialer ind i god tid (helst 24 timer) før pakken åbnes, så fugt ikke kan kondensere på de kolde trådoverflader.

3.3.12 REFERENCER

Litteratur

- [1] **M. F. Gittos** *Welding Al-Mg-Si alloys*
The Welding Institute Research Bulletin, July 1986.

- [2] "What you should know about welding aluminium"
N.N., Lincoln Electric Co.
Welding Journal, January 2000.

- [3] **Tony Anderson** *Filler alloy selection for aluminium welding*
Svetsaren No. 3, 1999.

- [4] "Aluminium welding wire"
Alcotec teknisk publication og katalog.

- [5] "Superglaze™ MIG welding wire"
Lincoln Electric teknisk publikation.

- [6] "Welding Handbook" Volume 3, Part 1 (Eighth edition) - "Materials and Applications"
American Welding Society, 1996.

Tekniske rapporter

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0036, *Tilsatsmateriale til svejsning af aluminium*

3.4 VALG AF SVEJSEPROCES TIL ALUMINIUM

De mest almindelige processer til svejsning af aluminium er TIG- og især MIG-svejsning.

Lasersvejsning er allerede indført til svejsning af mindre godstykkelser i blandt andet bilindustrien, og processen kan være attraktiv ved især massefabrikation.

Plasmasvejsning er velkendt fra svejsning af især rustfrie stål, men processen byder også på både produktivitetmæssige og kvalitetmæssige fordele i forbindelse med aluminium.

Punktsvejsning af aluminium kan godt lade sig gøre, men processen ligger i "konkurrence" med især mekaniske sammenføjningsmetoder som clinching. Denne sidste metode bliver således typisk foretrukket i forbindelse med aluminiumsbiler. Valget mellem disse to processer må bero på en samlet evaluering af styrke, omkostninger, produktivitet og sikkerhed for kvalitet i hvert enkelt tilfælde.

Friction Stir svejsning er en meget attraktiv proces til aluminium. Den rummer den fordel, at processen stort set ikke medfører nogen deformationer, og produktiviteten og anvendelsesområderne udvikles løbende. Udstyret er imidlertid temmelig kostbart, og der skal sikres en solid fiksering af emnerne, der skal svejses.

Valget af svejseproces influerer på designet af samlingsgeometrierne og omvendt. Tabel 3.6 giver et kort, generelt overblik over svejseprocessernes egnethed til forskellige samlingstyper.

Økonomiske og produktivitetmæssige forhold vil naturligvis også have en indflydelse på valget, ligesom adgangen til kvalificeret personale (svejsere, operatører). Processernes fordele og ulemper med hensyn til disse aspekter opsummeres i Tabel 3.7.

Tabel 3.6 Svejseprocessernes egnethed til forskellige samlingstyper.

Proces	Stumpsømme	Kantsømme	Overlapsømme	Udv. hjørnesømme
TIG	3	3	3	3
Plasma	3	2 (med tråd, ej key-hole)	1 (Evt. smeltesv. gennem to lag)	3 (dog ej key-hole)
MIG	3	3	3	3
Friction Stir	3	1 (sælige profilsamlinger)	1 (sælige profilsamlinger)	1 (sælige profilsamlinger)

Laser	3	0	1 (Evt. smeltesv. gennem to lag)	2
Laser-MIG	3	3	3	3
Modstands- svejsning	0	0	3	0
Beklæde elektroder	2	1	1	2
<p>3 = Velegnet 2 = Egnat, men ikke altid optimalt 1 = Muligt med forbehold 0 = Ej muligt</p>				

Tabel 3.7 Oversigt over fordele og ulemper ved alternative svejseprocesser til aluminium.

Proces	Fordele	Ulemper
TIG	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Billigt udstyr ▪ Billige reservedelspriser ▪ Meget fleksibel proces, især velegnet til manuel svejsning ▪ Mange er uddannede indenfor TIG svejsning ▪ Mange uddannelsessteder ▪ God svejsekvalitet kan udføres ▪ Ufølsom over for varierende tolerancer 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lav produktivitet ▪ Typisk mindre velegnet til automatsvejsning på grund af mere usikker tænding end f.eks. plasma, relativt stor følsomhed overfor elektrodeafstand til emnet og slid på wolframelektrode. ▪ Store deformationer ▪ Forstyrrelser fra højfrekvens

<p>Plasma</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Høj svejsehastighed ▪ Velegnet til automat- og robotsvejsning ▪ Lille forbrug af tilsatsmaterialer ▪ God svejsekvalitet ▪ Visuelt flot, jævn forside og rodside ▪ Velegnet til stumpsømme, herunder samlinger af plader ▪ Velegnet til svejsning af roterende emner, herunder rør og beholdere ▪ Velegnet til udvendige hjørnesømme ▪ Smådeformationer af emner ▪ Driftssikker pga. pilot- og plasmalysbue ▪ Fåforstyrrelser fra højfrekvens ▪ Fågener ved dårlig trålkvalitet 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Som hovedregel uegnet til manuel svejsning ▪ Dyrere udstyr end for TIG-svejsning ▪ Dyre reservedele til brændere ▪ Relativt snævre tolerancer for svejsefuger ▪ Kræver uddannelse af svejseoperatør ▪ p.t. ingen "standard"-uddannelser ▪ Begrænset know-how hos leverandører ▪ Stor brænder kan være et adkomstmæssigt problem ▪ Ikke velegnet til håndvejsning ▪ Start/stop problematik v. keyhole svejsning (slope-up og slope-down af strøm og gasser) ▪ Ikke mange referencer
<p>MIG</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Billigt udstyr ▪ Stor produktivitet ▪ Mulighed for høj svejsehastighed ▪ Velegnet til automat- og robotsvejsning ▪ Velegnet til manuel svejsning ▪ Billige reservedele ▪ Velegnet til svejsning af kantsømme ▪ Velegnet til meget store godstykker ▪ Mange uddannelsessteder ▪ Tåler store spaltevariationer 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stort forbrug af tilsatsmateriale ▪ Generelt dårlig svejsekvalitet (porer, start-stop) ▪ Risiko for mange produktionsstop pga. dårlig tråtransport ▪ Meget følsom over for dårlig trålkvalitet ▪ Generelt dårlig finish i forhold til TIG og plasma ▪ Ofte meget avancerede strømkilder ▪ Store deformationer

<p>Friction Stir</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Intet forbrug af tilsatsmateriale ▪ God svejsekvalitet (ingen porer og revner) ▪ Plan rodside "usynlig" efter maling ▪ Efterhånden god produktivitet ▪ Ingen deformationer ▪ Lille varmepåvirkning ▪ Gode mekaniske egenskaber ▪ Arbejdsmiljø: Ingen svejserøg, UV-lys eller ozon 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temmelig kostbart produktionsudstyr ▪ Licensafgifter ▪ Fortrinsvis begrænset til stumpsømme i plader og profiler ▪ Start/stop problematik
<p>Laser</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Høje svejsehastigheder ▪ Meget småsvejsedeformationer ▪ Meget smal varmepåvirket zone ▪ Automatiseret proces ▪ Meget lille tilsatsmaterialeforbrug ▪ "Ren" proces, ingen svejserøg 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kostbart udstyr ▪ Snævre spaltetolerancer ▪ Ofte poreproblemer (især Mg-holdige legeringer) ▪ Sømoerflader kan udvise et "ru", lidt ujænt udseende
<p>Modstands svejsning</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Velegnet til serie- og masseproduktion ▪ En række legeringer, som er vanskeligt svejsbare med lysbue kan med fordel modstandssvejses ▪ Høj kvalitet mulig ved anvendelse af korrekte procedurer ▪ Intet forbrug af tilsatsmaterialer ▪ Generelt godt arbejdsmiljø ▪ Kræver ikke specialuddannede operatører 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Høje strømstyrker nødvendige til aluminium, hvorfor relativt stort investeringsbehov ▪ Kun til mindre godstykkelser ▪ Adkomst og til dels emnestørrelse begrænset af maskinens rækkevidde ▪ Kraftigt elektrodeslid ved punktsvejsning af aluminium pga. oxidlaget ▪ Højere krav til styring af parametre, ikke så "taknemmelig" og "stabil" proces ved aluminium som ved stå
<p>Manuel lysbue (Beklæde elektroder)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lille, transportabel svejsestrømkilde er tilstrækkelig 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Generelt dårlig svejsekvalitet. Kun til nødtørftige, mindre reparationer ▪ Rester af fluss kan forårsage korrosion

I forbindelse med overvejelser omkring mekaniseret / robotiseret svejsning kan Tabel 3.8 give en indikation af hvilket omfang processen egner sig til automatisering.

Tabel 3.8 Svejsprocessernes egnethed til henholdsvis manuel og automatiseret svejsning.

Proces	Egnethed til	
	Manuel svejsning	Automatiseret svejsning
TIG	XXX	XX
Plasma	X (småtykk.)	XXX
MIG	XXX	XXX
Friction Stir	0	XXX
Laser	0	XXX
Modst.-svejsning	XXX	XXX

- 0 = *Ej muligt*
- X = *Muligt med forbehold*
- XX = *Egnet, men ikke altid optimalt*
- XXX = *Velegnet*

De rent økonomiske aspekter i forbindelse med valget af svejseproces behandles yderligere i dette kapitels afsnit 3.19.

3.4.1 REFERENCER

Supplerende litteratur

- [1] *Successful Welding of Aluminium*
WTIA Technical Note No. 2
Welding Technology Institute of Australia, 1997.

- [2] *Welding Aluminum; Theori and practice*, Aluminum Association, 1997.

- [3] *Goda råd vid Aluminiumsvetsning*, Svetskommissionen, 1997.

- [4] **Schoer, Heinz**, *Schwerßen und Hartlöten von Aluminiumwerkstoffen*
DVS, 1998.

- [5] **Bernd Baumann** *Hochleistungsschweißverfahren für aluminiumgerechte Konstruktionen*, (doktorafhandling) Aachener Berichte Fügetechnik (udgiver: Prof. Dr.-ing. U. Dilthey), 1998.

- [6] **Grave, Markus** *Beitrag zum MIG- und WIG-schweissen von Aluminiumlegierungen*
(doktorafhandling) Aachener Berichte Fügetechnik (udgiver: Prof. Dr.-ing. U. Dilthey), 1998.

Tekniske rapporter

SASAK-RAP-SV-AKS-MIG-0005, *TIG-svejsning af aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-MIG-0007, *MIG-svejsning af aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0008, *Fugeforberedelse ved svejsning af aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0009, *Friction Stir Welding*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0013, *Modstandssvejsning af aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0018, *CO2-lasersvejsning af aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0019, *Nd-YAG-lasersvejsning af aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0025, *Økonomiske beslutningsværktøjer ved valg af svejse- og produktionsproces*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0032, *Hybrid YAG-laser + MIG svejsning af aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0035, *Plasma-svejsning af aluminium*

3.5 TIG-SVEJSNING

TIG-svejsning anvendes typisk til lidt mindre godstykkelser (0,5 – 6 mm), eller hvor der kræves en høj svejskvalitet.

TIG-processen har tidligere været den mest udbredte proces til svejsning af aluminium, men indenfor de sidste år, har inverterteknologi i svejsemaskinerne forbedret de andre processer således, at især MIG-svejsprocessen har vundet frem.

Svejserens mulighed for både at kontrollere varmetilførslen samt trådfremføringen gør, at der kan opnås en indtrængningskontrol ved TIG-processen, som er vanskelig opnåelig med MIG-processen. TIG-processen er derfor ofte foretrukket ved svejsning af énsidige stumpsømme.

3.5.1 PROCESBESKRIVELSE

Benævnelsen TIG kommer fra USA og er en forkortelse af Tungsten Inert Gas.

T – Tungsten er den amerikanske betegnelse for wolfram. Wolfram er et metal, der har et smeltepunkt på over 3.300°C, dvs. mere end dobbelt så højt som smeltepunktet på de metaller, man normalt svejser.

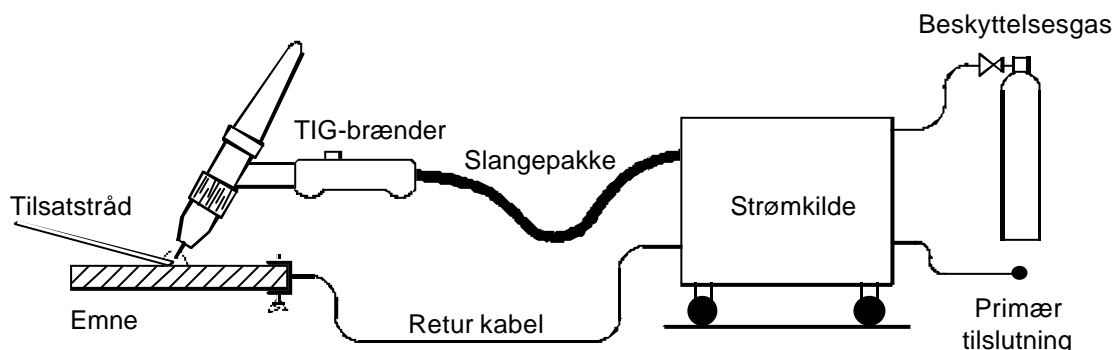
IG – Inert Gas er det samme som inaktiv gas, dvs. en gasart, som har den egenskab, at den ikke indgår i kemiske forbindelser med andre stoffer.

I Tyskland benævnes metoden WIG-svejsning, hvor W står for Wolfram.

TIG-svejsning er den internationale og danske standardiserede betegnelse for svejsemetoden.

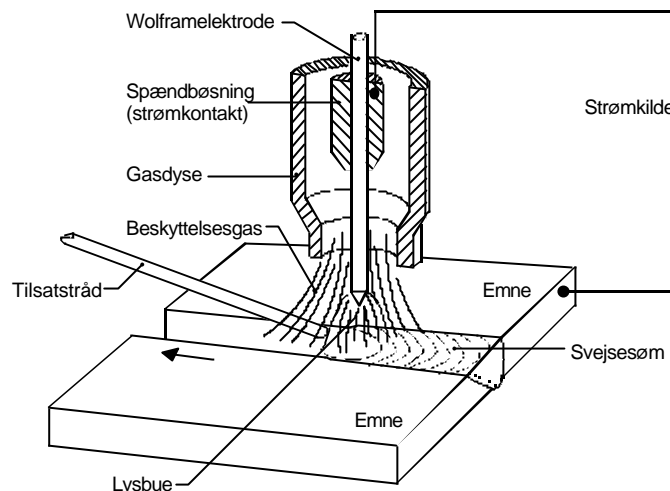
I henhold til DS/EN 24 063 er svejsemetoden angivet med nr. 141.

TIG-svejsning er en elektrisk lysbuesvejsemethode, hvor smelteenergien kommer fra en elektrisk lysbue, der brænder mellem emnet og wolframelektroden.



Figur 3.18 Principskitse af opstilling ved TIG svejsning.

Ved TIG-svejsning benyttes en wolframelektrode, der ikke afsmeltes. Hvis det er nødvendigt at benytte tilsatsmateriale, tilføres der svejsetråd ind i lysbuen. Princippet er vist på Figur 3.19.



Figur 3.19 Principskitse af TIG svejsning.

Elektroden, lysbuen og smeltebadet beskyttes under svejsningen mod den atmosfæriske lufts skadelige virkninger af en inaktiv beskyttelsesgas. Beskyttelsesgassen ledes ved hjælp af en gaskop ned omkring svejsezonen, hvor den fortrænger den atmosfæriske luft.

TIG-svejsning er en forholdsvis langsom svejsemetode, primært fordi en del af lysbueenergien bruges til at smelte tilsatstråden, og sekundært fordi der generelt arbejdes med manuel føddning af tilsatstråden.

Generelt gælder følgende fordele og ulemper ved AC TIG svejsning i aluminium.

Fordele:

- Høj svejsestømkvalitet i alle typer stømsømme mulig
- Høj svejsekvalitet ved svejsningens start mulig
- Høj svejsekvalitet i svejsningens afslutning ved hjælp af kraterfyldfunktion mulig
- Tilsatsmateriale kan styres og tilsættes uafhængig af lysbueeffekt
- TIG-svejsning giver en god overfladefinish
- God renseseffekt af oxidhinde

Ulemper:

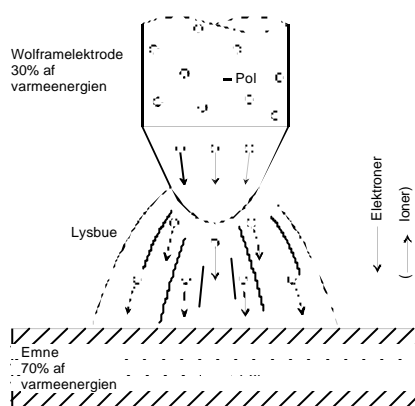
- Lav svejsehastighed
- Stor varmetilførsel på grund af lav svejsehastighed
- Bredere HAZ end andre processer såsom ved MIG

- Sommetider problemer med overvulst ved kantsømssvejsning
- Blød lysbue med en vis overfølsomhed overfor f.eks. termisk eller magnetisk forstyrrelse af lysbuen, evt. forårsaget af materialets overfladebeskaffenhed.

TIG-lysbuen

Ved TIG svejsning i aluminium er det mest almindeligt at svejse med vekselstrøm (AC), for at trænge gennem oxidlaget, der befinder sig på aluminiums overflade. Se nærmere beskrivelse i afsnittet om TIG svejsning med vekselstrøm.

Ved traditionel TIG-svejsning med jævnstrøm (DC) i stål, er wolframelektroden normalt tilsluttet den negative pol og svejseemnet den positive pol – se Figur 3.20.



Figur 3.20 Principskitse af traditionel DC TIG lysbue med minuspol på elektrode.

Når lysbuen tændes, sker der en vandring af negativt ladede elektroner fra den negative pol til den positive pol, mens de positive ladede ioner bevæger sig i modsat retning.

Elektronstrømmen fra elektrodens spids sker med meget stor hastighed, og når de rammer svejseemnet, udvikles der derved stor varmeenergi.

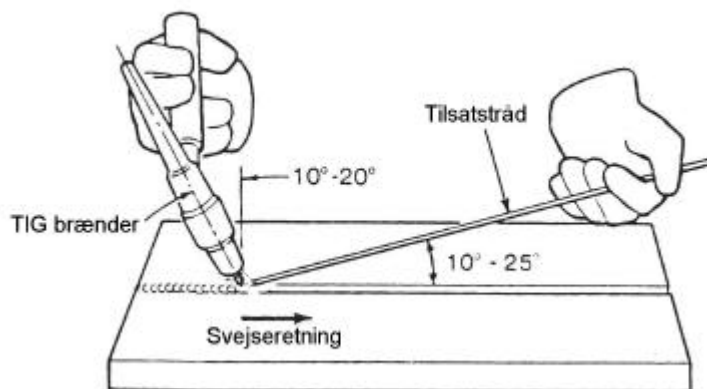
Med negativ polaritet på elektroden som vist på Figur 3.20 påvirkes elektroden med ca. 30% af den samlede varmeudvikling, mens de resterende 70% af varmen påvirker svejseemnet.

Ved svejsning med AC TIG svejsning kan man svejse med relativt høje strømstyrker, uden at wolframelektroden overbelastes og samtidig opnå en god indsmeltning.

Svejseteknik

Ved TIG-svejsning er det vigtigt at vælge en passende elektrodetype med en passende diameter. Dette er beskrevet under 3.5.2 Wolframelektroder. Gasdysen skal endvidere udvælges så den passer til elektroden og til den anvendte strømstyrke.

Svejsning udføres som regel som "frasvejsning" – se Figur 3.21. Elektroden holdes i en vinkel på ca. $10-20^\circ$, pøgende frem i svejseretningen. Tilsatsmaterialet sættes til i forkanten af smeltebadet, så varmen fra lysbuen og det smeltede materiale smelter tråden. Tråden sættes til i små dråber. Det er vigtigt at holde trådenden inde i gasbeskyttelsen hele tiden, da der ellers vil danne sig oxyder på trådenden.



Figur 3.21 Tråd og brændepositionering.

TIG-svejsning af aluminium foregår overvejende som manuel svejsning, men processen kan også automatiseres. Ved automatisering er det som oftest i form af mere simple automater, men i visse applikationer anvendes der også robotter.

Ved manuel svejsning fødes tilsatstråden normalt manuelt, men der kan dog fås specielle fødningsagregater, i form af såkaldte "Sigmette" pistoler, hvor der er påmonteret en lille trådspole direkte på svejsepistoler, og som gennem en taktmotor føder tråden automatisk.

Det giver større bevægelsesfrihed for operatøren, men på grund af Sigmettens størrelse, giver det dog også begrænsninger i på vanskeligt tilgængelige positioner.

En tommelfinger regel siger, at der ved AC TIG svejsning i aluminium skal anvendes ca. 40 ampere pr. mm godstykkelse. Vedrørende svejsedata henvises i øvrigt 3.5.4. I Tabel 3.9 gives en oversigt over de vigtigste parametres betydning ved TIG-svejsning.

Tabel 3.9 Variable og deres betydning ved TIG-svejsning.

Variabel	Betydning
Strømstyrke	Svejsehastighed, indtrængningsdybde manglende opfyldning, deformationer
Wolframelektrode, type og dimension	Lysbuetænding, Lysbuestabilitet, strømkapacitet, indtrængningsform
Lysbuelængde	Bredde af svejsesøm, spænding
Beskyttelsesgas	Lysbuestabilitet, spænding, start, indtrængning renseeffekt, beskyttelse af smeltebad
Tilsatsmateriale type og dimension	Revner i svejsning, styrke i svejsning, nødvendig strømstyrke
Svejsehastighed	Indtrængning, manglende opfyldning, deformationer
Svejsfugens positionering	Svejsehastighed, nedsmeltningssrate svejseudseende
Grad af mekanisering eller automatisering	Intermitens, svejsehastighed, nedsmeltningssrate, kvalitet

Styresystemet til TIG-svejseudstyr kan være meget enkelt, men der er også muligheder for udstyr med mange forskellige mere avancerede funktioner.

På de mere enkle TIG svejsemaskiner er det kun svejsestrømmen, der styres, og hvor beskyttelsesgassen åbnes og lukkes via en lille ventil, der sidder på TIG- brænderen.

De mere avancerede styrebokse kan styre beskyttelsesgasflowet og forsinke lukning for gassen indtil wolframelektroden er så kold, at den ikke tager skade af den atmosfæriske luft. En sådan boks har som regel også styrefunktioner, så tænding lettes uden at elektroden skal berøre emne.

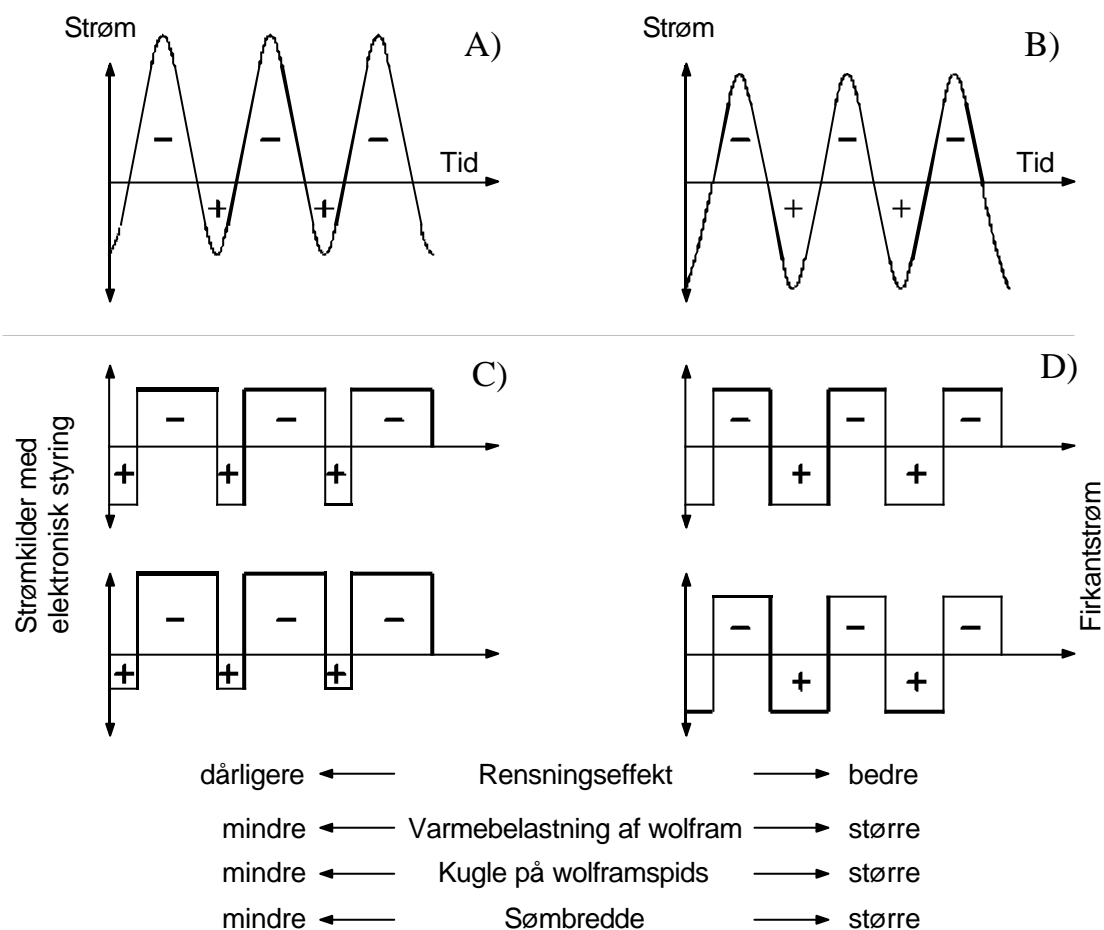
Det kan være en højfrekvens-enhed med en frekvens på 2 - 4 millioner perioder pr sekund (Hz) og en spænding på flere tusinde volt. Denne kombination kan skabe en gnist mellem elektrode og emne, så lysbuen tændes.

En anden form for styring af tænding er en enhed, som begrænser kortslutningsstrømmen ved berøring af emnet. Derved undgås at elektroden brænder fast. Styringen vil derefter, når elektroden løftes, øge svejsestrømmen og derved tænde lysbuen. Denne form for styring har forskellige betegnelser som LIFTIG eller LIFTARC.

Af andre styreegenskaber kan nævnes styring af strømforløbet ved start og stop af en svejsning. Slope-up funktioner giver mulighed for en langsommere kontrolleret strømstigning ved starten af svejsningen. Slope-down giver mulighed for en kontrolleret aftagende svejsestrøm i forbindelse med afslutningen af en svejsning, hvilket kan udnyttes til undgå kraterrevner.

TIG-svejsning med vekselstrøm

Vekselstrøm karakteriseres ved, at spændingen skifter polaritet et vist antal gange, normalt 100 gange pr. sekund svarende til netfrekvensen. TIG-svejseanlæg af lidt ældre dato arbejder typisk med ensartede sinusformede polaritetsperioder, præcis som netforsyningen. Dvs. at vekselstrømmen ændrer amplitude og polaritet i løbet af en periode på 20 msek svarende til en frekvens på 50 Hz - se eksempel i Figur 3.22, B).



Figur 3.22 Forskellige typer vekselstrøm med forskellige polaritetsfordelinger. Jo højere andel negativ polaritet, der svejses med på elektroden, jo mere varme tilføres svejsestedet og dermed varmbelastes elektroden mindre, men samtidig reduceres rensningseffekten (den elektriske opløsning af oxidhinden).

Svingninger i strøm og spænding medfører uro i lysbuen, primært pga. de mange passager igennem 0-linien ved skift fra positiv til negativ polaritet og omvendt.

Ulempen ved sinusformede perioder er, at der må anvendes en tændingsstabilisering vha. højspændingsimpulser, for ved hver nulpunktsgennemgang af svejse-spændingen at garantere gentænding.

Varmefordeling ved AC TIG-svejsning er anderledes end ved DC TIG-svejsning, hvor polariteten normalt er negativ (DC-).

Ved TIG-AC er elektroden positiv i en halvperiode, og i den samme halvperiode er svejseemnet negativt. I næste halvperiode er det omvendt, hvilket bevirker, at varmeenergien fordeler sig med 50% på elektroden og 50% på svejseemnet, når det drejer sig om traditionelt sinusformet anlæg.

Ved svejsning i aluminium og andre materialer med en oxidhinde på overfladen, udnyttes vekselstrømmens positive halvperiode til at gennemtrænge oxidhinden. Der sker en elektrisk oprensning af oxidlaget, når elektroden påvirkes med den positive halvperiode. I den følgende negative halvperiode varmebelastes wolframelektroden i mindre grad, idet 70% af varmen i denne halvperiode overføres til svejseemnet.

Det har vist sig, at for en nødvendig renseseffekt af oxidlaget er hele vekselstrømmens positive halvbølge normalt ikke nødvendig. Det er nok, at man på svejsemaskinens balanceregulering indstiller til at svejse med 20 til 30% positiv polaritet - se Figur 3.22 A).

Da wolframelektroden således kun er udsat for den varme positive polaritet i kortere tid, kan der svejses med højere strømstyrker, og samtidig overføres der mere varme til svejseemnet, hvilket samlet resulterer i en bedre indbrænding. Samtidig sikres en højere standtid, når strømstyrken forbliver den samme.

På de mest avancerede anlæg kan AC-balancen reguleres fra 0 – 100%, men standard er efterhånden blevet en fordeling på 20% plus og 80% minus.

Med en nyere invertertechnik anvendes en firkantbølgevekselstrøms teknik, hvor ovennævnte problem med gentænding ikke eksisterer – se Figur 3.22 C). Ved nyere elektroniske firkantbølgestrømkilder er den første gentænding endda lettere, da den som oftest sker med jævnstrøm under +pol. Først efter tænding af lysbuen skifter maskinen automatisk til vekselstrøm.

Tænding af lysbuen ved svejsningens start kan ske berøringsløst gennem højspændingspulser (HF-tænding) eller gennem "Lift-Arc" berøringstænding.

Moderne firkantbølgeanlæg råder desuden også over mulighed for frekvensregulering ved siden af AC-balancen, typisk 20 – 300 Hz, ved mere avancerede anlæg dog 5 – 500 Hz.

Ved at anvende mindre andel positiv polaritet og samtidig anvende en forholdsmeæssig høj frekvens, er der gode muligheder for at opnå en stabil lysbue.

Der er desuden udviklet elektroniske firkantbølgeanlæg, hvor der anvendes en mere avanceret styring af polaritetsfordelingen (eksempelvis D.O.C.-systemet udviklet af Migatronik), således at effekten der tilføres gennem den positive halvbølge minimeres.

TIG-svejsning af aluminium med jævnstrøm

Til TIG-svejsning af de fleste materialer andre end aluminium anvendes der jævnstrøm med elektroden som negativ pol.

Svejsning af aluminium og magnesium var engang anset som praktisk umuligt med jævnstrøm pga. oxidhinden, der har en høj smeltetemperatur på ca. 2050°C.

Det er dog efterhånden især i udlandet blevet mere udbredt at anvende DC TIG svejsning, med negativ polaritet på elektroden og ren helium som beskyttelsesgas. Erfaringerne viser, at der skal anvendes en meget kort afstand mellem elektrode og svejseemne. Den korte elektrodeafstand er sammen med en typisk højere svejsehastighed årsagen til, at TIG svejsning med DC minus som oftest udføres som automatiseret svejsning.

Eftersom der udvikles mindre varme på wolframelektroden, kan der anvendes en mindre elektrodediameter til en given strømstyrke. Typisk anvendes en 2% Thorium legeret wolframelektrode, som kan fastholde en renere elektrodespids længere en ren wolfram. Endvidere har denne elektrodetype mindre tendens til wolframdrop, hvilket er en fordel, eftersom elektrodeafstanden skal holdes meget kort.

Anvendelse af DC-minus tilfører en større effekt (varme) til svejsestedet for en given strømstyrke end det er tilfældet med vekselstrøm, hvilket resulterer i et dybere og smallere indtrængningsprofil.

Ved TIG svejsning med DC-minus bliver overfladen af svejseømmen mere mat i forhold til en ren og blank overflade, der kan forventes ved AC TIG svejsning. Den matte overflade kan dog typisk fjernes ved let overbørstning.

På grund af den manglende rensseffekt ved DC-minus, er en grundig afrensning før svejsning nødvendig. Det vil normalt involvere affedtning, kemisk afrensning, børstning, skrabning eller filing af svejseområdet.

Endvidere er indtrængningsmuligheden, under helium beskyttelse især af betydning ved svejsning i store godstykkelser. Ved svejsning i tyndere godstykkelser er der mulighed for at svejse med en hurtigere fremføringshastighed.

Eftersom ekstrem kort lysbue er nødvendig ved denne proces, er det nødvendigt at holde brændervinklen tæt på 90° og med kontinuert tilført tilsatmateriale. Dette er nødvendigt idet tilsatstråden skal have kontakt til smeltebadet for at sikre en korrekt formning af smeltebadet og hindre evt. oxider i at komme i kontakt med dette, samt for at sikre en optimal gasdækning.

Ved manuel fremføring er det ikke urealistisk med en lysbuelængde på 1,6 til 2,4 mm. Ved reparation kan der dog anvendes en større lysbuelængde, men dette kan kun lade sig gøre i stilling oven-ned.

Forsøges der med en større lysbuelængde i andre positioner resulterer det i underhævet overflade og dårlig svejseøms profil.

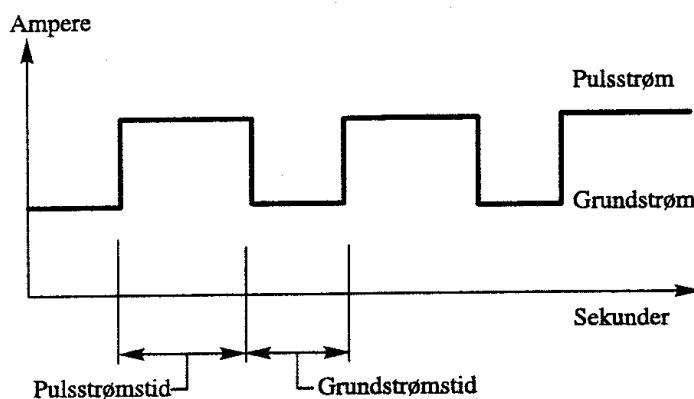
Ved maskinel fremføring i I-fuger anvendes der en meget kort lysbue, og spidsen på wolframelektroden positioneres på eller lige over grundmaterialet. Positioneringen har stor indflydelse på indtrængning, svejsningens bredde, manglende opfyldning og turbulens i smeltebadet, og vil afhænge af det enkelte grundmateriale, materialetykkelse og svejseprocedure. Ved brug af korrekt procedure er der mulighed for at svejse uden backing ved ensidig svejsning.

TIG Puls svejsning

Ved puls svejsning skifter svejsestrømmen fra en lav grundstrøm, som holder lysbuen i gang, til en høj puls strøm, som giver den nødvendige varme til svejsningen – se princip i Figur 3.23

Puls svejsning skal vel at mærke ikke forveksles med AC-svejsning (vekselstrøm). Ved pulssvejsning er der alene tale om en relativt lavfrekvent pulsning af effekten (strømmen) uafhængigt af strømtype og

polaritet. Frekvensen ved TIG puls svejsning ligger typisk i området tiendedele sekunder til flere sekunder.



Figur 3.23 Principskitse for Puls-svejsning.

Fordelen ved TIG puls svejsning er, at der er mulighed for at svejse med et relativt lille smeltebad, som er let at styre også ved stillingsvejsning. Det kan være den eneste løsning, hvis man eksempelvis vil foretage orbitalsvejsning (rundt om et rør).

En anden anvendelse af puls teknikken kunne være sammensvejsning af tyndt materiale til tykt materiale.

For at få tilstrækkelig varme i det tykke materiale skal man have en høj strøm, men den kunne let brænde igennem det tynde.

Ved at indstille pulstiden rigtig kan man reducere den høje strøm lige før man smelter igennem det tynde materiale. Når smeltebadet så er kølet lidt af kan man bruge høj strøm igen.



Figur 3.24 Sømudseende ved TIG-svejsning med puls.

En svejsesøm udført med PULS TIG består i princippet af en række svejsepunkter, som overlapper hinanden – se Figur 3.24.

3.5.2 WOLFRAMELEKTRODER

Tidligere anvendtes wolframelektroder i ren wolfram til TIG-svejsning med vekselstrøm, da denne type har en god lysbuestabilitet ved vekselstrøm. I dag findes der dog flere forskellige legerede

elektrodetyper, der svejser væsentligt bedre og som har længere standtid, og dermed er økonomisk mere fordelagtige at anvende. I Tabel 3.10 er forskellige typer wolframelektroder og deres anvendelse vist.

Tabel 3.10 Wolframelektroder efter DS/EN 26848 – DS/ISO 6848.

Mærkning	Oxid – tilsætning		Wolfram	Farvekode	Anvendelse
	%	Type			
W	-	Ingen	Rest	Gøn	Vekselstrøm
WT10	0,80-1,20	ThO ₂	Rest	Gul	Jævnstrøm
WT20	1,70-2,20	ThO ₂	Rest	Rød	Jævnstrøm
WT30	2,80-3,20	ThO ₂	Rest	Violet	Jævnstrøm
WT40	3,80-4,20	ThO ₂	Rest	Orange	Jævnstrøm
WZ3	0,15-0,50	ZrO ₂	Rest	Brun	Vekselstrøm
WZ8	0,70-0,90	ZrO ₂	Rest	Hvid	Vekselstrøm
WL10	0,90-1,20	LaO ₂	Rest	Sort	Jævn- og vekselstrøm
WL20	1,80-2,20	LaO ₂	Rest	Blå	Jævn- og vekselstrøm
WL30	2,80-3,20	LaO ₂	Rest	Blågrå	Jævn- og vekselstrøm
WC10	0,80-1,20	CeO ₂	Rest	Lyserød	Jævn- og vekselstrøm
WC20	1,80-2,20	CeO ₂	Rest	Grå	Jævn- og vekselstrøm
WS 2	?	Sjæld. jord.	Rest	Turkis	Jævn- og vekselstrøm

WT30 og WT40 anvendes ikke længere i Danmark af arbejdsmiljømæssige årsager, idet thorium udskiller små mængder radioaktivitet ved slibning af elektroderne.

I Tabel 3.11 er gode og dårlige egenskaber for forskellige elektrodelegeringer vist.

Tabel 3.11 Gode og dårlige egenskaber for de forskellige elektrodelegeringer.

Wolfram legering	Mærkning	Egenskaber	
		Gode	Dårlige
Ingen	W	<ul style="list-style-type: none"> • God til svejsning med vekselstrøm. • God lysbuestabilitet. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ved svejsning med jævnstrøm fås meget dårlige tændegenskaber og dårlig lysbuestabilitet.

			<ul style="list-style-type: none"> • Har tendens til at løsrive wolframpartikler ned i smeltebad i forbindelse med tænding.
ThO₂	WT10 WT20 WT30 WT40	<ul style="list-style-type: none"> • God til svejsning med jævnstrøm. • Med stigende thoriumoxid-indhold, forbedres tændegenskaberne, standtiden og strømbelastningen, og samtidig stiger smeltepunktet. • Har højt smeltepunkt (3.600°C for WT20) 	<ul style="list-style-type: none"> • Tendens til flakkende lysbue med vekselstrøm, hvilke øger risiko for løsrivning af wolframpartikler, og kan derfor ikke anbefales til svejsning med vekselstrøm. • Har muligvis et miljømæssigt problem, idet thorium udskiller småmængder radioaktivitet ved slibning af elektroderne.
ZrO₂	WZ3 WZ8	<ul style="list-style-type: none"> • God til svejsning med vekselstrøm. • God bestandighed mod løsrivning af wolframpartikler ved tænding. • Mindre tendens til forurening af elektrode end ved ren wolfram. • Tendens til større varmebestandighed end ved ren wolfram. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dåligere tændegenskaber end ved ren wolfram.
LaO₂	WL10 WL20 WL30	<ul style="list-style-type: none"> • Anvendes til både jævn- og vekselstrøm. • Har længere standtid end thoriumlegerede elektroder. • Danner blank glat overflade ved vekselstrømsvejsning. • God bestandighed mod løsrivning af wolframpartikler ved tænding. 	<ul style="list-style-type: none"> • Større tendens til at løsrive wolframpartikler ned i smeltebad i forbindelse med tænding i forhold til WC-elektroder.
CeO₂	WC10 WC20	<ul style="list-style-type: none"> • Anvendes til både jævn- og vekselstrøm. • Har ikke tendens til at danne skæg. 	<ul style="list-style-type: none"> • Har større elektrodeslid ved svejsning med jævnstrøm end WL20.

		<ul style="list-style-type: none"> • Har gode tændegenskaber. 	
Sjæ.jord.	WS 2	<ul style="list-style-type: none"> • Anvendes til både jævn- og vekselstrøm. • Ved jævnstrøm har den tendens til længere levetid og større bestandighed mod varme end WT-legerede. • Har ikke så stor tendens til at danne skæg som WT-legerede. • Danner jævn og glat overgang på elektrodespidsen ved vekselstrøms svejsning. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kemisk indhold ikke oplyst. • Har større elektrodeslid ved svejsning med jævnstrøm end WL20.

Til vekselstrøms svejsning er de mest udbredte elektroder enten ren eller (oftere, i udlandet) zirkoniumlegeret wolfram. Hvis der ved vekselstrøms svejsning ønskes en større slidbestandighed, og større bestandighed mod løsrivning af wolframpartikler, kan elektroder legeret med enten lathan eller cerium med fordel anvendes.

Ved jævnstrøms svejsning anvendes i højere grad de thoriumlegerede elektroder. Et godt alternativ til de thoriumlegerede elektroder ved jævnstrøms svejsning er legeringer bestående af sjældne jordarter [2].

Elektrodedimensioner spænder fra 0,5 til 8 mm som standard, men de mest anvendte dimensioner til TIG-svejsning i aluminium ligger fra 1,0 – 4,0 mm. I Tabel 3.12 er sammenhørende elektrodediametre og interval af strømstyrke ved AC TIG svejsning vist.

Tabel 3.12 Anbefalede strømstyrker i henhold til DS/EN 26848- DS/ISO 6848.

Elektrode diameter mm	Vekselstrøm (Ampere)	
	Ren Wolfram	Wolfram legeret med oxider
1,0	15 – 55	15 – 70
1,6	45 – 90	60 – 125
2,0	65 – 125	85 – 160
2,5	80 – 140	120 – 210
3,2	150 – 190	150 – 250
4,0	180 – 260	240 – 350

Det er vigtigt, at strømbelastningen er korrekt i forhold til den valgte wolframdimension.

Ved for høj strømbelastning dannes der en uforholdsmæssig stor kugle på enden af wolframelektroden, som både giver en ustabil lysbue og dårlig energioverførsel, men samtidig også forøger risikoen for wolframudrivning til smeltebadet.

Ved for lille strømbelastning er der risiko for dårlig tænding, idet det kræver en vis forvarmning af elektroden først, inden lysbuen kan etableres. Ved for lille strømbelastning er der endog risiko for at de frie ioner fjernes fra overfladen af wolframelektroden, således at gentænding af lysbuen vanskeliggøres. Typisk kan dette observeres ved, at wolframelektroden bliver helt koksgrå op ad elektroden, samt ved at der sker en lysbuetilbagebrænding til gaskoppen. Energien fjernes derved fra smeltebadet med dårlig sømkvalitet som resultat.

Flere moderne inverter strømkilder kan i dag reguleres således, at man stort set kan fastholde den rundingsradius, på wolframelektroden, der er ønskelig.

3.5.3 KRAV TIL Udstyr

Ved anskaffelse af nyt udstyr til TIG svejsning i aluminium bør man være opmærksom på, at svejseudstyret opfylder krav som:

- Strømkilden bør som minimum være enten en ensretter baseret på Thyristorteknik, men ellers er en moderne transistorstyret inverter at foretrække.
- Strømkilden skal kunne levere den nødvendige strømstyrke. En typisk strømkilde kan levere op til omkring 400 amp.
- Endvidere skal strømkilden gerne være i stand til at håndtere puls-svejsning.

- Strømkilden skal være udstyret med en justerbar og trinløs regulering af maskinens karakteristisk samt reaktans (drossel), således at såvel blød som hård puls kan vælges.
- Strømkilden skal gerne være udstyret med eller forberedt for fjernbetjening eller dialogstyring.
- Strømkilden skal være integreret med eller forberedt for vandkøling til bl.a. pulssvejsning eller svejsning med høj intermittens.



Figur 3.25 Eksempel på transportabel TIG AC/DC strømkilde.



Figur 3.26 Eksempel på betjeningspanel til større TIG svejsemaskine.

TIG-svejsning udføres ofte ved montagearbejde, derfor er der krav til at udformning, vægt og transportmulighed, således at den også kan opfylde disse specielle behov.

Ved stationært arbejde er der krav til strømkildens udformning, således den ubesværet kan transporteres rundt i værkstedet, evt. gennem transportvogn monteret med hjulstørrelser, der gør transporten sikker.

Strømkilder er underlagt forskellige fremstillingsnormer, herunder krav til CE-mærkning, hvorfor det er vigtigt at disse efterleves og mærkning er synlig.

Tabel 3.13 Skema for en TIG-strømkildes nødvendige og ønskværdige egenskaber.

Nødvendige egenskaber		Ønskværdige egenskaber
Standardudstyr	TIG-Puls	TIG-Puls
<ul style="list-style-type: none"> • Udlæsning af strøm (ampere) • HF-tænding • Høj strømreserve for gode start- og gentændings-egenskaber • Justerbar AC-balance • Slope-down (kraterfyld) • Automatisk regulering af strømstyrke • Pre- og Postgas • Let at håndtere 	<ul style="list-style-type: none"> • 4-kant formet AC-bølge • Regulerbar Pre- og Post gas • Hvilestrøm • Udlæsning af strøm værdier og gennemsnitsstrøm 	<ul style="list-style-type: none"> • Slope-up (hindring af wolframsprøjt i start) • Hotstart • Fjernbetjening, gerne i form af dialogstyret brænder • Asymmetrisk strømbalance • Mulighed for justering af programmer • Interface for dokumentation af anvendte parametre • Synergisk gasforsyning • Mulighed for direkte programmering • Låsning af programmer • Kompakt, bærbar

3.5.4 FORSLAG TIL SVEJSEDATA

De følgende 4 tabeller viser forslag til svejsedata ved AC og DC TIG svejsning i aluminium.

Tabel 3.14 AC TIG svejsning af stumpsømme i aluminium.

Gods-tykkelse mm	Svejsestilling	Fugeform	Spalte-åbning mm	Tilsats- dia. mm	Wolfra- dia. mm	Gasmund- stykke dia. mm	Gas- flow l/min	Strøm- styrke amp	Svejse- hast. cm/min	Antal streng	Ca. forbrug kg/m
1,5	PA,PC,	I	0-1,5	2,0	1,6-2,4	10	8-10	50-80	20-25	1	0,008
	PF PE	I	0-1,5	2,0	1,6	10	10-12	50-70	20-25	1	0,008
2,5	PA	I	0-2,5	3,2	2,4-3,2	10	8-10	80-100	20-25	1	0,015
	PC,PF	I	0-2,5	2,4-3,2	2,4	10	8-10	70-100	20-25	1	0,015
	PE	I	0-2,5	2,4-3,2	2,4-3,2	10	10-12	80-100	20-25	1	0,015
3,0	PA	I	0-3,0	3,2-4,0	3,2	12	8-10	100-140	25-30	1-2	0,030
	PC,PF	I	0-2,5	3,2	3,2	12	8-10	90-130	25-30	1-2	0,030
	PE	I	0-2,5	3,2-4,0	3,2	12	10-12	100-130	25-30	1-2	0,030
5,0	PA	V-60°	0-3,0	4,0-4,8	4,0-4,8	12	10-12	160-180	25-30	2	0,068
	PC	V-60°	0-3,0	4,0	4,0	12	10-12	150-175	25-30	2	0,068
	PF	V-90°	0-3,0	4,0	4,0	12	10-12	130-160	25-30	2	0,075
	PE	V-110°	0-3,0	4,0	4,0	12	10-12	150-180	25-30	2	0,090
6,0	PA	V-60°	0-3,0	4,8	4,8-6,3	12	12-14	190-240	20-25	2	0,120
	PC	V-60°	0-2,5	4,8	4,8	12	12-14	160-220	20-25	2	0,120
	PF	V-90°	0-2,5	3,2-4,0	4,0-4,8	12	12-14	170-210	20-25	2-3	0,135
	PE	V-100°	0-2,5	4,8	4,8	12	14-16	190-240	20-25	2	0,150
10,0	PA	V-60°	0-3,0	4,8-6,0	6,0	15	14-16	270-340	20-25	2	0,230
	PC	V-60°	0-2,5	4,8	4,8-6,0	15	14-16	230-270	20-25	3	0,280
	PF	V-90°	0-2,5	4,8	4,8-6,0	15	14-16	220-280	20-25	3	0,330
	PE	V-110°	0-2,5	4,8	4,8-6,0	15	16-18	230-280	20-25	3	0,480

Svejsepositioner: PA = Oven-ned, PC = Side ind, PE =Under-op, PF = lodret

Tabel 3.15 AC TIG svejsning af kantsømme i aluminium.

Gods-tykkelse mm	Svejestilling	Antal strenger	Tilsats-dia. mm	Wolfram-dia. mm	Gasmundstykke dia. mm	Gas-flow l/min	Strømstyrke amp	Svejsehastighed cm/min	Ca. forbrug kg/m
1,5	PB,PG,PF	1	2,0	1,6 – 2,4	10	8	50-80	20-25	0,008
	PD	1	2,0	1,6 – 2,4	10	10	50-70	20-25	0,008
2,5	PB	1	2,4 – 3,2	3,2 – 4	10	9	90-130	20-25	0,015
	PG,PF	1	2,4	2,4	10	9	80-110	20-25	0,015
	PD	1	2,4	2,4	10	10	90-120	20-25	0,015
3	PB	1	3,2	3,2 – 4	12	10	120-160	25-30	0,030
	PG,PF	1	3,2	2,4 – 3,2	10	10	100-130	20-25	0,038
	PD	1	3,2	2,4 – 3,2	12	12	110-140	20-25	0,030
5	PB	1	4	4 – 4,8	12	12	160-220	20-25	0,068
	PG,PF	1	4	4 – 4,8	12	12	160-200	20-25	0,080
	PD	1	4	4 – 4,8	12	12	160-210	20-25	0,068
6	PB	1	4,8	4,8 – 6,3	12	12	190-260	20-25	0,105
	PG,PF	1	4,8	4,8	12	12	170-240	20-25	0,135
	PD	1	4,8	6,3	12	12	180-250	20-25	0,105
10	PB	2	4,8	6,3	15	14	290-360	20-25	0,250
	PG	2	4,8	4,8 – 6,3	15	14	230-300	20-25	0,300
	PF	3	4,8	4,8 – 6,3	15	14	220-290	20-25	0,300
	PD	3	4,8	4,8 – 6,3	15	16	230-310	20-25	0,250

Svejseposition: PB = Stående, PG= lodret faldende, PF = Lodret stigende, PD =Under-op

Tabel 3.16 DC-TIG svejsning af stumpsømme i aluminium i position oven-ned under heliumbeskyttelse.

Gods- tykkelse mm	Fuge geometri	Antal svejse- streng	Tilsats- materiale dia. mm	Wolfram dia. mm	Lysbue spænding volt	Strøm styrke amp	Svejse hastighed mm/sek
0.8	I-fuge	1	1.0	1.0	21	20	7.2
1.0	I-fuge	1	1.6	1.0	20	26	6.8
1.6	I-fuge	1	1.6	1.0	20	44	8.5
2.4	I-fuge	1	2.4	1.6	17	80	4.7
3.2	I-fuge	1	3.2	1.6	15	118	6.8
6.4	I-fuge	1	4.0	3.2	14	250	3.0
12.8	V-fuge	2	4.0	3.2	14	310	2.3
19.0	V-fuge	2	4.0	3.2	17	300	1.7
25.4	Dobb.V-fuge	3	6.4	3.2	19	360	0.6

(Bemærk at svejsehastigheden angivet er i mm/sek!)

Tabel 3.17 DC- TIG-svejsning af kantsømme i aluminium under heliumbeskyttelse.

Gods- tykkelse mm	Svejse- stilling	A-mål mm	Tilsats- materiale dia. mm	Wolfram dia. mm	Lysbue spænding volt	Strøm- styrke amp.	Svejse hastighed mm/sek
3,2	O/N	3,5	2,4	2,4	14	130	8,9
3,2	O/N	3,5	2,4	2,4	14	180	7,6
6,4	O/N	5,0	4,0	3,2	14	255	6,3
6,4	L/S	5,0	4,0	3,2	14	230	4,2
9,8	O/N	5,0	4,0	3,2	14	335	5,9
9,8	O/N	8,0	6,4	3,2	14	290	3,0

(Bemærk at svejsehastigheden er angivet i mm/sek!)

3.5.5 REFERENCER

Litteratur

- [7] *Successful Welding of Aluminium*
WTIA Technical Note No. 2
Welding Technology Institute of Australia, 1997.
- [8] *Welding Aluminum; Theori and practice*, Aluminum Association, 1997.
- [9] *Goda råd vid Aluminiumsvetsning*, Svetskommissionen, 1997.
- [10] **Schoer, Heinz**, *SchwerBen und Hartlöten von Aluminiumwerkstoffen*
DVS, 1998.
- [11] **Bernd Baumann**, *Hochleistungsschweißverfahren für aluminiumgerechte Konstruktionen*, (doktorafhandling) Aachener Berichte Fügetechnik (udgiver: Prof. Dr.-ing. U. Dilthey), 1998.
- [12] **Grave, Markus**, *Beitrag zum MIG- und WIG-schweissen von Aluminiumlegierungen*, (doktorafhandling) Aachener Berichte Fügetechnik (udgiver: Prof. Dr.-ing. U. Dilthey), 1998.

Tekniske rapporter

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0004, *Beskyttelsesgasser ved MIG- og TIG-svejsning af aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0005, *TIG-svejsning af aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0006, *Wolframelektroder til TIG-svejsning i aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0014, *Krav til strømkilder for TIG- og MIG-svejsning af aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0025, *Økonomiske beslutningsværktøjer ved valg af svejse- og produktionsproces*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0029, *Gastransporten ved svejsning af aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0031, *Start-stop problematikker ved MIG- og TIG-svejsning af aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0036, *Tilsatsmaterialer til svejsning af aluminium*

3.6 PLASMASVEJSNING

Plasmasvejsprocessen er især kendt i forbindelse med svejsning af rustfaste stål, hvor en god svejsekvalitet og pæn produktivitet relativt nemt opnås. Yderligere anvendes plasmasvejsning også i nogen grad til ulegerede stål, dog med et lidt flere begrænsninger med hensyn til processens muligheder. Til stålmaterialer anvendes jævnstrøm (DC-).

Plasmasvejsning er imidlertid til dato meget lidt anvendt til aluminium. Dette skyldes formentlig, at tilgangen hér umiddelbart har været lidt vanskeligere. Der anvendes normalt vekselstrøm med asymmetrisk, firkantbølget strømforløb. Først da NASA begyndte at eksperimentere med plasmasvejsning af aluminium, kom der gang i udviklingen, selv om også deres første forsøg blev gjort med DC- såvel som DC+. Først senere har plasmasvejsning med AC fundet større udbredelse.

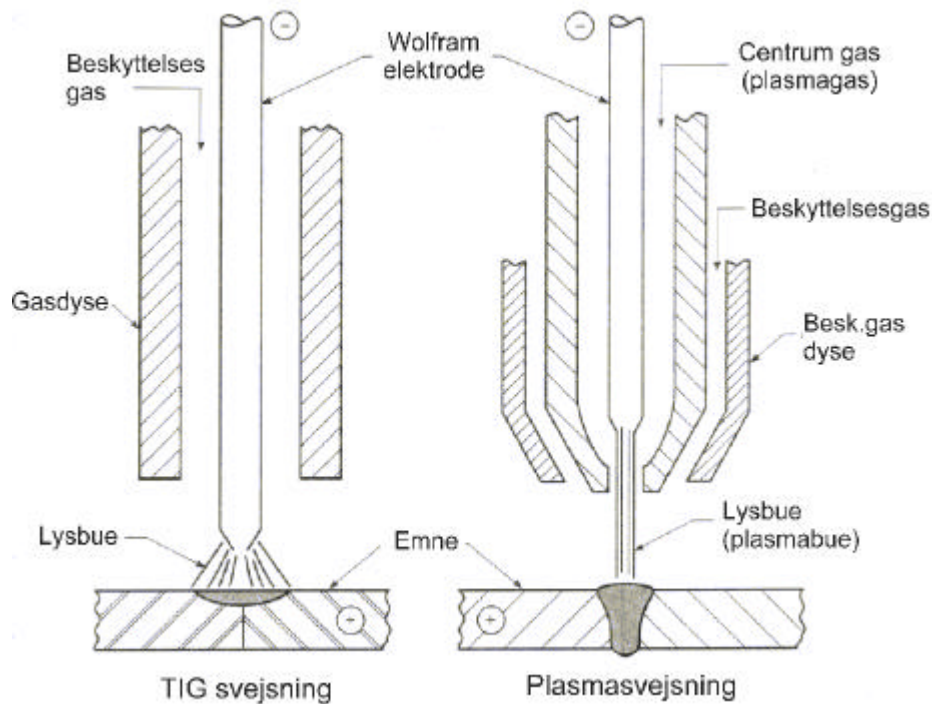
Ved samling af aluminium kan plasmasvejsning i en række situationer byde på et godt kompromis mellem en ganske stor produktivitet, god kvalitet og relativt beskedne investeringsomkostninger i forhold til alternative svejseprocesser.

3.6.1 PLASMASVEJSEPROCESSEN

Plasmasvejsprocessen har som udgangspunkt visse ligheder med TIG-processen. Oprindeligt er den da også udviklet på baggrund af erfaringer med TIG-svejsning. Man opdagede, at man ved at reducere diameteren på gasdysens hul ikke alene øgede gasstrømmens hastighed, men også øgede lysbuenes temperatur og koncentrerede dens energi. En kraftig indsnævring af gasdysens hul producerede en skærende lysbue, som siden med stor succes er brugt i forbindelse med skæring. Ved at moderere indsnævringen af dysehullet fandt man frem til, at lysbuen var velegnet til svejsning, med en række fordele frem for TIG-svejsning.

I modsætning til TIG-lys-buen, som er konisk, er plasmalysbuen udpræget cylindrisk. Det betyder, at små variationer i afstanden til svejsefugen har mindre betydning for koncentrationen af varme. En anden fordel er, at plasmalysbuen er meget ”stiv”. Den er ikke videre følsom overfor eksterne magnetiske påvirkninger, og det er nemt at få lysbuen til at ramme det ønskede sted, selv under vanskelige forhold.

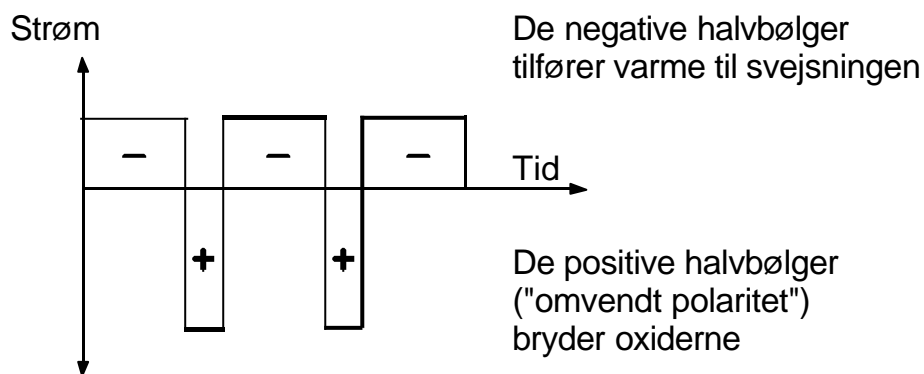
Ved traditionel plasmasvejsning af eksempelvis rustfrit stål anvendes jævnstrøm minuspol (DC-). Denne metode er ikke særligt egnet til aluminium, da oxiderne ikke brydes op, hvorfor de skal fjernes grundigt umiddelbart før svejsning. Dertil kommer, at selv om processen kan fungere på DC- med en vis rest af oxider, kan disse give anledning til poreproblemer.



Figur 3.27 Principskitse for henholdsvis TIG- og Plasma processen.

Plasmasvejsning med jævnstrøm plus-pol (DC+) kan anvendes ved mindre godstykkelser. Der opnås en god oxidopbrydning, men den høje varmebelastning på wolframelektroden betyder, at der skal anvendes en stor wolframdimension.

Det bedste kompromis og de bedste resultater ved plasmasvejsning af aluminiumlegeringer opnås oftest med variabel polaritet (vekselstrøm). Det er i SASAK projektet erkendt, at processen er mest effektiv, hvis den positive halvbølge når en noget højere strømstyrke end den negative (se Figur 3.28).



Figur 3.28 Strømførløb ved variabel polaritet med frit regulerbar balance mellem positiv og negativ polaritet samt separat regulering af strømmen i den positive halvbølge.

Plasma

Plasma er i svejsesammenhæng betegnelsen for en gas, der ved ekstrem høj varme er blevet ioniseret og derfor elektrisk ledende. Man kan betragte den som en ”grød”, hvor elektronerne ikke længere kredser om atomkernerne. Ved svejsning benyttes dette plasma til at lede den elektriske lysbue mellem wolframelektroden og emnet.

Gennem centrumdysen tilføres typisk argon som plasmagas. Gassen bliver opghedet og ioniseret mellem elektroden og svejsedyse ved hjælp af en pilotlysue (lille, konstant brændende lysbue, som overflødigør HF-tænding). Lysbuen overføres herefter i en stråle plasmagas til emnet. Da plasmagassen og den elektriske lysbue bliver tvunget gennem en snæver dyse, opnås med Plasma brænderen en høj varmekoncentration på et meget lille areal.

Rundt om centrumdysen tilføres en beskyttelsesgas. Ved svejsning af aluminium kan der være tale om argon eller argon/helium blandinger. Beskyttelsesgassen skærmer smeltebadet mod påvirkninger fra den omgivende atmosfære, samtidig med at den har en lysbuestabiliserende effekt.

Kølevæske ledes fra køleaggregatet via slangepakken til brænderhovedet og tilbage.

Køling af lysbuen

En vigtig parameter i forbindelse med indsnøringen af plasmalysbuen er afkølingsforholdene.

Det almindeligste er, at lysbuen ved passage af den vandkølede centrumdyse (plasmadyse) køles på ydersiden, så der opretholdes et lag af ikke-ioniseret gas mellem dysens væg og lysbuen. I modsat fald opstår der to lysbuer, idet den ene bue går fra wolframelektroden til dysen, og den anden går fra dysen til emnet. Der vil ikke ske nogen indsnøring, og dysen vil smelte.

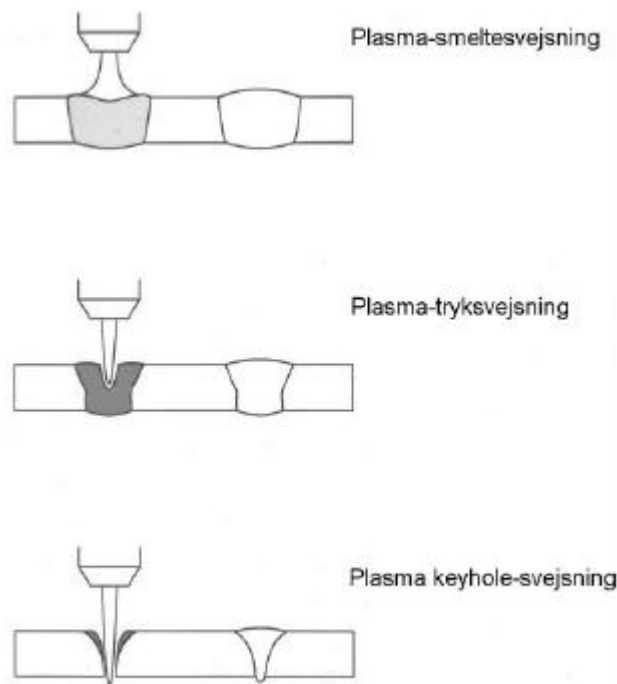
Den frie del af lysbuen køles af dækgassen (beskyttelsesgassen), som strømmer ud gennem den ydre gasdyse.

Til stålmaterialer anvendes ofte hydrogentilsætninger i dækgassen, da dissocieringen af hydrogenmolekyler til atomer giver en stor kølevirkning. Desværre er dette *ikke* anvendeligt til aluminium på grund af risikoen for hydrogenporer.

3.6.2 SMELTESVEJSNING, TRYKSVEJSNING, KEY-HOLE SVEJSNING

Traditionelt skelnes der mellem tre typer plasmavejsning (Figur 3.29):

- Plasma-smeltesvejsning, der primært anvendes til 0,1 til 3,0 mm godstykkelse
- Plasma-tryksvejsning, der primært anvendes til 1,0 til 4,0 mm godstykkelse
- Plasma-keyholesvejsning, primært fra 2-3 mm til 10 mm godstykkelse, for aluminium dog fortrinsvis fra ca. 3 til 7-8 mm (oven-ned).



Figur 3.29 Skitse af de 3 typer plasmavejsning.

Der er en glidende overgang mellem smeltesvejsning og tryksvejsning, og det kan være svært at definere en eksakt grænse mellem disse to typer plasmavejsning. Begge metoder giver en sikker svejsning med et flot sømudseende, og de kan være attraktive alene af rent visuelle årsager.

Keyhole-svejsning er kendetegnet ved, at plasmastrålen blæser et næsten cylindrisk hul tværs gennem samlingen. Bag ved keyholet løber det smeltede materiale sammen i en svejsning.

Ved keyhole svejsning er der mulighed for at lukke key-holet ved hjælp af en programmeret neddrogning af strøm, plasmagas og koldtråd. Således er det eksempelvis muligt at svejse stumpsømme i rør og beholdere uden efterreparationer.

Lodret stigende er den nemmeste position ved keyhole-svejsning i aluminium [4]. I denne stilling løber det smeltede materiale nemt sammen på bagsiden af key-holet på grund af tyngdekraften. Dette er eftervist både i Norge [4] og England [3]. Godstykkelser op til 15,9 mm er svejst i én streng med keyhole lodret stigende [2].

I SASAK projektet har fokus været på svejsning i stillingen oven-ned, som oftest vil være det mest anvendelige i produktionsmiljøer, så snart der ikke er tale om svejsning af rør og beholdere.

3.6.3 ANVENDELSESOMRÅDER OG PRODUKTIONSMÆSSIGE KONSEKVENSER

Plasmavejseprocessen egner sig i det væsentlige kun til mekaniseret svejsning. Til små godstykkelser *kan* man godt bruge plasmavejsning manuelt (smeltesvejsning), men det er noget vanskeligere end

TIG-svejsning. Lysbuelængden skal styres mere nøjagtigt end ved TIG-svejsning, samtidig med at man skal håndtere end brænder, som er noget større og tungere end en tilsvarende TIG-brænder.

Ved keyhole-svejsning vil de produktionsmæssige konsekvenser i relation til MIG og TIG primært være, at der stilles større krav til fugeforberedelse og tilpasning. Processen skal foregå i et værkstedsmiljø. I forbindelse med skibsbygning vil den være egnet til præfabrikation af paneler o.l., mens den vil være uegnet til montagesamlinger.

Fordele og ulemper ved Plasmasvejsning contra TIG- svejsning

Plasmasvejsning er som tidligere omtalt et alternativ til TIG-svejsning. Processens høje produktivitet gør den imidlertid også til et alternativ til andre svejseprocesser. Den kan i en række tilfælde således være et alternativ til henholdsvis MIG-svejsning eller lasersvejsning. Se i øvrigt afsnit 3.4 ”Valg af svejseproces”.

3.6.4 KRAV TIL UDSTYR

I princippet vil et konventionelt A/C TIG-udstyr ofte kunne anvendes, med tilføjelse af en plasmaforsats til strømkilden, et vandkølemodul, en plasmabrænder og en koldtrådsboks. Plasmasvejsning med key-hole i de kraftigste tykkelser har dog vist sig at være betinget af anvendelsen af strømkilder, som er i stand til at generere asymmetrisk firkantbølgeteknik med hensyn til både tid og strømintensitet inden for hver ”halvbølge”.

Det betyder, at der bør være mulighed for en separat indstilling af +/- balance samt separat +/- strømregulering i den positive halvbølge.

Eftersom plasmaudstyr typisk baserer sig på strømkilden til TIG-svejsning, gælder der stort set de samme krav til dette udstyr. Ved AC-Plasmasvejsning gælder dog i endnu højere grad, at reguleringen skal baseres på firkantbølger.

Specifikt for plasmaudstyr gælder det, at:

- Der bør forefindes digital udlæsning m.h.p. at kunne lave en nøjagtig gentagelse af en given indstilling
- Der bør forefindes automatisk gentænding af Pilotlysbue
- Der bør forefindes stabil Pilotstrøm samt mulighed for at indstille denne efter valg af brænder.
- Der bør forefindes en effektiv vandkøling: Der er mærkbart forskel på det svejseresultat, der kan opnås med henholdsvis god og dårlig køling af brænderen.
- Der bør være flowovervågning på vandkølingen: Hvis flowet ved et uheld afbrydes, kan brænderen ødelægges i løbet af minutter på grund af varmen fra pilotlysbuen.
- Der bør forefindes ”Gas-slope” på centrumgassen for lukning af key-hole.
- Der bør forefindes effektive og nøjagtige flowmetre for gasindstillinger



Figur 3.30 Plasmasvejsmaskine (Migatronic).



Figur 3.31 Eksempler på plasmabrændere (Thermal Arc).

Plasmasvejsedyser

Der findes forskellige slags dyser med hver deres fordele og ulemper:

Dysen af type a) på Figur 3.32 kan i princippet både bruges til indvendige sømme og stumpsømme, men tåler mindre varme, hvorfor den kun er egnet til svejsning af mindre godstykker.

Dyser af type b) og c): Begge er beregnet til svejsning af stumpsømme. Med flerhulsdyser opnås en lidt smallere svejsning på grund af en forøget indsnævring af lysbuen, men til gengæld forøges plasmagasforbruget med ca. 90% for at opnå et tilsvarende resultat ved keyhole-svejsning.



Figur 3.32 3 slags plasmasvejsedyser. Fra venstre:
a) Enkelthulsdyse til svejsning i indvendige hjørner.
b) Enkelthulsdyse til svejsning af stumpsømme.
c) Flerhulsdyse til svejsning af stumpsømme.

Dysetørrelser

Generelt er det en fordel at anvende en så lille dyse diameter som muligt for at opnå en maksimal indsnævring af plasmalysbuen.

I den forbindelse er det under forsøgene i SASAK erfaret, at der er en temmelig nøjagtig sammenhæng mellem maksimal strømbelastning og dyse diameter (plasmagas), som kan udtrykkes i tommelfingerreglen:

$$\text{Maks. strømbelastning (amp)} = \text{Dyse diameter (mm)} \times 100$$

Således vil en dyse med $\varnothing 3,2$ mm udvise en begyndende nedsmeltning af hulkanten ved strømstyrker på ca. 320 ampere og derover.

3.6.5 BESKYTTELSESGAS OG PLASMAGAS

Beskyttelsesgas

Ved plasmasvejsning af aluminium anvendes typisk følgende beskyttelsesgasser:

1. Argon
2. Ar/He 70/30

3. Ar/He 30/70

Et øget heliumindhold øges varmetilførslen til grundmaterialet. Dog lader det til, at virkningen ved tilsætning af Helium i beskyttelsesgassen ved plasmavejsning tilsyneladende ikke har helt så stor indflydelse som ved MIG- og TIG- processerne.

Beskyttelsesgasflow ligger typisk i størrelsesorden 15-25 l/min, afhængigt af især svejsehastigheden.

Plasmagas

Plasmagassen (centrumgassen) er som nævnt indledningsvis normalt argon.

Ved svejsning uden keyhole (dvs. melt-in) er det kun nødvendigt at have et ganske lille gasflow på 0,2-0,5 l/min. Et højere gasflow kan nemt skabe uønsket turbulens i smeltebadet.

Ved keyholesvejsning er plasmagasflowet en meget vigtig parameter, idet selv ganske små variationer af strømningshastigheden har stor indvirkning på svejsningens resultat. Det er derfor vigtigt, at styringen af flowet er præcis. I praksis betyder det, at flowcontrolleren ikke må være for følsom, hvilket kan være tilfældet hvis den dækker for stort et område. Vær også opmærksom på korrekt kalibrering af udlæsningen.

Ved key-hole svejsning ligger plasmagasflowet typisk i størrelsesorden 0,2-4,0 l/min afhængigt af godstykkelsen.

3.6.6 WOLFRAMELEKTRODER TIL PLASMASVEJSNING

Normalt anbefales en wolframelektrode legeret med 2% Cerium.

Ved forsøg i SASAK med alternative wolframelektrodetyper til plasmavejsning af aluminium er følgende legeringer i dimensionerne $\varnothing 4,0$ og $\varnothing 4,8$ mm blevet afprøvet:

a) WZ8	ZrO ₂	Zirkonium 0,8%	(Hvid)
b) WT20	ThO ₂	Thorium 2,0%	(Rød)
c) WL20	La ₂ O ₃	Lanthan 2,0%	(Blå)
d) WC20	CeO ₂	Cerium 2,0%	(Grå)
e) WS2	Sjældne jordarter	(Turkis)	

WZ8 Med denne legering, der ellers er fremragende til AC TIG kunne der pga. dårlige tændegenskaber ikke etableres en plasmalysbue.

WT20 Med denne Thoriumlegerede wolframelektrode var tændegenskaberne gode, men standtiden efter svejsning var utilfredsstillende. Elektroden må betegnes som uegnet til AC plasmavejsning.

WL20 Denne Lanthanlegering har glimrende tændegenskaber, og standtiden er fremragende. Plasmalysbuen er med denne elektrode meget stabil. Tåler temmelig høje strømstyrker. Særlig velegnet til AC plasmavejsning.

WC20 Denne Ceriumlegerede elektrode har gode tændegenskaber, og standtiden er god. Ved korrekt indstilling opnås en meget stabil plasmalysbue. Tåler høje strømstyrker. Særdeles velegnet til AC Plasmasvejsning.

WS2 Denne legering med sjældne jordarter (Wolfram, Lanthan, Ytrium og Zirkonium) har gode tændegenskaber og en tilfredsstillende standtid ved lave strømstyrker. Har en acceptabel plasmalysbue. Egnede til AC plasmasvejsning i lavere strømområder.

Baseret på ovennævnte erfaringer anbefales det at benytte Wolframelektroder legeret med **2% Cerium (grå)** eller **2% Lanthan (blå)**

Wolframslibning

Slibning af wolframelektroden er en væsentlig parameter af 2 årsager:

a) Hvis slibningsvinklen er for spids bliver enden af elektroden hurtigt deformeret, hvilket bevirker at man ikke kan bibeholde en stabil plasmalysbue uden at regulere wolframindstillingen flere gange. Man vil ende med en meget kugleformet afslutning på elektroden som vil forstyrre plasmagasflowet.

b) Hvis slibningsvinklen er for stump er det svært at tænde plasmalysbuen. Desuden er det svært at få tildannet en jævn kugle på elektrodespidsen hvilket igen bevirker en ustabil plasmalysbue.

En slibningsvinkel på 35 grader har vist sig tilfredsstillende for stabilitet og tændegenskaber.

3.6.7 EKSEMPLER PÅ SVEJSEDATA

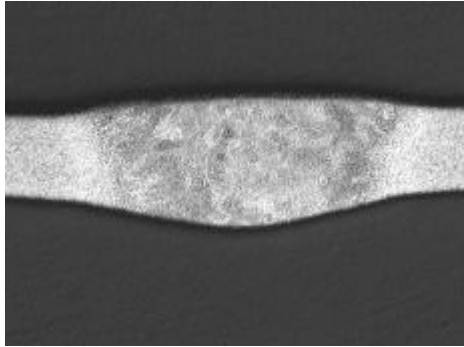
De anbefalede arbejdsområder og eksempler i dette afsnit er alle udviklet i SASAK (se rapport SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0035).

Godstykkelser 1 og 2 mm er svejst ved "melt-in" teknikken, altså uden key-hole.

For at opnå et godt resultat anbefales det at anvende tilsatstråd (typisk $\varnothing 1,0$ eller $1,2$ mm). Se afsnit om tilsatsmaterialer for valg af legering.

De ekstruderede legeringer (6000-serien) skal typisk svejses med lidt højere strøm (ca. 10%), dels på grund af legeringernes højere varmeledning, dels for at gennembryde deres tykkere oxidlag.

a) Svejsning af 1 mm plade



Figur 3.33 Tværsnit gennem plasmavejsning i legering 5083 (AlMg4,5Mn), t = 1 mm.

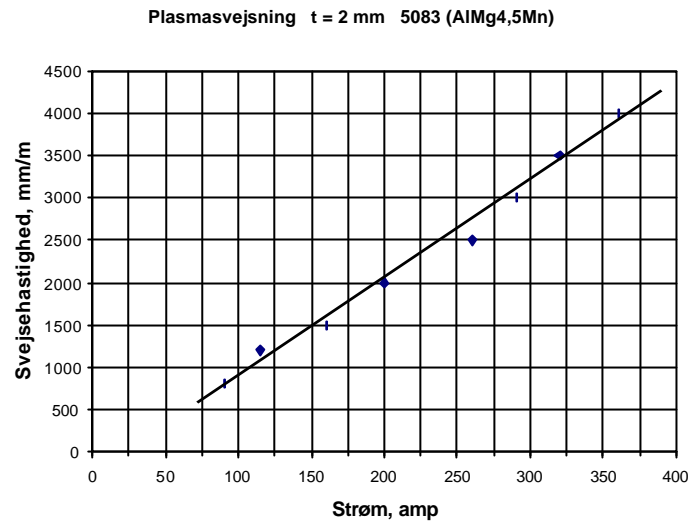
Stumpsømmen vist på Figur 3.33 er udført med en flerhulsdysse $\varnothing 3,5$ mm i stillingen oven-ned.

Svejsedata: Svejsenhastighed 2800 mm/min
Strømstyrke 140 amp.
Plasmagasflow 0,5 l/min

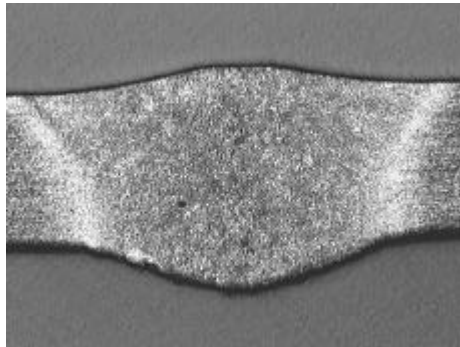
Tilsatstråd: AlMg5 $\varnothing 1,0$ mm

Ved anvendelse af højere hastigheder og mindre dysediameter kan svejsesømmen indsnævres noget i forhold til hér viste ca. 3 mm. Hastigheden kan øges til 10 m/min eller mere, afhængigt af størrelsen på strømkilden og brænderen.

b) Svejsning af 2 mm plade



Figur 3.34 Svejseshastighed som funktion af strømstyrke for stumpsømme i 2 mm plade.



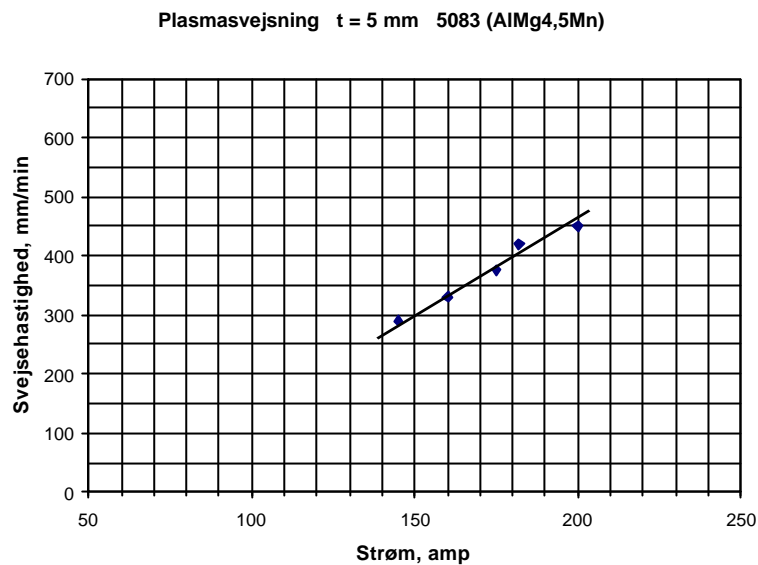
Figur 3.35 Tværsnit gennem plasmasvejsning i legering 5754 (AlMg3), t = 2 mm.

Stumpsømmen på Figur 3.35 viser en stumpsøm i 2 mm plade svejst med $\varnothing 3,5$ mm flerhulsdyse i stillingen oven-ned.

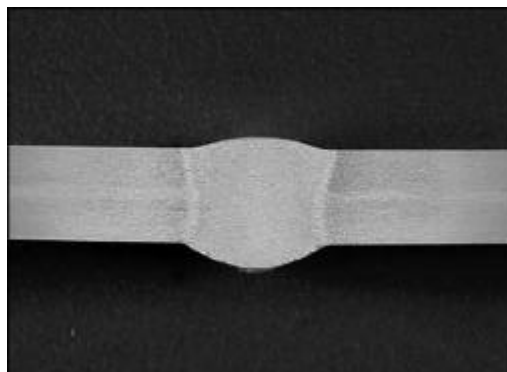
Svejsedata: Svejseshastighed 4000 mm/min
Strømstyrke 315 amp.
Plasmagasflow 0,5 l/min

Tilsatstråd: AlMg5 $\varnothing 1,0$ mm

c) Svejsning af 5 mm plade



Figur 3.36 Svejseshastighed som funktion af strømstyrke for stump sømme i 5 mm plade.



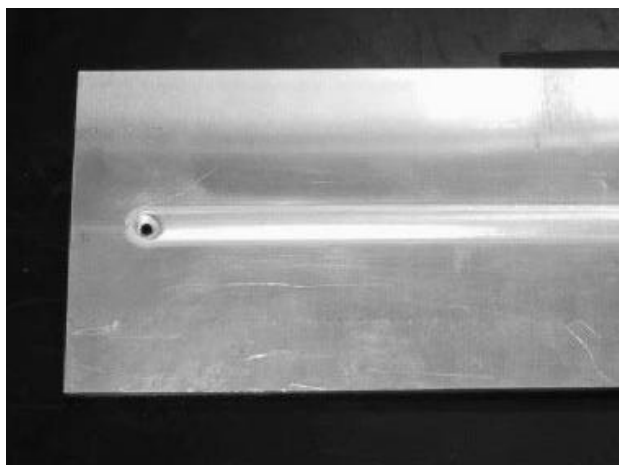
Figur 3.37 Tværsnit gennem plasma keyhole-svejsning i legering 5083 (AlMg4,5Mn), t = 5 mm.

Ved svejsning med key-hole er de anvendelige kombinationsmuligheder af strøm og svejseshastighed ikke så brede som ved smelte-teknikken i mindre godstykkelser. De anvendte data for svejsningen på Figur 3.37 har været:

Svejseshastighed:	420 mm/min
Strømstyrke (middelstrøm):	180 amp.
Plasmagasflow:	2,7 l/min
Tilsatstråd:	AlMg5 \varnothing 1,0 mm
Dyse:	\varnothing 3,5 mm flerhulsdyse

En røntgenundersøgelse afslørede ingen porer eller andre svejsfejl.

d) Svejsning af 8 mm plade



**Figur 3.38 Plasma key-hole svejsning, færdigsvejt i én streng.
Materiale: 6063, t=8 mm. Svejseshastighed 200 mm/min.**

Figur 3.38 viser en plasmasvejsning i 8 mm materiale af legering 6063.

Svejsedata:	Strøm (middel): 196 amp
	Beskyttelsesgas: 15-18 l/min
	Plasmagas: 3,0 l/min
	Frekvens: 60 Hz
	Balance på cyklus: 70% af tiden på –pol
	Svejseshastighed: 200 mm/min
	Tilsatstråd: AlSi5 \varnothing 1,2 mm
	Tilførselsrate for tråd: 100 mm/min

Forberedelser før svejsning

Svejsningerne vist i dette afsnit er svejst uden nogen forudgående afrensning eller børstning af pladerne. Svejsresultaterne var gode, men dette kræver naturligvis kontrollerede lagrings- og værkstedsforhold. Se i øvrigt afsnit 3.18 for generelt anbefalede forholdsregler under værkstedsforhold.

3.6.8 BETRAGTNINGER VEDRØRENDE SVEJSEFIKSTUR

Ved plasmasvejsning af aluminium har det vist sig at være umuligt at reproducere en keyholesvejsning med uændrede parametre flere gange i træk inden for kort tid. Dette skyldes, at svejsefiksturen akkumulerer varmen fra svejsningen, hvorved en stigende temperatur hurtigt overføres til de næste emner på grund af aluminiums gode varmeledningsevne. Det bevirker at man skal tilføre mindre og

mindre energi for at opnå det samme resultat, hvilket er praktisk umuligt at styre i en i en daglig produktion.

Det er derfor en forudsætning for en ensartet svejsekvalitet ved plasmasvejsning med keyhole i aluminium, at fiksturen er kølet med vand, så en fuldstændig ens temperatur overføres til emnerne fra gang til gang.

En anden mulighed vil være at bruge varmt vand til fiksturen. Dette vil medføre en væsentlig reduktion af behovet for tilført energi fra lysbuen, hvilket i større godstykkelser (5-12 mm.) vil aflaste strømkilde og plasmabrænder.

Rapport SASAK-RAP-SV-MIG-0034 beskriver undersøgelser af fiksturers indflydelse.



Figur 3.39 Vandkølet specialfikstur (Migatronic).

Anvendelse og design af fiksturer

Der findes kun få kommercielle standardfiksturer, men mange lette og svære "clamp" enheder er tilgængelige. Disse enheder kan leveres indbygget i specielle fiksturer for storproduktion, eller i justerbare og fleksible fiksturer, der nemt kan omstille til mindre produktion også.

Det mest almindelige er dog, at virksomhedens egne folk designer og bygger fiksturer tilpasset deres egen specialiserede produktion.

Et fikstur bør generelt designes på grundlag af mindst følgende kriterier:

- Svejsefugen skal være tilgængelig i fiksturet.
- Fiksturet skal være mere stiv i sin konstruktion end samlingen.
- Fastholdelseenheder såsom clamps, bolte m.m. skal være beskyttet imod svejseprøjt.

- Fiksturet skal tillade samling af enheden med et minimum af midlertidige hæftninger, som er synlige efter svejsning.
- Arbejdsstykker skal være lette at fjerne efter at svejsningen er afsluttet og komplet.
- Sikre ensartet varmeafledning.

Ved svejsning i aluminium er behovet for brug af fiksturer mere udpræget end i forhold til andre materialer.

Ved konstruktion af fiksturer for aluminium er det på grund af aluminiummaterialets meget høje varmeledningsevne, særlig vigtigt at tage hensyn til fiksturets varmeafledende egenskaber. Varmetransmission gennem dets enkeltdele har i langt højere grad indvirkning på de termiske forhold omkring svejsestedet. Der bør skabes en veldefineret og ensartet varmeafledning til fiksturet for at opnå reproducerbare svejseresultater.

En ensartet varmeafledning fra smeltezonen opnås ved at sikre:

- Konstant afstand til varmeafledende fiksturkomponenter.
- Konstant temperatur af disse.
- Ensartet termisk kontakt mellem svejseemne og fikstur.

3.6.9 REFERENCER

Litteratur

- [13] *Successful Welding of Aluminium*
WTIA Technical Note No. 2
Welding Technology Institute of Australia, 1997.

- [14] *Welding Aluminum; Theory and practice*
Aluminum Association, 1997.

- [15] *Goda råd vid Aluminiumsvetsning*
Svetskommissionen, 1997.

- [16] *Schweißen und Hartlöten von Aluminiumwerkstoffen*
Schoer, Heinz
DVS, 1998.

- [5] *TIG- & plasmasvejsning*
Palle Aastrup
FORCE publikation 88.34.

Tekniske rapporter

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0025, *Økonomiske beslutningsværktøjer ved valg af svejse- og produktionsproces.*

SASAK-RAP-SV-AKS-MIG-0034, *Kontrol af temperatur på svejsefikstur - effekt på svejseresultat.*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0035, *Plasmasvejsning af aluminium.*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0036, *Tilsatsmaterialer til svejsning af aluminium.*

3.7 MIG-SVEJSNING

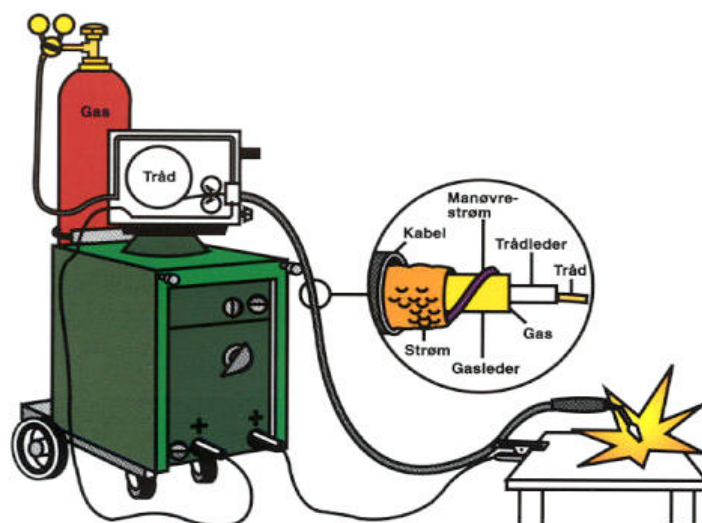
MIG/MAG-svejsning blev allerede introduceret i begyndelsen af 1950'erne, men blev kun anvendt i meget begrænset omfang de første 20-30 år. Efterhånden som svejsemaskinerne blev forbedret, og man lærte processen bedre at kende, blev teknikken mere udbredt. Det var først i 1970'erne, at man i større omfang indførte MIG/MAG-svejsning i industrien, hvilket ofte var på bekostning af elektrodesvejsprocessen.

Bl.a. forårsaget af den stadigt stigende internationale konkurrence har man på verdensplan løbende forsøgt at effektivisere MIG/MAG-processen samt at udvide anvendelsesområdet.

Ud over forskellige tråde- og gassammensætninger har man således gennem tiden udviklet forskellige varianter indenfor MIG/MAG-processen såsom puls- og tandemteknikken.

Mht. strømkilderne er der ligeledes sket en stor udvikling især hen mod stigende digitalisering, hvilket har gjort dem mere brugervenlige, fleksible og stabile.

MIG/MAG-processen kræver udstyr bestående af hovedelementerne: Strømforsyning (DC), trådtilførsel, beskyttelsesgas og svejsebrænder- se Figur 3.40.



Figur 3.40 Principskitse af opstilling ved MIG/MAG svejsning.

I dag udføres størsteparten (60-70 %) af al svejsning i metalindustrien i Europa med MIG/MAG-processen. Denne store udbredelse af MIG/MAG-processen skyldes hovedsageligt, at processen er meget fleksibel, hvilket betyder at den er egnet til et bredt udsnit af svejseopgaver herunder, til godstykkelser fra 1 mm og op, ved alle stillinger og i stort set alle metaller, herunder aluminium.

MIG/MAG-processen udmærker sig derudover ved at stille forholdsvis små krav til fugetolerancer samt muliggøre store afsmeltningssydelser. Disse egenskaber kombineret med den kontinuerlige tråd gør bl.a. MIG/MAG-svejsning særlig egnet til automatiseret svejsning.

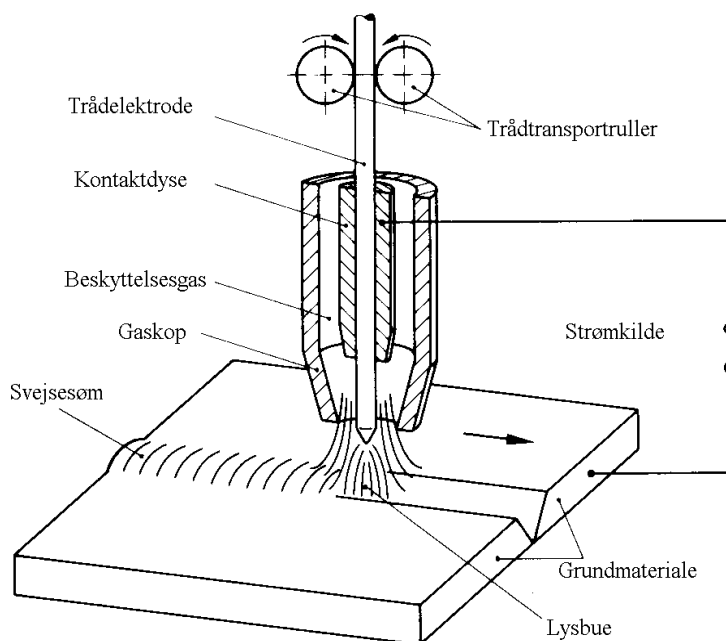
Betegnelsen MIG står for ”Metal Inactive Gas”, hvilket anvendes hvis beskyttelsesgassen er inaktiv. Hvis der anvendes en aktiv gas kaldes samme proces for MAG svejsning. Processen kaldes undertiden også for CO₂ svejsning, hvilket udspringer af, at CO₂ blev anvendt som beskyttelsesgas i begyndelsen.

Ved svejsning i aluminium anvendes (med meget få undtagelser) kun inaktive gasser, og derfor anvendes primært betegnelsen MIG i resten af dette kapitel.

3.7.1 PROCESBESKRIVELSE

Ved MIG-svejsning brænder en elektrisk lysbue mellem en kontinuert tilført trådelektrode og svejsestedet – se Figur 3.41. Svejestrømmen i det lukkede elektriske kredsløb overføres til trådelektroden gennem en kontaktdyse. Trådelektroden føres frem via drivruller og afsmeltes i dråber, der overføres gennem lysbuen til smeltebadet. De afsnørede dråber er især påvirket af de magnetiske kræfter i det elektriske kredsløb, der i afsnøringsøjeblikket skyder dråberne af sted mod smeltebadet med stor acceleration. Dette kaldes også ”pinch” effekten, hvilket bl.a. er medvirkende til, at der opnås en relativt dyb indtrængning, samt at stillingssvejsning er muligt.

Ved MIG-svejsning i aluminium anvendes der altid DC plus på brænderen, hvilket giver en effektiv oprensning af oxidlaget.



Figur 3.41 Principskitse for MIG-svejsning. Lysbuen overføres mellem den afsmeltende tråd og emnet.

Ved MIG-svejsning i aluminium beskyttes svejsestedet af en inaktiv gas, der som regel består af ren argon eller en blanding af argon og helium. Beskyttelsesgassen tilføres gennem gaskoppen med et konstant gasflow ud omkring svejsestedet hovedsageligt med den hensigt at stabilisere lysbuen samt

forhindre indeslutninger i svejsemetallet af oxygen og nitrogen fra den omgivende atmosfæriske luft. – se afsnit 3.8: Beskyttelsesgasser.

I forbindelse med MIG-svejsning i aluminium er især pulsteknikken egnet, idet denne metode er fleksibel og stabil, hvilket bl.a. giver god sikkerhed for en tilfredsstillende svejsekvalitet.

I visse situationer, eller pga. maskinbegrænsninger, kan konventionel spraybue-svejsning også med fordel anvendes til svejsning i aluminium.

Kortbue-teknikken, hvor der svejses med lave svejseparametre, er mindre egnet til svejsning i aluminium, men anvendes dog alligevel af og til.

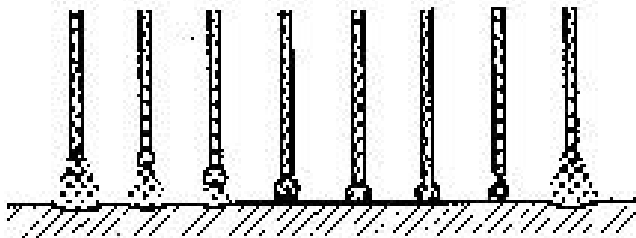
Hvilken teknik eller bueform der bør anvendes afhænger især af:

- Materialetykkelse
- Svejsesømform
- Svejestilling
- Svejsemaskinens muligheder

MIG kortbue

Kortbueteknikken anvendes kun i meget begrænset omfang ved MIG-svejsning i aluminium, specielt pga. risikoen for bindingsfejl og svejsesprøjt.

Ved kortbue-svejsning svejses der med lav spændings- og strømstyrkeniveau, således at tilsatstråden med høj frekvens kortslutter og afsmelter nede i smeltebadet.



Figur 3.42 Trådafsmeltning ved kortbue MIG-svejsning.

Ved begrænsninger i svejseværk for anvendelse af pulssvejsning, og hvor der i højere grad kræves svejsning med lave svejseparametre, eksempelvis ved små godstykkelser eller ved stillingsvejsning, kan kortbue-teknikken dog anvendes.

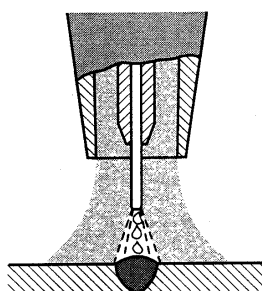
Til standardopgaver i tyndpladeområdet, der ikke er underkastet samme strenge regelsæt som til f.eks. tank- og skibsbygning, vil man i nogle tilfælde kunne klare sig med traditionel kortbue-svejsning.

Der stilles dog større krav til sikkerhed for god indtrængning, og dermed også større bevågenhed fra svejserens side, idet den "kolde" svejsemetode især i start øjeblikket kan give anledning til manglende indbrænding.

Der er en økonomisk fordel ved kortbue-teknikken frem for puls-teknikken, idet et traditionelt svejseværk er væsentlig billigere end de "forholdsvis" dyre inverter baserede pulsmaskiner.

MIG-spraybue

Spraybuesvejsning er kendetegnet ved en meget findråbet materialeovergang i centerlinien af lysbuen – se Figur 3.43. De relative små dråber slynges mod smeltebadet pga. pinch-effekten.



Figur 3.43 MIG spraybue.

Ved Spraybuesvejsning svejses der med relativt høj strømstyrke og lysbuespænding i forhold til tråddiameteren. Det bedste resultat fås, hvis lysbuen snerrer eller syder lidt.

Især strømstyrken skal op over en hvis grænse, før der opnås en stabil spraybue. Under denne grænse forekommer der typisk uregelmæssige store afsmeltninger, med risiko for ustabil lysbue, bindingsfejl og sprøjt. Dette kaldes også for blandbue-svejsning. Strømgrænsen mellem blandbue og spraybue stiger med stigende tråddiameter.

I bestræbelserne på at øge produktiviteten ved MIG-svejsning i stål, har man gennem de sidste to årtier eksperimenteret med svejsning i meget høje strøm- og spændingsområder. I disse høje parameterområder kan der opnås anderledes former for trådafsmeltning såsom forceret kortbue (Rapid arc), roterende lysbue m.m.

Ved MIG-svejsning i aluminium er der imidlertid ikke de samme muligheder for at øge svejseparametrene. Eksempelvis er der med en 1,2 mm AlMg tråd en øvre grænse for strømstyrken på ca. 350 A med en trådhastighed på 20-22 m/min. Hvis strømstyrken øges yderligere, stiger lysbuetrykket kraftigt, og smeltebadet bliver svært at kontrollere.

Ved spraybuesvejsning er varmetilførslen til emnet relativt stor, hvilket betyder, at smeltebadet bliver stort og letflydende, og at metoden derfor reelt kun er velegnet til oven-ned svejsning i stump- og kantsømme. For aluminium gælder det, at spraybuesvejsning specielt anvendes til svejsning af kantsømme, hvor kravet til høj svejsehastighed samt god indtrængning er stort.

MIG-Puls

Synergisk MIG-pulssvejsmaskiner blev opfundet af The Welding Institute i England, og omkring 1980 blev de først maskiner anvendt industrielt.

Ved svejsning i aluminium kan der opnås en række væsentlige fordele ved at anvende puls-teknikken i forbindelse med at opnå kvalitets svejsning med høj produktivitet.

Ved korrekt anvendelse kan følgende fordele opnås:

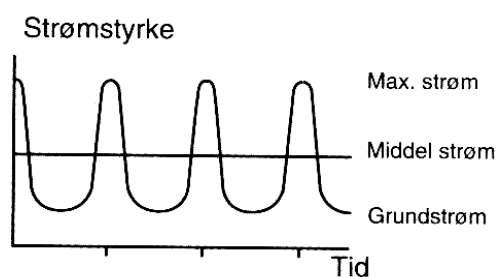
Mulighed for øget kontrol af varmetilførsel og indtrængning, hvilket er en stor fordel ved stillingssvejsning eller svejsning i mindre godstykkelser.

Relativt lidt eller ingen svejseprøjt også ved lave middelstrømstyrker, hvor materialeovergangen i lysbuen ellers ville være sket ved kortbueteknik eller ved store uensartede dråber, med meget sprøjt til følge.

Mulighed for at svejse med øget tråddiameter, hvilket er billigere samt mere driftsikkert mht. trådfremføring. Fordelagtigt især ved mekaniseret og automatiseret svejsning.

I visse tilfælde har man registreret en reduktion af porer i svejsemetallet, hvilket er søgt forklaret ved at inducerede vibrationer i smeltebadet bevirker at gasbobler hurtigere slipper ud.

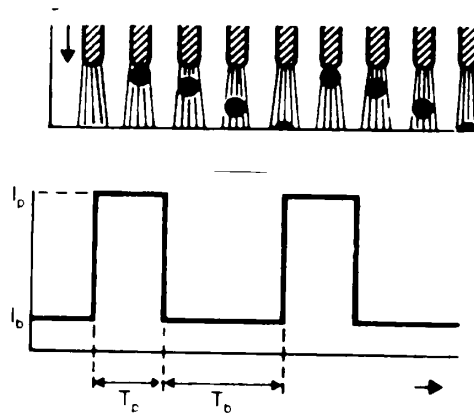
Ved pulssvejsning varierer svejsestrømmen mellem to niveauer med en passende frekvens. Det lave strømniveau kaldes en grundstrøm, hvilket forekommer i en såkaldt grundtid. Herefter stiger strømmen til det høje niveau, der kaldes en pulsstrøm, hvilket forekommer i en såkaldt pulstid – se Figur 3.44.



Figur 3.44 MIG-Puls med angivelse af middelstrøm.

Middelstrømmen er defineret som en gennemsnitlig strøm der anvendes over en pulsperiode.

Ideelt set skal der afsnøres en dråbe fra tilsatstråden for hver pulsstrøm – se Figur 3.45. For at opnå en stabil proces skal frekvensen være nøje indstillet efter trådhastigheden. Med stigende trådhastighed stiger den nødvendige frekvens, for at der afsnøres en dråbe af passende størrelse for hver puls. Frekvensen indstilles som regel, så der afsnøres en dråbe af den kontinuert fremførte tråd med en størrelse svarende til ca. trådens diameter.



Figur 3.45 MIG-Puls cyklus.

For at opnå en stabil proces er især valget af pulsstrømmen og pulstiden vigtige parametre, hvilket især afhænger af trådhastigheden, tr addediameter, tr addedmateriale og beskyttelsesgas.

Hvis svejseudstyret automatisk styrer forholdet mellem frekvens og tr addedhastighed kaldes det for synergisk styret puls svejsning.

Nyere inverter baserede svejsemaskiner giver mulighed for at vælge mellem mere varierede strømforløb, og dermed optimere på strømforløbet til konkrete svejseopgaver.

Med disse svejsemaskiner er det således i mindre grad et problem at få leveret den ønskede strømkurve hen over en pulsperiode; men snarere et spørgsmål om at vælge den ideelle strøm- og spændingskurve.

3.7.2 MIG TANDEMSVEJSNING

I begyndelsen af 1990'erne udviklede man MIG/MAG-svejsemaskiner, hvor der svejses med to tr addede i samme smeltebad. Det primære formål med denne teknik, der normalt kaldes tandemsvejsning, er at opnå højere svejsehastigheder og større afsmeltningssydelser.



Figur 3.46 MIG-brænder til tandemsvejsning.

Tandemteknikken blev allerede afprøvet i 1970'erne, men på det tidspunkt havde man ikke den nødvendige teknologi til at etablere en stabil lysbue med to tråde i samme smeltebad. Så sent som 1993/1994 kom de første svejsemaskiner til MIG/MAG tandemsvæjsning på markedet, og i dag kan flere forskellige leverandører tilbyde tandem-svejsemaskiner.

Tandem MIG-svejsning er kun egnet til mekaniseret eller robotiseret svejsning, da svejsehastighederne typisk er relativt høje og brænderen er relativt tung, hvilket gør manuel svejsning uegnet.

Ved anvendelse af tandemteknikken kan nedsmeltningssydelsen og svejsehastigheden øges ganske betydeligt, uden at det har negativ indflydelse på svejsekvaliteten.

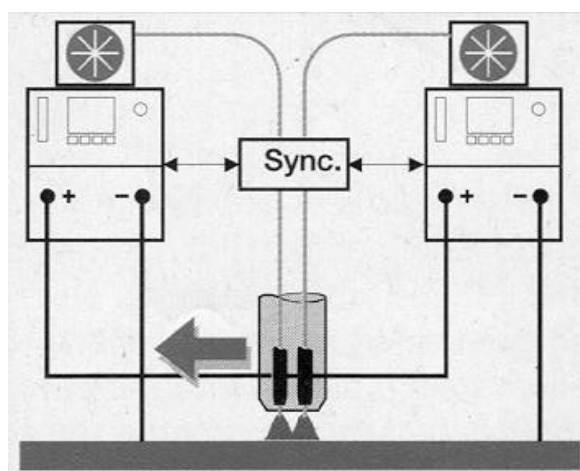
Det er ikke usædvanligt at svejsehastigheden kan fordobles eller tredobles ved at skifte fra traditionel MIG til tandemteknikken.

På trods af tandemteknikkens korte levetid anvendes den allerede i stort omfang i den europæiske industri, og alt tyder på at den vil finde større udbredelse i fremtiden.

Procesbeskrivelse

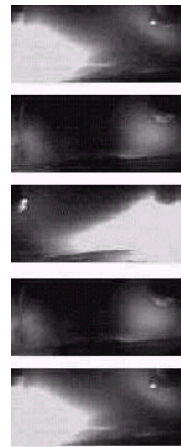
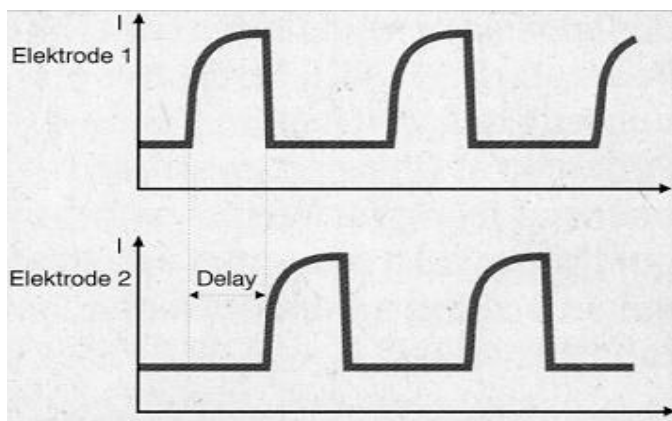
Svejsudstyret til MIG tandemsvæjsning består i princippet af to konventionelle strømkilder med hver sin trådfremføring. Trådlinjerne fra hver svejsemaskine føres sammen i en slange ud til en specialbygget vandkølet brænder med to separate kontaktdyser, hvorigennem trådene føres ned til samme smeltebad. Trådene er typisk forskudte fra hinanden i svejseretningen med en indbyrdes afstand mellem 5 og 20 mm, se Figur 3.47.

Ved MIG tandemsvæjsningen anvendes to kontaktdyser, der er isoleret fra hinanden. De to tråde styres separat af hver sin svejsemaskine, og det betyder, at der kan svejses med forskellige svejseparametre på hver tråd, hvilket naturligvis giver en meget stor fleksibilitet i svejseforløbet.



Figur 3.47 Princip ved MIG tandem-svejsning – 2 svejsemaskiner og 1 svejsebrænder.

Ved tandemsvæjsning anvendes der pulssvejsning, hvor pulsparametrene fra de to svejse-maskiner er synkroniseret, således at trådene skiftevis modtager en pulsstrøm, se Figur 3.48.



Figur 3.48 Ved skiftevis (synkroniseret) pulsning opnås en stabil proces.

Trådene skiftes således til at afsnøre en dråbe, hvilket giver en stabil proces med relativt lidt svejsesprøjt.

I de første par år efter introduktionen af tandem svejsning, havde man ikke fundet ud af fordelene ved at have to isolerede kontaktdyser og synkronisere pulserne på de to tråde. I stedet anvendte man teknikken ”twin-arc”, hvor der kun blev benyttet én kontaktdyse med to borer til trådene. Twin-arc teknikken gav en noget ustabil lysbue med forholdsvis meget svejsesprøjt som følge, og derfor anvendes denne teknik ikke mere.

Varmetilførsel

Ved MIG tandemsvæjsning er niveauet af svejseparametrene strøm og spænding på hver tråd, i samme område som ved traditionel MIG/MAG-pulssvejsning med én tråd.

Varmetilførslen Q ved tandemsvæjsning beregnes ved at addere varmetilførslen fra hver tråd efter følgende ligning:

$$Q = 0,8 * \frac{(I_1 * U_1 + I_2 * U_2) * 60}{v * 1000} \text{ [KJ / mm]}$$

Hvor:

- I_1 = middel strømstyrke på første tråd [A]
- I_2 = middel strømstyrke på anden tråd [A]
- U_1 = middel spænding på første tråd [V]
- U_2 = middel spænding på anden tråd [V]
- v = svejsehastighed [mm/min]

På trods af at der i princippet tilføres effekt fra to tråde, er den samlede varmetilførsel ved tandem-svejsning faktisk ofte mindre end ved almindelig MIG-svejsning med enkelt tråd, da svejsehastigheden som regel er 2 - 3 gange højere – se eksemplet i Figur 3.52. Mht. de metallurgiske egenskaber kan tandem-svejsning sammenlignes med traditionel MIG-svejsning.

Anvendelse af tandemteknikken

Tandem-svejsning kan kun anvendes som mekaniseret (ikke manuel) svejsning. Det er især ved svejseopgaver, der i forvejen løses ved almindelig MIG-spraybue svejsning, og hvor man ønsker at reducere svejsetiden, at tandem-svejsning er anvendelig.

Anvendelsesområdet for tandem-svejsning kan generelt sammenlignes med anvendelsesområdet for mekaniseret spraybue MIG-svejsning. Der kan tandem-svejses i aluminium i godstykker fra 1 mm og opefter.

Tandem-svejsning er især egnet til kantsømme, overlapsømme og opfyldningsstrengene i stumpsømme. Ud over aluminium kan tandemteknikken også anvendes til svejsning i ulegerede, legerede og rustfaste stål.

I den forbindelse skal det nævnes, at tandemteknikken især er fordelagtig til større mængder svejsning og specielt svejsninger over længere distancer; gerne mere end én meter, for at kunne udnytte de høje svejsehastigheder.

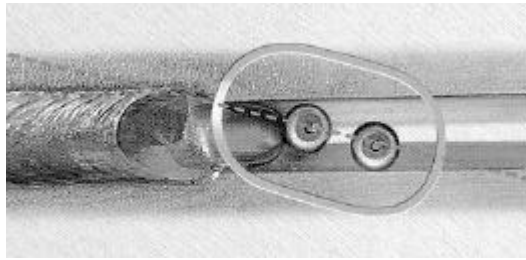
Svejekvaliteten og de metallurgiske egenskaber ved tandem MIG-svejsning kan sammenlignes med traditionel MIG spraybue svejsning med én tråd.

De i længderetningen forskudte tråde bevirker, at man får et relativt langt smeltebad, hvor gasforekomster på trods af den høje svejsehastighed har tid til at slippe ud af smelten.

Af ulemper kan det nævnes, at svejsebrænderen til tandem-svejsning er relativt stor, hvilket i nogle tilfælde kan give anledning til adkomstproblemer. Det kan også være en ulempe, at der med tandemteknikken er væsentlig flere svejseparametre at holde styr på, hvilket dog samtidig betyder at teknikken er mere fleksibel.

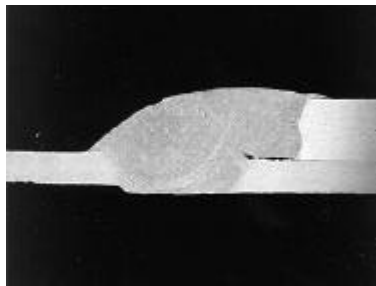
De sidste nye to-tråds-svejsemaskiner giver mulighed for at skifte mellem anvendelse af to tråde og én tråd. Det giver mulighed for at udføre svejsearbejde på vanskelige steder, hvor det ikke er hensigtsmæssigt at benytte svejsning med to tråde.

En anden fordel ved to-trådsteknikken er muligheden for at forskyde de to tråde til siderne, hvilket giver øgede muligheder for eksempelvis opfyldning af større og bredere fuger (Figur 3.49).



Figur 3.49 Tandem MIG-brænder med sideværts forskudte tråde.

Ved tandemsvejsning i tyndere aluminium kan der under gunstige forhold opnås forholdsvis høje svejsehastigheder på op til 2-3 m/min – se eksempel Figur 3.50.



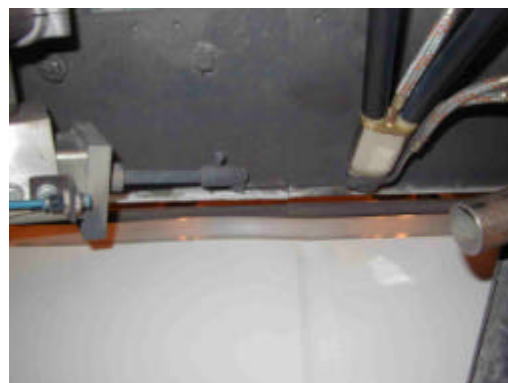
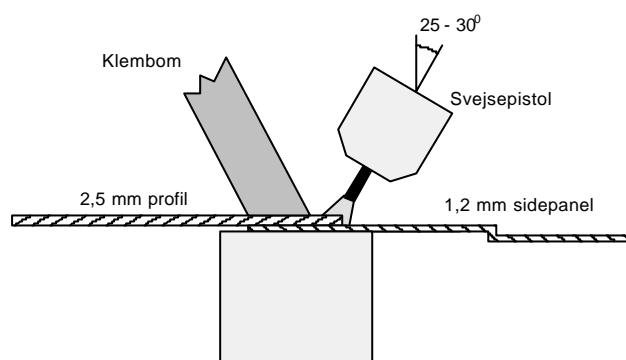
Figur 3.50 Tandemsvejsning af 1,2 mm til 0,8 mm tynd aluminiums-plade med en svejsehastighed på ca. 2,5 mm/min.

De vigtigste forudsætninger for at kunne svejse med så høje fremføringshastigheder ved anvendelse af tandemteknikken er en nøjagtig fugetildannelse, god varmeafledning evt. med vandkølet underlagsskinne/-backing og en stabil fremføring. Generelt gælder det, at jo mere processen optimeres i form af højere svejsehastighed, jo større krav stilles der til opstillingen og udstyret.

Gennem forsøgsarbejde i SASAK-projektet er det konstateret, at der kan tandemsvejses i aluminium i godstykkelser ned til ca. 1 mm. Ved svejsning i godstykkelser under 1 mm er der risiko for udbulinger langs svejseømmen.

Eksempel på anvendelse af tandemsvejsning

På Mærsk Container Industri (MCI) anvendes der tandemsvejsning til svejsning af 11,5 m lange overlapsamlinger i aluminium. På Figur 3.51 er den aktuelle svejseopgave vist.



Figur 3.51 Overlapsøm i aluminium svejst med tandemteknikken hos MCI.

Som vist på Figur 3.51 anvendes en klembom øverst og en vandkølet underlagsskinne med konstant temperatur på 15°C nederst. Der anvendes AlMg5 tråd og Fronius T.I.M.E. TWIN svejsemaskiner med push-pull. Med tandemteknikken er svejsehastigheden ca. 2,5 m/min.

På MCI er det erfaret, at der stilles forholdsvis store krav i form af en stabil fremføring af brænderen og en ensartet opstilling, for at opnå en reproducerbar god svejsekvalitet med så høj en svejsehastighed i så tynde aluminiumsplader. Fremføringen består derfor af kraftige og simpelt opbyggede vogne. Den vandkølede underlagsskinne er med til at sikre ensartede svejseforhold hen over hele døgnet. Til at følge fugen over de lange afstande styres tandembrænderen sideværts via en mekanisk føler, der følger fugen ca. 150 mm foran brænderen – se ligeledes Figur 3.51.

Fremtidsudsigter for tandem-MIG

Tandemsvejsning har på trods af teknikkenes korte levetid allerede fundet stor industriel anvendelse i Europa. Teknikken har vist sig at være meget anvendelig til at erstatte almindelig spraybue MIG-svejsning i aluminium og andre materialer, med det formål at minimere svejsetiden.

Især Tyskland har forstået at udnytte den større produktivitet, der opnås med tandemteknikken. Dertil skal det nævnes, at teknikken er udviklet dels i Tyskland og dels i Østrig, hvilket er med til at forklare deres forspring på dette område.

Hvis en virksomhed i forvejen udfører mekaniseret, konventionel MIG-svejsning, er det i mange tilfælde kun et spørgsmål om at skifte svejseværket ud med tandemudstyr, hvis man ønsker at fordoble eller tredoble svejsehastigheden.

Det forventes bl.a. derfor, at tandemteknikken vil finde betydelig større industriel anvendelse i fremtiden både i Danmark og i resten af verden.

3.7.3 TRADITIONEL MIG KONTRA TANDEM-MIG

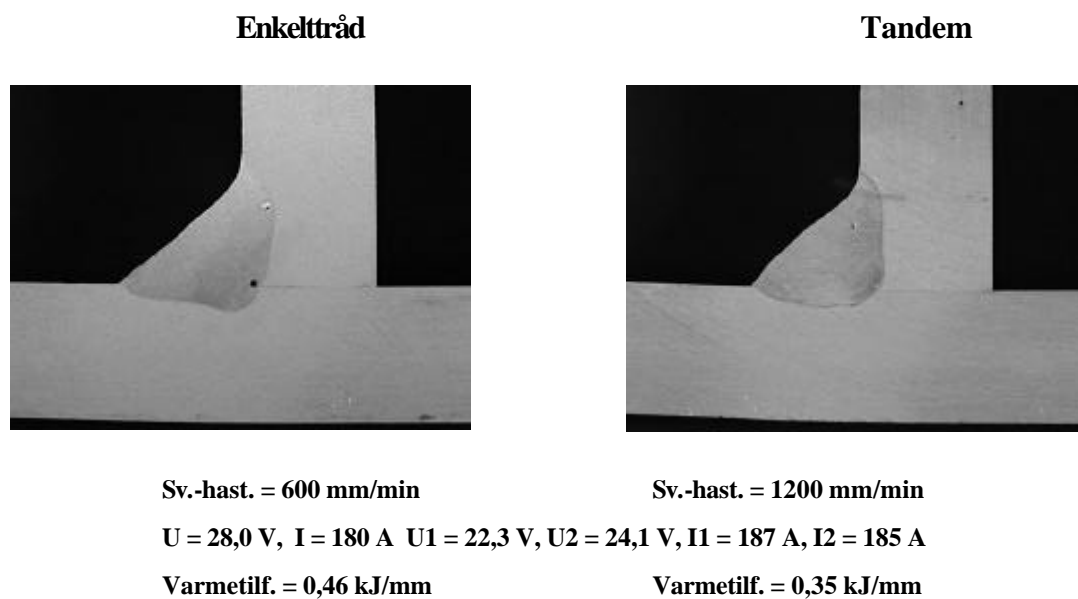
Svejsforsøg i aluminium i forbindelse med SASAK-projektet har vist, at man typisk kan fordoble svejsehastigheden med opnåelse af samme svejsekvalitet ved at skifte fra almindelig MIG-svejsning til tandemsvejsning. – se eksempel i Figur 3.52.

Hvad angår krav til fugetolerancer og brænderføring ved svejsning i større godstykkelser kan tandemteknikken sammenlignes med mekaniseret traditionel spraybuesvejsning med én tråd.

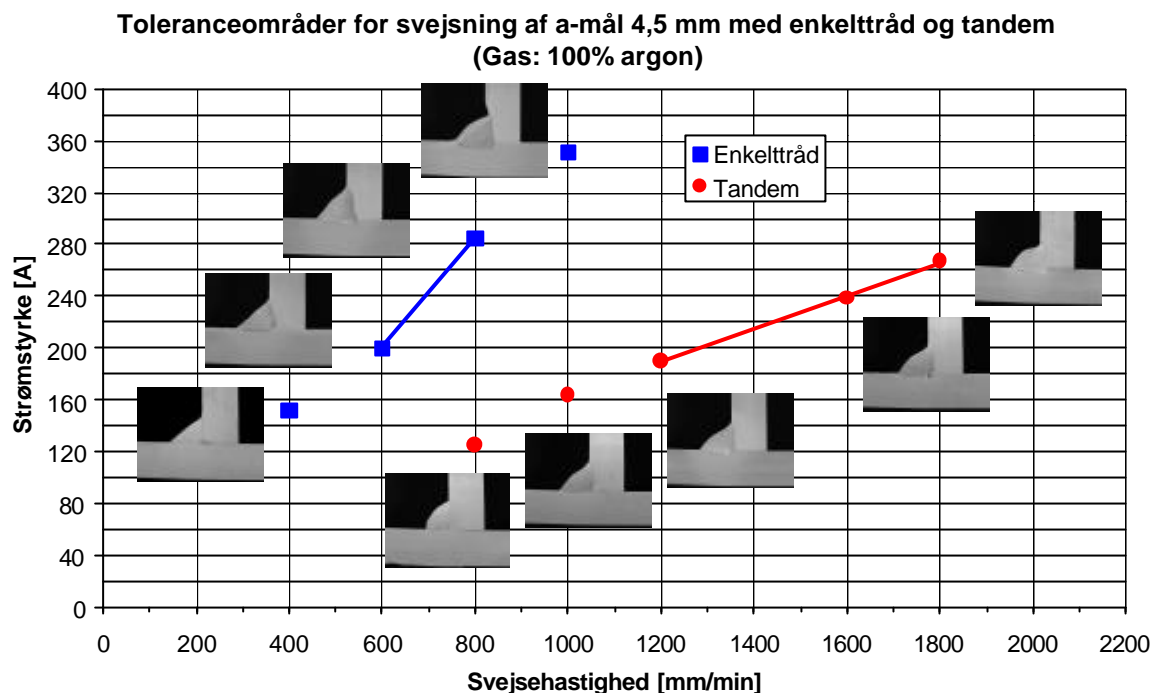
I forbindelse med SASAK-projektet blev der foretaget svejsforsøg med systematisk varierede svejseparametre for at sammenligne parameterområder for dels traditionel MIG og dels tandem-MIG svejsning.

Der blev taget udgangspunkt i en konkret svejseopgave, der bestod af en kantsøm med a-mål 4,5 mm på et T-profil med en godstykkelse på 8 mm og med ren argon som beskyttelsesgas.

På Figur 3.53 kan toleranceområder for svejsehastighed og strømstyrke aflæses for dels traditionel og dels tandem svejsning ved svejsning af den konkrete svejseopgave.



Figur 3.52 Enkeltråd (traditionel) MIG-svejsning (venstre foto) og tandemsvejsning (højre foto) ved svejsning af a-mål 4,5 mm i 8 mm godstykkelse i AlMg4,5Mn (5083) med gasblandingen 30% argon + 70% helium.



Figur 3.53 Tolerancer for svejseshastighed og strømstyrke ved dels traditionel og dels tandem MIG-svejsning af kantsømme med a-mål 4,5 mm i 8 mm T-profiler med ren argon som beskyttelsesgas.

Figur 3.53 illustrerer, at der med almindelig MIG-svejsning kan svejdes a-mål 4,5 mm med hastigheder mellem ca. 600 og 800 mm/min. Med tandemteknikken blev tilsvarende interval for svejseshastigheden mellem ca. 1200 og 1800 mm/min.

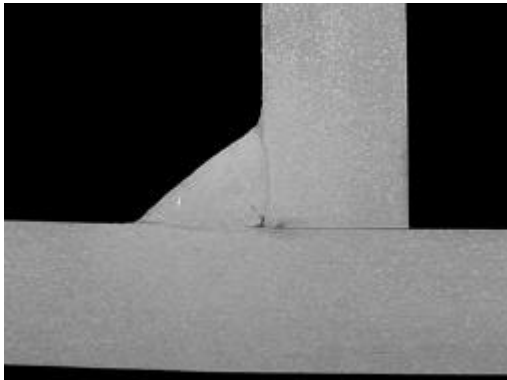
Intervallet for strømstyrken ligger for begge teknikker omkring 200 – 280 A på hver tråd.

For både traditionel MIG og tandemteknikken gælder, at hvis svejseparametrene (hastighed, strøm og spænding) bliver for små, så forekommer der bindingsfejl – se eksempel på

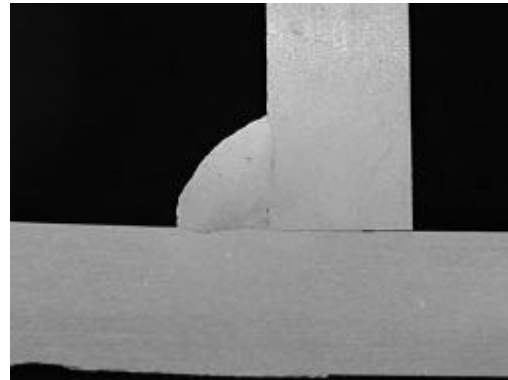
Figur 3.54.

Hvis svejseparametrene bliver for store, forekommer der enten sidekærv eller svejsningerne bliver uacceptabelt meget konvekse.

Enkeltråd



Tandem



Sv.-hast. = 400 mm/min Sv.-hast. = 800 mm/min

U = 22,1 V, I = 152 A

Varmetilf. = 0,40 kJ/m

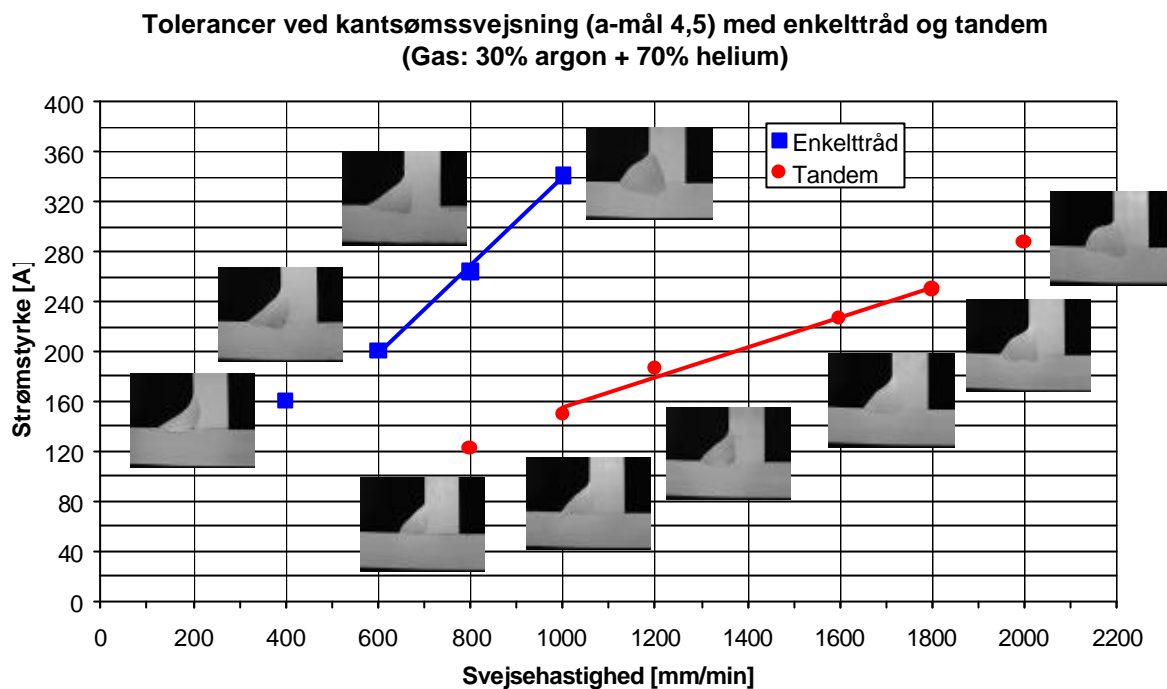
U1 = 18,2 V, U2 = 17,9 V, I1 = 124 A, I2 = 129 A

Varmetilf. = 0,27 kJ/m

Figur 3.54 Enkeltråd MIG-svejsning og tandemsvejsning ved svejsning af a-mål 4,5 mm i 8 mm tykt AlMg4,5Mn (5083) med ren argon. De lave svejseparametre øger risikoen for bindingsfejl!

Ved at tilsætte 70% helium i gassen blev toleranceområdet for svejsehastigheden og strømstyrken udvidet både ved almindelig og ved tandemsvejsning i forhold til svejsning med ren argon – se Figur 3.55.

Med traditionel MIG-svejsning af a-mål 4,5 mm kunne der svejses med hastigheder mellem ca. 600 og 1000 mm/min og med tandemteknikken var intervallet mellem ca. 1000 og 1800 mm/min.

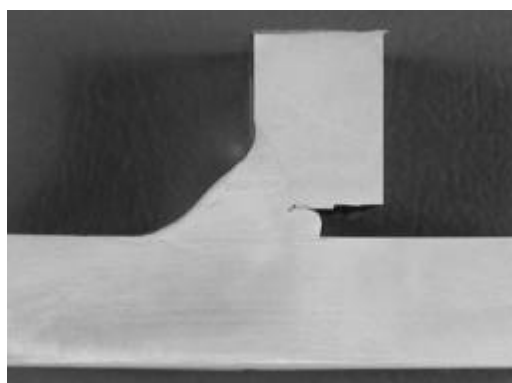
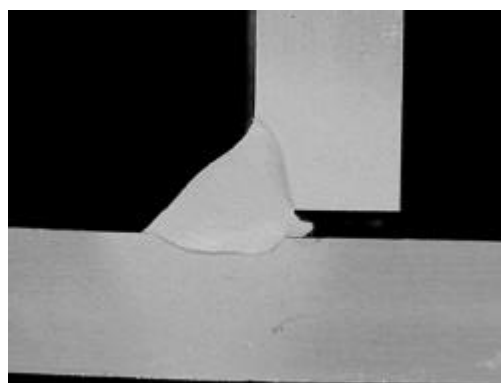


Figur 3.55 Tolerancer for svejseshastighed og strømstyrke ved svejsning med 30% argon + 70% helium med dels traditionel enkeltråds MIG- og dels tandemsvejsning. Der er svejst stående kantsømme med et reelt a-mål på ca. 4,5 mm på 8 mm T-profiler.

Fugetolerancer

I forbindelse med SASAK-projektet blev der ligeledes foretaget svejsforsøg af kantsømme med a-mål 4,5 mm på 8 mm tykke forsøgsemner med varierende fugespalte.

Med både traditionel MIG svejsning og med tandemteknikken kunne der svejses i fugespalter op til ca. 2,5 mm med opnåelse af tilfredsstillende svejskvalitet – se Figur 3.56.

Enkeltråd**Tandem**

Sv.-hast. = 700 mm/min Sv.-hast. = 1400 mm/min

U = 27,5 V, I = 255 A

Varmetilf. = 0,48 kJ/m

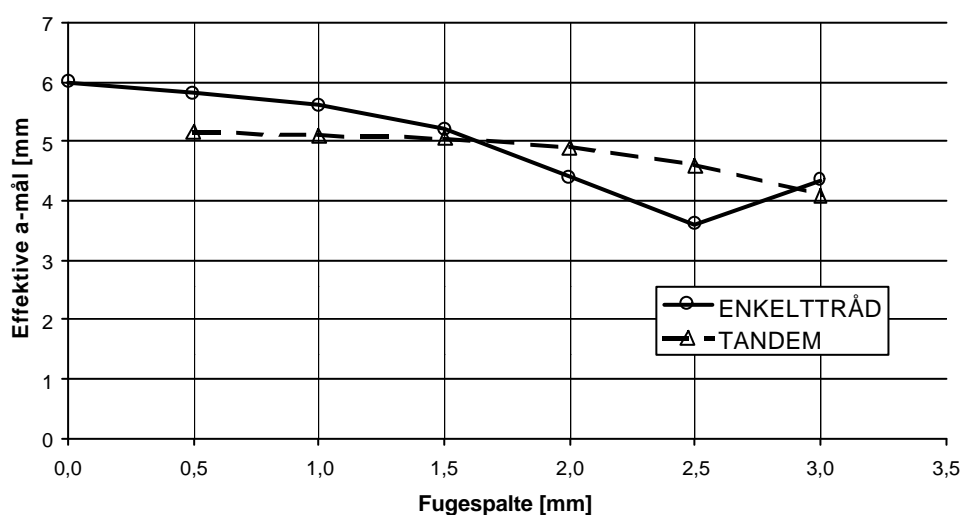
U1 = 21 V, U2 = 21 V, I1 = 210 A, I2 = 210 A

Varmetilf. = 0,31 kJ/m

Figur 3.56 Enkeltråd MIG-svejsning (venstre) og tandemsvejsning (højre) ved svejsning af a-mål 4,5 mm i 8 mm AlMgSi1 (6082) med en spalte på 2 mm.

Med traditionel enkeltråd svejsning kunne der dog kun svejses i fugespalter op til ca. 1,5 – 2,0 mm med opnåelse af et effektivt a-mål på mindst ca. 4,5 mm og uden sidekærv.

Med tandem teknikken var der derimod mulighed for at svejse med større fugetolerancer på op til ca. 2,5 mm med bibeholdelse af et effektivt a-mål på mindst 4,5 mm og uden sidekærv.

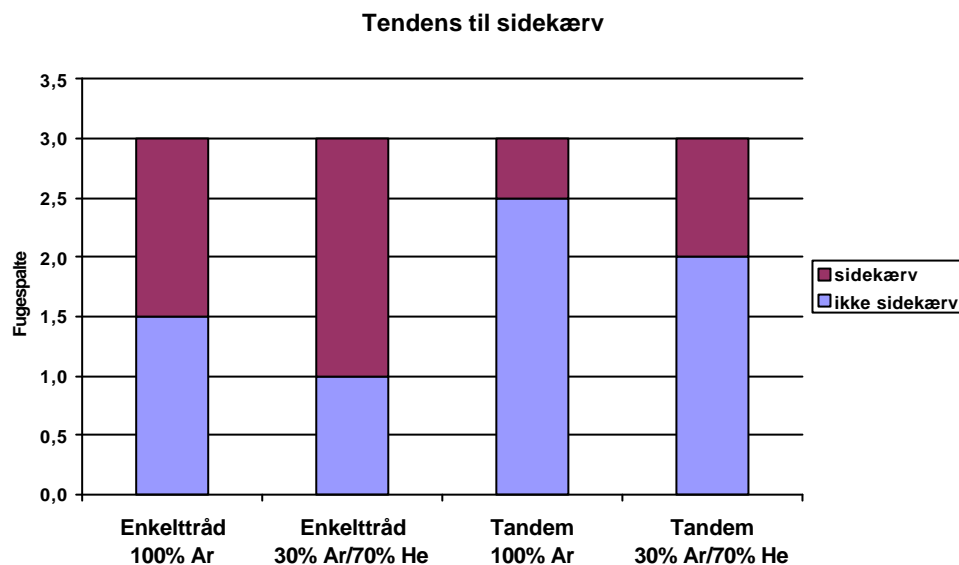
Effektive a-mål

Figur 3.57 Effektive a-mål ved dels enkeltråds og dels tandem MIG-svejsning. Hver kurve er et gennemsnit af svejsninger med hhv. ren argon og Ar/70 Ar/He – tendenserne var de samme for de to gasser.

Med tandemteknikken var der således de største muligheder for at opnå et konstant effektivt a-mål uden sidekærv ved kantsømssvejsning med varierende fugespalte i forhold til ved almindelig enkeltråd svejsning.

Med stigende fugespalte steg tendensen til sidekærv ved svejsning med både traditionel enkeltråd og med tandemteknikken.

Tendensen til sidekærv afhængig af fugespalten er vist i Figur 3.58.



Figur 3.58 Sidekærv afhængigt af fugespalte.

Det ses at tendens til sidekærv er størst ved traditionel MIG svejsning med helium i beskyttelsesgassen. Hvis der svejdes med tandem teknikken og 100% argon er tendensen til sidekærv således mindst.

De to, ovennævnte forhold - sikkerhed for tilstrækkelig effektivt a-mål og sikkerhed mod sidekærv - er ikke mindst interessant i forbindelse med mekaniseret og robotiseret svejsning, hvor det er en stor fordel at kunne fastlåse et sæt svejseparametre, som kan anvendes uanset spaltevariationer inden for bestemte grænser.

3.7.4 KRAV TIL Udstyr

I dette afsnit er det behandlet hvilke egenskaber, der bør forventes af et svejseudstyr, der skal anvendes til svejsning i aluminium. Herunder krav til: Strømkilde, trådfremføring, liner, kontaktdyse, slangepakke og svejsepistol. Mht. gastransporten henvises til afsnit 3.8 "Beskyttelsesgasser"

Strømkilde

Strømkilden, til svejsning i aluminium, bør som minimum være en ensretter baseret på Thyristorteknik, men primært er en moderne transistorstyret inverter at foretrække.

Strømkilden skal være af en sådan størrelse, at den er i stand til at kunne generere de strømniveauer, der er nødvendige for at kunne afvikle puls-svejsning på betryggende måde, dvs. minimum omkring 300 Amp.

Strømkilden bør som minimum have en intermittenfaktor, der svarer til den belastning maskinen udsættes for og gerne højere. Som regel skal den kunne svejse med minimum 35% intermittens.

Strømkilden skal være udstyret med en justerbar og trinløs regulering af maskinens karakteristik samt reaktans (drossel).



Figur 3.59 MIG-svejseanlæg (Migatron).

Strømkilden skal kunne reguleres synergisk, således at svejseren har mulighed for at korrigere for evt. forandringer under svejseforløbet.

Strømkilden skal være udstyret med en computerstyret betjeningsflade, der gør det muligt at justere på de parametre, der har direkte indflydelse på strømkildens egenskaber. Det gælder bl.a. når et synergisk program skal designes eller modificeres, dvs. justering af parametre som: Strøm, spænding, trådhastighed, drosselværdi, pre- og postgas, maskinkarakteristik, slope-funktioner for start- og kraterfyld funktioner, pulsparametre m.fl.

Det kan være en klar fordel, hvis strømkilden er udstyret med - eller forberedt for - fjernbetjening eller dialogstyring, således at operatøren, uafhængigt af selve svejsemaskinen, kan foretage parameter-korrektioner og justeringer, når disse er påkrævet.

Strømkilden skal være integreret med eller forberedt for vandkøling.

Ved svejsning i aluminium bør strømkilden være udrustet med en integreret eller ekstern trådfremføring, der er ekstra driftsikker og stabil.

Generelt set kan alle MIG-svejseanlæg anvendes til svejsning af aluminium, men der stilles dog specielle krav til svejseanlæg og udstyr, når der er krav om ekstra høj svejsekvalitet. Nedenstående skema lister de egenskaber, som et moderne MIG-anlæg bør have, samt hvilke egenskaber der i øvrigt kunne være ønskværdigt.

Tabel 3.18 er ikke nødvendigvis udtømmende, men skal alene betragtes som en huskeliste.

Tabel 3.18 Nødvendige og ønskværdige egenskaber for MIG-strømkilder.

Nødvendige egenskaber		Ønskværdige egenskaber
Standardudstyr	MIG-Puls	MIG-Puls
<ul style="list-style-type: none"> • Udlæsning af strøm (A) og spænding (V) • Tilbagebrændingsfunktion • Trådfremføring med 4-hjuls træk • Liner for aluminium-svejsetråd • Valgfri drosseludtag • Høj strømreserve for gode start- og gentændings-egenskaber • Min. 35% intermittens • Min. 60% intermittens gældende for de øvre strømområder, man skal arbejde med i en daglig produktion 	<ul style="list-style-type: none"> • Slope-down funktion • Regulerbar Pre- og Post gas • Elektronisk regulerbar drossel • Softstart • Trim-funktion • Trådfremføring med 4-hjuls træk • Liner for alu-svejsning • Udlæsning af strømvær-dier og gennemsnitsstrøm. 	<ul style="list-style-type: none"> • Synergisk regulering • Hotstart • Fjernbetjening, gerne i form af dialogstyret brænder • Push-Pull muligheder • Mulighed for justering af programmer • Bærbar • Interface for dokumentation af anvendte parametre • Synergisk gasforsyning • Mulighed for direkte programmering • Mulighed for låsning af programmer

Trådfremføring

I praksis er trådfremføringen en af de større udfordringer ved MIG-svejsning i aluminium. Når tråden glider ud gennem kontaktmundstykket, ser det jo enkelt ud, men i virkeligheden passerer den gennem mange enkeltdele, som skal være i orden for at opnå et godt svejseresultat.

Trådrollerne skal være indstillet, så rillerne passer til den aktuelle trådelektrode, og rullernes tryk på elektroden skal være korrekt. Er der for lidt tryk på trådelektroden, glider rullerne på elektroden, og fremføringshastigheden bliver ujævn.



Figur 3.60 Firehjuls trådfremføring (Migatronic).

Denne fejl kan registreres under svejseforløbet ved, at der kommer for lidt tilsatstråd frem, og at det ikke kommer konstant. Svejsningen får et ringe udseende, og der kan opstå bindingsfejl og porer i svejsemetallet.

Fejlen forebygges ved, at svejseren kontrollerer trådrollernes tryk på elektroden, inden svejsearbejdet påbegyndes. Når tilsatsmaterialet kan holdes tilbage mellem to fingre, så rullerne skrider på elektroden, er trykket korrekt.

Er trykket på svejsetråden for stort, vil den nærmest blive valset og derved deformeret og ødelagt. Ved at lade tråden løbe ud af kontaktmundstykket uden at kortslutte den, kan svejseren se, om elektroden er deformeret. Hvis tråden er deformeret, vil den komme frem af kontaktmundstykket i en spiral.

Når trådrollernes rilledybde og diameter passer til den aktuelle tilsatstråd, og rullernes tryk på tråden er korrekt, skulle elektroden gerne blive fremført jævnt med den hastighed, svejseren har valgt på svejseanlægget. Er det imidlertid ikke tilfældet, kan det være, fordi trådrollerne er slidte og skal udskiftes.

Endvidere er trådværkets kvalitet af afgørende betydning for, at svejsearbejdet forløber problemfrit. Trådrollerne skal være kraftige, og transmissionen mellem motor og ruller skal være ordentligt udført, f.eks. ved brug af et tandhjul. Et trådværk med firehjulstræk fungerer bedre end et enkelt trådværk, der trækker på to hjul. Desuden har firehjulstrækket flere anvendelsesmuligheder.

Trådindføringen gennem indløbsmundstykket skal sidde rigtigt fast og tilstrækkeligt tæt på trådrollerne. Er der for stor afstand mellem trådroller og indløbsmundstykke, kan elektroden slå knuder i mellemrummet mellem de to komponenter.

Kontroller desuden, at indløbsmundstykket flugter med rillen i trådrollen, og diameteren på hullet i indløbsmundstykket passer til den valgte tilsatsmateriale diameter.

Jo tykkere en svejsetråd der svejses med, jo lettere er det at fremføre tråden uden at tråden krøller. Eftersom aluminium er væsentlig blødere end stål, anbefales det normalt ved svejsning i aluminium at svejse med så stor tråddiameter som muligt, for derved at opnå en mere driftsikker og stabil trådfremføring.

Liner

På grund af at kulfiber har gode friktionsegenskaber, stor styrke og stivhed, er linere til fremføring af trådelektrode normalt fremstillet af kulfiber.

I lineren kan der dannes en prop af små aluminiumspåner, som vanskeliggør og i værste fald umuliggør den videre trådfremføring. Problemet optræder ofte periodisk og kan være meget irriterende og tidskrævende med udtagning af tråd, renblæsning eller udskiftning af liner og eventuelt en ødelagt kontaktdyse inden tråden kan sættes i på ny.

Blæs jævnligt trådlinere igennem med trykluft, så der ikke samler sig en masse skidt, som forhindrer trådelektroden i en jævn fremføring. Hvis der bruges et kvarter en gang om ugen på rengøring og kontrol af svejseanlægget, kan der spares mange penge og ærgrelser over driftsstop.

Problemerne med dannelsen af aluminiumspåner i lineren har uden held været forsøgt løst ved at benytte et andet liner materiale, bruge en liner med et større hul eller erstatte fremføringsrullerne af stål med tilsvarende ruller fremstillet af et blødere materiale, eksempelvis plast. Problemet er sandsynligvis også knyttet til tilsatstrådens overfladebeskaffenhed, men denne er svær at kontrollere.

Derfor løses problemet i praksis ved at justere på drivrullernes tryk på tilsatstråden, rense trykfladerne eller evt. skifte trådrollen ud med en anden rulle. Er problemet stadig ikke afhjulpet udskiftes indløbsrør, linere og trådfremføringsruller successivt, ligesom en jævnlig renblæsning af lineren som nævnt kan anbefales.



Figur 3.61 Korrekt og ukorrekt tilpasset snudespiral.

Tilpasningen af en snudespiralen er af stor vigtighed, ligesom snudespiralen hindrer evt. nedsmeltning af nylon-/kulteflon liner ved kontakt med en varm strømndyse. Figur 3.61 viser et eksempel på en korrekt og en ukorrekt tilpasning.

Slangepakke

Slangepakken er en sammenpakket enhed, bestående af trådliner, beskyttelsesgasslange, ledninger til styrestrøm samt evt. slanger til kølevand til svejsepistol. Heri kan der opstå mange forstyrrelser, der resulterer i svejsefejl.

Undgå altid skarpe buk på slangepakken. Disse kan forårsage, at trådfremføringen bliver ujævn, eller at trådlinieren knækker.

Undgå for lang slangepakke. Jo tyndere trådelektrode, der anvendes, jo kortere bør slangepakken være. Hvis det er nødvendigt med længere slanger, kan der købes en boks med ekstra trådfremføringsenhed, der skydes ind på slangepakken og på den måde hjælper med at holde trådelektroden stram på hele det lange fremføringsforløb.

De fleste driftsforstyrrelser på et MIG-anlæg kan svejseren forebygge ved at behandle udstyret med omtanke. Hvis svejseanlægget er vandkølet, bør slangeforbindelser, koblinger og pakninger kontrolleres for tæthed med jævne mellemrum.

Hvis et vandkølet svejseanlæg har stået stille i længere tid, så pakningerne er blevet tørre, skal man påregne at skifte disse ud, før svejsearbejdet kan begynde.

Svejsepistolen

Oftest kommer svejsefejl, der er opstået på grund af fejl i svejseudrustningen, fra fejl ved svejsepistolen og specielt kontaktmundstykket.

Ved stillingssvejsning er der forøget risiko for svejsesprøjt op i kontaktmundstykket, hvilket kan forårsage ujævn trådfremføring med porer og i værste fald bindingsfejl til følge.

Kontaktmundstykket slides også, så hullet heri bliver så stort, at strømovergangen bliver forringet. Dette bevirker ligeledes en ujævn trådfremføring og kan give porer og bindingsfejl.



Figur 3.62 Gaskølet MIG-brænder.

Afhængigt af svejsepistoltype er der monteret en isolator i gaskoppen eller en gasfordeler på pistolen lige under svanehalen. Disse ting sørger for, at beskyttelsesgassen bliver jævnt fordelt hele vejen rundt om kontaktmundstykket, så gassen dækker smeltebadet effektivt.

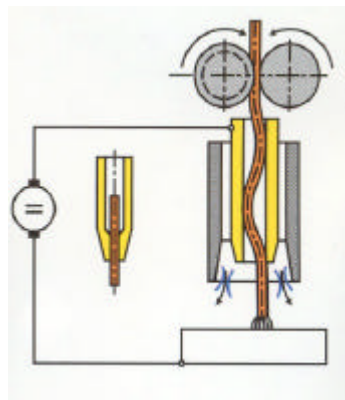
Hvis isolator eller gasfordeler er defekt, medfører det svejsefejl som porer og i værste fald bindingsfejl. Derfor bør svejseren dagligt kontrollere, om gasfordeler og isolator er i orden.

En anden vigtig ting, som skal kontrolleres ved svejsepistolen, er trådlineren. Foruden den liner, der løber fra svejsemaskinens trådværk gennem slangepakken til svejsepistolens håndtag, er der et lille stykke trådliner i svejsepistolens svanehals. Dette stykke skal gøres rent lige så ofte som den lange trådliner og udskiftes med mellemrum.

Kontaktdyse

Kontaktdysens funktion er at overføre strømmen til tråden, hvilket gør valget af kontaktdyse meget afgørende. Såfremt dyseåbningen og tråddiameteren ikke er valgt hensigtsmæssigt, risikeres der ustabil strømovergang og dermed ustabil lysbue.

Figur 3.63 viser princippet ved hhv. en god og en dårlig overførsel af strøm fra dyse til svejsetråd.



Figur 3.63 Principskitse - henholdsvis god og dårlig overførsel af strøm.

3.7.5 FORSLAG TIL SVEJSEDATA

De følgende 2 tabeller viser forslag til svejse­data ved MIG svejsning i aluminium i forbindelse med henholdsvis kantsømme og stumpsømme.

Tabel 3.19 KANTSØMME – MIG, vejledende svejse­data under argonbeskyttelse.

Gods- tykkelse mm	Svejse- stilling	Antal streng­e	Diameter tråd mm	SvejsestrømD C+ Amp	Lysbue spænding V	Argon flow L/min	Hastighed mm/s
2,5	PA,V,H,O	1	0,8	00-130	18-22	14	10,2-12,7
	F	1	0,8-1,2	125-150	20-24	14	10,2-12,7
3	V,H	1	0,8	110-130	19-23	14	10,2-12,7
	O	1	0,8-1,2	115-150	20-24	19	10,2-16,9
	F	1	1,2	180-210	22-26	14	10,2-12,7
5	V,H	1	0,8-1,2	130-175	21-25	17	10,2-12,7
	O	1	0,8-1,2	130-190	22-26	21	10,2-12,7
	F	1	1,2-1,6	170-240	24-28	19	10,2-12,7
6,5	V,H	1	1,2	170-210	23-27	21	10,2-12,7
	O	1	1,2-1,6	190-220	24-28	28	10,1-12,7
	F	1	1,6	140-300	26-29	24	7,6-10,6
10	H,V	3	1,6	190-240	24-27	28	10,2-12,7
	O	3	1,6	200-240	25-28	40	10,2-12,7
	F	4	2,4	360-380	26-30	28	7,6-10,6
20	H,V	4-6	1,6	260-310	25-29	33	10,2-12,7
	O	10	1,6	275-310	25-29	40	10,2-12,7

^A F = Oven-ned, V = Lodret-stigende, H = side-ind, O = under-op

Tabel 3.20 STUMPSØMME – MIG, vejledende svejse­data under argonbeskyttelse.

Gods- tykkelse mm	Svejse- stilling	Samlings geometri	Rod spalte mm	Antal streng­e	Diameter tråd mm	Svejse- strøm A	Lysbue- spænding V	Argon flow L/min	Hastighed mm/s
1,5	F	A	0	1	0,8	70-110	15-20	12	10,6-19,0
	F	G	2,4	1	0,8	70-110	15-20	12	10,6-19,0
2,5	F	A	0	1	0,8-1,2	90-150	18-22	14	10,6-19,0
	F,V,H,O	G	3,2	1	0,8	110-130	18-22	14	9,7-12,7
3	F,V,H	A	0-2,4	1	0,8-1,2	120-150	20-24	14	10,2-12,7
	F,V,H,O	G	4,8	1	0,8-1,2	110-135	19-23	14	7,6-11,8
5	F,V,H	B	0-1,6	1F, 1R	0,8-1,2	130-175	22-26	17	10,2-12,7
	F,V,H	F	0-1,6	1	1,2	140-180	23-27	17	10,2-12,7
	O	F	0-1,6	2F	1,2	140-175	23-27	28	10,2-12,7
	F,O	H	2,4-4,8	2	1,2-1,6	140-185	23-27	17	10,2-12,7
	H,O	H	4,8	3	1,2	130-175	23-27	28	10,6-14,8
6,5	F	B	0-2,4	2	1,2-1,6	175-200	24-28	19	10,2-12,7
	F	F	0-2,4	2	1,2-1,6	185-225	24-29	19	10,2-12,7
	V,H	F	0-2,4	3F, 1R	1,2	165-190	25-29	21	10,6-14,8
	O	F	0-2,4	3F, 1R	1,2-1,6	180-200	25-29	28	10,6-14,8
	F,V	H	3,2-6,4	2-3	1,2-1,6	175-225	25-29	19	10,2-12,7
	O,H	H	6,4	4-6	1,2-1,6	170-200	25-29	28	10,6-16,9
10	F	C-90 ⁰	0-2,4	1F, 1R	1,6	225-290	26-29	24	8,5-12,7
	F	F	0-2,4	2F, 1R	1,6	210-275	26-29	24	10,2-14,8
	V,H	F	0-2,4	3F, 1R	1,6	190-220	26-29	26	10,2-12,7
	O	F	0-2,4	5F, 1R	1,6	200-250	26-29	38	10,6-16,9
	F,V	H	6,4-9,6	3	1,6	210-290	26-29	24	10,2-12,7
	O,H	H	9,6	8-10	1,6	190-260	26-29	38	10,6-16,9
20	F	C-60 ⁰	0-2,4	3F, 1R	1,6-2,4	340-400	26-31	28	5,9-8,5
	F	F	0-3,2	4F, 1R	2,4	325-375	26-31	28	6,8-8,5
	V,H,O	F	0-1,6	8F, 1R	1,6	240-300	26-30	38	10,2-12,7
	F	E	0-1,6	3F, 3R	1,6	270-330	26-30	28	6,8-10,2
	V,H,O	E	0-1,6	6F, 6R	1,6	230-280	26-30	38	6,8-10,2

^A F = oven-ned, V = lodret-stigende, H = side-ind, O = under-op

^B Svejsespænding målt imellem kontaktdyse og svejseemne.

3.7.6 REFERENCER

Litteratur

- [17] *Successful Welding of Aluminium*
WTIA Technical Note No. 2
Welding Technology Institute of Australia, 1997.
- [18] *Welding Aluminum; Theory and practice*
Aluminum Association, 1997.
- [19] *Goda råd vid Aluminiumsvetsning*
Svetskommissionen, 1997.
- [20] *Schweißen und Hartlöten von Aluminiumwerkstoffen*
Schoer, Heinz
DVS, 1998.
- [21] *Hochleistungsschweißverfahren für aluminiumgerechte Konstruktionen*
Bernd Baumann, (doktorafhandling)
Aachener Berichte Fügetechnik (udgiver: Prof. Dr.-ing. U. Dilthey), 1998.
- [22] *Beitrag zum MIG- und WIG-schweissen von Aluminiumlegierungen*
Grave, Markus, (doktorafhandling)
Aachener Berichte Fügetechnik (udgiver: Prof. Dr.-ing. U. Dilthey), 1998.

Tekniske rapporter

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0003, *Muligheder for MIG-svejsning af tag mod offerprofil med totrådsteknikken*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0004, *Beskyttelsegasser til MIG- og TIG-svejsning af aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0007, *MIG-svejsning i aluminium – generelt, strømkilder, trådfremføringen, gasfremføringen, fejlmuligheder*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0011, *To-tråds MIG-svejsning i aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0012, *MIG-svejsning med enkeltråds- og dobbelttrådsteknik. Erfaringer hos MCI*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0014, *Krav til strømkilder for MIG- og TIG-svejsning af aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0016, *Indtrængningssikkerhed ved MIG-svejsning i aluminium – grundliggende påsejseforsøg*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0017, *Indtrængningssikkerhed ved MIG-svejsning af kantsømme i aluminium - enkeltråd*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0021, *Indtrængningssikkerhed ved MIG-svejsning af kantsømme i aluminium - tandem*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0026, *Fugetolerancer ved tandem og enkeltråd MIG-svejsning af kantsømme i aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0027, *Tandem MIG-svejsning i aluminium – afsluttende rapport*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0028, *Trådtransporten ved MIG-svejsning i aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0029, *Gastransporten ved MIG- og TIG-svejsning i aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0030, *MIG-svejsning med 1,6 mm enkeltråd - erfaringer hos MCI*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0031, *Start-stop problematikker ved MIG- og TIG-svejsning af aluminium*

3.8 BESKYTTELSESGASSEN

Ved lysbuesvejsning i aluminium anvendes der normalt kun inaktive gasser. Den mest almindelige beskyttelsesgas ved svejsning i aluminium er ren argon. Normalt er alternativet til ren argon at benytte en blanding af argon og helium, hvor der kræves en mere effektiv indbrænding. Ved mekaniseret svejsning anvendes i nogle tilfælde ren helium.

Tilsætning af andre gasarter som eksempelvis oxygen og nitrogen m.fl. med argon som hovedkomponent har været undersøgt gennem tiderne men anvendes kun i mindre omfang i dag. Hydrogen er ikke egnet at tilsætte beskyttelsesgassen ved svejsning i aluminium, da det vil resultere i porer i svejsemetallet.

Mikroadditiver af gasarter som nitrogen (N₂), oxygen (O₂), kuldioxid (CO₂) og nitrogenmonooxid (NO) tilsættes under tiden til argon eller argon/helium-blandinger hovedsageligt for at forbedre lysbuestabiliteten. Hvor stor betydning disse additiver har for svejseresultatet er diskutabelt.

Egenskaberne for nogle af de mest relevante gasarter i forbindelse med MIG-, TIG- og plasma-svejsning i aluminium er vist i Tabel 3.21.

Tabel 3.21 Beskyttelsesgassens specifikke egenskaber i.h.t. EN 439.

Gasart	Kemisk Betegnelse	Massefylde (luft=1,293) [Kg/m ³]	Varmeled- ningsevne*) [W/m ^o K]	Ionisations- energi**) [ev]	Reaktions- forhold ved svejsning
Argon	Ar	1,784	0,016	15,8	Inaktiv
Helium	He	0,178	0,143	24,6	Inaktiv
Oxygen	O ₂	1,429	0,024	13,6	Oxiderende
Nitrogen	N ₂	1,251	0,024	14,5	Reaktionstræg

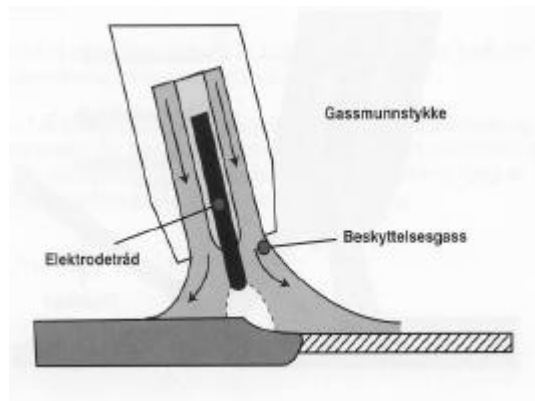
*) Varmeledningsevnen påvirker lysbuens form.

**) Ionisationsenergien er et udtryk for den energi der skal til at omdanne et atom til en ion og en elektron.

3.8.1 BESKYTTELSESGASSENS FUNKTION

Ved svejsning i aluminium er det nødvendigt at beskytte smeltebadet mod den omgivende atmosfæriske luft for bl.a. at undgå gasindslutninger i svejsemetallet. Det er især vigtigt at forhindre tilstedeværelse af hydrogen omkring smeltebadet, da aluminium i smeltet tilstand kan opløse store mængder hydrogen. Derudover har aluminium i smeltet tilstand en høj affinitet til oxygen.

Udover at beskytte smeltebadet er beskyttelsesgassens funktion at stabilisere lysbuen samt at medvirke til at fjerne oxidlaget på aluminiumsoverfladen.



Figur 3.64 Beskyttelsesgas omkring smeltebad.

Der er gennem tiderne undersøgt mange forskellige beskyttelsesgasser og blandinger af disse, og det har vist sig, at beskyttelsesgassens sammensætning har en afgørende indflydelse på svejsekvaliteten. Det gælder især forhold som svejse sømmens indbrændingsprofil, overfladeprofil og overfladetilstand samt lysbuestabiliteten.

Valg af beskyttelsesgas har desuden en betydelig effekt på produktiviteten

Ved TIG-svejsning skal beskyttelsesgassen desuden beskytte elektroden mod atmosfæren både under og lige efter svejsning. Uden beskyttelse vil der dannes oxider på elektroden, hvilket vil forringe elektrodens virkemåde og levetid.

Hvis der tilsættes tråd ved TIG-svejsning, skal man sørge for at den afsmeltende trådende befinder sig under gasdækningen for at sikre sig mod oxidering af tilsætningsmaterialet [1].

Ved oven-ned svejsning anbefales en brændervinkel på ca. 15° stikkende ofte [1], [19]. Ved høje svejsehastigheder med både TIG- og MIG-svejsning kan brændervinklen øges op til 30-40° stikkende for at opnå en passende gasdækning af smeltebadet [2].

3.8.2 ANVENDTE BESKYTTELSESGASSER

De mest anvendte gastyper til lysbuesvejsning i aluminium er efter EN 439:

- I1 (argon)
- I2 (helium)
- I3 (argon/helium blanding)

Egenskaberne og anvendelsesområder for disse tre typer beskyttelsesgasser i forbindelse med lysbuesvejsning i aluminium er beskrevet i det følgende:

Argon

Ren argon er en inaktiv en-atomig gas, der udvindes fra atmosfærisk luft, og som nævnt den mest anvendte beskyttelsesgas til lysbuesvejsning.

Argon er tungere end luft (se massefylde i Tabel 3.21), hvilket er en fordel, når der svejdes ovenned, da gassen har en tendens til at blive liggende omkring svejsestedet i modsætning til eksempelvis den lagt lettere gasart helium. Den forholdsvis høje massefylde gør ligeledes argon mindre følsom over for træk.

Som det ligeledes ses af Tabel 3.21 er ionisationsenergien lavere for argon end for helium, hvilket ved TIG-svejsning betyder, at lysbuen er lettere at tænde i argon end i helium. Endvidere er argons varmeledningsevne mindre i sammenligning med andre gasser. Argon øger lysbuestabiliteten, hvilket er vigtigt for svejseresultatet, specielt i forbindelse med TIG-svejsning med vekselstrøm. En anden betydelig fordel ved argon er, at den er forholdsvis billig.

Figur 3.65 viser en typisk indtrængning ved traditionel MIG-svejsning med anvendelse af 100% argon som beskyttelsesgas.



Gas: 100% argon

Materiale: 6 mm AlMgMn

Strøm: 198 A

Spænding: 21,5 V

Sv.hast.: 550 mm/min

Varmetilf.: 0,37 kJ/mm

Figur 3.65 Typisk indtrængning med 100% argon.

MIG-svejsning i aluminium med ren argon (99,995 %) resulterer i et indbrændingsprofil med tendens til "fingerform", som det er kendt fra svejsning i stål – se Figur 3.65.

Pga. aluminiums høje evne til at lede varmen væk fra svejsestedet, kan der ved MIG- og TIG-svejsning med ren argon være problemer med manglende indtrængning især ved svejsning i større godstykkelser.

Specielt skal man være opmærksom på, at det fingerformede indbrændingsprofil ved MIG-svejsning kan give anledning til risiko for bindingsfejl.

Helium

Helium (He) er som argon en en-atomig inaktiv gas. Helium udvindes fra nogle få forekomster i jorden, hvilket gør gassen 3-4 gange dyrere end argon.

Helium er ca. 10 gange lettere end argon og ca. 7 gange lettere end luft, og den vil derfor ved udstrømning fra svejsebrænderen stige til vejrs. Derfor anbefales normalt et større gasflow, når helium indgår i beskyttelsesgassen i forhold til svejsning med ren argon, (se afsnittet: "Gasflow").

Heliums ioniseringsenergi er næsten dobbelt så stor som argons og samtidig er varmeledningsevnen ca. 10 gange større end argons. Det betyder i praksis, at ved svejsning med helium i

beskyttelsesgassen øges lysbuespændingen for samme strømstyrke i forhold til svejsning med ren argon – se Tabel 3.23

Heliums store varmeledningsevne og den øgede svejse­spænding resulterer i en større indtrængning i bredden. En ulempe ved anvendelse af helium er, at den forringer lysbuestabiliteten.

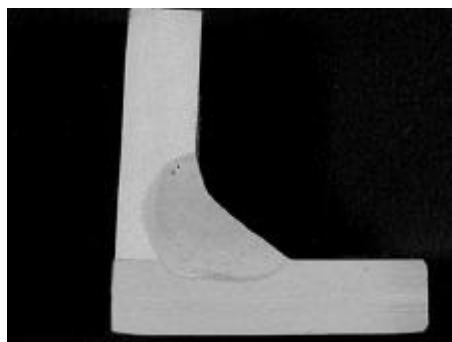
MIG-svejsning i aluminium med 100 % helium anvendes kun til stumpsømme i meget store godstykkelser, hvor den øgede indtrængning og heliums på­virkning af indtrængningsprofil­et evt. kombineret med en højere svejsehastighed kan være en fordel.

MIG- svejsning med 100 % helium kræver en ekstrem kort lysbue, og anvendes derfor ofte kun sammen med mekaniseret svejsning. I Danmark anvendes 100 % helium kun i meget lille omfang.

Argon/Helium

En blanding af argon og helium kan anvendes, hvis man ønsker at udnytte begge gassers gode egenskaber som eksempelvis en god lysbuestabilitet og en større indtrængning.

Figur 3.66 viser en typisk indtrængning ved traditionel MIG-svejsning med anvendelse af en c.



Gas: 30% argon + 70% helium

Materiale: 6 mm AlMgMn

Strøm: 204 A

Spænding: 25,8 V

Sv.hast.: 550 mm/min

Varmetilf.: 0,46 kJ/mm

Figur 3.66 Typisk indtrængning med argon/helium-blanding.

Af Figur 3.66 ses det, at der med 70% helium i gassen opnås en bredere og dermed mere sikker indtrængning i forhold til indtrængningen ved ren argon (Figur 3.65).

En efterhånden almindelig metode til at reducere risikoen for manglende indtrængning ved især MIG- og TIG-svejsning i større godstykkelser, er at tilsætte helium til beskyttelsesgassen. Af samme årsag vil behovet for forvarmning mindskes med stigende andel helium.

I nedenstående skema er der vist et eksempel på en mulig anvendelse af sammenhørende gasblandinger og godstykkelser ved MIG-svejsning:

Tabel 3.22 Eksempel på en gasleverandørs anbefalede gasblandinger afhængig af godstykkelsen.

Gasblanding Ar/He %	Godstykkelse [mm]
100/0	1-3
75/25	3-12
50/50	12-20
25/75	20-30

Ovenstående Tabel 3.22 skal ikke tages mere bogstaveligt end, at man også kan svejse med ren argon i eksempelvis godstykkelser på op til 20 mm og sågar derover.

FORCE Instituttets erfaringer viser, at det er muligt at svejse i store godstykkelser med anvendelse af ren argon ganske enkelt ved at øge svejseparametrene/varmetilførslen. Især strømstyrken har indflydelse på indbrændingen.

Formålet med at tilsætte helium ved svejsning i godstykkelser ned til 3 mm er som regel, at kunne svejse med større hastighed pga. den større varmetilførsel.

Ifølge en amerikansk kilde [11] er det først fordelagtigt at anvende helium eller argon/heliumblandinger, når materialetykkelsen overstiger ca. 12 mm. Ifølge samme kilde er argon/heliumblandinger mere fordelagtige for stumpsømme end for kantsømme.

Med stigende andel af helium i beskyttelsesgassen eksempelvis op til 70–80 %, kan der i højere grad opnås en pæn jævn overgang mellem svejsemetal og grundmateriale, hvilket bl.a. øger mulighederne for at opnå en pæn konkav svejsesøm ved kantsømssvejsning – se Figur 3.66.

Ved anvendelse af helium i beskyttelsesgassen reduceres koncentrationen af sundhedsskadeligt ozon omkring svejsestedet i forhold til svejsning med ren argon. Dertil skal nævnes, at ozonkoncentrationerne ved MIG-svejsning i aluminium normalt er så høje, at der under alle omstændigheder kræves anvendelse af friskluftsmaske.

Som tidligere nævnt er heliums ioniseringsenergi næsten dobbelt så stor som argons og samtidig er varmeledningsevnen ca. 10 gange større end argons, hvilket i praksis betyder, at lysbuespændingen stiger med stigende andel helium i gassen– se eksempel i Tabel 3.23.

Tabel 3.23 Eksempel på svejsedata for Ar/He-blandinger ved MIG-svejsning.

Gasblanding	Spænding	Strømstyrke
Ar/He %	[V]	[A]
100/0	25	280
75/25	27	282
50/50	30	285
25/75	34	285

Fordelene ved at blande helium i argongassen kan sammenfattes til:

- Bedre indtrængning og sømform
- Svejsning i større godstykkelser
- Forøget svejsehastighed
- Mindre krav til forvarmning
- Svejsning af aluminium på DC kan kun udføres med helium som beskyttelsesgas

Med stigende indhold af helium i beskyttelsesgas ændres indsmeltningprofil fra en snæver fingerformet facon til et bredere afrundet profil. Brugeren vil også mærke at der sker en reduktion af overvulst, og at der bliver en mindre forøget indsmeltningdybde..

To ulemper ved tilsætning af helium er, at stabiliteten af lysbuen bliver forringet, og at argon/helium-blandinger er 3-4 gange dyrere end ren argon. Dertil kommer, at heliums massefylde er ca. en tiendedel af argons, og derfor anvendes der normalt et større gasflow med helium i gassen, hvilket selvfølgelig er med til at fordyre anvendelsen af helium.

3.8.3 EKSEMPLER PÅ GASSENS INDFLYDELSE

Under SASAK-projektet blev der foretaget undersøgelser af beskyttelsesgassens indflydelse på svejseresultatet. I det følgende er der vist nogle eksempler fra undersøgelserne:

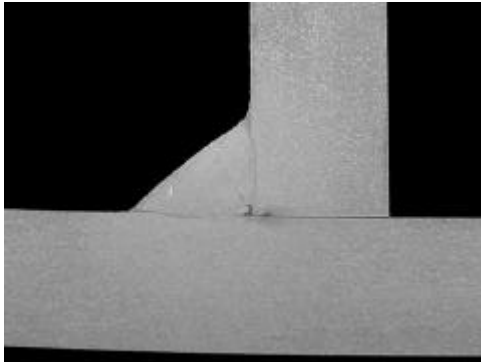
Eksempel 1

Dette eksempel viser et tilfælde, hvor det er en afgørende fordel at skifte fra 100% argon til en 30% argon + 70% helium blanding.

I undersøgelsen blev der udført MIG-svejsninger af kantsømme med et konstant reelt a-mål på 4,5 mm. Forsøgsemnerne bestod af T-profiler af AlMg4,5Mn (5083) med en godstykkelse på 8 mm.

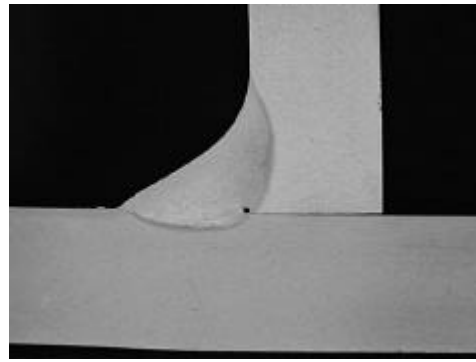
På Figur 3.67 kan de 2 gassammensætningers indflydelse på svejseresultatet ses, når der svejses med en svejsehastighed på 400 mm/min.

100% Ar



Strøm = 152 A
Tråd hast. = 8,8 m/min
Spænding = 22,1 V
Sv. hast. = 400 mm/min
Varmetilf. = 0,40 kJ/mm

30% Ar + 70% He

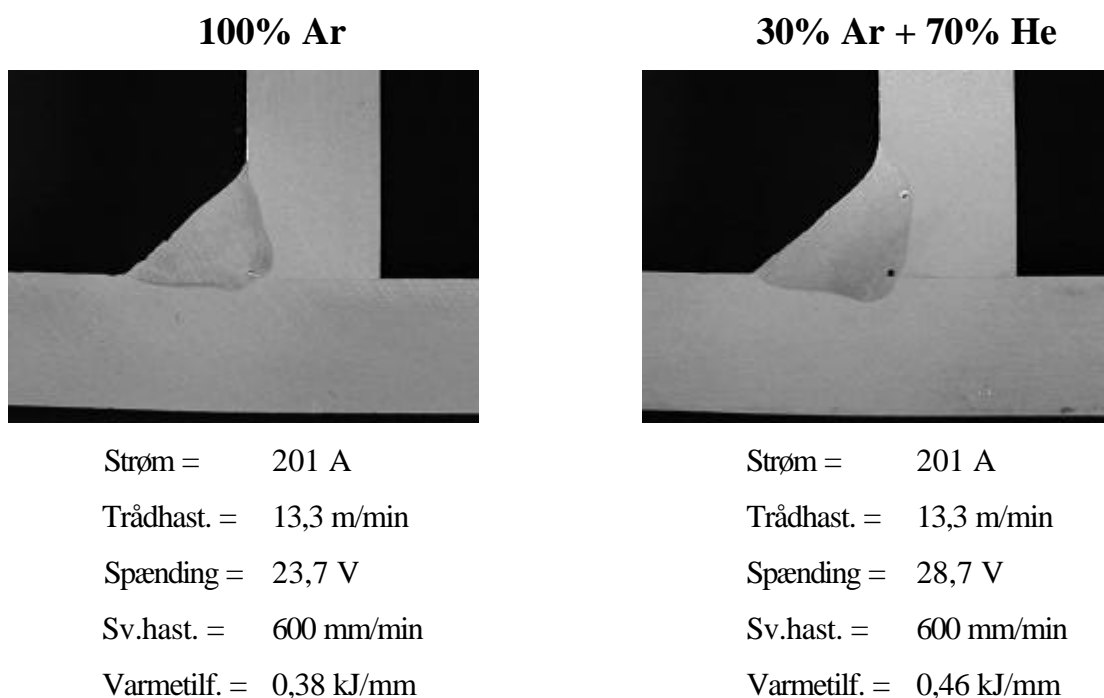


Strøm = 161 A
Tråd hast. = 8,8 m/min
Spænding = 26,7 V
Sv. hast. = 400 mm/min
Varmetilf. = 0,52 kJ/mm

Figur 3.67 Svejsehastighed på 400 mm/min ved svejsning af konstant a-mål 4,5 mm med dels ren argon og dels en argon/helium (30/70)-blanding i 8 mm AlMg4,5Mn med spraybue MIG-svejsning.

Ved svejsning af a-mål 4,5 mm med en svejsehastighed på 400 mm/min ses en betydelig mere sikker indtrængning, når der svejses med helium i beskyttelsesgassen (højre foto på Figur 3.67)

På Figur 3.68 er der vist tilsvarende svejsninger med a-mål 4,5 mm, men hvor svejsehastigheden er øget til 600 mm/min. I dette tilfælde ses det, at ved at øge svejseparametrene (svejsehastighed, strøm og spænding) så øges indtrængningen, således at der også med ren argon opnås en god og sikker indtrængning.



Figur 3.68 Svejsehastighed på 600 mm/min ved svejsning af konstant α -mål 4,5 mm med dels ren argon og dels en argon/helium (30/70)-blanding i 8 mm AlMg4,5Mn med spraybue MIG-svejsning

Undersøgelsen viste, at når der svejdes med lave svejseparametre i lignende svejseopgaver, hvilket er normalt ved manuel svejsning, så er det en fordel at svejse med 70% helium i beskyttelsesgassen for at undgå bindingsfejl. Ved at øge svejseparametrene reduceres behovet for helium i beskyttelsesgassen.

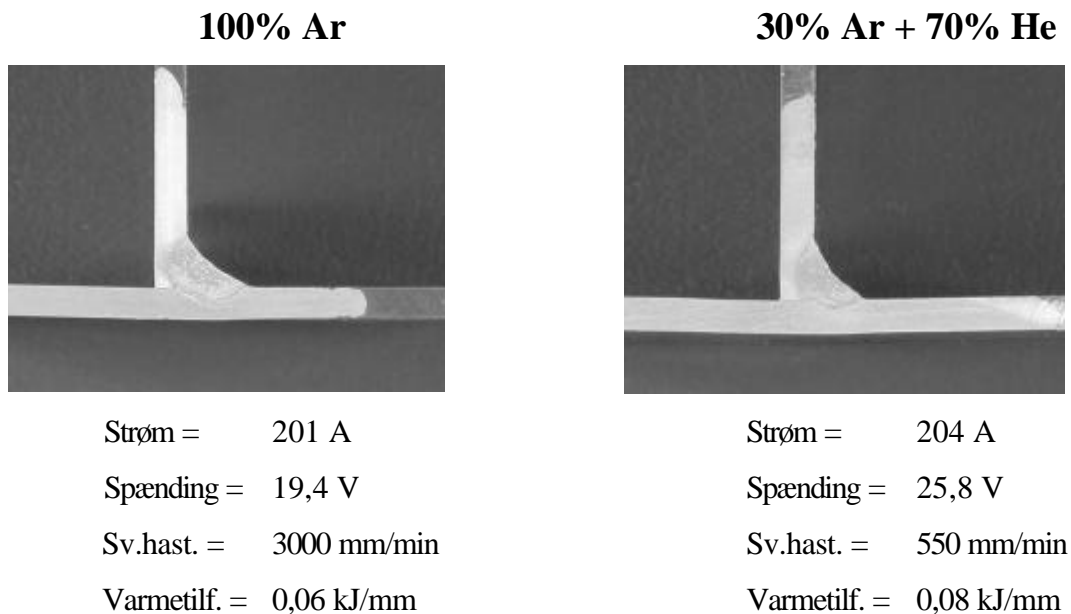
Eksempel 2

Der blev ligeledes svejst kantsømme i 2 mm AlMg3 med puls MIG med dels ren argon og dels en argon/helium blanding (30/70).

På Figur 3.69 kan det ses, at når godstykkelsen er så lille som 2 mm, så har det kun en meget ringe indflydelse på indtrængningen, om der svejdes med ren argon eller en argon/helium-blanding.

Ved så små godstykkelser er strømstyrken mere suveræn afgørende for indtrængningen.

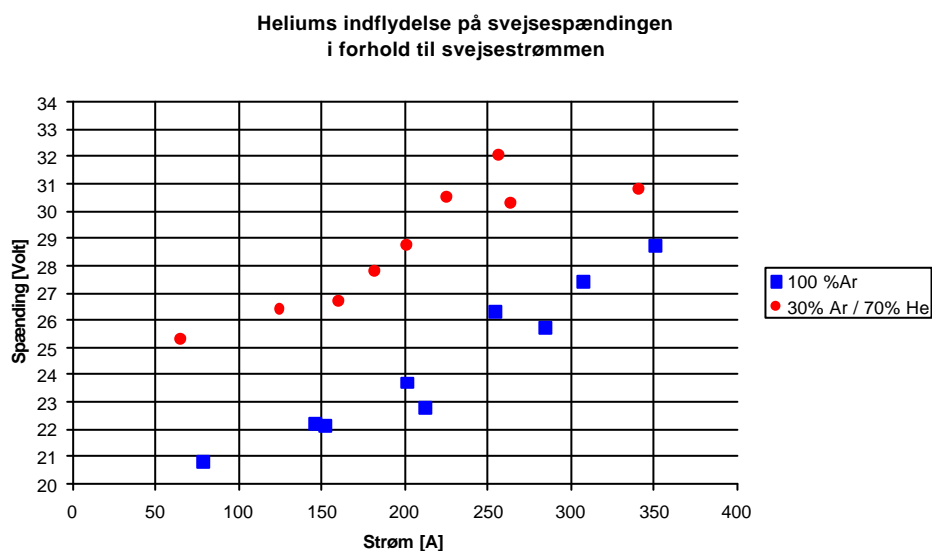
I det konkrete tilfælde kunne der ikke opnås en højere svejsehastighed ved at skifte fra argon til argon/helium. I den forbindelse skal det nævnes at de 3000 mm/min, der er svejst med i forsøgene vist på Figur 3.69, ligger tæt på den øvre grænse af hvad der er muligt. I produktionssituationer er en øvre grænse på 2000 – 2500 mm/min mere realistisk.



Figur 3.69 Svejsning af konstant α -mål med dels ren argon og dels en argon/helium (30/70)-blanding i 2 mm AlMg4,5Mn med puls MIG-svejsning.

Eksempel 3

På Figur 3.70 ses indflydelse på svejse-spændingen i forhold til strømstyrken, når der skiftes fra ren argon til 30% argon + 70% helium.



Figur 3.70 Heliums indflydelse på forholdet mellem svejse-spænding og strømstyrke ved svejsning med en 1,2 mm AlMg5 tråd.

På Figur 3.70 ses, at ved at skifte gastype fra 100% argon til 30% argon + 70% helium så stiger spændingen generelt med ca. 15% (4–6 volt) for samme strømstyrke.

3.8.4 GASFLOW

Et passende gasflow afhænger af en række forhold som eksempelvis beskyttelsesgassens massefylde, luftstømnings i værkstedet, afstand fra gaskop til plade, diameter af gaskop, spænding/strømstyrke, svejsehastighed, svejsestilling m.m.

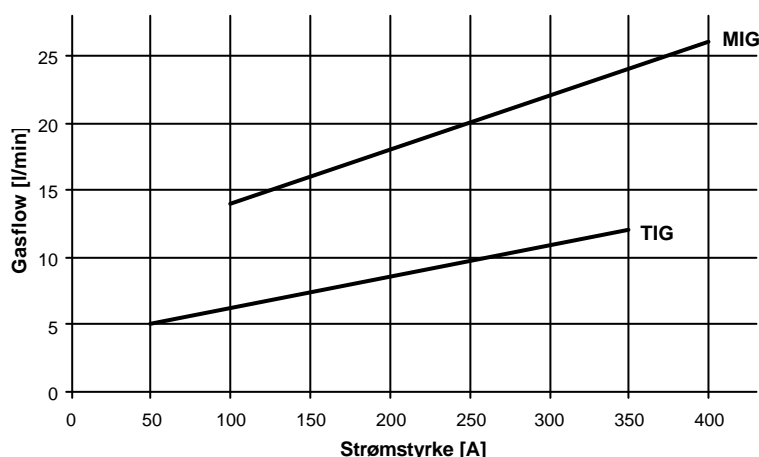
En beskyttelsesgas med lav massefylde påvirkes nemmere af luftstrømninger i værkstedsluften, og har større tendens til at stige tilvejs. Derfor bør der anvendes et større gasflow ved anvendelse af en beskyttelsesgas med lav massefylde.

Den omgivende luftstrømningshastighed i værkstedet har afgørende indflydelse på beskyttelsesgassens dækning af smeltebadet. Jo større luftstrømningshastigheden omkring svejsestedet er jo større bør gasflowet være evt. kombineret med en større gaskop, for derved at sikre at gassen når ned og dækker smeltebadet. En anden vigtig faktor er afstanden mellem gaskop og plade. Jo større afstanden er jo større bør gasflowet være.

Gasudstrømningens form afhænger i høj grad af gasflowet og gaskoppens diameter. Et højt gasflow kombineret med en lille gaskop-diameter kan give anledning til turbolente gasstrømninger, og dermed forøge risikoen for indtrængning af luft til lysbuen. En tommelfingerregel siger, at der skal anvendes lige så mange l/min som størrelsen af gaskoppens inderdiameter i millimeter [3].

Med stigende spænding/strømstyrke vil størrelsen af smeltebadet stige, og dermed vil der være behov for at dække et større område, hvilket kan løses med et større gasflow evt. kombineret med en gaskop med en større diameter. Det samme gælder ved høje svejsehastigheder, der giver mere aflange smeltebade, og dermed stiller krav til gasdækning af et større område.

Typisk anvendte gasflows som funktion af strømstyrke ved MIG og TIG-svejsning i aluminium med ren argon kan aflæses på Figur 3.71. De anviste gasflow er som regel tilstrækkelige til at modstå en luftstrømningshastighed i værkstedet på 10 cm/sek. Hvis luftstrømningshastigheden vurderes til at være mindre kan et mindre gasflow anvendes.



Figur 3.71 Typisk anvendte gasflow afhængig af strømstyrke ved TIG- og MIG-svejsning i aluminium med ren argon.

Beskyttelsesgassen bør strømme gennem slangesystemet i et stykke tid før en svejsning påbegyndes, eksempelvis i 5 sekunder, for at fjerne evt. luft i slangesystemet og omkring svejsestedet. Hvis

svejsedstyret ikke har været brugt i længere tid eksempelvis om morgenen, bør slangesystemet skylles ekstra godt igennem med gas før svejsning for bl.a. at fjerne fugt i slangesystemet.

Efter især en TIG-svejsnings afslutning er det ligeledes vigtigt at opretholde gasflowet i tilstrækkelig tid, for at køle elektroden ned indtil den ikke er i en reaktiv tilstand. En sådan gasefterstrømning anbefales at vare mellem 8 og 25 sekunder afhængig af strømstyrken [23].

Heliums indflydelse på gasflow

Helium er ca. 10 gange lettere end argon og ca. 7 gange lettere end luft, og derfor anbefales normalt et større gasflow, når helium indgår i beskyttelsesgassen i forhold til svejsning med ren argon.

I Tabel 3.24 ses retningslinier for gasflow ved MIG-svejsning afhængig af heliumindholdet i beskyttelsesgassen.

Tabel 3.24 Anbefalede gasflow ved MIG-svejsning afhængig af gasblanding.

Gasblanding Ar/He %	Gasflow [l/min]
100/0	18
75/25	20
50/50	23
25/75	30
0/100	40

En tommelfingerregel siger, at når der skiftes fra 100 % argon til 100 % helium bør gasflowet fordobles.

Gaslinser

I forbindelse med TIG-svejsning kan der anvendes gaslinser, der udover at øge afstanden mellem gaskoppen og svejsestedet kan sørge for et jævnt gasflow. Med anvendelse af gaslinser kan gasflowet ofte reduceres betydeligt.

Gaslinser er konstrueret således, at beskyttelsesgassen ledes igennem et fintmasket trådnetsfilter, hvorved de hurtigste gaspartikler opbremses – se Figur 3.72



Figur 3.72 Gaslinse.



Figur 3.73 Princip ved gaslinse.

Flowet bliver derfor mere ensartet og stabilt, og er knap så følsom overfor træk omkring svejsestedet – se princip på figur 3.7.

Dette betyder mindre risiko for turbulens i udstrømningsområdet, og derved mindre risiko for indsugning af atmosfærisk luft til smeltebadet.

Det har samtidig den fordel at man kan øge sit wolframudstik, og stadigvæk bibeholde en passende gasdækning

Diameter af gaskop ved TIG-svejsning

Formålet med gaskoppen ved TIG svejsning er tilsvarende ved MIG-svejsning, at lede den udstrømmende beskyttelsesgas ned omkring lysbue og smeltebad.

I forbindelse med TIG-processen, er specielt gaskoppens størrelse af betydning for gasbeskyttelsen af smeltebad, wolframelektrode og tilsatsmateriale.

Eftersom der findes forskellige gaskop størrelser, er det meget vigtigt, at den er tilpasset den korrekte og nødvendige gasmængde, for at øve optimal beskyttelse.

En meget anvendt tommelfingerregel siger at gaskoppens indvendige diameter skal være 4-5 gange tykkelsen på wolframelektroden.

En gaskops størrelse angives ved et nummer, som henviser til gaskoppens indvendige diameter – se Tabel 3.25. Betegnelsen henviser til 16.-dele engelske tommer, f.eks. 5/16.

Tabel 3.25 Valg af gaskop.

Gaskop nummer	4	5	6	7	8	10
Indv. Diam. (mm)	6,4	7,9	9,5	11,1	12,7	15,9

3.8.5 MÅLING AF GASFLOW

Som et retningsgivende værktøj kan der anvendes et flowmeter, der sættes over gaskoppens munding, til at aflæse det direkte gasflow – se Figur 3.74.

Fordelen ved et flowmeter er, at man altid får en indikation af beskyttelsesgasmængden direkte ved gaskoppen og smeltebadet.

Flowmetret skal altid anvendes i lodret position, idet kuglen skal kunne svæve frit i røret, og ellers vil give en forkert aflæsning.



Figur 3.74
Håndflowmeter

Heliums indflydelse på måling af gasflow

Ved måling af gasflow skal man være opmærksom på, at hvis der anvendes et flowmeter, der er kalibreret efter 100 % argon, da vil man med en argon/helium-blanding gennem samme flowmeter aflæse et gasflow, der er betydeligt mindre end det effektive, hvilket skyldes heliums lavere massefylde.

I Tabel 3.26 er der vist korrektionsfaktorer, der skal ganges med det aflæste gasflow på et argonkalibreret flowmeter for at få det effektive gasflow for en given Argon/helium-blanding.

Tabel 3.26 Korrektionsfaktorer afhængig af gassammensætning [3]. (For at finde det reelle gasflow ganges det aflæste gasflow på et argon-kalibreret flowmeter, med den angivne korrektionsfaktor.)

Gasblanding Ar/He %	Korrektions- Factor
100/0	1,0
70/30	1,2
50/50	1,4
30/70	1,6
0/100	3,0

Hvis man eksempelvis for en blandingsgas bestående af 30% argon og 70% helium aflæser et gasflow på 18 l/min på et argon-kalibreret flowmeter, så vil man reelt have et gasflow på ca. $(1,6 \cdot 18)$ l/min = 29 l/min. Tilfældigvis passer dette gasflow godt overens med det anbefalede gasflow for den pågældende gasblanding, se Tabel 3.24.

Hvis der anvendes en argon/helium-blanding kan man i mange tilfælde indstille sit gasflow, som om der anvendes 100% argon. Behovet for et større gasflow pga. heliums lavere massefylde opvejes i

høj grad af, at når helium er tilsat beskyttelsesgassen, vil det reelle gasflow være større, end det der aflæses på et argonkalibreret flowmeter.

3.8.6 UNDGÅ PORER OG UROLIG LYSBUE

Poreforekomster i MIG-/TIG- og Plasma-svejsninger i aluminium skyldes primært hydrogen, som fanges i størkningsprocessen.

Aluminium har ved smeltetemperaturen en meget højere opløselighed af hydrogen end eksempelvis stål. Derfor skal der kun små mængder hydrogen til at danne porer i aluminium, hvorimod tilsvarende små mængder hydrogen ofte ikke danner porer i stål.

Ved svejsning i aluminium stilles der derfor højere krav til gassens renhed og til en effektiv beskyttelse af smeltebadet.

Hydrogenen stammer typisk fra følgende kilder [18]:

- 1) Hydrogenholdig forurening eller fugt på overfladen af tilsatsmateriale eller grundmateriale.
- 2) Hydrogen i tilsætnings- og grundmateriale.
- 3) Hydrogen eller fugt i beskyttelsesgassen
- 4) Hydrogen eller fugt i luft der trænger ind i lysbuen af forskellige grunde.

I forbindelse med punkt 3 og 4 er beskyttelsesgassens renhed omkring lysbuen og smeltebadet af afgørende betydning.

Til svejseformål leveres argon og helium som regel med en renhed på mindst 99,95 %.

Det er vigtigt at undgå, at beskyttelsesgassen forurenes i forbindelse med dens fremføring fra gasflasken ud igennem samlinger og slanger, videre ud af gaskoppens munding for til sidst at dække lysbuen og smeltebadet.

Svigtende gasbeskyttelse

Fejl som porer og urolig lysbue kan ofte føres tilbage til svigtende gasbeskyttelse.

Årsagerne hertil kan være:

- Gasflasken er tom eller ventil lukket - reduktionsventil frossen eller defekt
- Træk - forkert beskyttelsesgasmængde (for meget eller for lidt)
- Magnetventil defekt - udstrømningsåbninger i svejsepistol stoppet af sprøjt
- For stor afstand mellem gasdyse og emne
- Brænder hældning for stor
- Uren beskyttelsesgas- uren overflade udvikler gasser - indtrængning af luft fra luftspalte
- Turbulens ved svejsning på emnets kanter giver luftindtrængning i beskyttelsesgas
- Gasslange er utæt, så der trænger luft ind i beskyttelsesgassen

- Emnet er for varmt, opdriften fra den varme overflade "løfter" beskyttelsesgassen
- Svejseshastigheden er så høj, at den omgivende, stillestående luft virker som træk.

3.8.7 TRANSPORT AF BESKYTTELSESGAS

For at undgå hydrogenporer i svejsninger er det vigtigt at sikre en korrekt beskyttelsesgasdækning under svejsning samt foretage en rengøring af materialer.

Specielt grundmaterialets overflade, som består af en hygroskopisk oxidhinde, indeholder megen hydrogen, hvorfor en fjernelse af denne hinde er forudsætning for en fuldstændig porefri svejsning.

Men også tilsatsmaterialet, fremdrivningsenheder såsom drivhjul, linere m.m. til MIG-svejsning kan være væsentlige hydrogenbærere. Det er derfor almindelig anerkendt, at disse områder underkastes en øget opmærksomhed og rengøring.

Mindre anerkendt er det dog, at selve beskyttelsestransporten, det være sig trykbeholdere, gasslanger m.m. også kan være en væsentlig forurener.

Typisk er trykbeholder og faste centralanlæg udført i stål og kobber, medens den fleksible slangedel fra reduktionsventil til svejsebrænder som oftest er i PVC eller anden plastik/gummikombination.

Eftersom den fleksible del som oftest er samlet med mange samlinger, er der også mange muligheder for utætheder såsom for løse slangesamlinger. Denne del er også mere følsom overfor miljømæssige påvirkninger, såsom varme, kulde, sol, fedt og snavs. Slangesamlinger har nemlig en tendens til at erodere, hvorfor diffusion ud af slangerne ofte ses.

Opmærksomheden imod diffusion ind i slangerne, gennem hygroskopiske revner og porøsitet, er derimod ikke særlig udbredt.

Som regel er det ud fra antagelsen om, at der gennem beskyttelsesgassens tryk i slangerne og den konstante gennemskylning ingen fare er for forurening af den anvendte beskyttelsesgas.

Disse antagelser er dog ikke altid korrekte, hvilket er beskrevet nærmere i det følgende.

Gasflasker

For gasflaskernes vedkommende kan der desværre ske det, at en flaske tømmes fuldstændigt og efterlades med åben flaskeventil. Derved kan der opstå et vakuum i beholderen. Dette vakuum tillader atmosfærisk luft at sive ind i gasflasken, og eftersom der ikke er automatisk skylning af gasflaskerne før påfyldning, kan der være en latent risiko for at modtage en forurenede flaske, med kvalitetsmæssige problemer til følge - typisk i form af sortsvidning af materialet og stort indhold af porer i svejsemetallet.

De fleste gasleverandører udfører derfor en hydrostatisk test af deres flasker hvert femte år, bl.a. også for at undersøge for indvendig rustdannelse.

De enkelte leverandører beskriver hvilken renhed der stilles til de enkelte gasblandinger, og den enkelte kunde er nødsaget til at anvende en besværlig og kostbar test, såfremt den forventede renhed skal kontrolleres.

Faste installationer

De faste installationer, typisk benævnte som centralanlæg, findes på mange store arbejdspladser og centraliserer transporten ud til de enkelte arbejdspladser/-stationer. Fordelen ved dette er, at der kan laves forsyningsrør for de enkelte gasarter ud til pladser, hvorved de større virksomheder kan drage fordel af evt. eget centralt blandingsanlæg.

Sådanne forsyningsstrengene kan have en udstrækning på flere hundrede meter, med mange enkeltposter.

Der er derfor en risiko for utætheder i sådanne systemer, og såfremt der ikke er konstant flow i ledningerne, kan evt. indstrømmende atmosfærisk luft gennem utætte samlinger m.m., i timevis, dagevis ja måske i ugevis forurene disse forsyningsstrengene og dermed være en latent kvalitetsrisiko for selve svejsearbejdet.

En systematisk trykprøvning og evt. gennemskylning bør derfor være et led i virksomhedens generelle vedligeholdelsespolitik.



Figur 3.75 Eksempel på udtagsposter ved centralanlæg.

Et andet væsentligt argument for systematisk trykprøvning, er det økonomiske aspekt. Et utæt forsyningsystem lækker konstant, og med prisniveauet på Argon/Helium taget in mente, vil der være mange penge at spare ved et tæt system.

Ikke-metalliske slangeforbindelser

For plastik- og ikke-metalliske slangeforbindelser, er risikoen for utætheder og erosion latent til stede, specielt fordi ingen normalt forventer at der også kan ske en diffusion ind igennem det hygroskopiske materiale, samt ikke mindst gennem indsvivning ind igennem slangeåbningerne, når processen er slukket, og der ingen gasdækning er i slangen.

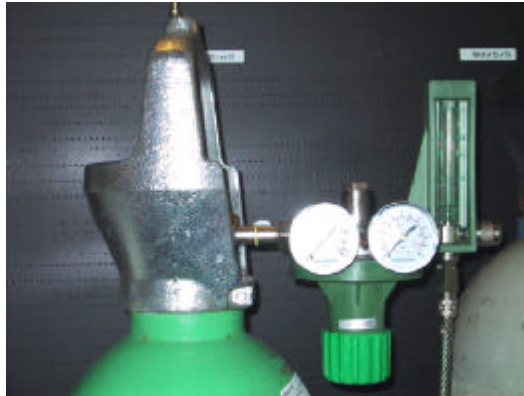
De forskellige trykforhold, foranlediget af bl.a. omgivelsernes relative lufttryk gør, at slangerne bliver forurenede ved blot få minutters tomgang uden gasflow.

Under normale omstændigheder er denne forurening dog af så lille karakter, at dennes indflydelse på svejsningens kvalitetsniveau ofte omtales som normale poreforekomster ved MIG og TIG-svejsning af aluminium.

Reduktionsventilen

Eftersom kvalitetssvejsninger er betinget af et konstant flow under alle forhold, er reduktionsventiler med indbygget flowmeter at foretrække fremfor en reduktionsventil alene med literaflysning.

Alle typer reduktionsventiler giver dog et konstant tryk/flow, men med et flowmeter med kugleflæsning kan man altid se om regulatoren er i aktion, idet kuglen da vil vise det aktuelle flow i flowmetersøjlen.



Figur 3.76 Reduktionsventil med flowmeter.

Såfremt alle skrueforbindelser, pakninger m.m. er tætte, er der ingen fare for at atmosfærisk luft kan sive ind i slangerne i trykfrie perioder og derved forurene beskyttelsesgassen.

3.8.8 EN 439 KLASSIFIKATION

I nedenstående er den generelle klassificering af beskyttelsesgasser efter EN 439 vist.

Tabel 3.27 EN 439 Klassifikation af beskyttelsesgasser til svejsning.

Symbol		Komponenter i volumenprocent						Anvendelse	Bem.
Gruppe	Id. nr.	oxyderende		Inactive		reducerende	neutral		
		CO ₂	O ₂	Ar	He	H ₂	N ₂		
R	1	-	-	rest	-	>0-15	-	TIG,	Reducerende
	2			rest		15-35		Plasma baggas	
I	1	-	-	100	-	-	-	MIG,TIG,	inaktiv
	2	-	-	-	100			Plasma sv.	
	3	-	-	rest	>0-95			baggas	
M1	1	>0-5	-	rest	-	>0-5			let
	2	>0-5	-	rest	-	-			oxyderende
	3	-	>0-3	rest	-	-			
	4	>0-5	>0-3	rest	-	-			
C	1	100	-						
	2	rest	>0-30						
F	1					-	100	Plasma	neutral
	2					>0-50	rest	skær. baggas	reducerende

3.8.9 REFERENCER

Litteratur

- [23] **Schoer, Heinz**
Schwerßen und Hartlöten von Aluminiumwerkstoffen
DVS, 1998.
- [24] *Successful Welding of Aluminium*
WTIA Technical Note No. 2
Welding Technology Institute of Australia, 1997.
- [25] *Goda råd vid Aluminiumsvetsning*
Svetskommissionen, 1997.
- [26] *Materials and applications – Part 1*
Welding Handbook - eighth edition,
American Welding Society, 1996.
- [27] *Sammenføjning af aluminium*
Efteruddannelse i materialeteknologi, FORCE Institutet, DTI, Danmarks Ingeniørakademi
og Forskningscenter Risø, 1995.
- [28] *Guide for Aluminum Hull Welding*
An American National Standard
ANSI/AWS D3.7-90, 1989.
- [29] **Haas, B. (DVS)**
Schutzgasschweißen von Aluminium
Der Praktiker, 9/97.

- [30] **Runnerstam, O., Persson, K.A., and Lund, T.** (AGA)
The importance of a good quality gas shield
Svetsaren No. 3, 1995.
- [31] **Aastrup, P.**
Arbejdsområder for MIG-svejsning af kantsømme i aluminium AlMg3 og Al99,5.
Rapport 93.20, FORCE Institutet, 1993.
- [32] **Zerner, I.**
Trends in der Schweißtechnik – Schweißen von Aluminium.
Schweissen & Schneiden, 51 (1999) Heft 8.
- [33] **Altshuller, B.**
A guide to GMA Welding of Aluminium
Welding Journal, June 1998.
- [34] *Facts about TIG-svejsning*
AGA.
- [35] **Dye, S.A.**
Gas shielding for arc welding aluminium and its alloys – part 1: Gas mixtures for MIG welding
WI Research Bulletin Vol. 13 1972. 301-305.
- [36] **Fukui, T., Sugiyama, Y. and Terai, S.**
Effects of Nitrogen, Oxygen and Hydrogen Gases Added to Argon Gas on MIG welding of Aluminium Alloys
Transactions of J.W.S., april 1970.
- [37] **Harris I.D.**
A review of porosity formation and recommendations on the avoidance of porosity in TIG welding
The Welding Institutet, 1988.

- [38] **Harris I.D.**
A review of literature on porosity formation and recommendations on the avoidance of porosity in MIG welding
The Welding Institutet, 1988.
- [39] **Lindstrom, J. (AGA)**
Adding NO to the argon or argon/helium mixture does the trick
Inalco 98, 7th International Conference, Joints in aluminium, vol. 1., 1998.
- [40] **Weiping Liu, Dalian and Dorn, L.**
Improved filler wires for aluminium alloy welding – a review, part 1.
ALUMINIUM – 70, 9/10, 1994.
- [41] **Ellis, M.B.D. and Spiller, K.R.**
Gas shielded fusion welding of aluminium alloys – a review of the techniques
Welding and Fabrication, November/December 1993.
- [42] **Blewett, R.V.**
Welding aluminium and its alloys
Welding and Fabrication, October 1991.
- [43] **Dye, S.A.**
Gas shielding for arc welding aluminium and its alloys – part 2: D.C. helium-shielded TIG welding of horizontal/vertical joints in aluminium
WI Research Bulletin Vol. 13, 1972, 301-305.
- [44] **Farwer, A. (FRG)**
Recent Investigation on MIG and TIG aluminium welding with different shielding gases
IIW Doc. XII – 1436 – 1996.
- [45] **HEDE NIELSEN**
Svejsehåndbogen for TIG- MIG- og MAG-svejsning, 1997.

[46] **Aichele, G.** (Breisgau)

Aluminium – ein Thema für die Schweißtechnik

ALUMINIUM, 71. 1995.

Tekniske rapporter

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0004-01, *Beskyttelsesgasser ved MIG- og TIG-svejsning af aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0016-00, *Indtrængningssikkerhed ved MIG-svejsning i aluminium – grundliggende påsvejsforsøg*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0017-00, *Indtrængningssikkerhed ved MIG-svejsning af kantsømme i aluminium – enkeltråd*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0021-00, *Indtrængningssikkerhed ved MIG-svejsning af kantsømme i aluminium – tandem*

SASAK-RAP-SV-AKS-MIG-0029-00, *Gastransporten ved svejsning af aluminium*

3.9 MODSTANDSSVEJSNING

3.9.1 INTRODUKTION

Modstandssvejsning er fællesbetegnelsen for fem svejseprocesser: Punktsvejsning, sømsvejsning, pressvejsning (projektionssvejsning), stuksvejsning og brændstuksvejsning. Sømsvejsning består af en række sammenhængende punktsvejsninger.

Man kan også punkt- og sømsvejsning med f.eks. TIG-svejsning, og derfor anvendes præfikset **modstands**-punktsvejsning hvis der er risiko for misforståelser. Tabel 3.28 viser eksempler på produkter samlet med modstandssvejsprocesser.

Tabel 3.28 Eksempler på produkter svejst med modstandssvejsning.

Produkt	Modstandssvejsemetode			
	Punkt-	Pres-	Søm-	Brændstuk-/stuk-
Rustfrie vakse i borde	x		X	x
Trålnet		x		
Møbeldele		x		
Køkkengrej, håndtag pådisse	x	x		
Værktøj, bor spidser i HS stå				x
Kabelstiger og master		x		
Læg og bund påbeholdere			x	
Bil dele: plader	x			
Bil dele: bag aksel huse				x
Bil dele: lydpotter	x		x	
Radiatorer	x	x	x	
Jernbane skinner				x
Kæder				x
Beslag	x	x		

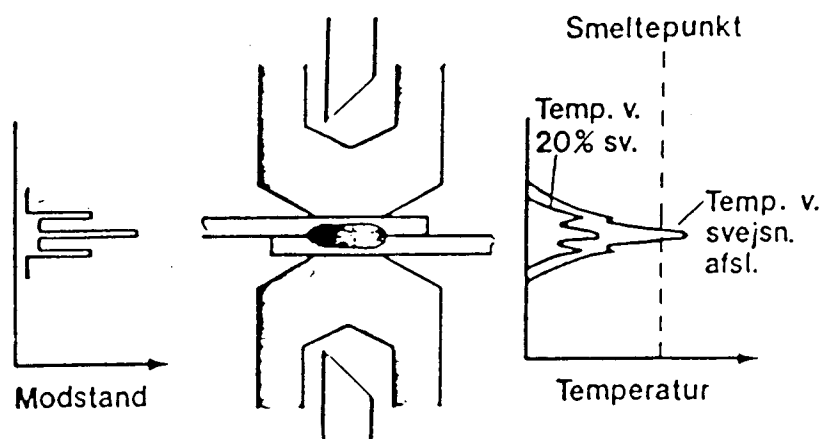
Ved modstandssvejsning opvarmes svejsestedet til svejsetemperaturen ved at en elektrisk energi omdannes til varme. Da de materialer som typisk svejse har en relativ god elektrisk ledningsevne, kræves der stor strøm for at opnå tilstrækkelig energi. Svejsespændingen er derimod meget lille. Den tilførte varme kan i princippet udtrykkes ved følgende formel

$$Q = I^2 * R * t \quad \text{Hvor } I \text{ er strømmen, } R \text{ er den samlede modstand og } t \text{ er tiden.}$$

Typiske værdier er for modstanden 50-500 micro ohm, for strømmen fra 1000 ampere til over 100.000 ampere og tiden i millisekunder (spændingen ligger typisk på 1-10 volt). De høje strømme opnås ved en nedtransformering af vekselstrøm som findes i vores almindelige elforsyning, dette kan eventuelt efterfølges af en ensretning til jævnstrøm, men typisk anvendes ved moderate strømniveauer vekselstrøms maskiner.

I det følgende gennemgås udelukkende punktsvejsning. Pressvejsning er yderst vanskeligt at gennemføre i aluminium, da kombinationen af smeltet metal bag et usmeltet oxidlag hindrer et ordentligt svejseforløb under kollapset af projektionen. Stuksvejsning og brændstuksvejsning er relativt sjældne, hvorfor der henvises til speciallitteraturen.

Punktsvejsning anvendes fortrinsvis til overlapsamlinger af pladeformede emner, og strømmen koncentrerer sig i svejsepunktet ved elektrodernes form, hvilket vil sige at elektrodernes geometri er bestemmende for svejsningens geometri. Normalt tilstræbes der en punktdiameter 3-5 gange t (t=pladetykkelsen i mm). Ved svejsning af to plader i samme materiale og i samme tykkelse vil der dannes en svejselinse, der er symmetrisk omkring skillefladen imellem pladerne - se Figur 3.77.



Figur 3.77 Punktsvejsning.

3.9.2 ALUMINIUMS MODSTANDSSVEJSE EGENSKABER

Det endelige resultat ved modstandssvejsning er stærkt afhængig af materialets egenskaber (elektrisk og mekanisk), og svejseparametrene skal vælges efter dette. Ved punktsvejsning af aluminium må der træffes særlige foranstaltninger.

Tabel 3.29 viser de fysiske karakteristika for stål og aluminium, og som det ses er der stor forskel især på elektrisk ledningsevne og varmeledningsevne. Disse værdier er for rene metaller, og derfor vil de variere for forskellige legeringer.

Tabel 3.29 Fysiske karakteristika for stål og aluminium.

	Stål	Aluminium
Specifik vægtfylde kg/m ³	7.85 x 10 ³	2.7 x 10 ³
Varmeledningsevne W/m°C	59	214
Varmefylde J/g°C	0.46	0.90
Termisk udvidelses koefficient °C ⁻¹	1.3 x 10 ⁻⁵	2.4 x 10 ⁻⁵
Smeltepunkt °C	1528	660
Elektrisk ledningsevne m/Ω mm ²	6.7	35-37

Da varmeledningsevnen er meget større for aluminium end for stål skal aluminium normalt svejses med en meget kort svejsetid i forhold til stål, da energien ellers vil forsvinde ud i det omkringliggende materiale. På grund af den korte svejsetid og aluminiums relativt gode elektriske ledningsevne, skal der anvendes meget høje svejsestrømme typisk 3-5 gange så høj som til stål i samme dimension.

Der er et relativt smal temperaturområde indenfor hvilket aluminium forbliver plastisk inden det når sit smeltepunkt. Dette betyder at svejsedata skal holdes indenfor et smalt parameter- område. Hvis der er for lidt svejsestrøm bliver opsmeltningen utilfredsstillende, og hvis den er for stor er der risiko for sprøjt.

Aluminium legeres let til kobber, og da kobberlegerede elektroder er det normale til modstandssvejsning, afsættes aluminium, selv uden strøm, på elektrodespidsen. Dette fænomen forstærkes yderligere ved opvarmning og højt tryk, altså under svejsning.

Når aluminium kommer i forbindelse med luftens oxygen, dannes der meget hurtigt en oxidhinde på overfladerne, og en sådan er derfor i praksis altid tilstede på aluminiumsplader når de leveres. Disse oxider har et meget højt smeltepunkt (over 3 gange aluminiums), og samtidigt en relativt stor elektrisk modstand, hvilket betyder at oxidlaget på pladerne opvarmes kraftigt under svejsning. Dette er selvfølgelig en fordel i skillelinien mellem pladerne, men en stor ulempe ved kontaktfladen mellem elektrode og plade. Når elektroden opvarmes af dette oxidlag accelereres nedbrydningen, dels på grund af at elektroden bliver plastisk, og dels på grund af, at den forøgede opvarmning fører til en yderligere oplegering af elektrodespidsen.

Dette problem kan minimeres ved at oxidhinden fjernes, hvilket kan ske på to måder, kemisk eller mekanisk. Den kemiske afrensning kaldes også bejdsning. Den mekaniske afrensning kan foretages f.eks. ved børstning med nylonbørster eller ved glasperleblæsning.

Man kan også acceptere oxidhinden og svejse i leveringstilstand. Dette kan løses på to måder dels ved at afrense elektroderne med et passende mellemrum (typisk 5-25 svejsninger), eller ved at anvende et specielt elektrode design, som tager hensyn til det slid som elektroden udsættes for under svejsning. Den første løsning er typisk den løsning som kan give den højeste kvalitet (flykvalitet), men er samtidig også den dyreste på grund af afrensningen. Den sidste løsning benyttes til en svejskvalitet

(industri kvalitet) som i langt de fleste tilfælde vil være tilstrækkelig. Se mere om dette under elektrodedesign (underafsnit 3.9.4).

3.9.3 ELEKTRODEMATERIALER

Et velegnet elektrodemateriale skal mindst have følgende egenskaber:

- A. Skal kunne overføre den nødvendige svejsestrøm
- B. Skal kunne overføre den nødvendige elektrodekraft uden at deformere plastisk
- C. Kunne modstå oplegering med aluminium, eller hvis dette ikke kan opfyldes, så alligevel svejse med en kvalitet der kan accepteres (industri kvalitet), selv om et oplegeringslag på elektrode er dannet.

Normale punktsvejeelektrode er normalt udført i kobber som er legeret for at øge hårdheden, men legeringselementerne har den uheldige egenskab at de sænker den elektriske ledningsevne. Da aluminium har en god elektrisk ledningsevne, skal de benyttede elektroder helst have en ledningsevne som er bedre.

Til høj kvalitets arbejde vil man typisk vælge en type A 1/.. (klasse I) elektrode (se Tabel 3.30), som kan være legeret med f.eks. sølv. Denne type elektrode har som det ses af tabellen en relativt lav maksimal arbejdstemperatur, hvilket kan indikere problemer med elektrodeslid, hvis man ikke afrenser elektroderne for oxid med et passende mellemrum.

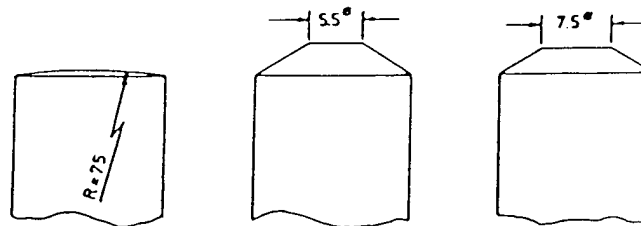
Til industri kvalitet vil man typisk ønske en så lang standtid på elektroderne som muligt, og derfor vælge en elektrode med en større arbejdstemperatur oftest en type A 2/.. (klasse II) elektrode. Men for at opnå den ønskede standtid vil det kræve et elektrode design som beskrevet i næste kapitel.

Tabel 3.30 Elektrodeklasser efter ISO 5182.

Elektrodematerialer. Uddrag af ISO 5182 - 1978.							
Type	Legerings- elementer	Hårdhed HV (30 kg) Min. -	Elektrisk ledningsevne MS/m. min.	Max. anvendelses- temperatur °C	Anbefalet anvendelse		
					Punktsv.	Sømsv.	Pressv.
A 1/1	Cu Ag	85	56	150	Aluminium	Alum.	
A 1/2	Cu Cd	90	43	250	Aluminium	Alum.	
A 2/1	Cu Cr	125	43	475	Bl. stål	Bl. stål	Elektroder
A 2/2	Cu Cr Zr	130	43	500	Bl. stål	Bl. stål	
A 3/1	Cu Co Be	180	23	475	Rustfr. stål	Rustfr. stål	Elektroder
A 3/2	Cu Ni Si	200	17	500	Elektr. holdere		
A 4/1	Cu Ni P	130	29	475	Elektr. holdere		Elektroder
A 4/2	Cu Be Co Ni	350	12	300	Elektr. holdere		Elektroder
A 4/3	Cu Ag	120	40	400		Bl. stål	Elektroder
A 4/4	Cu Al Fe Ni	170	4	650	Elektr. holdere		Elektroder
B 10	W 75 Cu	220	17	1000			Bl. stål
B 11	W 78 Cu	240	16	1000			
B 12	W 70 Cu	300	12	1000			Rustfr. stål
B 13	Mo	150	17	1000			
B 14	W	420	17	1000	Kobber Kobberleg.		
B 15	W 65 Ag	140	29	900	Kobber Kobberleg.		

3.9.4 ELEKTRODEDESIGN

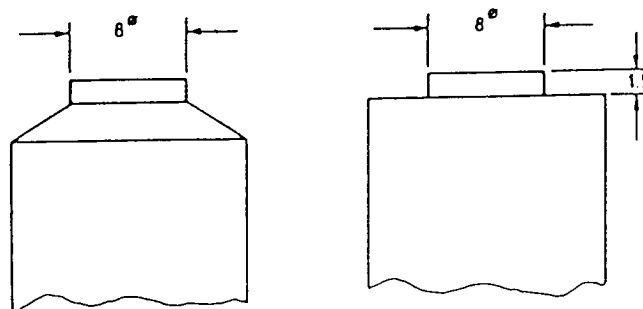
Strømmen koncentrerer sig i svejsepunktet udfra elektrodedesignet. Til aluminium anvendes til høj kvalitets svejsning normalt en hvælvet elektrode, se Figur 3.78. Når denne elektrode anvendes til svejsning af aluminiumplade i leveringstilstand, vil der meget hurtigt afsættes aluminiumoxid på elektrodespidsen, hvorved at den slides meget hurtigt. Sliddet medfører en forøgelse af kontaktarealet mellem elektrode og emne, hvilket resulterer i en formindskning af strømkoncentrationen gennem svejsepunktet, hvorved svejsningens diameter mindskes.



Figur 3.78 Almindelige elektrodegeometrier, henholdsvis hvælvet og konus formet. I midten og til højre: Henholdsvis en ny og en efter 2000 svejsninger.

Der har gennem årene været mange forsøg med forskellige belægninger (f.eks. nikkel) af elektroden, hvilket i nogle tilfælde har kunnet give en elektrode levetid på op mod 2000 svejsepunkter på afrenset plade vel at mærke. Ved at anvende alm. elektroder (konus) er det muligt at svejse i aluminium men man skal forvente en meget stor spredning i kvaliteten. Denne elektrode er også meget følsom overfor slid (Figur 3.78 til højre).

Til svejsning i almindelig industri kvalitet på plader i leveringstilstand, er der udviklet et specielt elektrodedesign som tager hensyn til det slid som uventet vil optræde ved svejsning i plader med oxidlag, se Figur 3.79.



Figur 3.79 Elektrode design til svejsning af oxidbelagt aluminiumsplade (som leveret).

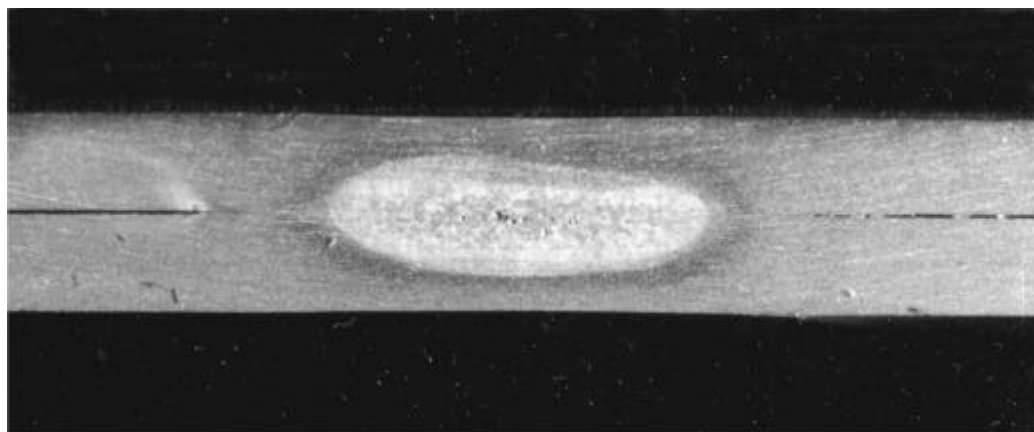
Med dette design er det muligt at svejse op mod 5-6000 svejsepunkter uden afrensning af elektroden. Dog skal elektroden "indkøres" for at opbygge et konstant oxidlag, normalt kasseres de

første 50 - 100 punkter, hvorefter svejsedata kan indstilles. Elektrodespids diameteren skal være større end det normalt anbefalede. F.eks. hvis der anbefales $\varnothing 5$ mm skal den være $\varnothing 8$ mm. Hvis pladerne afrensnes (f.eks. børstet med NYLON børster) kan elektrodelevetiden øges til opmod det tredobbelte 15-20.000 punkter.

Under indkøringen af elektrode (eventuelt på en anden maskine) vil der være en tendens til at elektroden "klæber" til pladen, men dette vil fortage sig efterhånden som indkøringen skrider frem.

3.9.5 PORØSITET I PUNKTSVEJSNINGER

Makroslib af punktsvejsninger i aluminium viser at der typisk er en stor porøsitet (porer og oxidindeslutninger) koncentreret i midten, og langs den oprindelige skilleflade mellem pladerne (Figur 3.80). Denne porøsitet skyldes for porernes vedkommende at oxidlaget på pladerne binder store mængder fugt. Når oxidlaget opvarmes under svejsning frigives den brint som er bundet, og på grund af den korte svejsetid kan den ikke undslippe svejsningen.



Figur 3.80 Typisk porøsitet i punktsvejsning i aluminium.

Porer midt i svejsningen har dog ikke den store styrkemæssige betydning, idet de mekaniske spændinger vil koncentreres i svejsningens periferi, og midten af svejsningen forbliver spændingsløs.

3.9.6 ALUMINIUMLEGERINGERS MODSTANDSSVEJSBARHED

Punktsvejsning af aluminium er en veletableret metode, som oftest er mere økonomisk end andre svejse metoder når der er tale om masseproduktion.

For at opnå en god kvalitet ved punktsvejsning i aluminium kræves normalt en god kontrol af de tre vigtigste parametre, som før nævnt, elektrodekraft, strøm og svejsetid.

På grund af aluminiums relativt store elektriske og termiske ledningsevne vil der normalt være behov for meget store svejsestrømme, på 10-100 kA eller højere, sammenlignet med stål som normalt har behov for strømme mellem 3-25 kA. Den gode termiske ledningsevne betyder samtidigt at der skal anvendes korte svejsetider.

Aluminium når sit plastiske område ved en meget lavere temperatur end stål, og det kræver derfor mindre varme at opnå et vis opsmeltet volumen. Temperaturområdet inden for hvilket aluminium er plastisk inden smeltning, er meget lille. For ren aluminium er dette område kun ca. 35 °C, og for de fleste aluminiumslegeringer 50-165 °C, mens det for stål er ca. 550 °C. Det vil sige at svejseparametrene skal kunne styres meget præcist. Ved punktsvejsning er der således risiko for sprøjt mellem pladerne.

Modstandssvejsbarheden af aluminiumslegeringer er til dels afhængig af pladernes leveringstilstand, specielt hårdheden har indflydelse som vist i Tabel 3.31 (svejsbarheden er udtrykt ved en skala fra 1-6 hvor 6 er meget god svejsbarhed) . Som det ses er de hårde typer generelt bedre svejsbare. Undtaget fra dette er højstyrketyperne i gruppe 2000 og 7000, som er lige svejsbare i blød som hård tilstand. Modsat almindelig lysbuesvejsning er højstyrke legeringerne bedre modstandssvejsbare end de bløde legeringer.

Tabel 3.31 Forskellige aluminiumlegeringers svejsbarhed.

Legering	Sammensætning	Leveringstilstand	
		Hård	Blød
AA1050A	Al99.5	5	4
AA1200	Al99.0	5	5
AA2011	Al5.5Cu0.4Bi0.4Pb	3	-
AA2017A	Al4.0Cu0.7Mn0.7Mg0.5Si	5	5
AA2024	Al4.4Cu1.5Mg0.6Mn	5	5
AA3003	Al1.3MnCu	5	4
AA3103	Al1.2Mn	5	4
AA5004A	Al0.9Mg	6	5
AA5052	Al2.5MgCr	6	5
AA5154A	Al3.5MgMnCr	6	5
AA6061	Al1.0Mg0.6SiCuCr	5	4
AA6082	Al0.9Mg1.0Si0.7Mn	5	4
AA7020	Al4.5Zn1.2MgMnCrZr	5	-
AA7075	Al5.6Zn2.5Mg1.6CuCr	5	5

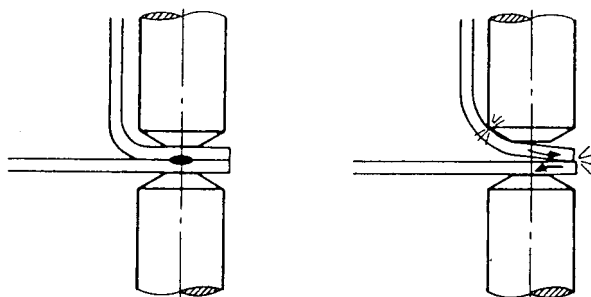
Aluminiumslegeringer, specielt kobber- og zinklegerede kvaliteter, gennemgår en stor ekspansion og kontraktion når de går fra fast til flydende tilstand og tilbage til fast tilstand igen. Disse dimensionsforandringer er størst i svejsezone og kan resultere i revner ved de normalt korte svejsetider.

Revner og spændinger i materialet kan forebygges hvis svejsmaskinen er konstrueret således at der tages højde for disse egenskaber. Maskinen skal have et elektrode system med en lille træghed og lav friktion, idet der kan opnås betydelige kvalitetsforbedringer ved at anvende et forhøjet holdetryk efter selve svejsningen, hvor materialet stadig er plastisk, dette reducerer tendensen til revner. Dette kan med fordel suppleres med en down-slope af strømmen eller eftervarme under det forhøjede holdetryk, som derved holder materialet i eller i nærheden af det plastiske område.

3.9.7 KONSTRUKTIONSANVISNINGER

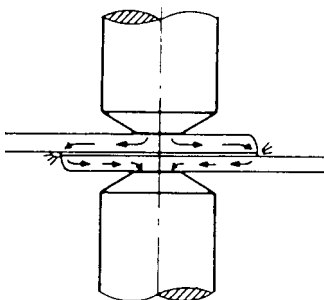
Ved modstandssvejsning er der en række forhold som bør tages i betragtning, for at svejsningen kan udføres optimalt.

En af de afgørende faktorer for at kunne modstandssvejs med en god kvalitet, er at adkomstforholdene er i orden. Hvis svejsningen besværliggøres af at adkomstforholdene er for dårlige påvirker det ikke kun kvaliteten negativt, men også prisen idet produktionstiden forøges. Med adkomstforhold menes i dette tilfælde mulighed for at kunne placere elektroderne på en fornuftig måde, således at de f.eks. ikke rører pladen ved ombuk o.s.v.. Dette kan give problemer med at strømmen ikke kun løber mellem de to elektroders spids, men også fra kanten. Se Figur 3.81.



Figur 3.81 Shunting mellem elektrodeskaft og plade.

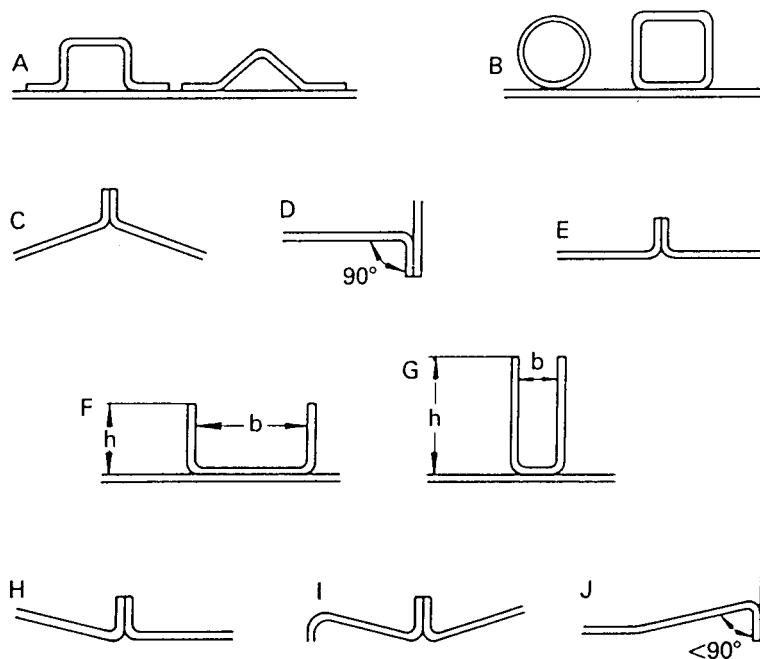
Klippekanter på plader kan, hvis de vendes forkert, give anledning til shuntstrømme, specielt i tykke plader. Dette resulterer i en mindre opsmeltning end forventet. Se Figur 3.82.



Figur 3.82 Shunting fra klippekanter.

Strømmens vej gennem grater og klippekanter kan ofte iagttages ved at klippekanterne bliver glødende under svejsning, eller ved at der er strøm mærker ved klippekanterne ved en destruktiv test af emnet efter svejsning. Det er først når klippekanterne er nedsmeltet, og vigtig svejse tid er mistet, at strømmen løber mellem de to elektroder. Resultater er at svejsepunktet bliver mindre end forventet.

Figur 3.83 viser eksempler på god og mindre god udformning, hvis et givet produkt skal modstandssvejses.



Figur 3.83 Eksempler på konstruktionsudformning.

Del A viser en velegnet udformning, mens de lukkede profiler i del B er svære at svejse. Del C er velegnet fordi der kan anvendes almindelige lige elektroder, mens D er lidt svær at komme til. Del E er vanskelig, hvis der ikke benyttes skråstillede elektroder. Del F er velegnet hvis $h/b < 2,5$. Desuden anbefales her at $b=15 + 5t$ hvis $h < 50$ samt $b=30$ hvis $50 < h < 75$. Hvis Del G har $h/b > 2,5$ er den ikke egnet til svejsning. Del H,I og J er alle mindre egnet idet der kræves specielle elektroder som er skråstillede.

3.9.8 MASKINER TIL MODSTANDSSVEJSNING AF ALUMINIUM

Til punktsvejsning af aluminium vil det normalt være påkrævet med maskiner, som har en meget større strømkapacitet end maskiner til almindeligt stål. Udover den større strømkapacitet vil det i mange tilfælde også være påkrævet med en bedre styring af elektrodekraften. På grund af aluminiums relativt lille toleranceområde med hensyn til svejseparametrene, stiller det også krav til maskinindstillingernes repeterbarhed.

Udviklingen er gået fra almindelige vekselstrømsmaskiner over jævnstrømsmaskiner til inverterteknikken. Denne udvikling har resulteret i lavere installationsomkostninger, som ved vekselstrømsmaskiner med meget høj strømkapacitet kan være meget store. Udviklingen har også haft en effekt på elektrodelevetiden, gående mod længere levetider.

De høje effektbehov og store krav til styringen af maskinen, betyder at maskiner til modstandssvejsning af aluminium normalt er meget dyrere end maskiner til almindeligt stål. Men dette kan i mange tilfælde opvejes af de lavere installations omkostninger.

3.9.9 RETNINGSGIVENDE VÆRDIER FOR MASKININDSTILLINGER

Ved punktsvejsning af aluminium er det i første omgang vigtigt at beslutte sig for hvilken kvalitet der er nødvendig for at løse opgaven. Hvis kun den allerhøjeste kvalitet kan accepteres, er man nødt til at tage højde for den ekstra tid som afrensning af elektroderne tager, eller optimere sine svejsedata meget præcist. Maskinudviklingen har betydet at der kan svejdes med væsentligt længere elektrode levetider og med længere intervaller mellem afrensningen af elektroderne. Praksis er normalt at benytte hvælvede elektroder (klasse D), høj strøm (jævn strøm) i meget kort tid, en stor elektrodekraft, og kort holdetid. Samtidigt kan det være effektivt at have en god køling af elektroderne, således at elektrodernes driftstemperatur holdes nede. Alle disse tiltag har til formål at hæmme oplegeringen mellem aluminium og kobber på elektrodespidsen. dette sker ved at specielt kontaktmodstanden og kontakttiden holdes på et minimum.

Derudover kan det i de fleste tilfælde være nødvendigt med en styring af elektrodekraften, således at der svejdes med eftervarme, og en forhøjet elektrodekraft i holdetiden efter svejsning (for at undgå varmerevner), samt up- og down-slope af strømmen. Se tabel 4 og 5 for retningsgivende indstillingsværdier for svejsningen med henholdsvis veksel- og jævn strøm.

Tabel 3.32 Svejsning i flykvalitet med hvævede klasse I elektroder, én-fase vekselstrøm.

Plade tykkelse mm	Elektrode kraft Svejsning efterpres		Strøm kA	Svejsetid med slope up down		Elektrode radius diameter	
	N	N		per.	per.		
0.5	2000	4000	25	2	2	75	16
0.75	3000	6000	31	2	3	75	16
1.0	4000	8000	35	3	4	100	16
1.25	5000	10000	42	4	5	100	19
1.5	6000	13000	50	4	7	100	19
2.0	7500	18000	55	6	9	150	19
2.5	10000	23000	63	7	10	150	19
3.0	13000	30000	70	8	12	200	25

Tabel 3.33 Svejsning i flykvalitet med hvævet klasse I elektroder, jævnstrøm.

Plade tykkelse mm	elektrode radius mm	Elektrode kraft N	Strøm kA	Svejsetid Perioder	opsmeltning Ø mm
0.5	75	1800	19-24	2	3.5
0.75	75	2200	24-30	3	4.5
1.0	75	3000	25-32	3	5.0
1.25	100	3500	26-34	4	5.5
1.5	100	4000	27-35	5	6.0
2.0	100	5000	30-38	6	7.0
2.5	100	6500	34-42	7	8.0
3.0	100	8000	38-45	8	8.5
3.5	150	10000	44-50	9	9.5

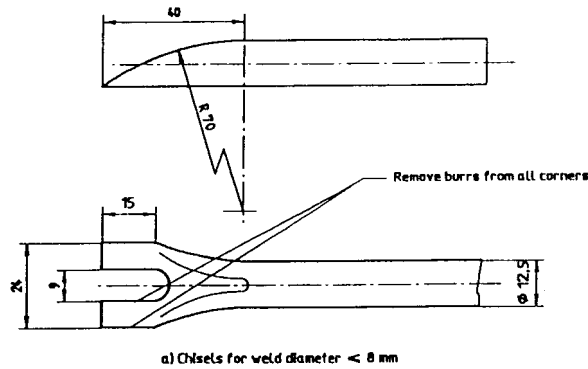
3.9.10 KVALITETSKONTROL

Ved kontrol af en modstandssvejsningssamling, udføres først en visuel kontrol. Der kontrolleres for revner og forbrændinger, sprøjt og for store elektrode indtryk.

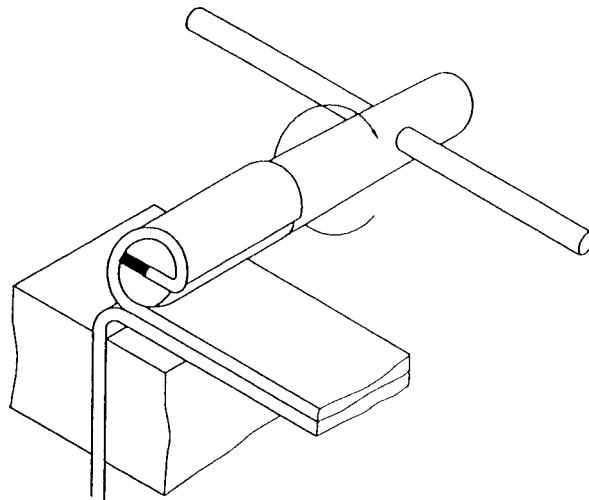
Styrken af en modstandssvejsningssamling kan kontrolleres på flere måder, men normalt kun destruktivt. Flere ikke-destruktive metoder er undersøgt med skiftende held.

Ved en såkaldt mejseltest, kontrolleres styrken ved hjælp af en mejsel. Mejslen bankes ind ved siden af punktsvejsningen, og pladen skal kunne deformeres kraftigt uden at svejsningen slipper. Man kan derefter fortsætte med at banke mejslen ind mellem plader således at der sker en udlokning af et hul i den ene plade. Diameteren på det materiale som blev siddende på den plade uden hul kan derefter måles. Ved pladetykkelser $t > 2$ mm, får man ikke altid en udlokning af et hul, men et eventuelt brud bør ikke ske helt mellem pladerne, men en vis mængde materiale skal blive siddende på den ene plade.

Ved en skrælleprøve, kan benyttes en speciel mejsel, med en slids i hvor svejsepunktet går op i (Figur 3.84), eller en speciel dorn, med en slids som den ene plade vikles op om (Figur 3.85).



Figur 3.84 Speciel mejsel til skråltest.



Figur 3.85 Skrålledorn.

Fælles for begge er at der skal ske en udvinding af materiale således at svejsepunktet sidder på den ene plade.

Disse destruktive test metoder anvendes ved prøve svejsning i forbindelse med indstilling af svejsedata. og ved løbende kontrol under produktion.

For at få et optimalt "billede" af svejsningen, kan det være en fordel at benytte sig af metallografiske undersøgelser. Dette sker ved at der laves et snit igennem centrum af svejsningen, som så slibes, poleres og ætzes. Svejsningens geometri kan nu bedømmes og måles meget nøjagtigt, evt. i mikroskop.

Træk - eller torsionsprøver af specielle prøvestykker, kan udføres under laboratoriemæssige forhold til bedømmelse af punkts styrke.

3.9.11 BOLTESVEJSNING

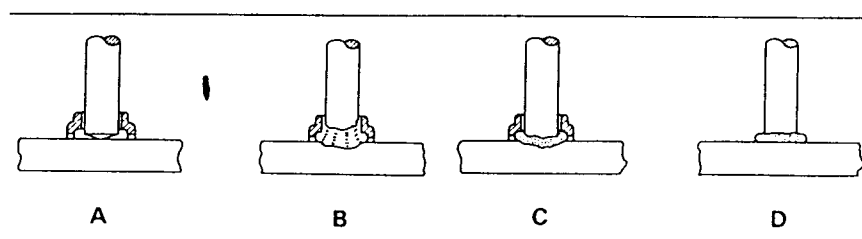
Svejsning af en bolt, tap eller lignende mod en flade, kan udføres på mange måder. Man kan benytte almindelig lysbuesvejsning, modstandssvejsning, friktionssvejsning, lasersvejsning og så videre. Men boltesvejsning eller tapsvejsning som det også kaldes, er specielt skræddersyet til formålet.

Boltesvejsning er en semi-automatisk svejseproces, og har derfor den fordel at det ikke kræver højt uddannet personale. Svejse kvaliteten er ikke direkte operatør afhængig, og processen kan udføres til høj kvalitet med en stor repetitionsnøjagtighed.

Boltesvejsning kan inddeles i tre principielle metoder til svejsning, Philips metoden, trukken lysbue (løftetænding) og kondensatorboltesvejsning. Philips metoden udføres med en "tændsats" ved hjælp af hvilken der etableres en lysbue. Denne metode anvendes normalt ikke til aluminium, og vil derfor ikke blive behandlet yderligere.

3.9.12 BOLTESVEJSNING MED TRUKKEN LYSBUE (LØFTETÆNDING)

Ved boltesvejsning med trukken lysbue (løftetænding) bliver boltens ende og montagepunktet opvarmet til smeltepunktet ved hjælp af en lysbue trykket imellem de to. Når tilstrækkelig varme er opnået presses de to dele sammen. Anvendes typisk til bolte over 8 mm. Se Figur 3.86.

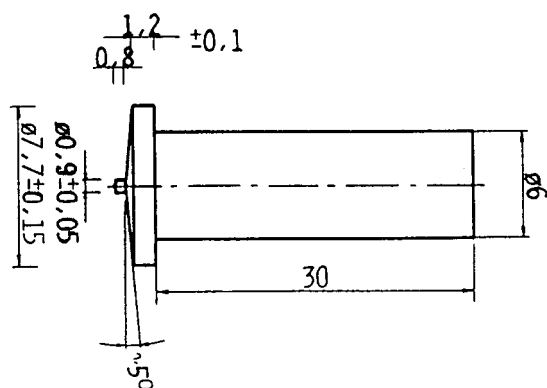


Figur 3.86 Operationsforløb ved boltesvejsning med trukken lysbue.

En speciel boltesvejsepistol bruges til at holde boltens ende og udfører bevægelsessekvenserne. Ved boltesvejsning af stål benyttes en keramikring omkring svejsestedet, denne beskytter smeltebade og giver vulsten den rette facon. Denne ring slås itu med en hammer bagefter. Ved boltesvejsning af aluminium er der behov for at beskytte smeltebadet endnu bedre, og derfor svejses der med en inaktiv beskyttelses gas, men uden keramikring.

3.9.13 KONDENSATORBOLTESVEJSNING

Ved kondensatorboltesvejsning opnås en tilstrækkelig opvarmning af svejsezonen ved hjælp af en energiudladning fra et kondensatorbatteri. Svejsetiden er meget kort ca. 2 ms., og derfor skal boltens ender formes inden meget snævre tolerancer. Anvendes typisk til bolte under 8 mm. Se Figur 3.87.



Figur 3.87 Udformning af bolt til kondensatorboltesvejsning.

Svejsningen kan udføres på to forskellige måder:

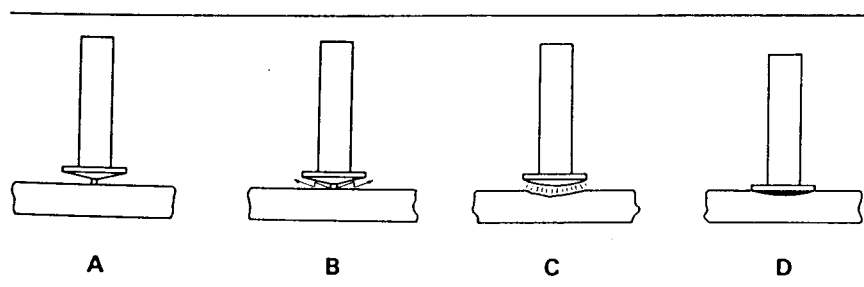
- a) Strømmen indkobles **før** berøring.

Bolten fastgøres i en holder. Spændingen fra kondensatorbatteriet tilføres boltens tæppe, og den bevæges mod arbejdsstykket. Bevægelseshastigheden bestemmes af et fjeder- eller trykluftsystem. Når den lille tap berører arbejdsstykket, indledes svejsningen, kontaktfladerne opvarmes og boltens tæppe trykkes ned i de smeltede kontaktflader.

- b) Strømmen indkobles **efter** berøring.

Bolten fastgøres i en holder. Med et let tryk bringes tappen i berøring med arbejdsstykket. Trykkraften bestemmes af en fjedermekanisme. Kondensatorbatteriet kobles derefter til boltens tæppe, og svejsningen startes. Efter opvarmningen trykkes boltens tæppe ned i de smeltede kontaktflader.

Selve svejseprocessen indledes med, at tappen bærer en meget stor strøm. På grund af den meget store strømkoncentration vil tappen meget hurtigt smelte og fordampe. Derved sker der en ionisering (dannelse af plasma) af luft og metaldamp omkring svejsezonen, og der dannes en lysbue mellem kontaktfladerne. Det store plasmatrik vil rense og opvarme kontaktfladerne til smeltetemperatur. Når plasmatrikket falder og kondensatorbatteriets energi er opbrugt, trykkes kontaktfladerne sammen – se Figur 3.88.



Figur 3.88 Operationsforløb ved kondensatorboltesvejsning.

Som det fremgår af Figur 3.87, er tappen forsynet med en krave, som giver en kontaktflade, der er større end tappens tværsnit.

Dette skyldes dels, at plasmatrikket så kan virke over en større flade, og dels at kontaktarealet derved øges. På grund af svejsningen karakter, er der stor risiko for fejl i samlingsfladen, og i praksis må man regne med, at der kun sker en egentlig opsmeltning i ca. 70-80% af samlingsfladen. Da svejsefladen er større end tappens areal, vil samlingen styrke alligevel være større end tappens.

På grund af den korte svejsetid, er den varmpåvirkede zone meget lille. Processen kan derfor anvendes til f.eks. fastgørelse af bolte på plader med plast belægning på modsatte side, uden at plastbelægningen ødelægges.

3.9.14 SÆRLIGE FORHOLD VED BOLTESVEJSNING AF ALUMINIUM

Som nævnt er der i praksis to af boltesvejsprocesserne der kommer på tale ved boltesvejsning af aluminium. Boltesvejsning med trukken lysbue og kondensator boltesvejsning. Dette afsnit dækker de mest nødvendige forholdsregler for de to metoder.

Forberedelse

Inden svejsning skal overfladerne på hvilke der skal svejses være rene og fri for urenheder som f.eks.:

- a. Maling
- b. Fugt
- c. Kraftige oxidlag
- d. Olie og fedt

Afrensning kan foretages ad mekanisk vej (fræsning eller børstning) eller ad kemisk vej til f.eks. olie og fedt. Normalt skal svejsning foretages inden for 8 timer efter afrensning.

Beskyttelsesgas

Beskyttelsesgas til boltesvejsning af aluminium skal være af en meget ren inaktiv type f.eks. minimum 99.5 % argon. Gassen tilføres via en speciel adapterfod der søger for at der kun strømmer gas når der svejses (med før og efterløb af gas).

Udstyr

Processen foretages med strømkilde med jævnstrøm, med minuspol på pladen. Selve pistolen og maskine kan som udgangspunkt indstilles efter de i Tabel 3.34 angivne retningsgivende værdier. Pistolen holdes normalt i lodret position.

Tabel 3.34 Retningsgivende værdier til boltesvejsning af aluminium (trukken lysbue).

Boltediameter	Svejsetid	strøm	Beskyttelsesgasflow
mm	perioder	A	l/min

6.4	20	250	7
7.9	30	325	7
9.5	40	400	9.5
11.1	50	430	9.5
12.7	55	475	9.5

3.9.15 OVERFLADE KVALITET

Mekanisk bearbejdet aluminium behøver normalt ikke afrenses, men skal være fri for snavs, olie og fedt. Kemisk afrensning/ætsning er normalt ikke påkrævet.

3.9.16 ANODISERET ALUMINIUM

Da en anodisering udvikler et meget kraftigt oxidlag, bør denne proces udskydes til efter at bolten er monteret.

Hvis dette ikke kan lade sig gøre, er det nødvendigt at bearbejde fastgørelsespunktet mekanisk. Man skal også i denne forbindelse være opmærksom på at det kan være vanskeligt at montere jordklemmen med en tilstrækkelig god kontakt gennem det anodiserede lag.

3.9.17 OVERSIGT OVER FORDELE OG ULEMPER VED BOLTESVEJSNING

Fordele	Ulemper
<ul style="list-style-type: none"> • Billigt udstyr (konventionelle strømkilder der evt. kan parallelkobles til større effekt) • Høj svejsekvalitet • Stor produktivitet • Kan automatiseres • Små operatørkrav • Stort dimensionsområde for bolte/beslag 	<ul style="list-style-type: none"> • Anvender specielle bolte/beslag • Problematiske til stillingsvejsning • Kan være følsom over for urenheder • Dyre bolte, så snart der ikke er tale om standardstørrelser

3.9.18 INVESTERINGSBEHOV VED BOLTESVEJSNING

Da boltesvejsmaskiner benytter sig af mere eller mindre konventionelle strømkilder er selve udstyret ikke så investeringstungt. Det kræver naturligvis en vis seriestørrelse at retfærdiggøre en evt. investering, men én strømkilde kan dække et stort dimensionsområde af bolte og beslag. Hvis processen skal automatiseres, skal man være opmærksom på håndteringsudstyrets investeringsbehov.

I år 2001 var prisen for et udstyr til boltesvejsning med trukket lysbue typisk mellem 20.000,- og 40.000,- for strømkilde og pistol. En M6x25 bolt kostede typisk ca. 0,50 kr. ved køb af 1000 stk.

Prisen for et udstyr til kondensatorboltesvejsning var i 2001 typisk mellem 20.000,- og 25.000,- for strømkilde og pistol. En M6x25 bolt kostede typisk ca. 0,40 kr. ved køb af 1000 stk.

3.9.19 REFERENCER

Litteratur

- [1] *Motståndssvetsning SV38*
Svetskommissionen IVA 1987
ISBN 91 7082 436 3.

- [2] *Welding, Brazing and Soldering*
ASM Handbook volume 6
ISBN 0-87170-382-3.

- [3] **Erik Østgaard**
Modstandssvejsning
Force publikation 84.05.

- [4] **Erik Østgaard**
Punktsvejsning af aluminium i leveringstilstand
Force publikation 78.09.

Tekniske rapporter

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0013, *Modstandssvejsning af aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0022, *Boltesvejsning i aluminium*

3.10 LASERSVEJSNING

Lasersvejsning finder større og større udbredelse i industrien både nationalt og internationalt. Dette skyldes i høj grad de sidste 10 års udvikling af laserteknikken som har resulteret i forøgede effektive niveauer og forbedret maskinstabilitet. Endvidere har strålehåndterings-systemer, både spejl- og fiberoptisk baserede, gennemgået en stærk udvikling som i dag gør teknikken attraktiv for både mindre og større virksomheder.

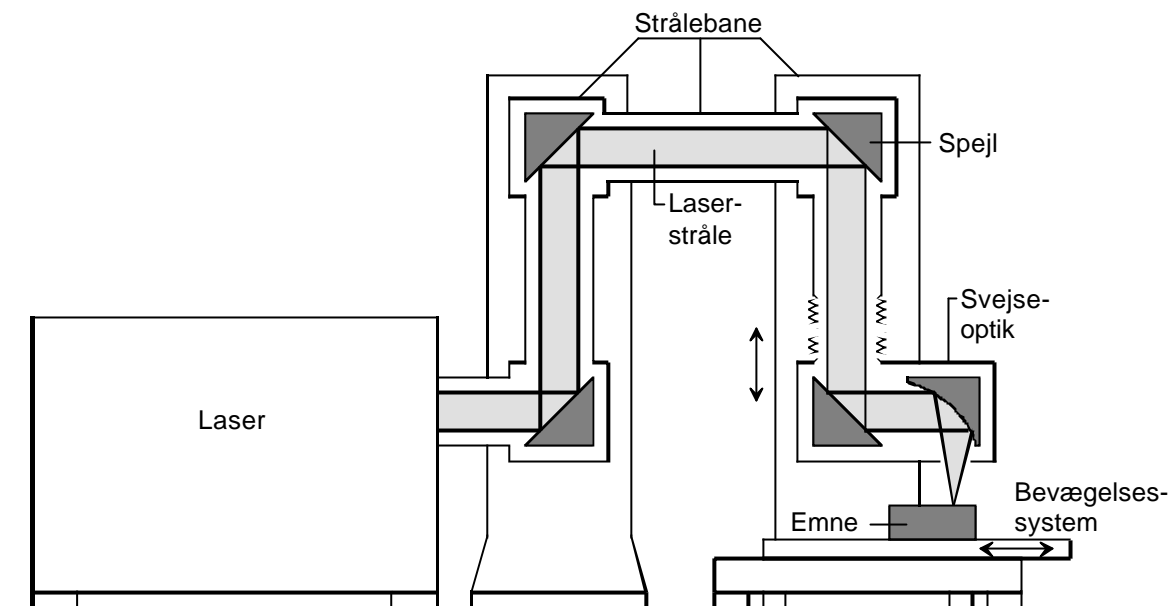
Lasersvejsning giver generelt en række fordele i forhold til konventionelle svejsemetoder i form af højere proceshastigheder og dermed bedre produktivitet, mindre varmepåvirkning og dermed mindre deformation. Svejsgeometrien adskiller sig ligeledes fra konventionelle forhold. Ofte kan komponenten simplificeres, idet fugeformer og tilpasning er enklere.

Lasersvejsning foregår under automatiserede forhold. Investeringsniveauet er afhængig af komponentkompleksitet, -størrelse og nødvendigt bevægelsesmønster, men er generelt højt typisk flere millioner kroner. Derfor er høj produktivitet og et vist produktionsvolumen nødvendigt m.h.t. forrentning og afskrivningsforhold.

To typer af lasere dominerer området indenfor lasersvejsning nemlig CO₂-laseren og YAG-laseren. Industrielle CO₂-lasere fås med effekter op til ca. 20 kwatt, hvilket svarer til at man kan fuldsvejses en stumpsøm i aluminium fra en side op til ca. 12 mm godstykkelse. For YAG-laserens vedkommende kan effekter fås op til ca. 5 kwatt, hvilket tilsvarende betyder at godstykkelse op til ca. 8 mm kan svejses ensidigt.

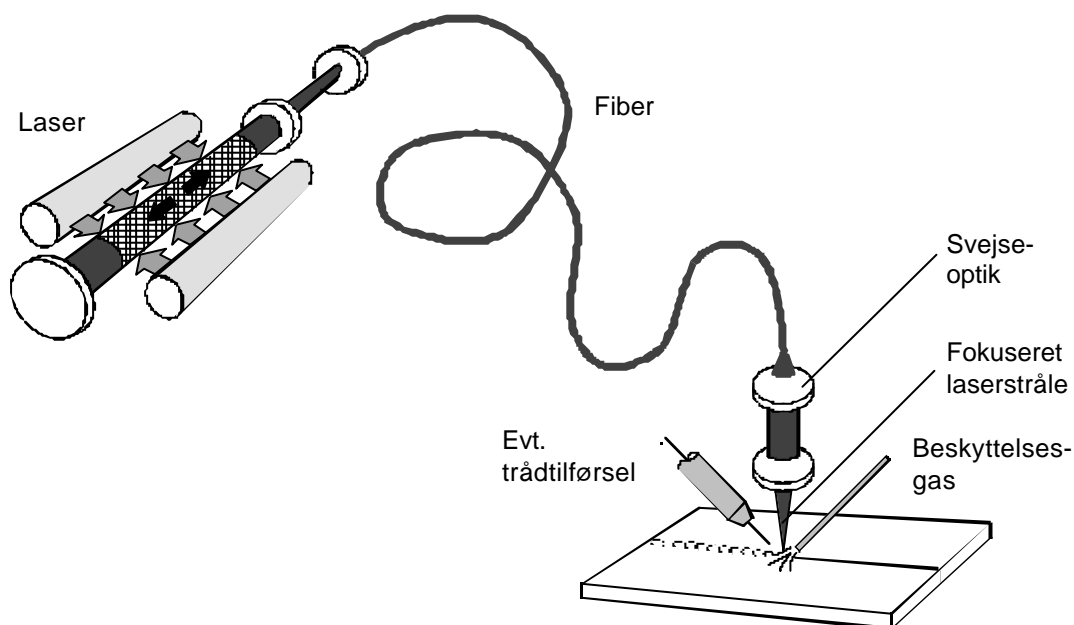
En laser adskiller sig generelt fra andre strålekilder ved, at lysstrålen er et veldefineret energibundt med en given udgangsdiameter og med en lille divergens (spredning).

For CO₂-laserens vedkommende kan strålen sendes ud over lange afstande, i praksis ofte 10-20 meter fra laser til svejseposition. Når lyset lukkes ud af CO₂-laseren, passerer det typisk et antal spejle undervejs for at blive dirigeret hen til arbejdsstationen, hvor svejsningen skal foregå.



Figur 3.89 Spejlbaseret strålebane – anvendes typisk til CO₂-lasere.

For YAG-laserens vedkommende kan fremføring af lyset foregå både via spejle og gennem et fiberoptisk kabel. Sidstnævnte fremføringsmetode giver nogle fleksible og ofte billigere muligheder for at håndtere lyset i forbindelse med svejseprocessen, f.eks. ved hjælp af robotløsninger - se princippet på Figur 3.90.

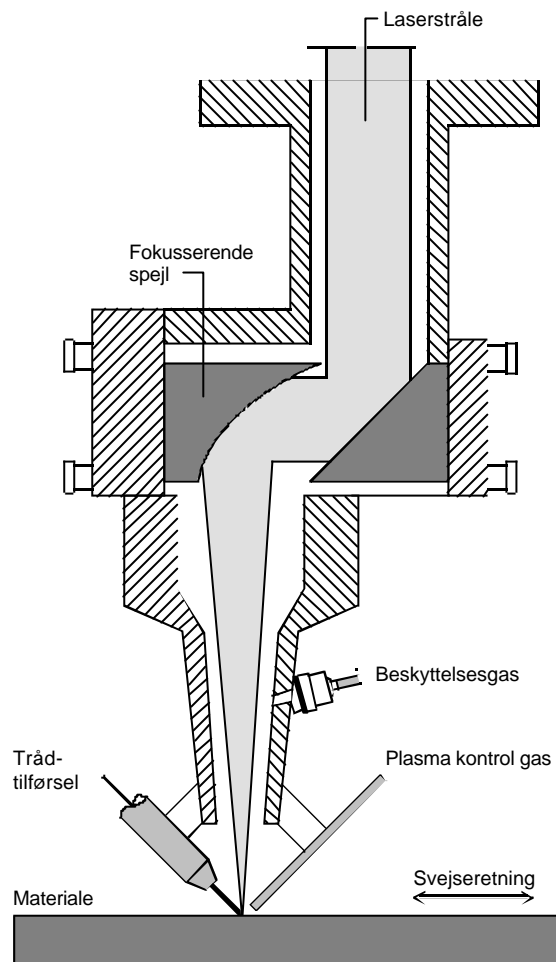


Figur 3.90 Stråle fremført gennem fiberoptisk kabel – anvendes typisk til YAG-lasere.

Ved svejsepositionen fokuseres lyset på samlingen, der skal svejses, ved hjælp af en linse eller et hulspejl. Dette gøres for at koncentrere lysets energi til effektætheder, der er høje nok til at smelte materialet i og omkring brændpunktet. Herved dannes en smal og dyb indsmelting.

Når der er tale om højere effekter, dvs. mere end 5 kW, anvendes spejlbaseret fokusering, idet linser termisk ikke tåler højere effekter.

På Figur 3.91 ses et typisk anvendt princip til at fokusere laserstrålen fra en CO₂-laser.



Figur 3.91 Fokusering af strålen via hulspejl. Bemærk i øvrigt tilførsel af tråd, beskyttelsesgas og plasma kontrolgas.

Svejestationen omfatter typisk et fikstur- og bevægelsesystem, der er tilpasset svejseopgaven. Under bevægelserne skal den rette fokusering opretholdes under hele svejseforløbet, hvilket stiller krav til bevægelsesnøjagtigheder og programmeringsfaciliteter etc. Under svejseforløbet skal smeltezonen dækkes af en beskyttelsesgas, som det er kendt fra traditionelle svejsemetoder. Der kan også anvendes tilsatsmateriale, normalt i form af en trådtilførsel, i tilfælde hvor dette er påkrævet.

Lyset fokuseres som nævnt til en energitæthed der er høj nok til at skabe en hurtig absorption af lyset med opsmeltning til følge, således at en ønsket opsmeltning af materialet, dvs. en ønsket svejsedybde, opnås. Ved "keyhole"-svejsning opnås den dybe indsmeltning ved, at laserstrålen danner en damp/plasma-kanal i materialet, der opretholdes gennem det kraftige damptryk, der dannes i kanalen. Denne kanal kan være fra 0.2 - 1 mm i diameter, og kan ved f.eks. 12 kW være op til 10

mm dyb for aluminium. Svejsesømmen dannes ved at laserstråle og emne bevæges i forhold til hinanden.

Plasmadannelse er en essentiel forudsætning for at absorptionen initieres. Plasmaskylen består af ioniseret metal og metaldampe. Denne virker populært sagt som bindeled mellem laserstråle og materiale. Hvis plasmaskylen er for stor, kan den "lette" fra overfladen og virke som skjold imellem laserlys og materiale. Denne effekt observeres normalt ved et meget ustabilt svejseforløb, hvor plasmaet "tænder" og "slukker" periodisk. Denne effekt efterlader naturligvis en ujævn overflad ofte med nogle usvejste områder. Ved en tilpas størrelse af plasmaskylen forløber processen stabilt.

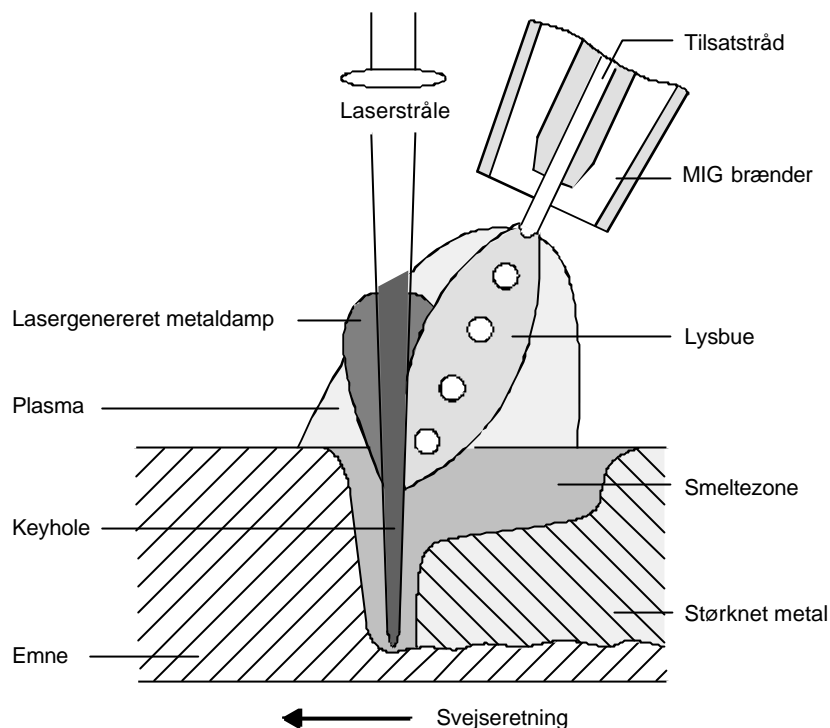
Det er således en forudsætning for processens stabilitet, at plasmaudviklingen styres, og er stabil under svejseforløbet. Plasmadannelsen kan styres ved at undertrykke den mere eller mindre ved hjælp af en lokal kraftig gasstrøm rettet hen over plasmaskylen. Den såkaldte 'plasma'-dyses diameter er af størrelsesordenen 2 mm, og har en afstand af typisk 10 mm fra smelten og en vinkel på ca. 30 grader med smelteoverfladen. Som plasmakontrolgas anvendes typisk helium, idet denne gas ikke ioniseres, og dermed selv danner plasma, så nemt og villigt som andre gastyper, f.eks. argon eller nitrogen. Dog kan en blanding af f.eks. helium og argon i et bestemt forhold være optimal for plasmaforholdene. Argon og nitrogen kan imidlertid anvendes til den generelle oxidationsbeskyttelse omkring smelten, hvilket normalt gøres af den årsag, at disse gasser er billigere end helium.

Der er mange muligheder for tilpasning af samlingsgeometrien ved lasersvejsning. Ofte er det, i forhold til andre samlingsmetoder, nødvendigt at ændre konstruktionen omkring samlingen, til en simplere udformning. Samlingsgeometrier er typisk stumpsømme, kantsømme eller overlapsømme. Laseren har yderligere den mulighed i forhold til de traditionelle svejseprocesser, at der kan svejses gennem flere lag materiale, hvilket giver nogle specielle muligheder for samling af en komponent. Ofte er der tale om maskinbearbejdede komponenter dvs. med en fin tilpasning i samlingen med kun minimale spalteforhold, hvorved svejsningen kan foretages uden brug af tilsatsmateriale. I tilfælde af spaltestørrelser på mere end ca. 0,4 mm er det nødvendigt at anvende tilsatsmateriale for at undgå geometriske fejl.

En lasersvejsnings smelteprofil adskiller sig fra den traditionelle svejsning ved at kunne være smal og dyb. Dette opnås specielt ved højeffektsvejsning og kaldes for "keyhole"-svejsning. Et dybde/bredde-forhold af størrelsesordenen 10/1 er ikke ualmindeligt for CO₂-laserens vedkommende og tilsvarende 5/1 for YAG-laseren ved svejsning i stål. Svejsesømmens bredde ligger typisk i området 1 – 2 mm. For aluminiums vedkommende er dybde/bredde-forholdene dog kun ca. det halve på grund af andre refleksions- og plasmaforhold og en meget større varmeledningsevne sammenlignet med stål.

Begrebet Hybrid-svejsning dækker over svejsninger, hvor man kombinerer 2 forskellige svejseprocesser i en lysbue og opnår en synergieffekt samtidigt med at man udnytter fordelene fra begge processer.

Der findes forskellige hybridprocesser, laserkilden kan være CO₂-laser eller Nd:YAG laser, den sekundære proces kan være MIG, TIG, plasma eller sågar en diode-laser. Det mest anvendte hybridprincip er dog CO₂ eller Nd:YAG laser kombineret med MIG eller TIG -svejsning. Et eksempel er vist i Figur 3.92.



Figur 3.92 Princip ved hybridsvejsning – her kombineres laser- og MIG-svejsning.

Svejsning af aluminium giver traditionelt en del problemer, ligegyldigt hvilken proces der benyttes. De forskellige processer har både fordele og ulemper, hybridsvejsning kombinerer forskellige processer og deres fordele.

- Svejsning med laser er en højenergi proces, hvilket resulterer i dybe og smalle svejsninger med en lav varmetilførsel og deraf en smal varmepåvirket zone (HAZ). Laserens største ulempe er at den har en meget lav tolerance overfor spalte og forsætninger, tolerancen er typisk i størrelsesordenen nogle få tiendedele millimeter.
- MIG-svejsning giver en høj produktivitet og er velegnet til automatisering, processen tåler modsat laserens store spaltevariationer. MIG-svejsning giver en moderat svejsekvalitet med større deformationer pga. høj varmetilførsel.

Ved hybrid-svejsning kombineres de 2 processer og fra laseren opnås en stor indtrængning og en høj svejsehastighed, fra MIG processen fås en stor spaltetolerance. Den samlede svejsehastighed kan ligeledes hæves derved falder varmetilførslen og deformationerne.

3.10.1 LASERSVEJSNING AF ALUMINIUMSLEGERINGER.

For både CO₂-laseren og YAG-laseren gælder, at et materiale som aluminium, ved stuetemperatur, i høj grad er reflektivt dvs. spejlende, hvilket betyder at kun en begrænset del af energien afsættes/absorberes i materialet og giver anledning til en temperaturstigning.

Ved stuetemperatur er absorptionen ca. 1% for CO₂-laseren og ca. 5% for YAG-laseren, af den indkomne stråling. Imidlertid gælder det, at absorptionen stiger med stigende materialemperatur, og allerede ved et par hundrede grader celsius er absorptionen mere end 90%, hvorefter indkoblingen

af lyset bliver nær total. Det er således i indkoblingsøjeblikket et spørgsmål om, at der skabes en lille temperaturstigning, der efter kort tid resulterer i maksimal absorption. I praksis er der med en fokuseret stråle tale om mikrosekunder for denne indkobling.

Generelt er der dog en højere refleksion af lys og plasmastråling sammenlignet med svejsning af f.eks. stål. For CO₂-laserlyset kræves, i forhold til aluminium, en energiintensitet i området 3-5*10⁶ watt/mm² for at opnå den nødvendige temperaturstigning for absorption og smeltedannelse. For YAG-laseren er denne værdi ca. 5 gange mindre. Ved svejsning i stål er denne nødvendige intensitet til sammenligning mindre end 10⁶ watt/mm².

De væsentligt forøgede refleksionsforhold ved lasersvejsning af aluminium betyder, at der skal tages ekstra hensyn til køling af optik og dyser.

Endvidere er der generelt mere sprøjt under svejseprocessen der typisk skyldes afdampning/kogning af metaller som f.eks. magnesium. Dette sprøjt har retning mod optik og dyser, hvilket igen kræver optimale tværluftanordninger som hindrer sprøjtet i at sætte sig på nævnte elementer.

For at undgå en direkte tilbagerefleksion mod spejl og laserresonator svejser man ofte under en vinkel som gør at refleksioner får retning væk fra den indfaldende strålebane og uden i øvrigt at kolliderer med andre elementer i nærheden. Tilslutninger, vand-, og gasslanger må ligeledes skærmes mod refleksioner. For YAG-laserens vedkommende kan uheldige refleksioner betyde at udgangen på den optiske fiber kan beskadiges med større omkostninger til følge.

De mere kritiske refleksionsforhold ved lasersvejsning af aluminium betyder ligeledes at ekstra afskærmning af arbejdsstationen kan være nødvendig af personsikkerhedsmæssige årsager.

3.10.2 LASERSVEJSNINGERS STRUKTUR OG EGENSKABER

Porrer

Den mest almindelige form for svejsefejl eller størkningsdefekt i forbindelse med lasersvejsning af aluminium er dannelse af porer. Porer opstår i svejse smelten og dannes af gasindeslutninger. Disse gasindeslutninger stammer hovedsageligt fra brint. Brinten frigives når oxidlagets OH - grupper opvarmes. Aluminium har høj opløselighed af brint i smeltet tilstand, og da opløseligheden falder kraftigt ved størkning udskilles brinten i små indeslutninger.

Specielt ved "keyhole"-svejsning, kan porefrekvensen være specielt stor, idet tilfældige indsnøringer af "keyholet" hindrer dannet gas at forlade smelten. Ved den hurtige størkningsproces fanges "gasboblerne" i deres opdrift og bliver hængende i smelten ofte som kugleformede indeslutninger også kaldet porer.

Da den udviklede brint hidrører fra oxidlaget, er det klart at netop tykkelsen og beskaffenheden af dette lag har stor betydning for poretilbøjeligheden. Afhængig af kravene til poreindhold kan det derfor blive nødvendigt med en vis fugeforberedelse i form af slibning, fræsning, børstning eller skrabning af kanterne umiddelbart før svejsning.

Ud over de såkaldt makroskopiske porer som varierer i størrelse, typisk fra tiendedele til et par millimeter i diameter, kan man også finde mikroporer beliggende mellem dendritarme eller i korngrænser. Porer under en vis størrelse og mængde er generelt ikke et problem for de mekaniske

egenskaber, da de som pæne afrundede defekter sjældent er årsag til f.eks. en voksende revnedannelse.

Porer er nemme at detektere med røntgen men 'fanges' også ofte i et tværslib. Størrelsen og mængden af porer påvirker den statiske styrke.

Den gældende standard på området, CEN/TC 121/SC 4/WG8 'Quality levels, beam welding.', tillader et vist poreniveau afhængig af de forskellige kvalitetsklasser.

Porer er nemme at detektere med røntgen men 'fanges' også ofte i et tværslib. Størrelsen og mængden af porer påvirker den statiske styrke, hvorfor der i standarden, CEN/TC 121/SC 4/WG 8/N16, som tidligere nævnt er beskrevet grænser for forekomsten af porer.

Varmrevner

Varmrevner – sommetider også kaldet størkningsrevner - opstår som resultat af de spændinger der skabes under afkølingen af smelten og tværkrympningen af materialet. For høje spændinger omkring lokale eutektika kan initiere dannelsen af interkrystallinske revner. Ved endnu mere ugunstige spændingsforhold kan større revner, såkaldte makrorevner, betyde at samlingen rent mekanisk ingen forlængelsesevne eller styrke har, med øjeblikkelig brud til følge. Sådanne revner kan normalt identificeres rent visuelt.

Revnetilbøjeligheden er således dels relateret til den aktuelle aluminiumlegering men også til svejsegeometrien som er bestemmende for den spændingstilstand man får omkring smelten.

Tyske og amerikanske undersøgelser, ref.[21], har vist at for AlMgSi-legeringer er revnetilbøjeligheden i høj grad relateret til volumenandelen af udskillelsesfasen Mg₂Si. Ved omkring 1% af denne fase er revnetilbøjeligheden størst. Her befinder i ørigt en kendt ekstruderbar legering som A6082 sig.

Størkningsforholdene har afgørende betydning for revnetilbøjeligheden. Ved moderate lavere hastigheder fås størkningsforhold hvor kornene vokser ud fra et cirkulært smeltebad og hvor kornene infiltreres i hinanden på tilfældig vis. Under disse forhold er revnetilbøjeligheden meget lav. Ved højere hastigheder bliver smeltebadet mere aflangt/dråbeformet.

En del af størkningen foregår ved at aflange korn vokser ud vinkelret på størkningsfronten. I denne situation dannes der typisk tværrevner som støder op til den varmepåvirkede zone. Ved endnu højere hastigheder, hvor smeltebadet er endnu mere aflangt fås en størkning hvor aflange korn støder op til hinanden fra hver sin side af samlingen efterladende en langsgående varmrevne i midten af det størknede materiale, hvor netop et eutektikum udskilles påvirket af et vist spændingsniveau.

Afhjælpning af varmrevner i lasersvejsninger

Sammenholdes ovennævnte med teori og erfaringer fra poredannelsesforholdene så betyder det, at det er svært at finde et parameterområde, hvor både porefri og revnefri forhold er tilstede samtidig. Revnetilbøjeligheden er størst ved høje hastigheder og porehyppigheden størst ved lavere hastigheder hvor svejsedybden er relativt større.

Varmrevner kan afhængig af legering normalt afhjælpes ved brug af en passende overlegeret tilsatstråd. En sådan kompenserer dels for den tværkrympning og de spændinger som ellers opstår

samtidigt med at den erstatter den mængde af elementer som har tendens til at brænde/koge af under processen, typisk magnesium og zink. En silicium-holdig tråd nedsætter typisk revnetilbøjeligheden markant i forhold til situationen uden trådanvendelse. Se også afsnit 3.3 vedrørende valg af tilsatsmaterialelegering.

Erfaringer fra svejsforsøg

En stort udvalg af svejsninger foretaget i de forskellige legeringer er blevet røntgenfotograferet og evalueret for mængde og størrelse af porer. Generelt må det siges at porer normalt altid blev detekteret i større eller mindre mængde. Følgende generelle observationer omkring mængden af porer i en svejsning kunne gøres:

Få porer, < 5%:

- Bead-on-plate svejsning, dvs. opsmeltning i en plade uden samling.
- Ved svejsning på rigtige samlinger i ren aluminium.

Forøget indhold af porer, >5%:

- Svejsning på rigtige samlinger generelt.
- Ved svejsning i højere legerede aluminiums typer, specielt m.h.t. Mg-indhold.

I bead-on-plate tilfældet optræder generelt ingen og kun enkelte gange få og små porer under de fleste svejsforhold. Ved svejsning på stumpsamling optræder der, for rent aluminiums vedkommende, ganske få porer, langt færre end for de legerede typer af aluminium. Her kan man således alene tilskrive oxidlaget i stumpsamlingen årsagen til den lette poredannelse. For de legerede typer er 'afkogning' af de lette elementer i samspil med oxidhinden årsag til den forøgede poredannelse.

Generelt viste resultaterne omkring mængden af porer at denne varierede meget mellem 0 og 10%. De fleste af svejsningerne kan således godkendes efter standarden under det der hedder klasse D, moderate. Hvis der stilles strengere krav til svejsningerne betyder dette, at man skal være meget omhyggelig med fugeforberedelse, fjernelse af oxid, optimering af svejseparametre m.m. Legeringssammensætningen kan således også få betydning.

De - som fejltipe betragtet - langt mere kritiske varmvævner viste sig sjældent i forbindelse med stumpsamlinger i forhold til de undersøgte legeringstyper. Spændingsforholdene omkring denne samlingsgeometri er ikke så kritiske sammenlignet med f.eks. kantsamlinger. Kun omkring kantsamlinger viste det sig at legeringen A6082 havde revnetendenser. Især anvendelse af en egnet tilsatstråd ville kunne hindre revner i sådanne tilfælde.

Nedsynkning af svejsemetal

En ikke uvæsentlig fejltypen som optræder ved fuld gennemsvajning i stumpsamlinger er nedsynkning af smelten, en såkaldt 'hængekøje' svejsning. Denne er tilladt i moderat grad i forhold til standarden CEN/TC 121/SC 4/WG 8/N16, men kan i praksis være meget markant og derfor give anledning til problemer.

Situationen opstår fordi aluminiumsmelten er meget letflydende med en lille overfladespænding der ikke formår at 'holde' på smelten i forhold til tyngdekraftens indvirkning. Standarden tillader derfor delvist gennemsvajste samlinger i visse tilfælde. Den nævnte fejltypen kan afhjælpes ved anvendelse af tilsatsmateriale i form af tråd som har en vis evne til at holde på smelten. Endvidere kan man ved at svejse horisontalt eller ved at svejse mod en bagskinne af f.eks. kobber reducere denne effekt.

Tilsatstråd

En undersøgelse af svejsning med tilsatsmateriale viste, at dette er muligt selv med relativt tynde tråde, f.eks. med diametre ned til 0,8 mm. Problemet med alt for tynde tråde er den svage styrke sammenholdt med den lave smeltetemperatur der gør, at tråden kan få tendens til at afbøje undervejs til smeltebadet eller afsmelte for tidligt i svejseplasmaet.

Trådtilførsel skal generelt anvendes hvis spaltestørrelsen overstiger ca. 0.3 mm. Dels opstår der mangel på materiale i samlingen men der skal ligeledes kompenseres for en vis afbrænding specielt omkring de Mg-legerede aluminiumstyper. Generelt kan man sige at de Mg-legerede tråde 'gnister' og 'sprøjter' mere end de siliciumlegerede. Sidstnævnte flyder specielt godt og efterlader som regel en meget flot glat og blank overfladefinish. Forsøg med en AlSi12 tråd viste netop sådanne forhold.

Levetidsforhold

En undersøgelse af de korrosionsmæssige forhold omkring lasersvejst aluminium er blevet gennemført i forbindelse med SASAK-projektet.

Spændingskorrosion er udført under 4-punkt bøjning i langsomt – og hurtigt strømmende havvand samt under periodiske påsprøjningsforhold. Den maksimale eksponeringstid var 740 dage.

Generelt var der ingen tegn på revner overhovedet i 5000 og 6000 serien. 7020 legeringen viste tegn på revner allerede efter 30–45 dage. 2024 legeringen viste ligeledes revnetendenser efter 120 dage i hurtigt strømmende vand.

Kun legeringen 7020 viste tydelige tegn på exfoliation.

Sammenlignet med tilsvarende TIG-svejste emner var de korroderede områder 4-5 gange mindre, dog med samme dybde.

Konklusionen er således at de korrosionsmæssige forhold tilsyneladende ikke er dårligere sammenlignet med traditionelt svejste samlinger. Disse forhold skal derfor behandles med samme omhu som for traditionel svejsning.

Generelt er udmattelsesegenskaberne primært afhængig af de geometriske forhold og overfladefinish. Større undersøgelser omkring stålmaterialers egenskaber i denne henseende har vist, at lasersvejsninger er mindst lige så gode eller bedre sammenlignet med traditionelt lysbuesvejste emner.

Der er derfor ingen grund til at tro andet end at dette også er tilfældet for aluminium selvom undersøgelser i dag, på dette område, stadig er begrænsede.

3.10.3 CO₂-LASERSVEJSNING AF ALUMINIUMSLEGERINGER

På grund af de specielle refleksionsforhold for aluminium skal en effekttæthed på mere end $3\cdot 5\cdot 10^6$ Watt/mm² være tilstede for at kunne danne et absorberende plasma. Endvidere skal man typisk op over 3 kwatt for at kunne etablere et keyhole, ref.[4]. Forholdet mellem svejsedybde, svejsehastighed og effekt er således meget beroende på om ovennævnte forhold er tilstede.

Ved svejsning med f.eks. 12 kwatt vil man typisk have keyholeforhold i hastighedsområdet op til 6000 mm/min. med en svejsedybde i området 6-12 mm. Ved større hastigheder kan keyholet ikke opretholdes, hvorved smelteprofilen bliver mere halvkugleformet / varmeledningsbetinget og svejsedybden falder markant til under 3 – 4 mm.

En meget anvendt legering for ekstrudering er A6082 F30. Typiske data for dette materiale er ; Modningshærdet AlMgSi1 legering med flydegrænse på ≥ 255 [N/mm²] og brudstyrke på ≥ 315 [N/mm²]. Hårdheden er 95 HV og brudforlængelsen A₅ 10%. Ved stumpsømssvejsning med 12 kwatt i 6 mm godstykkelse udviser legeringen et hårdhedsfald på ca. 30 % målt i det opsmeltede område i forhold til grundmaterialet ved svejsning uden anvendelse af tilsatsmateriale, se Figur 3.93 og Figur 3.94.

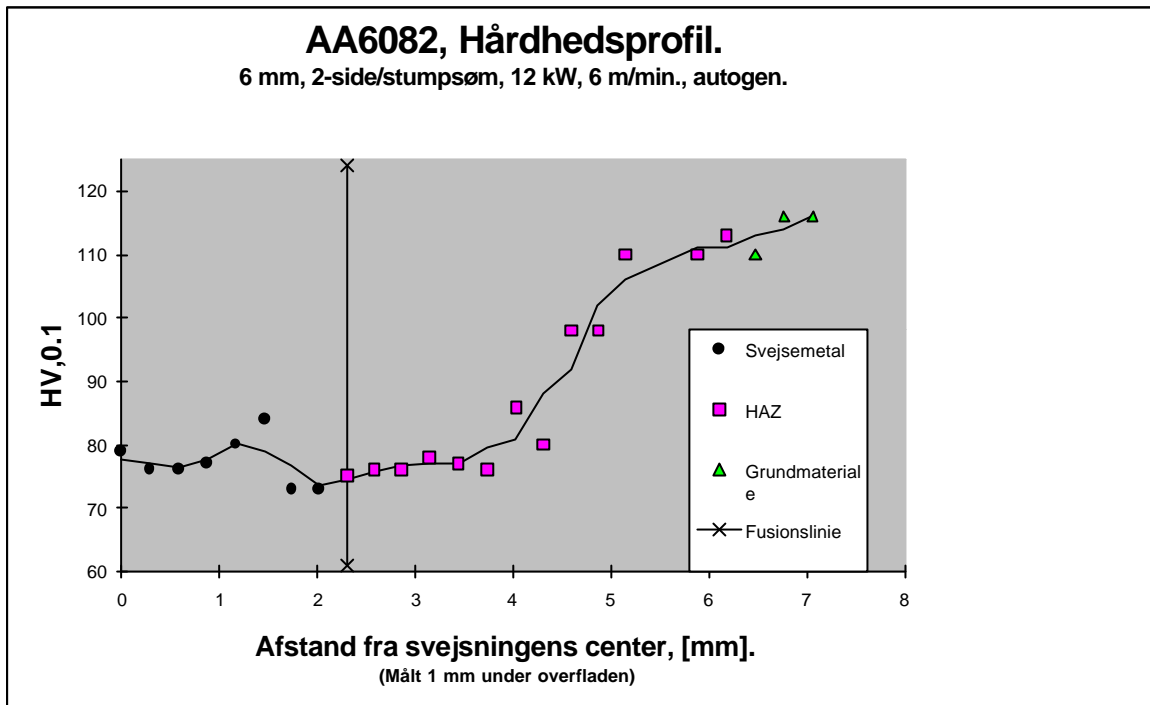
For en modningshærdet legering som A6082 er dette dog forventeligt.

Ved anvendelse af en passende tilsatstråd AlSi5 eller AlMg5, ser man at tabet i hårdhed reduceres til ca. 20% - se eksempelvis Figur 3.95.

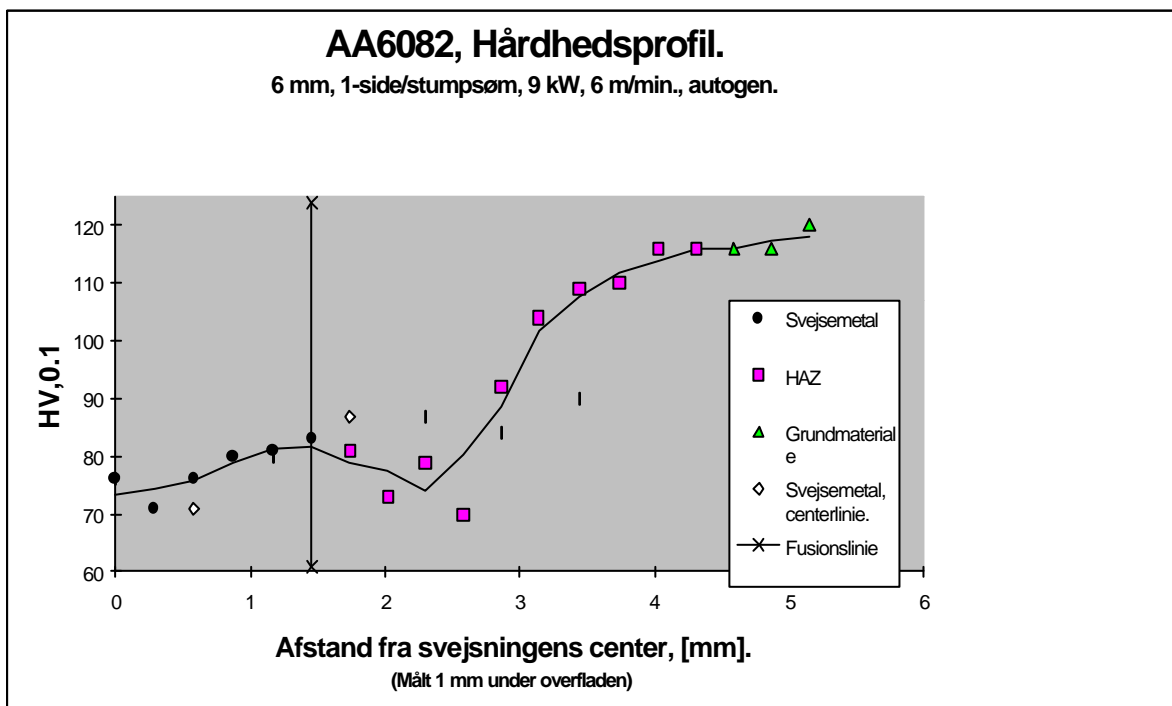
Tilsvarende viste trækprøveforsøg at styrketabet, i forhold til grundmaterialet, på samme måde blev målt til 40% ved svejsning uden tilsatsmateriale og ca. 30% ved anvendelse af tilsatsmateriale i forhold til grundmaterialets styrke – se Figur 3.96.

Legeringstyper som A5754 og A5083 udviser ikke tilsvarende nævneværdigt hårdhedsfald i svejsningen. Dette skyldes at materialerne er varmvalsedede legeringer som ikke har gennemgået nogle styrkeøgende processer. Mere specifikt omkring disse legeringer ses i ref.[12].

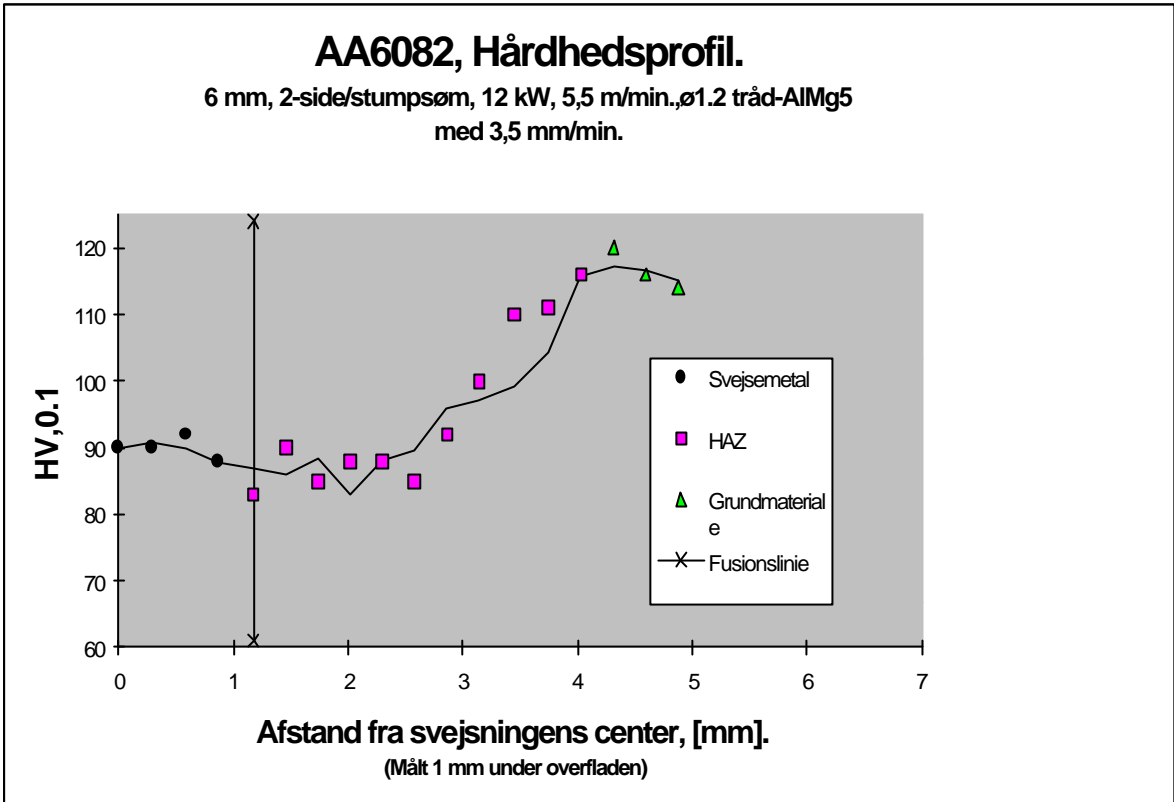
En ligeledes meget anvendt legering er A7108.5 med følgende typiske data; zink-legeret, modningshærdet aluminium med en brudstyrke på ≥ 350 [N/mm²]. Hårdheden er ca. 110-120 HV. Legeringen har det karakteristika, at den over tid genvinder sin oprindelige styrke i svejsemetallet. Umiddelbart efter lasersvejsning udviser legeringen et hårdhedsfald på ca. 40%, det samme gør sig gældende for svejsning under anvendelse af tilsatsmateriale. Efter en modningshærdning over ca. 30 dage er ca. 95% af styrken dog genvundet. Trækstyrken er tillige på dette tidspunkt målt til en værdi kun ca. 15% lavere i forhold til grundmaterialet.



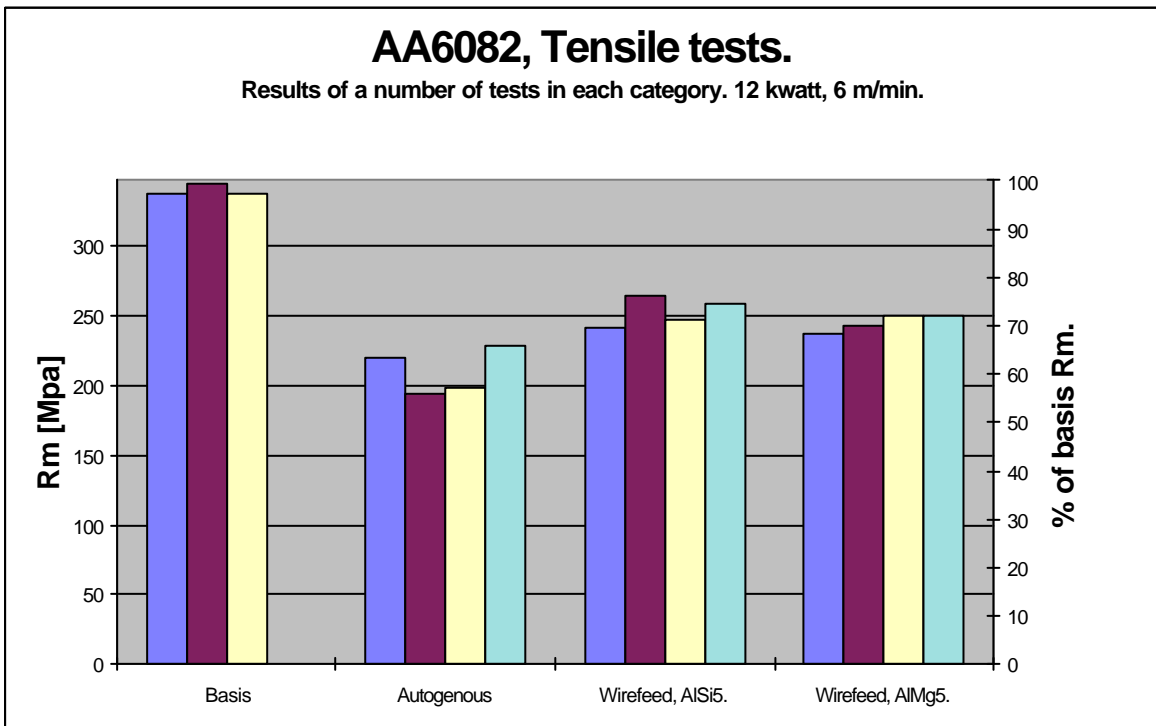
Figur 3.93



Figur 3.94



Figur 3.95



Figur 3.96

Fastlæggelse af procesparametre ved lasersvejsning

For at illustrere hvilke typiske procesparametre der anvendes ved lasersvejsning af aluminium, samt hvordan de udvælges, gennemgås fremstillingen af stumpsømme i 5mm 5083 og 6082 plade.

Trådtilførsel:

Ved lasersvejsning i aluminium er det oftest fordelagtigt at anvende trådtilførsel, idet det forbedrer geometrien af svejsningen, samt er med til at afkøle smelten, hvilket reducerer poreindholdet. I dette tilfælde er der valgt at anvende en Ø1,2mm AlSi5 tråd. Tråddiameteren er valgt til 1,2mm da tyndere tråde er sværere at arbejde med, da de er tilbøjelige til at smelte inden de når ned i keyholet. Med den valgte tråddiameter vil den typiske trådshastighed ligge på 1,5 til 2 gange svejsehastigheden. Trådtypen er valgt til AlSi5 da det er en tråd der er velegnet til svejsning af 6082 og generelt er nem at arbejde med.

Fugeforberedelse:

Ved lasersvejsning i plader af denne dimension bør der anvendes en I-fuge. For at sikre et godt resultat er det vigtigt at gabet mellem pladerne ikke overskrider ca. 0,3mm. For at sikre dette er kanterne maskinbearbejdet plane. For at minimere opstillingstiden er der valgt ikke at skrabe kanterne eller overfladen af emnerne fri for oxidhinden inden svejsning, idet forsøg viser en sådan skrabning af kanterne kun reducerer poreindholdet minimalt.

Gasbeskyttelse:

Som beskrevet ovenfor anvendes der 3 forskellige gasser ved lasersvejsning. Til disse svejsninger er der valgt følgende gasser:

Baggas: Nitrogen

Beskyttelsesgas: Helium

Plasmagas: 70% Helium / 30% Argon

Gasserne er valgt ud fra følgende kriterier: Til baggas er der valgt nitrogen da den er billigst, og som baggas ligeså god som helium. Til beskyttelsesgas er der valgt helium da denne gas giver den bedste dæmpning af plasmaskylen, og derved bedste beskyttelse af optikken. Til plasmagas er der valgt 70% helium og 30% argon, da denne gas giver anledning til de pæneste svejsninger. Der kunne også være valgt at anvende nitrogen som plasmagas, dette kan dog give problemer med dannelse af sidekærv under svejsning.

Udstyr:

Svejsningen er udført i oven/ned position i en opstilling med fast optik, det vil sige at spejlene står stille og emnet bevæges i forhold til laserstrålen. Bevægelsen er udført med et CNC styret X-Y bord. Laserkilden er som følger:

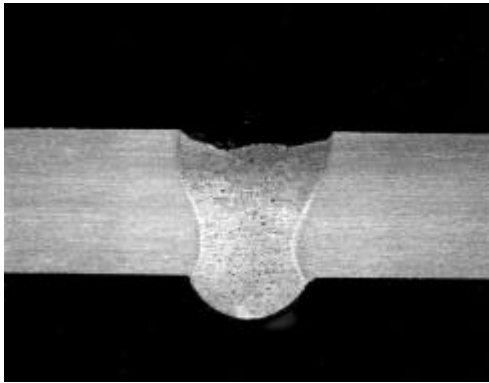
17 kW Rofin Sinar CO₂ laser - anvendt i CW mode

Spejlbaseret optik med 300mm fokallængde

Valg af fokuspunkt placering:

I 3 ud af de 4 udførte svejsninger er der valgt at placere fokuspunktet 3mm under overfladen af pladen. Denne placering af fokuspunktet lidt under overfladen giver en mere stabil proces, på bekostning af et lille fald i svejsehastighed. Den ene af svejsningerne er udført med fokuspunktet liggende på overfladen af emnet, hvilket giver den maksimale svejsehastighed ved en given lasereffekt.

Med denne opsætning er der fremstillet svejsninger i henholdsvis 5mm 5083 og 5mm 6082 plade. Figurene 3.9, 3.10 og 3.11 viser eksempler på svejsedata for svejsning af de to pladetyper med forskellige effektniveauer.



5mm 6082 plade

Lasereffekt: 6 kW

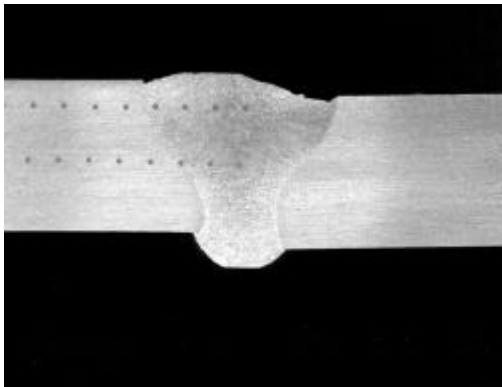
Svejseshastighed: 1300 mm/min

Tråd hastighed: 1900 mm/min

Tråd: Ø1,2mm AlSi5

Fokuspunkt: På overfladen

Figur 3.97 Eksempel 1.



5mm 6082 plade

Lasereffekt: 9 kW

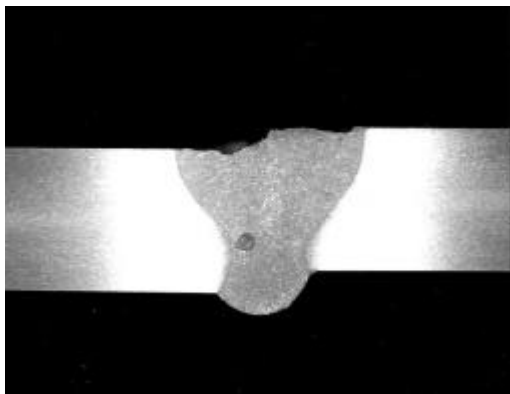
Svejseshastighed: 1700 mm/min

Tråd hastighed: 3400 mm/min

Tråd: Ø1,2mm AlSi5

Fokuspunkt: 3mm under overfladen

Figur 3.98 Eksempel 2.



5mm 5083 plade

Lasereffekt: 6 kW

Svejsenhastighed: 100 mm/min

Tråd hastighed: 2500 mm/min

Tråd: Ø1,2mm AlSi5

Fokuspunkt: 3mm under overfladen

Figur 3.99 Eksempel 3.

Resulterende kvalitetsklasse:

Efter svejsning er emnerne undersøgt med røntgen og deres kvalitetsklasse er vurderet efter prEN ISO 13919-2. Kvaliteten er som følger:

5mm 6082 eksempel 1: Klasse D

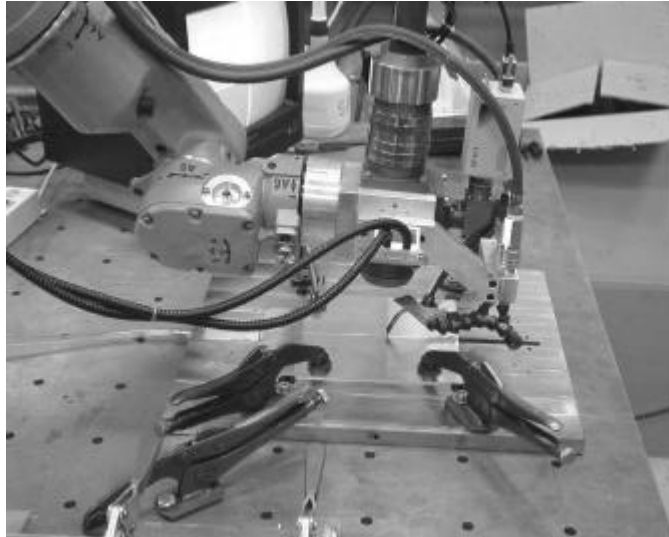
5mm 6082 eksempel 2: Klasse D

5mm 5083 eksempel 3: Klasse C

3.10.4 ND-YAG-LASERSVEJSNING AF ALUMINIUMSLEGERINGER.

YAG-laseren byder på den helt klare fordel at laserlyset kan fremføres i en optisk fiber, som kan bevæges af en robot eller et føringssystem. Den optiske fiber giver processen en større fleksibilitet og muligheder for at løse mere komplekse opgaver.

Svejsning med YAG-laser er en højenergi proces, hvilket resulterer i dybe og smalle svejsninger med en lav varmetilførsel og deraf en smal varmepåvirket zone (HAZ). Ved svejsning i aluminium har den minimale varmetilførsel ligeledes en afgørende betydning for deformationsniveauet.



Figur 3.100 Eksempel på en forsøgsopstilling til svejsning af en stumpsøm i 5mm aluminiumsplade, bemærk at der i dette tilfælde benyttes en robot til fremføring af laserstrålen.

Ved lasersvejsning skal man huske på at processen kun tolererer små ændringer i tolerancerne, derfor er det vigtigt med en god fiksering af emnerne og en nøjagtig fremføring af laserstrålen. Figur 3.100 viser et eksempel på en forsøgsopstilling til hybridsvejsning.

Ligeledes bør man sørge for en god fugetilpasning, da dette også må betragtes som en parameter med en afgørende indflydelse på svejsekvaliteten.

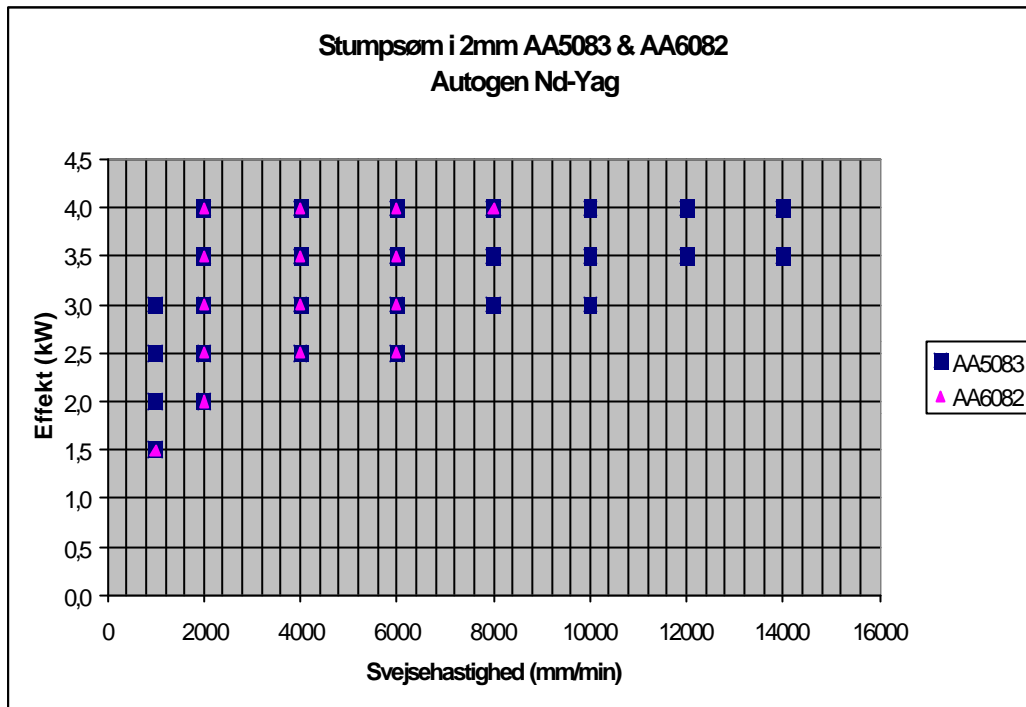
Ved svejsning af aluminium med en YAG-laser er der en række parametre, der alle har betydning for det endelige svejseresultat:

1. Laserens udgangseffekt
2. Svejsehastigheden
3. Placering af fokuspunkt
4. Brændvidde på fokuseringsoptikken
5. Beskyttelsesgassen
6. Placeringen af gasdysen
7. Gasflowet

Foruden de parametre der er nævnt ovenfor, har valget af aluminiums-legering stor betydning for kvaliteten og forekomsten af eventuelle svejsefejl.

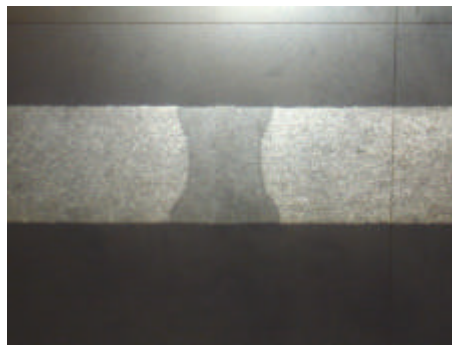
Af sekundære parametre skal også nævnes valg af samlingstype og emnets tolerancer.

Laserens udgangseffekt og svejsehastigheden er de to mest betydende parametre for svejsegeometrien og kvaliteten. Ud fra disse to parametre kan der opstilles en toleranceboks som viser størrelsen af det svejsbare område se Figur 3.101.



Figur 3.101 Eksempel på en toleranceboks, opstillet på baggrund af praktiske forsøg på 2mm AA5083 og AA6082.

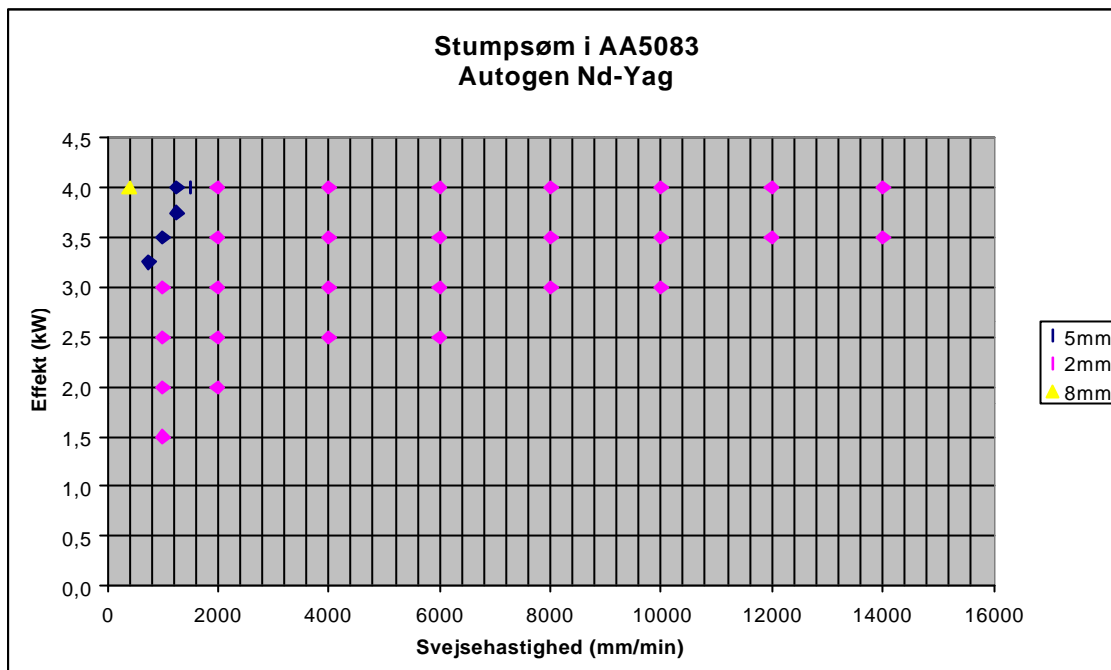
Bemærk at legeringstypen har stor betydning for den maksimale svejsehastighed og størrelsen af det svejsbare område.



Figur 3.102 Makroslib af en stumpsøm i 2mm AA6082, svejst med 8 m/min og 4 kW.

Vælger man at benytte parametersæt som befinder sig nær midten af det svejsbare område, er man mere sikker på at opnå et godt resultat, se Figur 3.102.

Ved stigende materialetykkelse kræves en højere lasereffekt og det svejsbare område indsnævres kraftigt – se Figur 3.103. Dermed får selv små ændringer i procesparametrene større betydning for det endelige resultat.



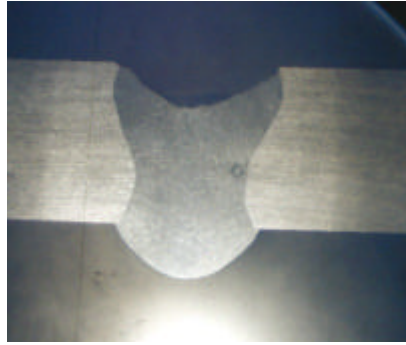
Figur 3.103 Eksempel på den kraftige indsnævring af det svejsbare område, der forekommer ved stigende materialetykkelser.

Placeringen af fokuspunktet har indflydelse på svejsningens geometri. Ved mindre materialetykkelser vælges ofte at have fokuspunktet på materialets overflade, dette giver den største energiintensitet. For større godstykkelser kan det være en fordel at sænke fokuspunktet lidt under overfladen.

Valget af brændvidden på fokuseringoptikken foretages ud fra den aktuelle applikation. En kort brændvidde giver en mindre strålediameter i fokuspunktet og dermed høj energiintensitet, men betyder til gengæld også en mindre dybdeskarphed. Omvendt giver en længere brændvidde en større fokuseret strålediameter med mindre energitæthed. Som hovedregel benyttes de korte brændvidder til svejsning i mindre dimensioner og de lange brændvidder til store godstykkelser.

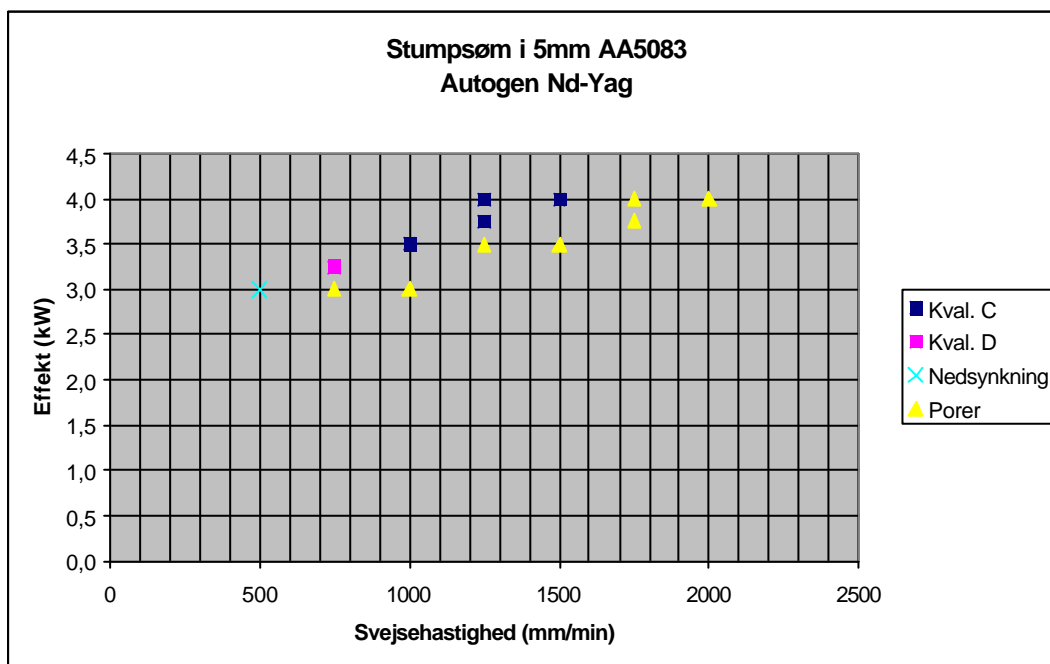
Beskyttelsesgassen har til formål at beskytte smeltebadet mod oxidation og styre plasmaskylen der dannes lige over svejsestedet. Som beskyttelsesgas anvendes normalt Argon, Helium eller Nitrogen. Gasyssens udformning, placering i forhold til smeltebadet og selve gasflowet har stor indflydelse på svejsningens geometri og kvalitet.

Et ikke uvæsentlig aspekt ved YAG-lasersvejsning i aluminium er at det kan være svært at opnå en acceptabel svejsegeometri. Aluminiumsmelten er letflydende og har samtidig en lav overfladespænding, det betyder at smelten får en tendens til at synke ned. Problemet fremkommer mest ved svejsning i større materialetykkelser se Figur 3.104.



Figur 3.104 Eksempel på uacceptabel nedsynkning af svejsningen. Materiale: 5 mm AA6082, svejst med 4 kW og 1 m/min.

Som nævnt tidligere i afsnittet omkring svejsefejl fremkommer der tit porer i forbindelse med svejsning af aluminium, ved YAG-lasersvejsning opstår porene når smeltebadet bliver for småt, eller svejsehastigheden for høj, i begge tilfælde kan gasboblerne ikke nå at komme ud af smelten. Problemet illustreres på Figur 3.105.



Figur 3.105 Eksempel på områder i hvilke svejsefejl kan fremkomme.

Svejsning med tilsatstråd

Ved YAG-lasersvejsning i aluminium er det også muligt at anvende tilsatstråd. Der er flere grunde til at vælge tilsætning af tråd. Tilsatstråden påvirker metallurgien i svejsesamlingen, så risikoen for varmvæner ofte kan mindskes, og der kan kompenseres for evt. afbrænding af legeringselementer.

Tilsatstråden kan også bruges til at forbedre svejsegeometrien ved f.eks. større eller varierende spaltebredde.

I praksis er det en fordel at tilføre tråden forfra mod smeltebadet og i så flad en vinkel som muligt i forhold til emneoverfladen. Tråd hastigheden skal minimum være lig med svejsehastigheden gerne højere.

Introduktion af tilsatsmateriale giver flere parametre at holde styr på og derfor mindre stabilitet i processen. Praktiske forsøg har vist at det kan være svært at finde et svejsbart område mellem manglende gennembrænding med stor overvulst til følge og uacceptabel nedsynkning. Ligeledes kan tilsatsmateriale have den virkning at det nedkøler smelten så meget at evt. gasbobler ikke når at diffundere væk, med porer til følge – se Figur 3.106.



Figur 3.106 Lasersvejsning i 5 mm AA5083 udført med tilsatsmateriale. Lasereffekt 3,5kW, svejsehastighed 1,5m/min og tråd-hastighed 3m/min.

Bemærk manglende gennembrænding og poreforekomst på Figur 3.106.

Generelt kan det siges at ønsker man at benytte Nd:YAG-laser til svejsning i aluminium, kræver det god styring og kontrol af de forskellige parametre for at sikre et godt resultat. Hvis processen kører optimalt kan der opnås meget gode resultater, sammenlignet med de mere konventionelle svejseprocesser.

3.10.5 HYBRID-SVEJSNING (YAG-LASER OG MIG).

Begrebet Hybrid-svejsning dækker over svejsninger, hvor man kombinerer 2 forskellige svejseprocesser i een lysbue og opnår en synergieffekt samtidigt med at man udnytter fordelene fra begge processer.

Der findes forskellige hybridprocesser, laserkilden kan være CO₂-laser eller Nd:YAG laser, den sekundære proces kan være MIG, TIG, plasma eller sågar en diode-laser. Det følgende afsnit omhandler primært hybridsvejsning med Nd:YAG laser kombineret med MIG-svejsning. At anvende hybridsvejsning giver både fordele og ulemper:

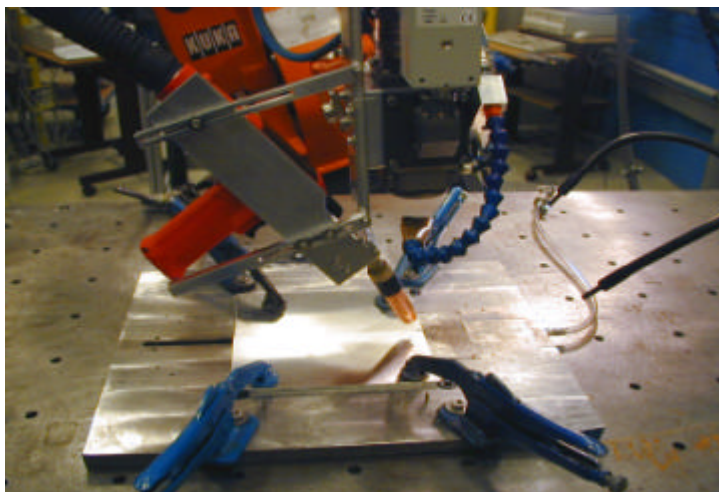
- **Fordele**

- Høj tolerance mod spalte og forsætning
- Høj svejsehastighed
- Stor indtrængning
- Muligt at svejse store dimensioner fra én side uden fugeforberedelse
- Lav varmetilførsel = små deformationer
- Høj produktivitet

- **Ulemper**

- Flere variable parametre
- Stor investering
- Ringe adkomst forhold
- Høje sikkerhedskrav

Et eksempel på en opstilling til laser/MIG hybridsvejsning kan ses på Figur 3.107. Se også Figur 3.92, der viser en principskitse af hybridprocessen.



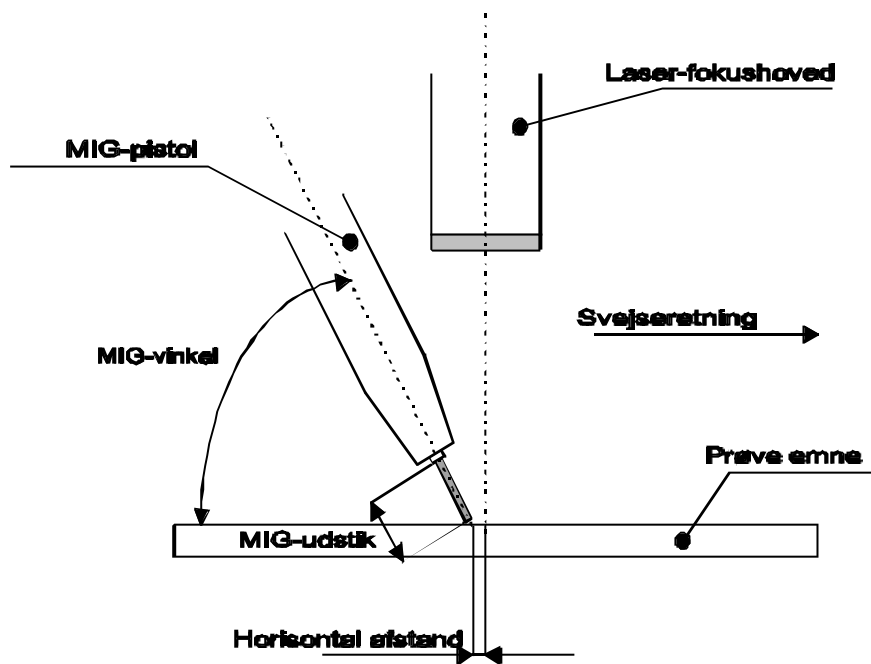
Figur 3.107 Eksempel på forsøgsopstilling til hybridsvejsning af stumpsøm i 5 mm aluminium. Bemærk, at der benyttes en robot til fremføringen.

Ved at introducere en ekstra proces fremkommer der yderligere en del parametre, som kan varieres. For at opnå en stabil proces og sikre overblikket over processen, kan det være nødvendigt at fastholde så mange parametre som muligt.

Når der opbygges en opstilling til hybridsvejsning, bør der fokuseres på at opnå størst mulig stabilitet i fikseringen af emnerne og fremføringen, dette er nødvendigt fordi selv små variationer i de fysiske rammer, se Figur 3.108, har betydning for svejse kvaliteten.

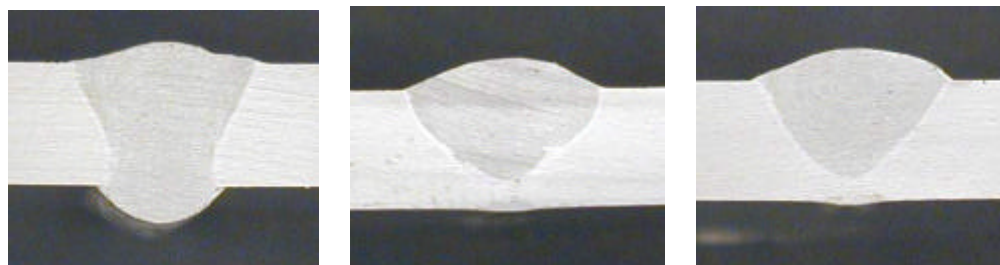
Der er visse retningslinier som er fordelagtige at følge når de 2 processer skal samles til een:

- MIG-pistolvinklen bør være minimum 60 grader, gerne større.
- MIG-udstikket ca. mellem 10 og 15mm.
- Horizontal afstand mellem 0 og 5 mm, denne afstand har stor betydning for processens stabilitet og den ønskede synergieffekt.



Figur 3.108 Fysiske parametre.

Nedenstående Figur 3.109 illustrerer betydningen af den horisontale afstand mellem lysbuerne, billederne viser prøver svejst med samme parametre, men med variation i den horisontale afstand mellem lysbuerne.

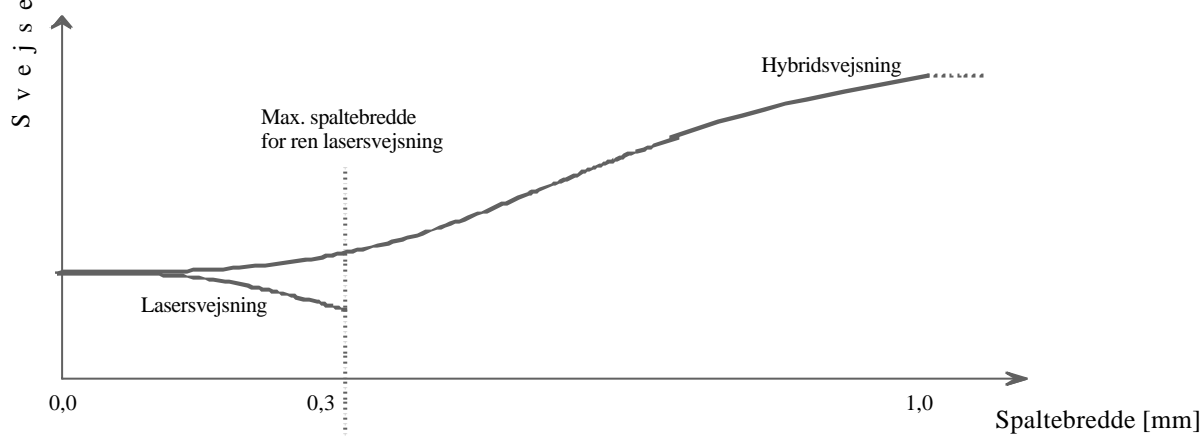


Horizontal afstand 3mm Horizontal afstand 0mm Horizontal afstand 6mm

Figur 3.109 Betydningen af den horisontale afstand mellem lysbuerne.

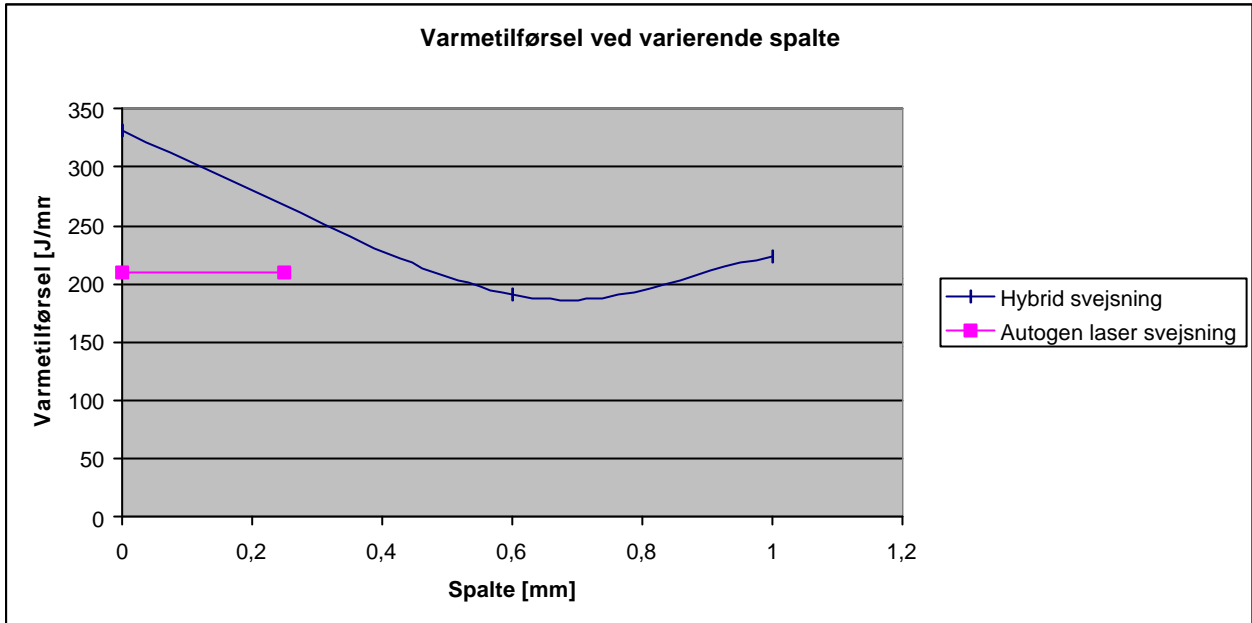
Hvis hybridsvejsning betragtes som 2 enkelte processer med en samlet synergivirkning, skal der også tages hensyn til den indbyrdes energifordeling. Litteraturen foreskriver en energifordeling på ca. 50% fra hver proces og dette er et udmærket udgangspunkt, i praksis er det dog muligt at lade den ene proces dominere hvis man ønsker at fremhæve dens egenskaber.

- Laserprocessen styrer indbrændingsprofilen og rodsiden (hvis der svejses gennemgående). Hæves laserenergien opnås en større indbrænding ligesom svejsehastigheden kan hæves.
- MIG-processen sørger for at efterfylde spalter og sikre en visuelt pæn svejsning. Hæves energien fra MIG-processen kan der optages større spalter og der vil ligeledes fremkomme en passende overvulst.



Figur 3.110 Teoretisk sammenhæng mellem svejsehastighed og spaltebredde for svejsning af stumpsøm.

De udførte forsøg under SASAK projektet viste at anvendelsen af hybridsvejsning giver en signifikant forøgelse af svejsehastigheden ved spalter se Figur 3.110, den høje svejsehastighed har en positiv indflydelse på varmetilførselen og dermed deformationerne se Figur 3.111.



Figur 3.111 Varmetilførsel ved varierende spalte.

Bemærk at varmetilførslen er beregnet ved 100% termisk virkningsgrad.

Ud fra de udførte forsøg i SASAK kan der drages følgende generelle konklusioner:

Hybridsvejsning af stumpsømme uden spalte:

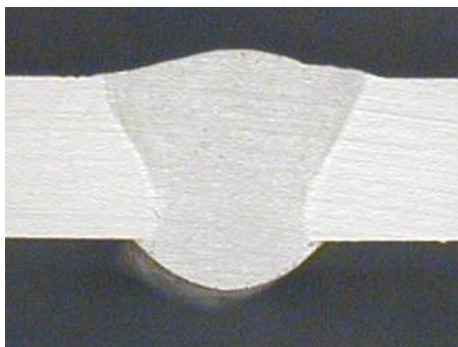
- Kræver høj varmetilførsel
- Giver ingen umiddelbar forøgelse af svejsehastigheden, sammenlignet med autogen lasersvejsning
- Giver en del porer i svejsningen
- Problematisk at opnå en acceptabel rodside

Hybridsvejsning af stumpsømme med spalte:

- Kan forøge svejsehastigheden med mere end faktor 2, sammenlignet med autogen lasersvejsning
- Selv små spalter giver øget processtabilitet og en bedre rodside
- Giver markant lavere indhold af porer i svejsningen
- Giver større indflydelse på svejsegeometrien

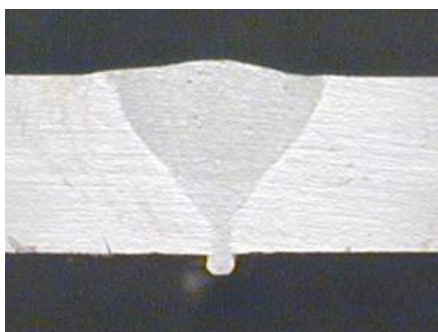
Eksempler på laser-MIG hybridsvejsninger

Hybridsvejsning giver bedre mulighed for at styre svejsegeometrien. Figur 3.112, Figur 3.113 og Figur 3.114 viser eksempler på forskellige hybridsvejsninger.



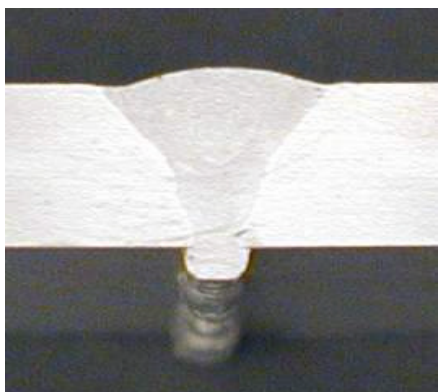
Hybridsvejsning uden spalte
Lasereffekt 2500 W
MIG spænding 21 V
MIG strøm 146 Amp
Svejseshastighed 1000 mm/min
EN ISO 13919-2 kvalitet D (moderate)

Figur 3.112 Eksempel 1 på anvendelse af hybridsvejsning.



Hybridsvejsning med spalte 1,0 mm
Lasereffekt 2500 W
MIG spænding 21 V
MIG strøm 146 Amp
Svejseshastighed 1500 mm/min
EN ISO 13919-2 kvalitet B (stringent)

Figur 3.113 Eksempel 2 på anvendelse af hybridsvejsning.



Hybridsvejsning med spalte 0,6 mm
Lasereffekt 4000 W
MIG spænding 25,4 V
MIG strøm 218 Amp
Svejseshastighed 3000 mm/min
EN ISO 13919-2 kvalitet C (intermediate)

Figur 3.114 Eksempel 3 på anvendelse af hybridsvejsning.

3.10.6 REFERENCER

Supplerende litteratur

- [1] **Masumoto, Isao**, *Laser Welding of A5083 Aluminum Alloy*, IIW DOC. IV-566-91.
- [2] **Binroth, Ch.**, *Laserstrahlschweissen von Aluminiumlegierungen*, DVS 113, 1990.
- [3] **Kimura S.**, *CO2 Laser Welding of Copper and Aluminum alloys*, IIW DOC. IV-565-91.
- [4] **Sepold, G.**, *CO2 Laser Beam Welding of Aluminum Alloys for Transport Systems*, IIW DOC. IV-539-90.
- [5] **Yamaoka, H.**, *CO2 Laser Welding of aluminum A6063 alloy*.
Welding International 1992, 6, p.766-773.
- [6] **Walh, T.**, *Laser Welding of Alloy (AlMgSi1) Sheet with Medium Power CO2-lasers*, Universitet Stuttgart, Stuttgart, 1991.
- [7] **Kutsuna, M.**, *CO2 Laser Welding of A2219, A5083 and A6063 aluminium alloys*,
Welding in the world, Vol. 31, no. 2, pp. 126-135, 1993.
- [8] **Kristensen, J.K.**, *Diverse computerbereggede afkølingskurver for lasersvejsning i aluminium.*, FORCE, 1996.
- [9] **Kristensen, J.K.**, *Sammenføjningsteknikker i forbindelse med store aluminiumskonstruktioner*, FORCE, Oktober 1996.
- [10] **Nielsen, S.E.**, *Lasersvejsning af aluminiumsprofiler ved Roll-Tech A/S*,
FORCE-rap. nr. AL_MUP2-2, 1996.
- [11] **Nielsen, S.E.**, *Svejsning med højeffekt laser, Grundlæggende undersøgelser*,
FORCE-rap. nr. 92.80.

- [12] **Nielsen, S.E.** “Højeffekt lasersvejsning af aluminiumslegeringer - en orienterende undersøgelse”. FORCE-rap. nr. 97.23.
- [13] **CEN/TC 121/SC 4/WG 8**, 'Quality levels, beam welding', *Electron and laser beam welded joints in aluminium and its weldable alloys*. Guidance on quality levels for imperfections., 1995.
- [14] **Milewski, J.O.**, *Microstructural Evaluation of Low and High Duty Cycle Nd:YAG Laser Beam Welds in 2024-T3 Aluminium.*, Welding Research supplement, 1993, p. 341-346.
- [15] **Val, David de.**, *Aluminium for car bodies and truck cabins - Laser Welding*, Temadag vedr: 'Lasersvetsning inom framtidens bilindustri.', Gøteborg, 1996.
- [16] **Martukanitz, R.P.**, *Laser Beam Welding of aluminium alloys*, Sixth International Conference on Aluminium Weldments. American Welding Society, 1995.
- [17] **Matsunawa, A.**, *Rapid Solidification Microstructures and Microsegregation in Laser Welded Single Crystals of Aluminium Alloys*, Osaka University, 1990.
- [18] **Jones, Ian**, *Laser Welding aluminium alloys*, TWI bulletin July/August 1992.
- [19] **Wøldike Sørensen, Kai**, *Aluminium - varmebehandling og svejsemetallurgi*, Svejsning nr. 3, 1992.
- [20] **Chen, Genhan**, *Wire-feed Laser Beam Welding of Steels and Aluminiums - Optimization of Parameters and Application*. Laser und Optoelektronik , 26(5)1994.
- [21] **Rapp, Jurgen**, *Werkstoffschadigung beim schweissen der legierung AlMgSi1 mit einem CO2-laser*, Diplomarbeit, Universitat Stuttgart, 1991.
- [22] **ASM Committee on Aluminium and Aluminium Alloys**, 24, *Temper Designation System for Aluminium and Aluminium Alloys*.
- [23] **ASM Committee on Aluminium and Aluminium Alloys**, 44, *Aluminium Mill Products*.

- [24] **ASM Committee on Aluminium and Aluminium Alloys**, 140, Aluminium Foundry Products.
- [25] **Jensen, Anders V.**, *Lasersvejsning i aluminium*. Kbh Teknikum, Afgangprojekt 1996.
- [26] **Thorstensen, Bernt**, *Laser Welding of Aluminium*, The Industrial Laser Annual Handbook, 1989.
- [27] **Jensen, T. A.**, *Nd-YAG Lasersvejsning af aluminium legeringer*. FORCE-rap. nr. AL_MUP2-3, Maj 1997.
- [28] **Bruun, N.K.**, *Korrosionsundersøgelse af lasersvejste aluminiumsamlinger.*, FORCE-rap. nr. AL_MUP2-4, 1997.
- [29] **Hufnagel, W.**, *Key to Aluminium Alloys*, Aluminium-Verlag, 1982.
- [30] **Beyer, E.** *Schweissen mit CO₂-hochleistungslasern*. Technologie Aktuell 4, 1987, VDI.

Tekniske rapporter

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0018, *CO₂-lasersvejsning af aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0019, *Nd-YAG-lasersvejsning af aluminium*

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0032, *Hybrid YAG-laser + MIG svejsning af aluminium*

3.11 FRICTION STIR SVEJSNING

3.11.1 INTRODUKTION

Friction Stir Welding repræsenterer et af de mest radikale gennembrud inden for svejsning i mange år. Processen er opfundet og udviklet på det engelske Welding Institute (TWI) i første halvdel af 1990'erne, og den egner sig i særdeleshed til sammenføjning af aluminium.

Processen har ikke fået noget officielt dansk navn, men bliver herhjemme oftest omtalt som "Friction Stir svejsning" eller "FSW".

Selve processen forgår ved at et specielt udformet, roterende værktøj tvinges ned i emnet og føres langs den søm som ønskes svejst. Rotationsvarmen fra svejseværktøjet (herefter kaldet svejsedornen) opvarmer materialet, til det bliver plastisk, men lige præcis ikke smelter. Den kendsgerning, at sammensvejsningen foregår uden en egentlig opsmeltning af emnerne, indebærer en række fordele.

Der foregår i disse år stadig en rivende udvikling indenfor Friction Stir svejsning, så blandt andet produktionshastigheder og anvendelsesområder løbende udvides bemærkelsesværdigt.

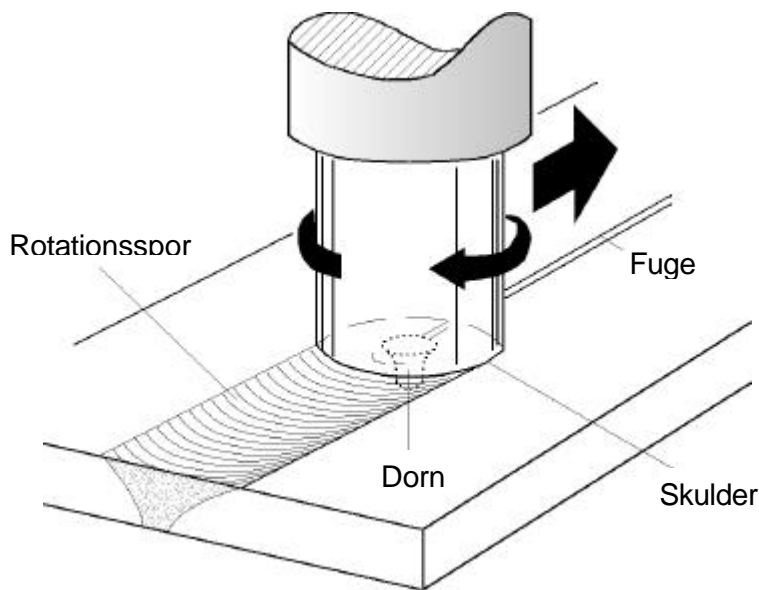
I det følgende gives et overblik over teknikken bag Friction Stir svejsning, og de muligheder som processen giver. Selve processen og en række af de ideer, som præsenteres, er beskyttet af diverse patentrettigheder, hvorfor rettigheds- og licensforhold bør afklares før en eventuel egen anvendelse af teknologien.

3.11.2 PROCESBESKRIVELSE

Friction Stir svejsning er en fastfase svejseproces, hvor materialet bliver plastificeret af en specielt udformet svejsedorn. Denne dorn roteres og tvinges ned i skillelinien mellem de to emner som skal svejses (eller gennem pladerne, hvis det er en overlapsamling som ønskes). Når materialet er blevet tilstrækkelig opvarmet ved friktionsopvarmningen mellem emne og svejsedorn, føres dornen under fortsat rotation langs svejselinien.

Bevægelsen af dornen giver en søjle af plastificeret materiale, som bevæger sig rundt om dornen og langs svejsningen. Dette sønderdeler et eventuelt oxidlag og sammensvejser de to emner. Da svejsningen foregår uden opsmeltning på noget tidspunkt, kan en meget høj kvalitet opnås.

I tyndere godstykkelser stammer hovedparten af den tilførte friktionsvarme fra skulderen, mens tappens bidrag øges relativt i større godstykkelser.



Figur 3.115 Princip for Friction Stir svejsning.

Processen involverer temmeligt store kræfter, hvorfor emnerne skal fastholdes effektivt under svejsningen. Dette betyder også, at der stilles meget store krav til selve svejsemaskinen med hensyn til positionering og repeterbarhed.

3.11.3 FRICTION STIR - FORDELE OG BEGRÆNSNINGER

Fordelene ved Friction Stir svejsning bunder først og fremmest i den kendsgerning, at svejsningen foregår i fast fase, lige under emnets smeltetemperatur. Det er almindelig kendt, at fastfase processer som f.eks. den klassiske rotations-friktionssvejsning giver en virkelig god svejsekvalitet. Der er også erfaring for, at fastfasesvejsning gør det muligt at samle sammensvejsede vanskeligt svejsbare legeringer.

Fordelen ved Friction Stir svejsning er derfor bl.a. at det er muligt at svejse legeringer i f.eks. 2000 og 7000-serien, som normalt anses for dårligt svejsbare eller ikke-svejsbare. Friction Stir svejsning benytter sig af almindeligt kendt maskinteknologi, og er derfor yderst egnet til automatisering.

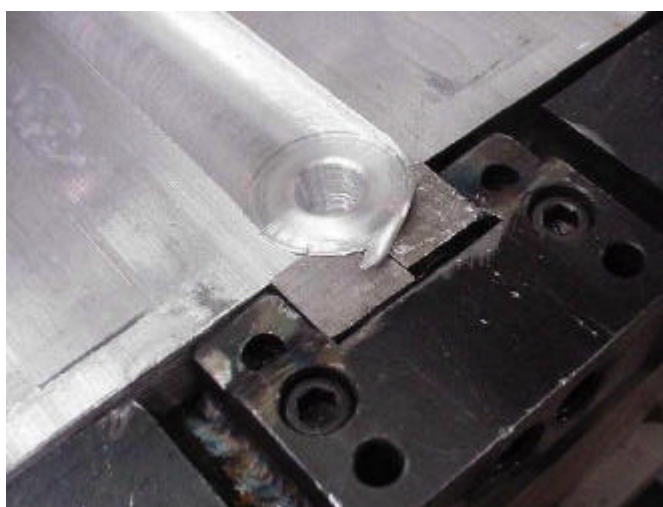
Processens fordele kan opsummeres som følger:

- Ringe deformation af emnet
- Gode mekaniske egenskaber
- Ingen svejserøg eller ozondannelse, dvs. lille arbejdsmiljøbelastning
- Ingen porøsiteter (et klassisk problem i aluminium)
- Ingen svejsesprøjt
- Ingen spændinger i svejsningen
- Intet tilsatsmateriale er nødvendigt
- Ingen behov for beskyttelsesgas

- Ingen særlige krav til uddannelse af operatøren
- Gode tolerance overfor unøjagtighed i emnet og et eventuelt tykt oxidlag
- Emnet kan svejses i leveringstilstand

Begrænsningerne ved FSW- svejsning er på den anden side:

- Traditionelt en moderat svejsehastighed. Grænserne flyttes dog løbende.
- Emnet skal fikseres nøje
- Backing er nødvendig (traditionelt)
- Keyhole ved svejsningens udløb (traditionelt)



Figur 3.116 Keyhole ved svejsningens udløb. Det er i dette tilfælde søgt at minimere den længde, som skal skæres af efter svejsning, ved anvendelse af udløbsslapper (General Tool Co.).

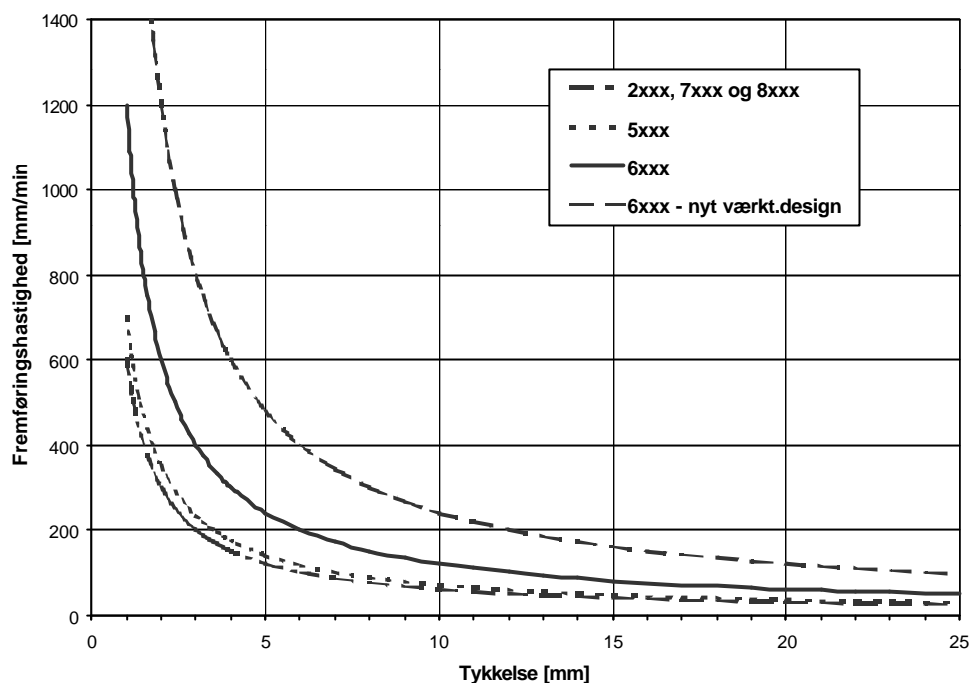
En af hindringerne for en hurtigere udbredelse af FSW er givetvis også kombinationen af relativt dyrt udstyr og de licensafgifter, som skal betales, hvis en virksomhed vil anvende processen. En førende leverandør af udstyr til FSW har dog indbygget en "éngangslicens" i det udstyr, de leverer. Denne licens gælder evigt, men dækker til gengæld kun dette ene udstyr.

3.11.4 SVEJSEHASTIGHED

De ekstrudérbare legeringer er nemmest at svejse med FSW, og med disse opnås da også de højeste svejsehastigheder.

I takt med udvikling af nye værktøjer ændres både opnåelige hastigheder og nødvendige kræfter løbende. Figur 3.117 viser typiske hastigheder opnået i 1998. Bemærk den mærkbart forøgede svejsehastighed ved anvendelsen af et nyt værktøj til svejsning af 6000-legeringer (øverste kurve).

Svejsehastighed ved Friction Stir Welding



Figur 3.117 Typiske svejsehastigheder som funktion af godstykkelse (baseret på tal fra TWI, 1998).

3.11.5 MEKANISKE EGENSKABER

Statisk styrke

Selve ”æltningen” af materialet under svejsning vil give en struktur i svejsningen som har en finere mikrostruktur end grundmaterialet. Svejsemetallets styrke overstiger i mange tilfælde den styrke som kan opnås i den termomekanisk påvirkede zone. Svejsning af materiale i 0-tilstand (blød) vil ved test give brud i grundmaterialet, væk fra svejsezonen (både selve svejsningen og HAZ).

Kvaliteten af svejsning udført i fuldt hærdede aluminiumslegeringer (kolddeformerede og/eller varmebehandlet) kan forbedres yderligere gennem en nøje kontrol den termiske påvirkning, specielt ved at mindske anløbning og overældning i den termomekanisk påvirkede zone. Det er i den termomekanisk påvirkede zone, man finder de laveste styrker efter svejsning. For at modvirke dette kan det være nødvendigt at varmebehandle svejsningen. Dog skal man være opmærksom på at det ikke altid er muligt at varmebehandle på grund af f.eks. emnets fysiske størrelse og geometri.

Hvis der udføres en modning (ældning) af en Friction Stir svejst aluminiumsamling, vil svejsningen kunne genopnå næsten samme styrke som det benyttede grundmateriale. Dette kan opnå fordi bl.a. magnesium og silicium genudfældes som hårde partikler. Den del af svejsningen som er karakteriseret ved en kornvækst kan ikke nøjes med en modnings-/ældningsproces - den skal først opløsningsglødes.

Typiske mekaniske egenskaber for Friction Stir svejst aluminium AA6082 fremgår af tabel 1. Grundmaterialets leveringstilstand her meget stor betydning, f.eks. ses det at leveringstilstand T6

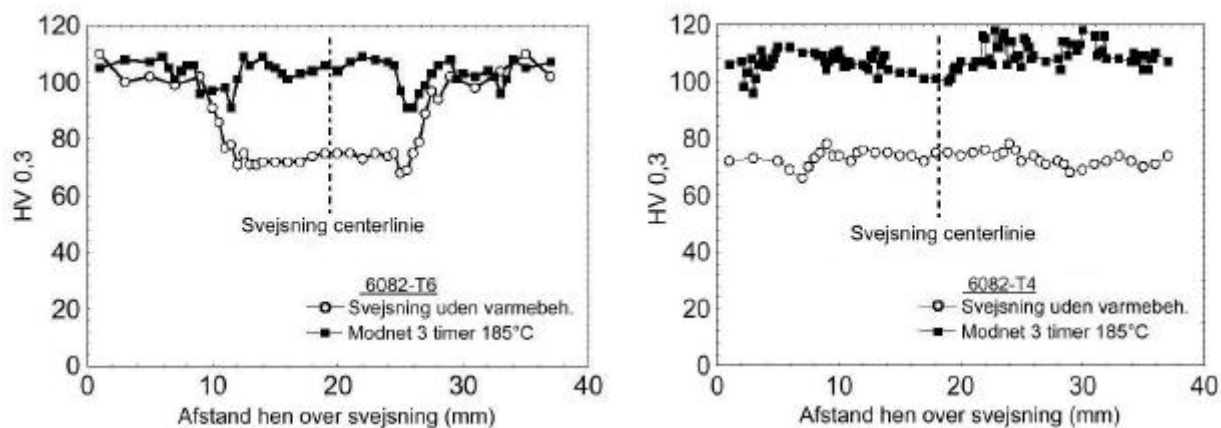
påvirkes relativt meget ved den varme påvirkning som det udsættes for ved Friction Stir svejsning. Dette tab af styrke kan tilskrives en opløsning af partikler i svejsezonen. Styrken kan dog, som det ses, genoprettes ved en modningsbehandling efter svejsning. Brudforlængelsen kan til gengæld ikke helt genoprettes ved en efterfølgende varmebehandling.

Som det ses af Tabel 3.35, opnås det bedste resultat generelt ved at benytte en lidt blødere materiale kvalitet f.eks. T4.

Tabel 3.35 Typiske mekaniske egenskaber for et Friction Stir svejst profil i 6082.

Materiale	Flydespænding Mpa	Trækstyrke Mpa	Brudforlængelse %
AA 6082 T6, parallelt med valseretningen	291	303	11,30
AA 6082 T6 påtværs af valseretningen	286	301	10,40
Friction Stir svejst do.	160	254	4,85
Friction Stir svejst do. + ædning	274	300	6,40
AA 6082 T4 påtværs af valseretningen	149	260	22,90
Friction Stir svejst do.	138	244	18,80
Friction Stir svejst do. + ædning	285	310	9,90

Hårdhedsprofilen for en svejsning kan benyttes til at give information om indflydelsen af varmpåvirkningen på materialet. Det kan bl.a. vise bredden af den varmpåvirkede zone, og hvilken indflydelse en eventuel efterfølgende varmebehandling har haft. Den finkornede, rekrystalliserede zone i selve svejsningen har et meget konstant hårdhedsprofil sammenlignet med det for den varmpåvirkede zone. Se Figur 3.118.



Figur 3.118 Hårdhedsprofiler for FSW-svejst AA6082 T6 og T4 (SAPA).

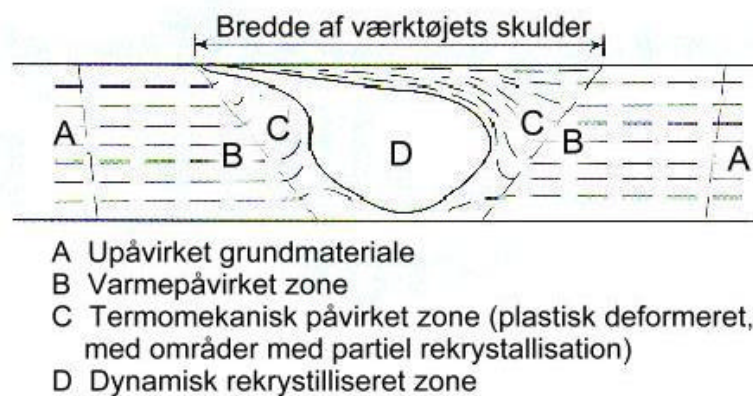
Dynamisk styrke - udmattelse

FSW-svejsninger er af en meget høj kvalitet, uden porer og revner, med en glat bagside og ingen overvulst. Derfor udviser de generelt meget gode værdier for udmattelsesstyrke. De ligger ofte meget tæt på grundmaterialets udmattelsesstyrke, og generelt langt over de udmattelsesstyrker som ses ved almindelig smeltesvejsning. Spredningen på værdierne ved udmattelsesprøver er også typisk meget mindre end ved lysbuesvejsning.

Ønskes en god udmattelsesstyrke bør man anvende værktøjer og procedurer, som giver så små ripler i overfladen som muligt. En optimal udmattelsesstyrke fås ved maskinbearbejdning af den øvre, rillede overflade.

3.11.6 MIKROSTRUKTUR

For at kunne forstå mikrostrukturen i en FSW-svejsning, er det nødvendigt at dele svejsningen op i zoner. Følgende opdeling er udviklet på The Welding Institute i England, og er den mest benyttede - se Figur 3.119.



Figur 3.119 Tværsnit af Friction Stir svejsning.

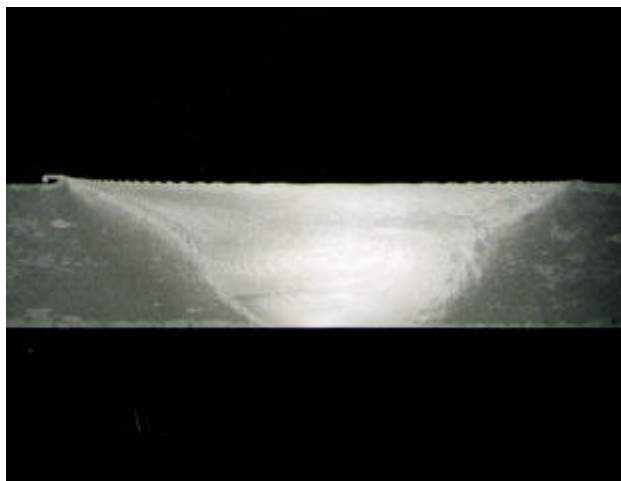
Grundmaterialet: Det er den del af emnet, som ikke er blevet berørt af den mekaniske og termiske påvirkning ved svejsningen.

Varmepåvirket zone (HAZ): Den del af emnet, som har været udsat for en termisk opvarmning, der har påvirket mikrostrukturen. Der er ingen plastisk deformation i denne zone.

Termomekanisk påvirket zone: Den del af svejsningen, som både er plastisk deformeret af svejsedornen, og termisk påvirket. Ved svejsning af aluminium er det muligt at svejse uden rekrySTALLISATION i denne zone. Hvis der er en rekrySTALLiseret zone er der genereret en klar grænse mellem den rekrySTALLiserede zone og de deformerede zoner i den Termomekanisk påvirkede zone.

Svejselinse: Den rekrySTALLiserede del af den termomekanisk påvirkede zone ved svejsning i aluminium kaldes normalt for svejselinse.

Der er tegn på at den zone, som ligger umiddelbart under værktøjets skuldre, også vil få sin egen betegnelse, på grund af at mikrostrukturen ofte er anderledes end den termomekanisk påvirkede zone.



Figur 3.120 Makroslib af Friction Stir svejsning i aluminium.

3.11.7 MATERIALER OG GODSTYKKELSER

Friction Stir svejsning kan benyttes til at sammensvejsede mange typer af materialer og kombinationer af disse. Den eneste forudsætning er, at der kan findes et værktøj en fugegeometri som passer til opgaven. Dog har Friction Stir svejsning på nuværende tidspunkt fundet størst udbredelse i aluminium og dets legeringer. Følgende aluminiumlegeringer kan FSW- svejses med stor reproducerbarhed og høj svejsekvalitet inden for snævre geometriske tolerancer.

2000 serien

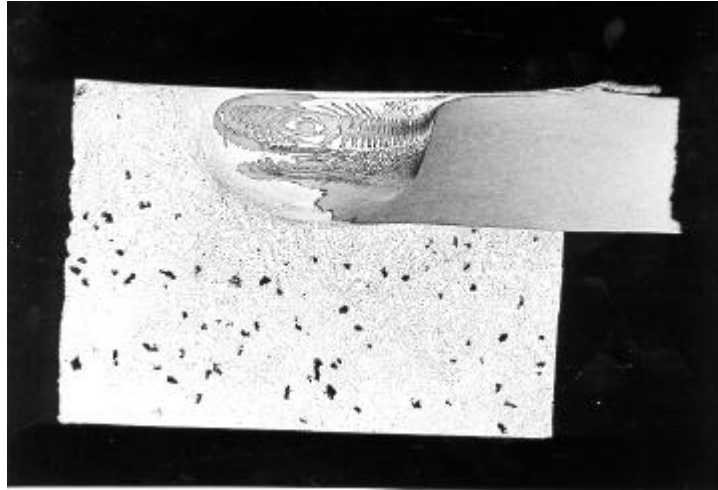
5000 serien

6000 serien

7000 serien

8000 serien

De første resultater og forsøg med Friction Stir svejsning er primært udført i valsede og ekstruderede aluminiumslegeringer. Efterfølgende forsøgsarbejde har vist at selv støbte legeringer kan svejses, samt kombinationer af støbte og ekstruderede (Figur 3.121).

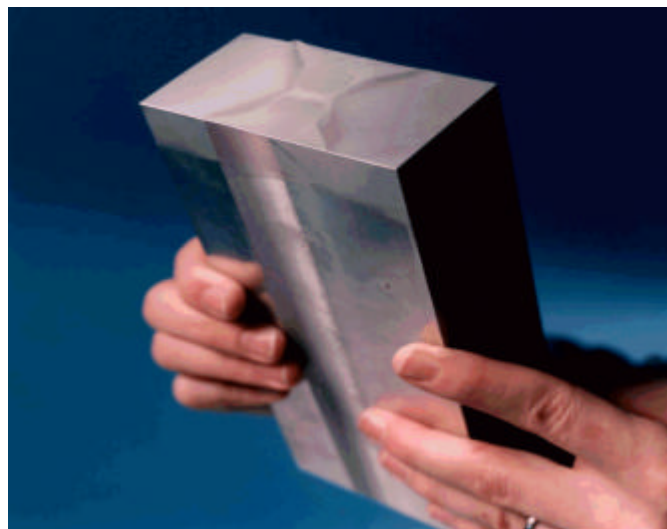


Figur 3.121 FSW samlinger kan udføres mellem (porøst) støbt aluminium og valsede / ekstruderede kvaliteter (TWI).

Stumpsømssvejsning fra én side af aluminiumslegeringer kan udføres i godstykkelser fra 1 mm til 50 mm, uden speciel fugeforberedelse. Stumpsømsvejsninger af godstykkelser op til 100 mm kan udføres ved at svejse fra begge sider (fig. 9). De fleste erfaringer haves i området fra 1,6 mm til 120 mm godstykkelse.

Specielle svejsedorne til overlapsamlinger i aluminium er fremstillet til godstykkelser fra 1,6 mm til 6 mm.

Som nævnt er det i primært selve svejsedornen, som sætter begrænsningen for hvilke materialer, der kan svejdes. I takt med dette værktøj udvikles og forbedres, udvides gruppen af materialer som kan svejse med Friction Stir svejsning. Således kan man ikke blot svejse aluminium, men også en lang række andre materialer. Processen kan også anvendes til svejsning af magnesium til aluminium og aluminiumbaserede Metal Matrix Kompositter.



Figur 3.122 FSW stumpsøm i 100 mm tykt emne i legering 6082, svejst fra 2 sider (TWI).

3.11.8 FUGEOMETRIER

Friction Stir svejsning benyttes primært til fremstilling af stumpsømme i aluminiumslegeringer, men overlapsamlinger, T- samlinger, kantsømme og svejsning af hjørnesamlinger benyttes til dels også. Til hver af disse fugegeometrier kræves en speciel udformet svejsedorn, og det er specielt denne dorn som hele tiden udvikles og optimeres. I takt med at denne svejsedorn udvikles flyttes grænserne for hvilke geometrier, der kan svejdes.

Friction Stir svejsning kan også benyttes til at svejse langs en periferi/kontur, ringformet, ikke lineær eller tredimensional svejsning (se afsnittet om svejsning i flere dimensioner). Da tyngdekraften ingen indflydelse har på en fastfase svejsning som Friction Stir svejsning, kan der svejdes i alle positioner.

3.11.9 UDVIKLING INDEN FOR FSW

Der foregår i disse år stadig en rivende udvikling indenfor FSW, ikke mindst inden for udvikling af nye dorne, hvorved grænserne flyttes med hensyn til

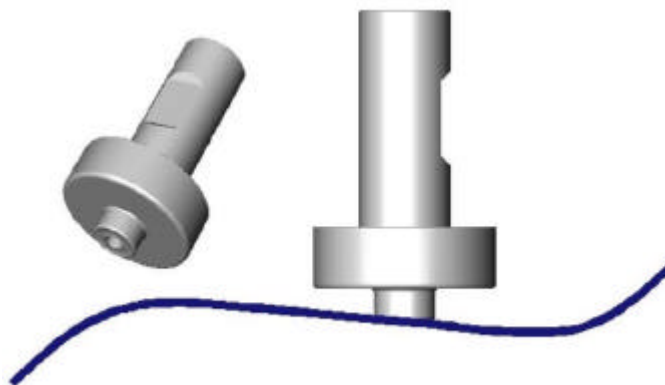
- Stadig bredere anvendelsesområder med hensyn til hvilke materialer, som kan svejdes
- Stadig højere hastigheder
- Nedbringelse af nødvendige kræfter
-

Flerdimensionel svejsning

I dag bruges FSW fortrinsvis til svejsning af lineære stød, ofte i form af sammensvejsning på langs af ekstruderede profiler.

Svejsning i to dimensioner (x-y) er dog ikke noget videre problem. Med den eksisterende teknologi skal man stadig sørge for at orientere dornen, så der udføres ca. 3° ”frasvejsning” uanset svejseretning, men der arbejdes på at udvikle effektive ”0°-dorne”.

Svejsning i 3 dimensioner (x-y-z) kan også lade sig gøre, enten ved anvendelse af specialbyggede maskiner, eller ved anvendelse af en passende kraftig robot. Der er dog grænser for, hvor lille en radius, dornen kan klare i højaksens plan (se Figur 3.123).



Figur 3.123 3-dimensionel svejsning (GKSS / RIFTEC).

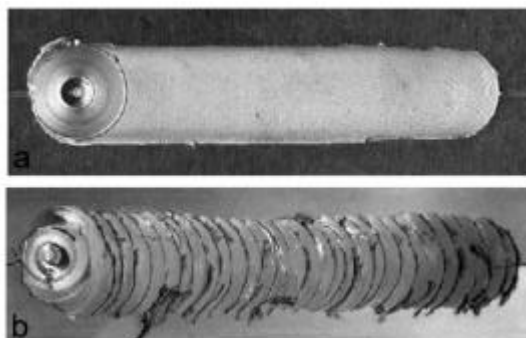
Eftersom de specialbyggede maskiner hurtigt kan vise sig at blive temmelig kostbare, kan en robot kan være et tiltalende alternativ. På grund af de store, involverede kræfter – især normalkraften ned mod emnet – skal robotten værre meget kraftig, selv for svejsning af relativt små godstykkelser. Et godt bud kan være en robot af ”Tricept”-typen som vist på fig. 11. Denne type robotter er oprindeligt designet til at konkurrere med store CNC-maskiner til fræseopgaver, og kan både optage store kræfter og levere en stor positioneringsnøjagtighed.



Figur 3.124 Robot med stor stivhed egnet til FSW i mindre tykkelser (NEOS Robotics).

Selv om der anvendes kraftige robotter, vil de involverede kræfter give anledning til mærkbare deflektioner på mange millimeter. Disse deflektioner kan der kompenseres for under programmeringen af robotten, men der er naturligvis pludselig tale om et ganske stykke beregnings- og programmeringsarbejde.

En anden ulempe ved robotters relativt ringe stivhed er, at de kan komme i egensvingninger, som typisk vil genereres når værktøjet trykkes ned i det kolde emne. Når først disse svingninger er startet, vil de fortsætte. Figur 3.125 viser en svejsning udført under sådanne utilsigtede egensvinger, sammenholdt med en korrekt, normal svejsning.



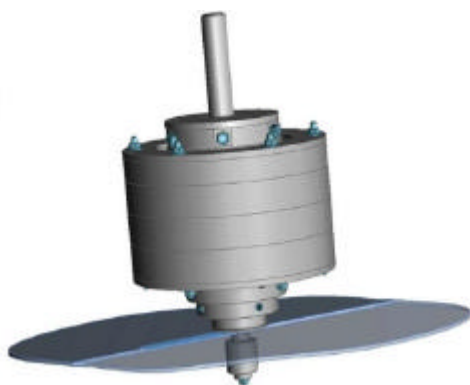
Figur 3.125. a) Normal, god FSW-svejsning. b) Effekt af egensvingninger under svejsning (RIFTEC / GKSS).

Egensvingningsproblemerne kan i vidt omfang løses ved at anvende selvcentrerende dorne.

Løsningen på defleksions-/positioneringsproblemerne og egensvingningsproblemerne synes i øvrigt at ligge i anvendelsen af en adaptiv styring af robotten, som sørger for en konstant, forprogrammeret normalkraft. Resultaterne med anvendelse af kraftstyring hos blandt andre NASA og GKSS har til dato været særdeles lovende.

Integreret modhold

Et bud på eliminering af de store modholdskræfter fremgår af Figur 3.126. Modholdet fastholdes gennem dornens tap.



Figur 3.126 Sammenbygning af dorn og modhold eliminerer behovet for en del af de store kræfter, som sædvanligvis skal anvendes ("Bobbin Tool" udviklet af GKSS / RIFTEC).

Start-stop problematikken – "retractable pin tool"

I forbindelse med svejsning af rundsømme er det man tvunget til at lade svejsningen dreje af for at slutte uden for den egentlige samling. Med lidt fantasi kan det ofte lade sig gøre at give forudsætningerne for konstruktivt, men det ville naturligvis være bedre, hvis man kunne undgå, at der efterlades et key-hole ved svejsestop.

NASA har udviklet et værktøj som muliggør, at tappen trækkes ind i skulderen. Ved svejsestop standses fremføringen, og tappen trækkes tilbage, mens rotationsvarmen fra især skulderen opretholdes. Dermed efterfyldes materiale i key-holet.

Af hensyn til processens stabilitet bør værktøjet bruges under anvendelse af den tidligere beskrevne adaptive styring af tilholdskraften.

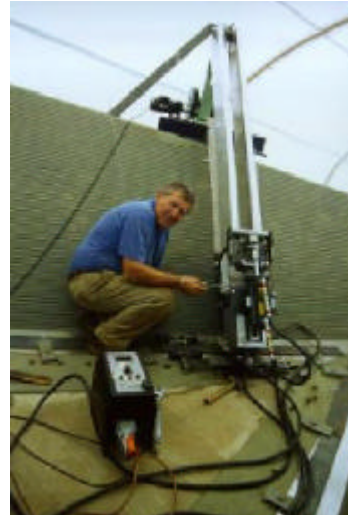
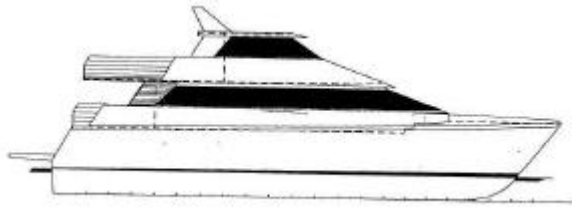
3.11.10 ANVENDELSESOMRÅDER

Skibsbygning

Skibsbygning og den maritime industri var de to første industrier som benyttede Friction Stir svejsning på kommerciel basis. Den klassiske anvendelse er panelfabrikation baseret på ekstruderede profiler med indbyggede stivere m.v.

Generelt kan anvendelsesmulighederne inden for skibsbygning listes op som følger:

- Dørk-, side- og gulvpaneler samt skot
- Aluminiumsprofiler
- Skrogdele
- Helikopter landingsplatforme
- Off-shore bygninger (f.eks. beboelsesmoduler i aluminium)
- Andre marine og transportkonstruktioner
- Master og bomme, til f.eks. sejlbåde
- Fryselastrum



Figur 3.127 FSW-svejsning af stød i klædning til 24 m fartøj. Efter sammensvejsning af klædningen bliver skroget eksplosionsformet – en australsk specialitet! [3].

Fly- og rumfartsindustri

Luftfartsindustrien bruger mange ressourcer på at undersøge mulighederne for indførelse af Friction Stir svejsning, for bl.a. at spare vægt i konstruktionerne, samt nedsætte produktionsomkostningerne. Mulighederne foreligger for eksempelvis at sammensvejs klædningen i stedet for at nitte og lime.

Friction Stir svejsning tilbyder store fordele sammenlignet med maskinbearbejdning, specielt som nævnt ved at kunne spare i vægt, og nedsætte produktionsomkostningerne.

Langsømssvejsning og kontursvejsning af aluminiums brændstoftanke til rumfartøjer er svejst og afprøvet med et tilfredsstillende resultat. En anden umiddelbar fordel er muligheden for at øge størrelserne af standard plader inden montering. Friction Stir svejsning spås en fremtid indenfor følgende:

- Vinger, skrog og haleparti
- Brændstof tanke til rumfart (anvendes til Space Shuttle løfterakterne)
- Hydraulik tanke
- Reservetanke til militærfly
- Raketindustri
- Reparationssvejsning

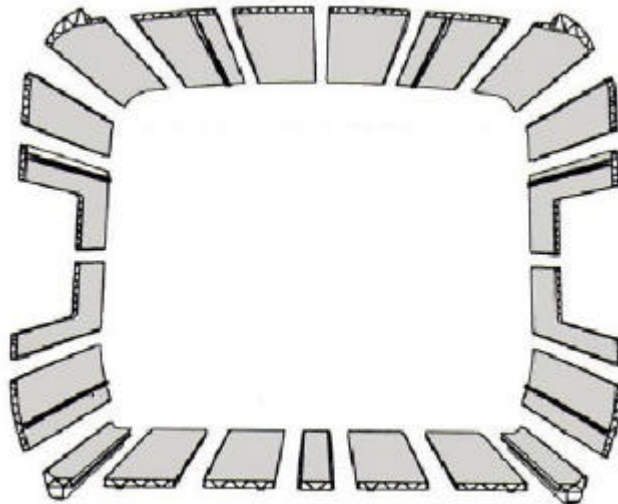
For tiden overvejes det seriøst at fremstille en række nye Airbus fly med FSW-svejst klædning. Stiverne påtænkes lasersvejst til klædningen.

Fremstilling af tog

Produktionen af højhastighedstog fremstillet af aluminium, giver muligheder for Friction Stir svejsning:

- Dele til selve toget
- Gods- og tankvogne
- Containere

Blandt andre japanerne er langt fremme med introduktionen af FSW i stor skala til fremstilling af tog. Et væsentligt motiv for valget er, at man slipper for svejsedeformationer. En klar kosmetisk fordel, og man sparer en del efterarbejde.



Figur 3.128 Fremstilling af togvogne: Ekstruderede profiler samles ved hjælp af FSW-svejsning (Hitachi).

Landtransport sektoren

Friction Stir svejsning er ved at vinde kommerciel indpas inden for automobil branchen og underleverandører til branchen. Der forgår en del forskning indenfor letvægts automobil konstruktioner. Mulige applikationer er:

- Motor og chassis
- Fælge
- Befæstelser
- Platforme med sammensvejsning af forskellige pladetykkelser
- Førerhuse til lastbiler
- Lifte til lastbiler
- Mobilkraner
- Tankbiler
- Campingvogne
- Busser

- Motorcykel- og cykelstel
- Reparation af aluminiumsbiler
- Magnesium og magnesium/aluminium

Byggebranchen

Med udviklingen bl.a. af et transportabelt Friction Stir svejseanlæg, har byggebranchen set muligheder inden for:

- Aluminiumbroer
- Facadepaneller af aluminium, og på sigt kobber eller titan
- Vinduesrammer
- Aluminiums rørstrækninger
- beholder og kedelindustri
- Varmeveksler og aircondition
- Rørfabrikation

Elektronikbranchen

Elektronikindustrien ser med stor interesse på udviklingen af Friction Stir svejsning, og ser muligheder indenfor:

- El-motorhuse
- El-kontakter
- Indkapsling af elektronik

En fordel er den lave varmeudvikling, hvilket ofte vil kunne muliggøre svejsning efter installation af elektronikdele.

Andre industrier

Udover de nævnte er der en lang række af andre industrier, som vil kunne have glæde af Friction Stir svejsning, og listen øges i takt med udviklingen af processen. Følgende kunne være en mulighed:

- Frysepaneler
- Køkkengrej og hårde hvide varer
- Gasbeholdere og cylindere
- Møbler

3.11.11 REFERENCER

Litteratur

- [1] Inalco 98 konference – diverse indlæg.

- [2] **Dave Nicholas & Stephan Kallee**, *Causing a Stir in the Future*
TWI, SASAK andet seminar, 2000.

- [3] **Ian Henderson**, *Exploiting Friction Stir welding in explosively-formed aluminium boat hull construction* University of Adelaide.

- [4] Second Friction Stir Welding Symposium, Göteborg, Diverse indlæg (33).

Tekniske rapporter

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0009, *Friction Stir Welding*

3.12 REPARATION

Reparationer kan komme på tale i forbindelse med:

- Fejl opstået under fabrikation (svejsfejl)
- Pludselige skader opstået under drift (revner og buler på grund af kollisioner m.v.)
- Udmattelsesrevner

Før reparation af skader opstået under drift bør det stå klart, hvorfor de opstod. Er der tale om revner, bør det således afgøres, om de skyldes overbelastning ved en usædvanlig éngangspåvirkning eller udmattelse opstået under almindelige driftsforhold.

Hvis skaden er opstået under almindelige driftsforhold, har den nødvendige strukturelle styrke åbenbart ikke været til stede, og reparationen må omfatte en konstruktiv ændring. En udmattelsesmæssigt bedre konstruktion kan opnås på to måder: Enten ved at gøre konstruktionen så stiv, at en ”deformation” ikke kan opstå, eller ved at gøre konstruktionen så fleksibel, at alle dele forskydes lige meget - dvs. eliminering af ”hårde punkter”. Se i øvrigt kapitel 2.

Dette afsnit behandler svejsereparationer, mens korrektioner af deformationer behandles i afsnit 3.15.

Acceptkriterier for fejl samt andre kvalitetsmæssige og formelle aspekter omkring svejsereparationer behandles i afsnit 3.18. Er der således tale om trykbeholdere eller andre konstruktioner, som er omfattet af bestemte regelsæt, skal særlige krav og regler i forbindelse med reparations svejsning afklares først. Der kan være generelle krav til tilsatsmaterialer, maksimalt tilladte antal reparationer, m.v.

Revner i svejsninger

Er en revne opstået i (eller i kanten af) en svejsning som følge af en unormal overbelastning, vil det typisk være tilstrækkeligt at udføre en svejsereparation, som gendanner en sund forbindelse.

Det er eftervist i SASAK, at gentagne varmepåvirkninger ved svejsereparation ikke medfører noget mærkbart tab af statisk styrke eller udmattelsesstyrke i forhold til den oprindelige svejsning (SASAK-RAP-E5-AKS-FI-0001), [1]. Dette forudsætter dog, at den geometriske svejsekvalitet er i orden. Man skal især være opmærksom på at undgå bindingsfejl og slibespor (SASAK-RAP-LE-AKS-KEH-011).

Hvis der er tale om en udmattelsesrevne i en ellers sund svejsning, kan man ikke ubetinget regne med, at en svejsereparation vil ”nulstille” levetiden for samlingen, således at den vil kunne tåle lige så mange påvirkninger igen (SASAK-RAP-LE-AKS-KEH-0006).

Skyldes revner en for ringe svejsekvalitet fra starten, kan det sommetider være nok at svejsereparere til en tilstrækkelig god kvalitet. Ellers må designmæssige ændringer af det åbenbart svage område naturligvis overvejes.

Revner uden for svejsninger

Er revnen opstået uden for en svejsning, må det tages i betragtning, at der vil opstå et styrketab i den varmpåvirkede zone ved siden af svejsereparationen, i hvert fald hvis grundmaterialet er en deformationshærdet og/eller modningshærdet legering. Det skal overvejes, om denne lokale nedsættelse af statisk styrke kan accepteres.

Eftersom overfladen på en svejsning normalt er mindre jævn end det upåvirkede grundmateriale, og udmattelsesstyrken nedsættes markant ved geometriske imperfektioner, vil en svejsereparation også kunne forventes at give en nedsat udmattelsesstyrke i det pågældende område.

Skal der i det hele taget repareres?

Det kan være fornuftigt at overveje, om eksempelvis en reparation af en poresamling i en svejsning vil kunne forventes at gøre mere skade end gavn. Afsnit 3.18 behandler acceptkriterier for svejsefejl, både i henhold til normer og ud fra mere generelle, subjektive vurderinger.

3.12.1 FORBEREDELSE FØR SVEJSEREPARATION

Fjernelse af defekt område

Det defekte område bør som hovedregel fjernes mekanisk. Roterende fræsere er velegnede til denne opgave. Skal kantsømme eller et større volumen i stumpsømme fjernes, kan det være hurtigere og nemmere at starte med at fjerne materiale med en vinkelsliber. Det anbefales dog at afslutte bearbejdningen med en håndfræser (Figur 3.129).

Så vidt muligt bør man tilstræbe at opnå et U-formet tværsnit af fugen efter fræsning. Siderne bør ikke være helt lodrette på grund af risikoen for bindingsfejl. Enderne af udfræsningerne bør helst fases af med en hældning på minimum 1:3.



Figur 3.129 Roterende håndfræser. Denne type bliver ikke tilstoppet af aluminiumspåner.

Kontrol før genopsvejsning

Det bør sikres, at hele svejsefejlen er fjernet før genopsvejsning. Man skal være opmærksom på, at man især ved brug af vinkelsliber nemt kommer til at "lukke" fejlen i overfladen, så den ikke er synlig med det blotte øje. Ligeledes skal man ikke forvente at kunne se bindingsfejl med det blotte øje.

Det kan derfor anbefales at foretage en penetrantprøvning, som vil afsløre sådanne fejl, som ikke kan ses, selv om de kun delvist er fjernet.

3.12.2 VALG AF SVEJSEPROCES TIL REPARATIONER

I princippet kan reparationer i en svejsning normalt udføres med samme svejseproces og procedure som ved den første svejsning. Det vil således være naturligt at genopsvejsning en MIG-svejst kantsøm med samme proces.

I praksis vil det dog ofte være nemmere at opnå et sikkert og godt resultat ved anvendelse af TIG-svejsning. Ved reparationssvejsning er dette vigtigere end høje svejsehastigheder.

Til reparation af fejl i stumpsømme vil TIG således normalt være det mest oplagte valg.

Valget af TIG kan også være dikteret af de dårlige adkomstforhold, som ofte er kendetegnet ved reparationssvejsarbejder. Kompakte TIG-hoveder kan komme til mange steder, hvor det vil være umuligt at komme ordentligt til med en MIG-pistol.

3.12.3 ANDRE FORANSTALTNINGER

- Valg af tilsatsmateriale skal afstemmes efter grundmaterialet. Hvis reparationerne skal udføres på et emne, som ikke har været svejst før, skal man være særligt opmærksom på, om der i det hele taget er tale om en svejsbar legering.
- Er grundmaterialets sammensætning ukendt, kan dets kemiske sammensætning fastslås ved en materialeanalyse. Afhængigt af metode kan man nøjes med en brik materiale på cirka 30 x 30 mm, lidt borespåner eller ganske lidt slibestøv fra overfladen ("gnubbet" af med særligt diamantslibepapir).
- Ved svejsning i tynde godstykkelser kan det være en fordel at anvende et tilsatsmateriale med et højt siliciumindhold såsom AlSi12, så svejsningen nærmere har karakter af svejselodning. Dermed mindskes risikoen for, at grundmaterialet "smelter væk" (Figur 3.130).
- Ved reparationer på konstruktioner, som allerede har været i drift, skal man være særligt opmærksom på at fjerne maling, snavs, fedt, olie og andre forureninger. Der må kun svejses på blankt og rent metal.
- Hvis poresamlinger ikke fjernes helt før svejsning, vil de give anledning til nye poreproblemer, når man forsøger at svejse hen over dem.
- Ved reparation af revner kan det være nødvendigt at bore et hul ud for hver ende af revnen (ca. $\varnothing 3$ mm), før man går i gang med reparationsarbejdet. Dette vil særligt være tilfældet ved revner, som går på tværs af svejseretningen.

- I tilfælde af fejl som strækker sig over større længder, kan det være en fordel at udfræse og genopsvejske kortere stykker ad gangen. derved mindskes eventuelle problemer med svejsedeformationer.
- Teknikken med trinvis opfræsning og fuld genopsvejsning kan også bruges med fordel ved reparations svejsning af emner, som skal bibeholde deres oprindelige dimensioner og tolerancer så godt som muligt (eksempelvis støbte motorhuse, maskindele m.v.). I så fald skal emnet yderligere fikseres så grundigt som praktisk muligt.



Figur 3.130 Ved reparationer i mindre godstykkelser kan det være fordelagtigt at anvende MIG-svejsning med en AISi-12 tråd. (Svejsereparation på Ferrari sportsvogn).

3.12.4 REFERENCER

Litteratur

- [1] **Michael Møller Nielsen**, *Aluminiums reaktion på varmepåvirkning fra svejsning*, IKT Eksamensprojekt forår 2001.

Tekniske rapporter

SASAK-RAP-E5-AKS-FI-0001, *Udmattelsestest af reparations svejsninger i aluminiumskonstruktioner.*

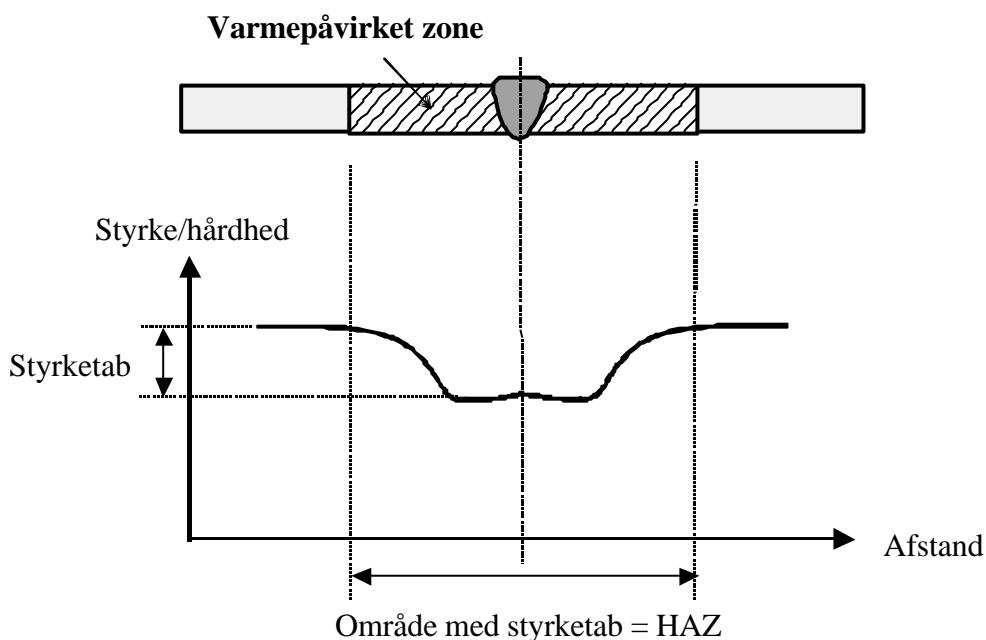
SASAK-RAP-LE-AKS-FI-0008, *Undersøgelse af 6 svejseprøver efter udmattelsestests.*

3.13 STYRKETAB VED SVEJSNING

3.13.1 INTRODUKTION

Ved svejsning i aluminium vil styrkeegenskaberne langs med svejse sømmen være svækkede pga. varmepåvirkningen fra svejseprocessen. Dette område kaldes HAZ (Heat Affected Zone) eller på dansk: "Den varmepåvirkede zone".

Figur 3.131 viser en stumpsøm med markering af den varmepåvirkede zone. På den nederste del af figuren er der skitseret et eksempel på, hvordan de reducerede styrkeegenskaber typisk variere indenfor denne varmepåvirkede zone.



Figur 3.131 Styrketab langs en svejsning, (varmepåvirket zone = HAZ).

I forbindelse med dimensionering af en aluminiumskonstruktion er det nødvendigt at kompensere for styrketabet i HAZ.

For at simplificere de reducerede styrkeegenskaber i forbindelse med dimensionering af svejste aluminiumskonstruktioner, angiver de mest relevante standarder størrelsen af HAZ ved en bredde og en svejsefaktor (softening factor ρ_{haz} ifølge Eurocode 9). Svejsefaktoren er et udtryk for, hvor meget styrken er reduceret i den varmepåvirkede zone – se Figur 3.131.

I Danmark benytter designere og konstruktører typisk standarder som eksempelvis DS 419, Eurocode No. 9 eller BS 8118 i forbindelse med estimering af HAZ-bredden og svejsefaktoren.

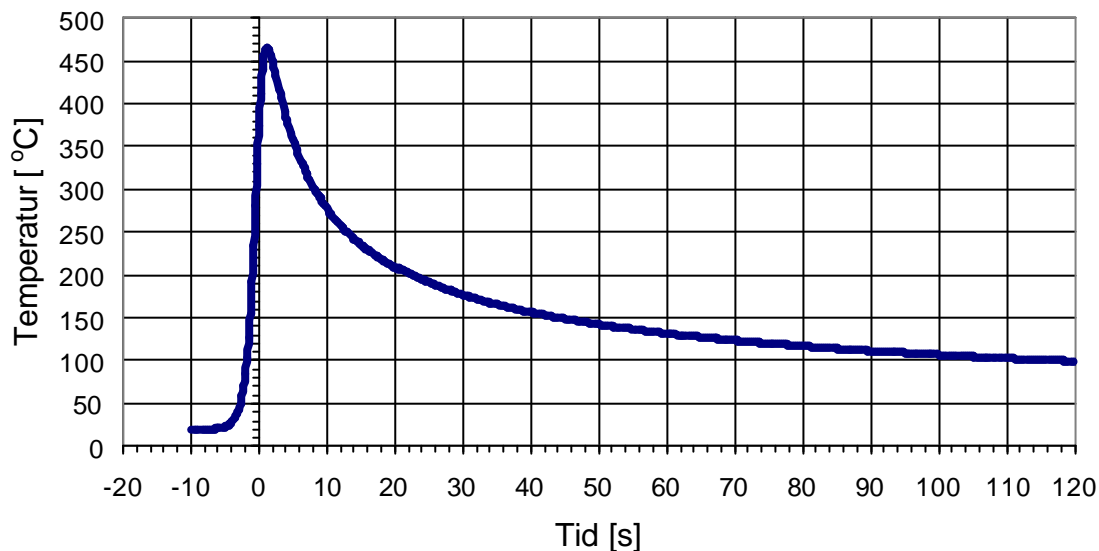
3.13.2 VARMEPÅVIRKNING

Hvordan varmen fra en svejseproces fordeler sig ud i en metalplade, er især afhængig af de tre materialeparametre: Varmeledningsevne, massefylde og varmekapacitet. I aluminium foregår varmeudbredelsen væsentlig hurtigere i forhold til i ulegeret stål. Dette skyldes især den større varmeledningsevne og den mindre massefylde, som aluminium har i forhold til stål.

Til beregning af varmeudbredelsen fra en svejseproces kan Rosenthals analytiske løsninger benyttes [1], [2], [4], [5], [6], hvilket også er beskrevet mere detaljeret i SASAK-rapporten: SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0001-00.

Temperaturforløbet vist på figuren afspejler en typisk temperaturpåvirkning over tid som materialet i nærheden af en svejse søm udsættes for.

Temperatur/tids-forløb i et punkt 10 mm fra MIG-svejsning.



Figur 3.132: Eksempel på tid/temperaturforløb 10 mm fra MIG-svejsning (Stumpsøm i 8 mm tyk 5083-plade med en varmetilførsel på 0,51 kJ/mm.).

I det konkrete tilfælde vist på Figur 3.132 vil aluminiumspladen i afstanden 10 mm fra svejse sømmen opleve en maksimal temperatur på ca. 465 °C efter ca. 1 sekund.

Typisk forekommer der først en brat opvarmning med en efterfølgende hurtig nedkøling, hvorefter afkølingen flader mere ud. Den reelle varmekapacitet, som materialet oplever i en konkret svejse situation, afhænger primært af afstanden til svejse sømmen, varmetilførsel, kombineret godstykkelse, legering m.m.

Metallurgiske reaktioner

Aluminium kan deles op i ikke-modningshærdbare og modningshærdbare legeringer. Med hensyn til varmpåvirkning og styrkeegenskaber opfører de to grupper sig forskelligt.

Ikke-modningshærdbare legeringer, der har opnået øgede styrkeegenskaber gennem koldhærdning, udglødes som regel omkring 350-400 °C, hvorved materialet kommer i en blød tilstand (rekrystalliserer). Det kan ikke senere bibringes forhøjet styrke ved en varmebehandling.

Modningshærdbare legeringer, der har opnået øgede styrkeegenskaber gennem varmebehandling, har mere varierende egenskaberne i HAZ. I HAZ-området op mod smeltelinien er grundmaterialet blevet påvirket af de største temperaturer med en efterfølgende bratkøling. Der er her foregået en opløsningsglødning (glødning sker normalt i intervallet 450 °C til 550 °C afhængig af legeringssammensætning) og herefter foregår der en koldmodning. Koldmodningen finder typisk sted over et antal uger afhængig af legering.

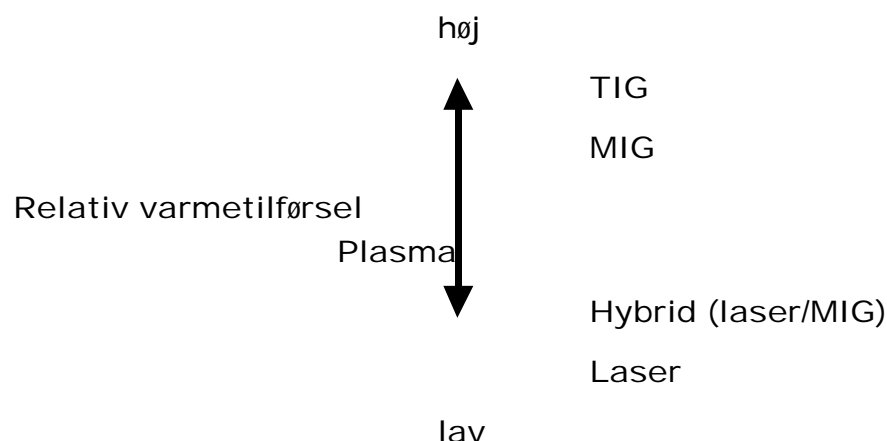
I området hvor maksimumtemperaturen har været omkring 400 °C falder hårdheden, fordi der har fundet en udglødningseffekt sted. Længere væk fra smeltebadet stiger hårdheden indtil den når op på grundmaterialets oprindelige hårdhed. Den stigende hårdhed skyldes, at effekten fra ældningsprocessen bliver mindre med den faldende temperatur.

3.13.3 VARMETILFØRSEL VED FORSKELLIGE SVEJSEPROCESSER

Hvor stor den varmpåvirkede zone bliver, er meget afhængig af hvor stor en varmetilførsel, der svejses med. Varmetilførslen er igen meget afhængig af, hvilken svejseproces der svejses med.

I Figur 3.133 er forskellige svejseprocesser rangeret efter hvor stor varmetilførsel Q , der typisk anvendes ved en konkret svejseopgave.

Generelt er tendensen, at jo mere koncentreret effekten fra en svejseproces er, når den rammer grundmaterialet, jo lavere varmetilførsel kræves der for at opnå en vis indtrængningsdybde.



Figur 3.133 Relativ varmetilførsel fra forskellige svejseprocesser.

Denne tendens følger ovenstående liste af svejseprocesser, hvor TIG-processen er den svejseproces, der spreder effekttilførslen over det største areal, mens laserprocessen svejser med den mest koncentrerede effekttilførsel.

Eksempelvis er der ved TIG-svejsning en forholdsvis bred lysbue, hvor effekten i lysbuen spredes relativt meget ud, og samtidig svejses der relativt langsomt. Aluminiumet omkring smeltebadet er en meget effektiv varmeleder, hvilket bevirker at varmeenergien ved denne relative langsomme proces i højere grad forsvinder ud i det omgivende materiale på bekostning af indtrængningen. Derfor er der behov for en større varmetilførsel ved TIG-svejsning i forhold til de andre nævnte svejseprocesser.

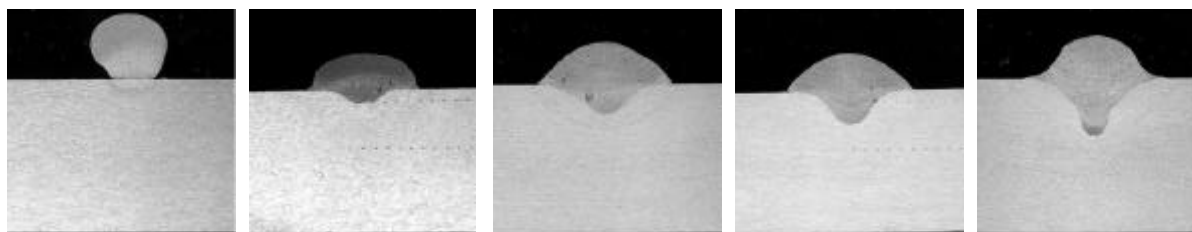
Valget af svejseproces, der har en direkte indflydelse på størrelsen af varmetilførslen, er således af afgørende betydning for dels størrelsen af den varmepåvirkede zone og dels, hvilket indtrængningsprofil der opnås.

Svejseparametre

Mht. indtrængningen i grundmaterialet kan der opnås vidt forskellige indtrængningsprofiler med samme svejseproces og samme varmetilførsel men med forskellige svejseparametre.

Varmetilførslen Q ved svejsning afhænger dels af den tilførte effekt ($U \cdot I$) og dels af svejsehastigheden v , efter ligningen: $Q = (U \cdot I) / v$.

Som eksempel er der i Figur 3.132 vist 5 slib af MIG-påvejsninger, der er svejst med samme varmetilførsel ($Q = 0,4 \text{ kJ/mm}$), men med indbyrdes forskellige svejseparametre.



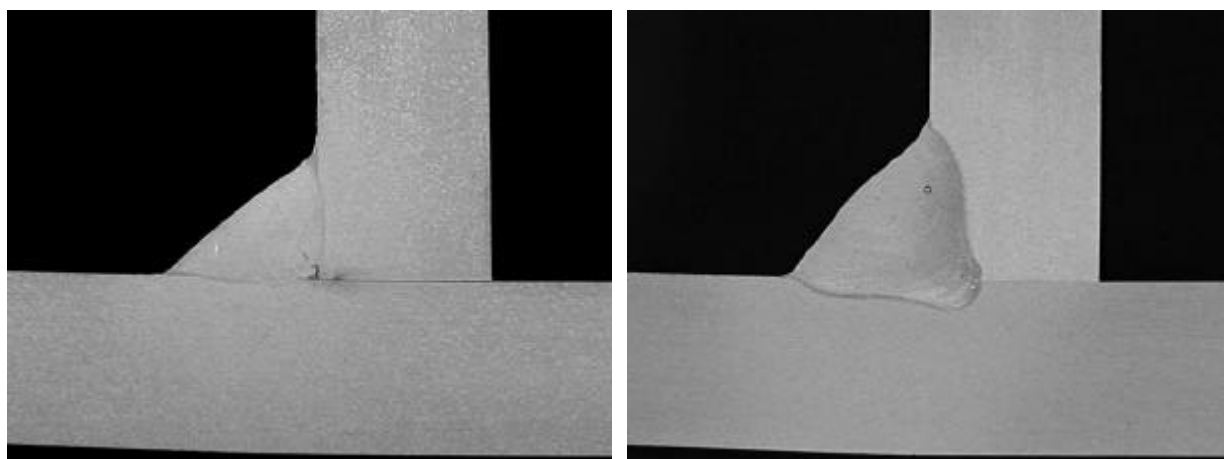
$v = 200 \text{ mm/min}$	$v = 400 \text{ mm/min}$	$v = 600 \text{ mm/min}$	$v = 800 \text{ mm/min}$	$v = 1000 \text{ mm/min}$
$U = 20,8 \text{ V}$	$U = 22,2 \text{ V}$	$U = 22,8 \text{ V}$	$U = 26,3 \text{ V}$	$U = 27,4 \text{ V}$
$I = 79 \text{ A}$	$I = 146 \text{ A}$	$I = 212 \text{ A}$	$I = 254 \text{ A}$	$I = 307 \text{ A}$

Figur 3.134 Fem MIG-påvejsninger med konstant varmetilførsel $0,4 \text{ kJ/mm}$, men indbyrdes forskellige svejseparametre. (Plade: 12 mm 6082, gas: 100% argon, tråd = $1,2 \text{ AlMg5}$).

Figur 3.132 viser tydeligt hvordan indtrængningen stiger med stigende svejseparametre på trods af at varmetilførslen er konstant. Denne tendens gælder for alle typer af svejsesamlinger og alle typer svejseprocesser.

Den væsentligste årsag til den mindre indtrængning, når der svejses med lave svejseparametre, er, at energien (varmen) der tilføres svejsestedet har mere tid til at fordele sig ud i den omgivende aluminium, og det område der bliver opvarmet til en temperatur over aluminiums smeltetemperatur bliver derfor mindre. Dvs. indtrængningen bliver mindre.

På figur 3.133 ses to kantsømme med samme ydre a-mål 4,5 mm svejst ved MIG-svejsning.



Sv.-hast. = 400 mm/min

U = 22,1 V, I = 152 A, Q = 0,4 kJ/mm

Sv.-hast. = 800 mm/min

U = 25,7 V, I = 285 A, Q = 0,54 kJ/mm

Figur 3.135 Slib af to MIG-svejsning svejst med ca. samme ydre a-mål på 4,5 mm, men med forskellige svejseparametre (godstykkelse: 8 mm).

Eftersom HAZ-området kun i ringe grad bliver større, men at der opnås en betydelig større og mere sikker indtrængning ved høje svejseparametre for samme varmetilførsel, anbefales det at svejse med så høje svejseparametre som muligt.

En anden væsentlig fordel er naturligvis at produktiviteten stiger med stigende svejsehastighed. Hvis der anvendes manuel svejsning kan det dog i visse tilfælde være problematisk at svejse med hastigheder i området 600-800 mm/min og med højere hastigheder.

3.13.4 STYRKETAB

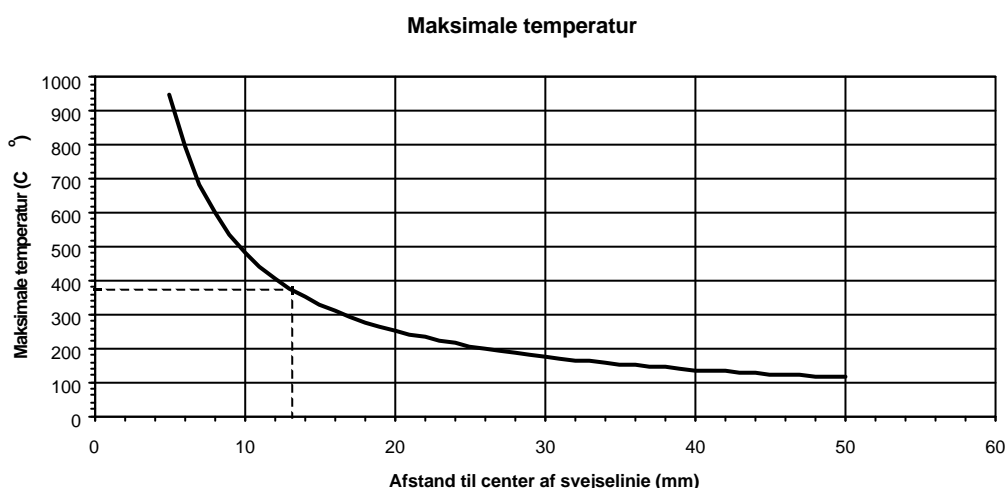
I forbindelse med SASAK-projektet er det erfaret, at det især er den maksimale temperatur, som en aluminiumslegering påvirkes med i en vilkårlig afstand til en svejsesøm, der er afgørende for, om der mistes styrke. Tiden, som materialet er opvarmet i, er mindre afgørende.

Størrelsen af den maksimale temperatur i en vilkårlig afstand til en svejsesøm, og dermed bredden af HAZ, afhænger især af følgende tre parametre: Varmetilførsel, kombineret godstykkelse og aluminiumslegering.

Fra tilgængelig litteratur samt Gleeble-tests¹ under SASAK-projektet er det ligeledes erfaret, at aluminiumslegeringer i 5000-serien (ikke-modningshærdbare legeringer) mister styrke, når den maksimale temperatur overskrider omkring 360 - 370°C.

Aluminiumslegeringer i 6000-serien (modningshærdbare legeringer) mister styrke, når den maksimale temperatur overskrider omkring 255 - 270°C, Brungraber og Nelson [3].

Figur 3.136 viser et eksempel på fordelingen af den maksimale temperatur som funktion af afstanden til svejsesømmen i et konkret tilfælde, hvor der MIG-svejses i en 5083-legering.



Figur 3.136 Eksempel på beregnede maksimale temperatur ved MIG-svejsning i 5 mm aluminium (5083) som funktion af afstanden til centerlinien af en stumpsøm.

Man må dog påregne, at legeringer i 6000-serien også i mindre omfang er påvirket af den tid legeringen er opvarmet. De nævnte grænsetemperaturer skal derfor kun betragtes som middelværdier, der afhængig af de eksakte forhold kan variere lidt.

¹ Forsøgsmetode hvor mindre forsøgsemner fysisk påvirkes med tid/temperatur forløb svarende til varmepåvirkningen fra en svejsning.

I eksemplet vist på Figur 3.136 er den maksimale temperatur over grænsetemperaturen for 5000-serien (360 – 370°C) fra centerlinien af svejsningen og ud i en afstand på ca. 13 mm. Det antages derfor, at der i det konkrete tilfælde forekommer styrketab 13 mm ud til begge sider af svejseømmens centerlinie.

Styrketab ifølge standarder

Som nævnt indledningsvis benytter designere og konstruktører i Danmark typisk standarderne DS 419, Eurocode No. 9 eller BS 8118 i forbindelse med dimensionering af svejste aluminiumskonstruktioner.

I januar 2002 udkommer en ny udgave af DS 419, hvor indholdet vedrørende varmpåvirkning og styrketab i al væsentlighed svarer til indholdet i Eurocode 9.

Mht. dimensionering af svejste konstruktioner henvises der til nærværende håndbogs kapitel 2: ”Dimensionskriterier”.

HAZ-bredde

Hvad angår bredden af HAZ har forsøgsresultaterne i SASAK projektet vist, at DS 419, Eurocode 9 og BS 8118 i mange tilfælde er meget konservative (overestimerede), hvilket også er andres erfaringer [4]. Hvor HAZ-bredden skal måles fra i forhold til svejseømmen afhænger af fugetypen, og der henvises i den forbindelse til standardernes angivelser.

Siden 60-erne har man også anvendt den såkaldte ”one-inch-rule”, hvor det antages at HAZ-bredden fra centerlinien af en svejsning og vinkelret ud konstant er 25,4 mm. Eftersom HAZ-bredden kan variere mellem få millimeter og op til over 30 mm, er denne regel selvfølgelig temmelig unøjagtig.

Da ovennævnte standarder er meget unøjagtige eller meget konservative, er der i forbindelse med SASAK-projektet udviklet en ny og mere nøjagtig model til estimering af HAZ-bredden – se rubrik 3.13.5: ”SASAK-model for HAZ-bredde”.

Svejsfaktor

Svejsfaktoren ifølge DS 419 ((softening factor ρ_{haz} ifølge Eurocode 9) er et udtryk for, hvor meget styrken er reduceret i den varmpåvirkede zone, dvs. inden for HAZ-bredden. Ved dimensionering skal styrken inden for et HAZ-område som hovedregel, beregnes som styrken af grundmaterialet ganget med svejsfaktoren, der er mindre end eller lig 1.

I SASAK projektet er det gennem forsøgsarbejde eftervist, at svejsfaktorer angivet i DS 419 og Eurocode 9 er i god overensstemmelse med virkeligheden. Disse to standarder angiver svejsfaktoren for 5000-serien til at være ca. 0,80 – 0,85 og for 6000-serien til at være ca. 0,65.

Svejsfaktorer angivet i BS 8118 er derimod helt nede omkring 0,5 eller mindre, hvilket er betydelig mere konservativt, og dermed uhensigtsmæssig at følge, hvis man ønsker at undgå alt for store overdimensioneringer af en aluminiumskonstruktion.

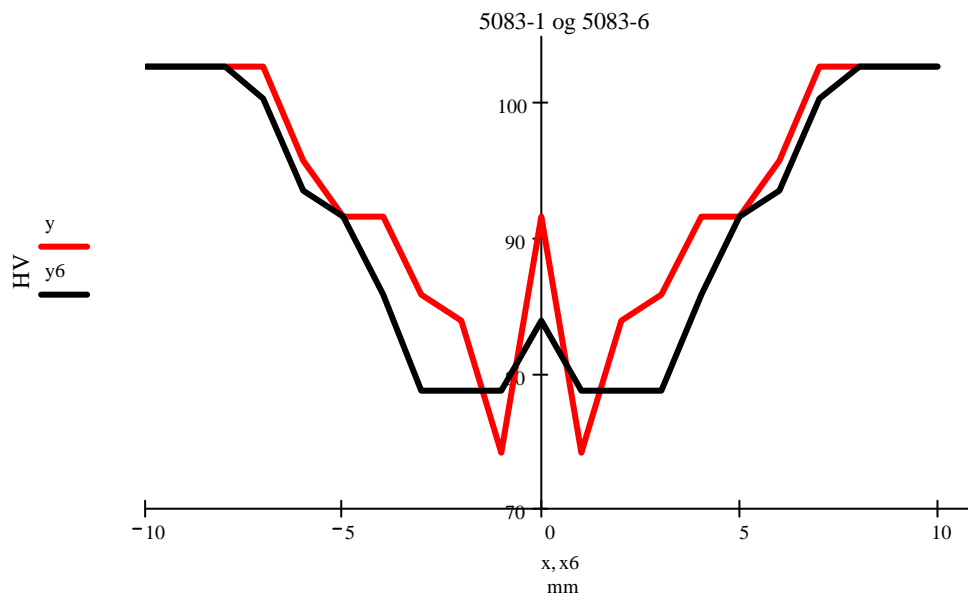
Gentagne varmepåvirkninger.

Ved eksempelvis reparations svejsning vil samme område omkring en svejsning blive varmepåvirket flere gange. Ifølge Eurocode 9 og DS 419 må der højst svejses 2 gange samme sted, da der ellers vil være risiko for øgede styrketab i HAZ.

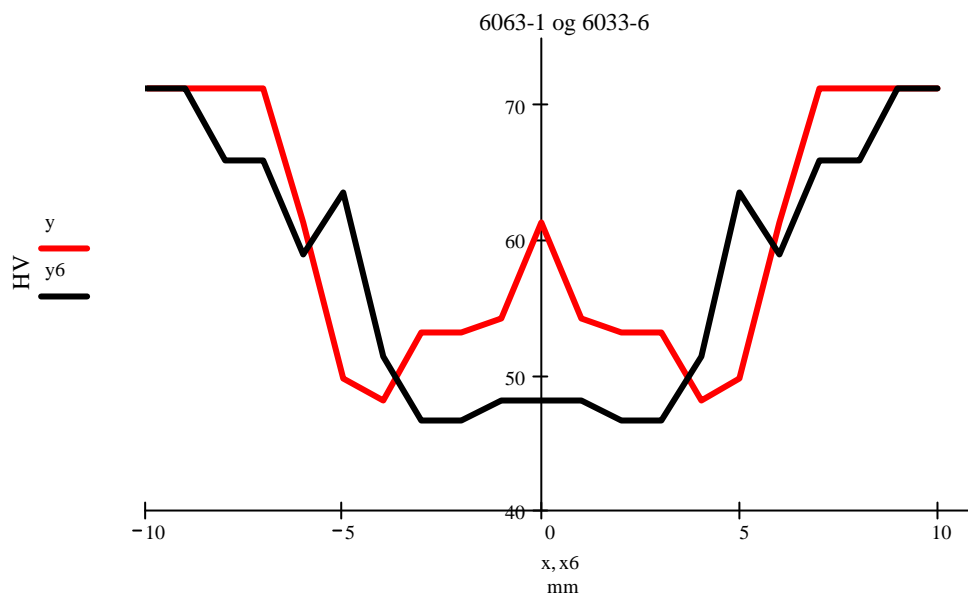
I tilfælde af behovet for en tredje reparation i en produktionssituation, vil man i nogle tilfælde udskære det reparerede område og indsætte et nyt stykke. Dette er som regel tidskrævende og besværligt, og derfor temmelig uhensigtsmæssigt.

Ifølge den studerede teori i forbindelse med SASAK projektet, bør styrkeegenskaberne imidlertid ikke blive forringet yderligere, selvom der svejses adskillige gange samme sted, så længe varmetilførslen ikke øges, og så længe forvarmen ikke er øget.

Dette er eftervist gennem praktiske forsøg med både MIG- og TIG svejsninger i 5000 og 6000 legeringer, [8]. På Figur 3.137 og Figur 3.138 ses eksempler på at hårdhedsfordelingen i HAZ stort set er uændret efter 6 ensartede varmepåvirkninger i forhold til efter 1 varmepåvirkning.



Figur 3.137 Hårdhedsfordeling i HAZ efter TIG-på svejsning hhv. 1 og 6 gange samme sted (Q: 0,2 kJ/mm, godstykkelse: 5 mm, legering: 5083), [8].



Figur 3.138 Hårdhedsfordeling i HAZ efter TIG-på svejsning hhv. 1 og 6 gange samme sted (Q: 0,2 kJ/mm, godstykkelse: 5 mm, legering: 6063), [8].

3.13.5 SASAK-MODEL FOR HAZ-BREDDE

Baggrund

Eftersom DS 419 og Eurocode No. 9 generelt angiver meget konservative estimater for HAZ-bredden ved henholdsvis MIG- og TIG-svejsning i aluminium, er der i forbindelse med SASAK projektet udviklet en mere nøjagtig model til estimering af HAZ-bredden.

Formålet med et mere nøjagtigt estimat af HAZ-bredden er, at man i designfasen for visse aluminiumskonstruktioner i højere grad kan undgå overdimensioneringer, og dermed opnå lettere og billigere aluminiumsprodukter.

Gennem beregningseksempler er det bl.a. vist, at den samlede styrkereduktion for et profil kan være over 10% højere (bedre) ved anvendelse af SASAK-modellens beregnede HAZ-bredde i forhold til standardernes ofte meget konservative angivelser af HAZ-bredden.

SASAK-modellen er opstillet på baggrund af teoretiske beregninger af varmeudbredelsen ved svejsning, og den er eftervist gennem praktiske svejseforsøg.

Det er tiltænkt, at SASAK-modellen kan erstatte punkt (3) og (6) under afsnit 5.5.3 i Eurocode 9, hvis der ønskes et mere nøjagtigt estimat af HAZ-bredden.

Anvendelse af SASAK model

SASAK-modellen for estimering af HAZ-bredden gælder for stump-, kant- og overlap-sømme ved TIG- eller MIG-svejsning på kombinerede godstykkelser under 32 mm, og hvor emnets temperatur er omkring stuetemperatur.

Modellen kræver kendskab til følgende 3 parametre:

- Kombinerede godstykkelse, t_k (se Figur 3.139)
- Varmetilførsel, Q (eller tværsnitsareal af tilført materiale ved MIG-svejsning)
- Legeringsserie (5000 eller 6000).

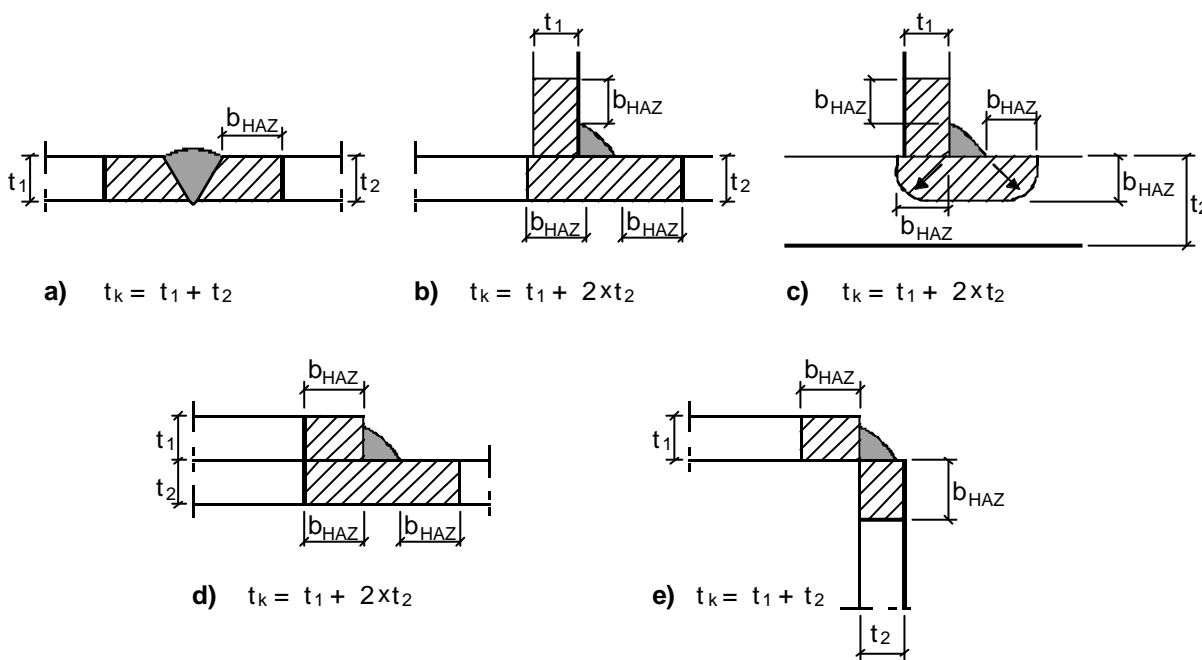
Med disse 3 parametre kan HAZ-bredden aflæses på Figur 3.141, der gælder for legeringer i 5000-serien eller Figur 3.142, der gælder for legeringer i 6000-serien.

For andre legeringsserier end 5000 og 6000 henvises til DS 419 eller Eurocode 9.

Påvirkninger af HAZ-bredden ved flerstrengssvejsning, eller hvis den svejste aluminiumskonstruktion skulle være kølet eller forvarmet, er beskrevet sidst i dette kapitel.

Udbredelse af HAZ

På Figur 3.139 er det vist, hvordan modellens estimerede HAZ-bredde er defineret i forhold til de respektive fugetyper, samt hvordan den kombinerede godstykkelse beregnes.

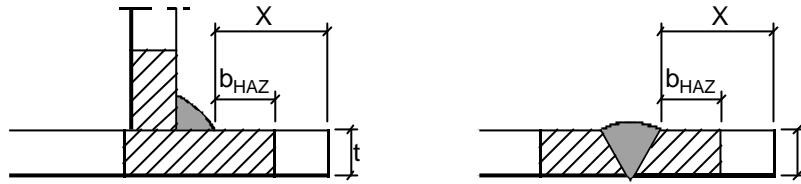


Figur 3.139 Definition af HAZ udbredelse samt beregning af kombinerede godstykkelse.

Ved kombinerede godstykkelser over 32 mm, gælder SASAK-modellen ikke, og det anbefales i stedet at anvende 25 mm eller angivelserne i DS 419 eller angivelserne i eurocode 9.

Randbetingelser

Hvis der svejses nær en pladekant, bremses varmeudbredelsen ved pladekanten, og varmeenergien ophobes, hvilket kan resultere i et større af HAZ-område.



Figur 3.140 Randbetingelser.

Hvis X vist på Figur 3.140 er mindre end $3 \cdot b_{HAZ}$, skal hele længden X betragtes som HAZ-zone. Eurocode 9 har samme regel for randbetingelser.

Varmetilførsel kontra areal af tilført svejsemetal ved MIG-svejsning.

På Figur 3.141 og Figur 3.142 (gældende for hhv. 5000 og 6000 serien) afhænger den aflæste HAZ-bredde af varmetilførslen Q.

Varmetilførslen ved TIG og MIG-svejsning kan beregnes som:

$$Q = \frac{U \cdot I \cdot h \cdot 60}{1000 \cdot v} \quad , \text{ hvor}$$

Q = varmetilførsel (kJ/mm)

U = Spænding (V)

I = Strømstyrke (A)

η = Virkningsgrad ($\eta_{TIG} = 0,6$ og $\eta_{MIG} = 0,8$)

v = Svejseshastighed (mm/min)

Varmetilførslen er dog ofte ukendt for konstruktøren/designeren i designfasen.

Ved MIG-svejsning følger varmetilførslen imidlertid som regel tværsnitsarealet af svejseømmen med en nogenlunde konstant faktor. Fra praktiske svejseforsøg under SASAK-projektet er denne faktor midlet til at være ca. 0,019, hvilket giver sammenhængen:

$$Q = 0,019 \cdot A$$

Hvor Q er varmetilførslen i kJ/mm og A er arealet af det tilførte materiale i mm^2 .

I det følgende er det beskrevet, hvordan arealet af tilført materiale simpelt kan beregnes.

Areal af tilført materiale

Ved MIG-svejsning af stumpsømme i V-fuge og af kantsømme kan arealet af det tilførte materiale (A) for hver svejsestreng simplificeret beregnes som:

Stumpsømme i V-fuge:
$$A = \frac{(t)^2}{s}$$

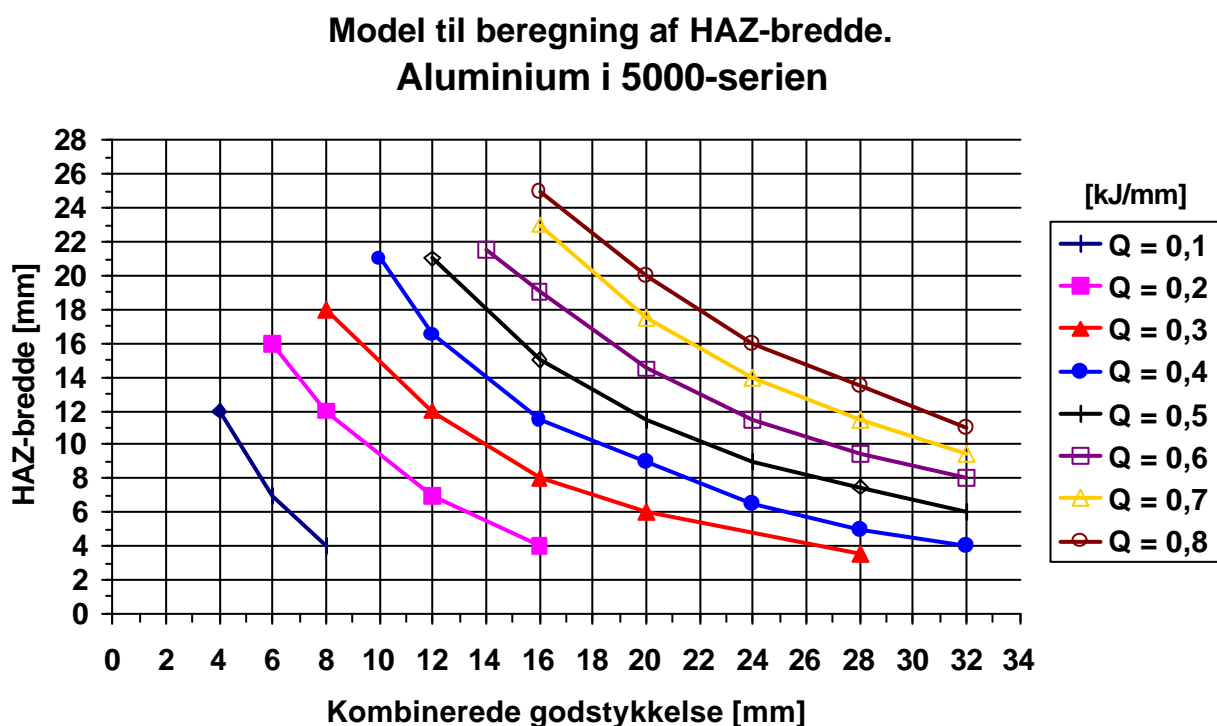
,hvor t er godstykkelsen, og s er antal svejsestreng

Kantsømme:
$$A = \frac{(a)^2}{s}$$

,hvor a er a-målet, og s er antal svejsestreng

HAZ-bredde for 5000-serien

På Figur 3.141 er SASAK-modellen til beregning af HAZ-bredden for legeringer i 5000-serien vist som funktion af den kombinerede godstykkelse og varmetilførslen. Den valgte grænsetemperatur er 365°C.



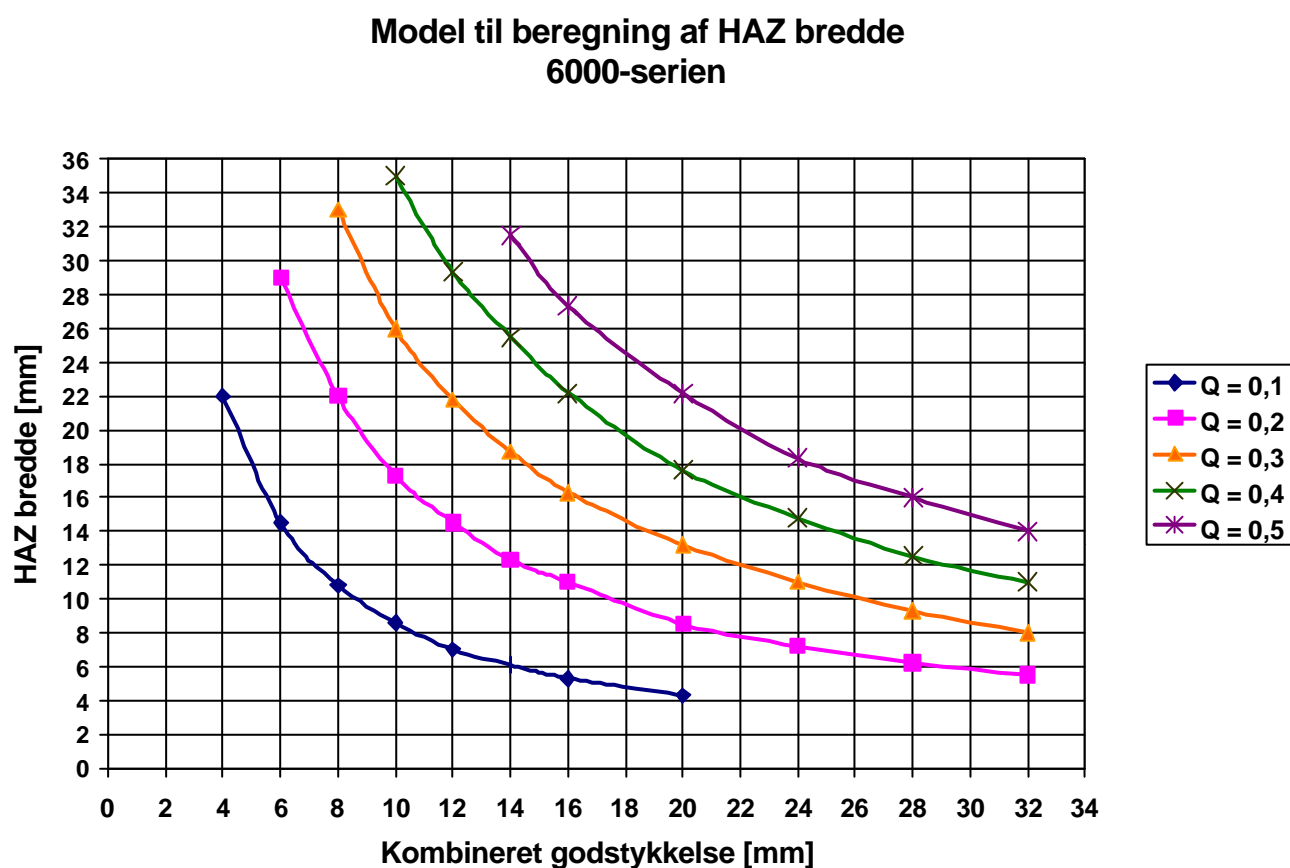
Figur 3.141 SASAK-model til beregning af HAZ-bredde (b_{haz}) ved MIG- og TIG-svejsning af stump-, kant- og overlapsømme i aluminiumslegeringer i 5000-serien.

Hvis Figur 3.141, der gælder for 5000-serien, angiver en HAZ-bredde over **25 mm**, skal 25 mm anvendes som maksimum.

Hvis Figur 3.141 angiver en HAZ-bredde mindre end **5 mm**, skal 5 mm anvendes som minimum.

HAZ-bredde for 6000-serien

Tilsvarende modellen for aluminiumslegeringer i 5000-serien, er der udviklet en model for aluminiumslegeringer i 6000-serien. Den valgte grænsetemperatur er 240°C, hvilket nok må betegnes som lidt til den konservative side.



Figur 3.142 SASAK-model til beregning af HAZ-bredde (b_{haz}) ved MIG- og TIG-svejsning af stump-, kant- og overlapsømme i aluminiumslegeringer i 6000-serien.

Hvis Figur 3.142 ,der gælder for 6000-serien, angiver en HAZ-bredde over **35 mm**, skal 35 mm anvendes som maksimum.

Hvis Figur 3.142 angiver en HAZError! Bookmark not defined.-bredde mindre end **5 mm**, skal 5 mm anvendes som minimum.

Flerstrengssvejsning

Som nævnt under rubrik 3.13.4 er det i SASAK-projektet vist, at gentagne varmepåvirkninger ikke forøger HAZ-bredden, så længe mellemstrengs-temperaturen er omkring stuetemperatur.

Ved flerstrengssvejsning bestemmes HAZ-bredden derfor efter den svejse søm, der svejses med den største varmetilførsel.

Forvarmning

Det har en væsentlig indflydelse på HAZ-bredden, hvis svejseemnet er forvarmet til temperaturer væsentligt over stuetemperatur.

I Eurocode 9 ganges HAZ-bredden med en beregnet faktor, når forvarmetemperaturen er over 60°C. Forsøgsarbejdet i SASAK viser dog, at Eurocode 9 i dette tilfælde underestimerer forvarmens betydning for HAZ-bredden.

I SASAK modellen gælder derfor følgende: Hvis forvarmetemperaturen er større end 30°C, skal der for aluminiumslegeringer i 5000 og 6000-serierne ganges en faktor α på den estimerede b_{HAZ} . Faktoren α kan beregnes af følgende ligning,

$$\alpha = 1 + \frac{(T_1 - 20)}{100}$$

Ovennævnte ligning er lidt mere konservativ end tilsvarende ligning i Eurocode 9.

Køling fra svejsefikstur

Hvis der i en svejseopstilling forekommer kraftig køling af svejsesamlingen, eksempelvis gennem vandkølede kobberkæber i et svejsefikstur, er der risiko for, at SASAK-modellen overestimerer HAZ-bredden. Hvis eksempelvis varmetilførslen er uforholdsmæssig stor i relation til konstruktionens godstykkelse, kan dette være tegn på, at der sker en kraftig bortledning af varme fra svejsestedet.

Hvis modellens estimat af HAZ-bredden ved legeringer i 5000-serien er større end 25 mm, kan 25 mm anvendes som maksimum.

Hvis modellens estimat af HAZ-bredden ved legeringer i 6000-serien er større end 35 mm, kan 35 mm anvendes som maksimum.

Alternativt anvendes HAZ-angivelserne i DS 419 eller Eurocode 9.

3.13.6 REFERENCER

Litteratur

1. **J. Hattel**
Grundlæggende varmelære for termiske materialeprocesser
Kompendium, IPT, DTU, 1995.
2. **O.R.Myhr and Ø.Grong**
Dimensionless Maps for Heat Flow Analyses in Fusion Welding
Acta metallurgica et Materialia, Vol. 38, No. 3, pp. 449-460, 1990.
3. **R.J. Brungraber and F.G. Nelson**
Effect of Welding Variables on Aluminium Alloy Weldments
Welding Research Supplement, March 1973.
4. **J. Dwight and I. Robertson**
Extent of the Softened Zone at MIG Welds on 6XXX Aluminium
INALCO, 1998.
5. **Clausen, B**
Lysbuesvejsning af deformations- og modningshærdede aluminiumslegeringer
Svejsning 8, (5), oktober, 1981.
6. **G.O. Rading and J.T. Berry**
A Model for Heat.Affected Zone Hardness Profiles in Al-Li-X Alloys
Welding Research Supplement, september 1998.
7. **Nielsen, M. M.**
Aluminiums reaktion på varmemåvirkning
Afgangsprojekt, Ingeniørhøjskolen Københavns Teknikum, 2001.

Tekniske rapporter

SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0001-00, *Aluminiums reaktion på varmepåvirkning – første delrapport*

SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0005-01, *Model for styrketab ved svejsning i aluminium – baggrund og forsøg*

SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0010-00, *Model for styrketab ved svejsning i aluminium – 2. udgave (endelig)*

Supplerende litteratur

T. Ma og G. den Ouden

Heat-affected zone softening during arc welding of Al-Zn-Mn alloys

Joining of Materials 7, Helsingør, Denmark, 1995.

3.14 DEFORMATIONER VED SVEJSNING

3.14.1 INTRODUKTION

Ved smeltesvejsning i såvel aluminium som i stål vil der altid i en eller anden grad forekomme deformationer og spændinger omkring svejsesømmen, grundet den voldsomme varmepåvirkning materialet oplever i og omkring svejsestedet. Først opvarmes materialet i og omkring smeltebadet kraftigt, og kort efter forekommer der en tilnærmelsesvis bratkøling. Disse temperaturpåvirkninger resulterer i rumfangsændringer, og da materialet ikke kan arbejde frit pga. af de omkringliggende koldere dele, opstår der spændinger i materialet. Hvis spændingerne overskrider en vis grænse (flydespændingen), begynder materialet at deformere omkring svejsningen.

Aluminium har en udvidelseskoefficient der er næsten dobbelt så stor som ståls, hvilket betyder at aluminium udvider sig næsten dobbelt så meget ved en temperaturstigning i forhold til stål. Svejsedeformationer i aluminium bliver derfor som regel større i forhold til svejsedeformationer i stål.

Svejsedeformationerne kan direkte ses eller måles ved at sammenligne fugesamlingen før og efter svejsning. Det kan vise sig ved, at de ophæftede profiler ikke er rette efter svejsning, eller som udbulinger i tyndere materialer.

Svejsespændinger kan ikke umiddelbart ses, men de kan have en betydelig indflydelse på anvendeligheden af de svejste konstruktioner emner. Med tilstedeværelse af store svejsespændinger øges risikoen for spændingskorrosion, udmattelsesbrud og sprødbud. Desuden påvirker svejsespændinger tendensen til varmerevner. Man bør derfor så vidt mulig undgå store svejsespændinger.

Omkring svejsemetallet (det opsmeltede materiale) opstår der sædvanligvis trækspændinger, pga. den sammentrækning af materialet der har fundet sted efter afkøling. Hvor store trækspændingerne bliver afhænger i høj grad af hvor hårdt indspændt konstruktionen har været under svejsning. I en meget stiv konstruktion opstår der store spændinger, der i værste fald resulterer i revner. Er konstruktionen mere frit bevægelig bliver spændingerne som regel mindre, og deformationerne bliver til gengæld større.

Størrelsen af spændinger og deformationer omkring en svejsning afhænger af en kompleks sammenhæng af bl.a. forhold som:

- Svejseteknik
- Sømform (stumpsøm, kantsøm m.fl.)
- Fugegeometri (fugevinkel, spalte m.m.)
- A-mål (tværsnit af svejsesøm)
- Varmetilførsel
- Svejserækkefølge
- Konstruktionens stivhed (godstykkelse, indspænding, hæftning mm.)
- Materialesammensætning

På de efterfølgende sider er der på baggrund af praktisk forsøgsarbejde samt teoretiske overvejelser i SASAK-projektet opstillet værktøjer til estimering af størrelsen af svejsedeformationer ved MIG-svejsning på ikke-indspændte forsøgsemner. Så vidt vides eksisterer der ikke tilsvarende værktøjer til estimering af svejsedeformationer i aluminium andetsteds i litteraturen.

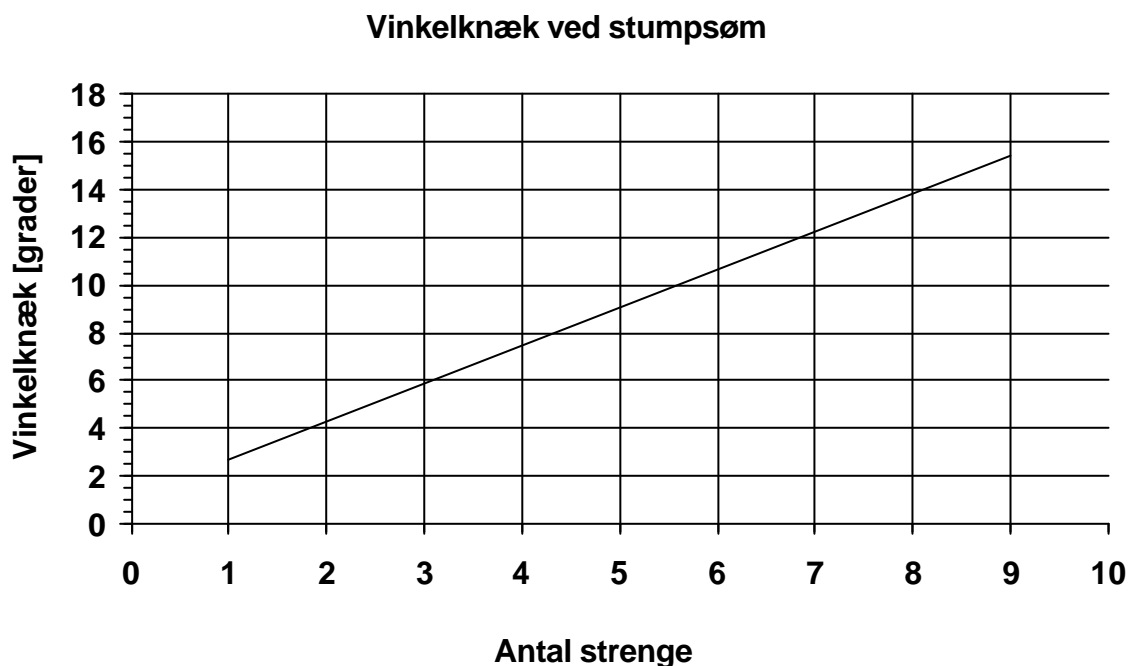
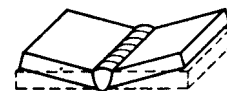
I produktionssituationer er svejsedeformationernes størrelse bl.a. afhængig af den svejste konstruktions stivhed, i hvilken grad konstruktionen er fastspændt, svejserækkefølge samt de andre ovennævnte forhold. De deformationsværdier, som kan udledes i de efterfølgende afsnit, skal derfor vurderes med ”et gran salt”, når deformationer i store konstruktioner skal anslås. Typisk vil man ofte få en lille smule mindre deformationer i praksis.

Kurverne for deformationer kan ligeledes anvendes til at give en indsigt i de mekanismer/parametre, der er bestemmende for svejsedeformationernes størrelse, og dermed hvordan man kan minimere svejsedeformationer.

3.14.2 VINKELKNÆK

Stumpsøm

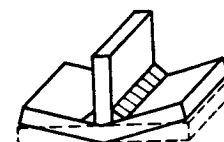
På Figur 3.143 er vinkelknækket ved svejsning af stumpsømme vist som funktion af antal strenge.



Figur 3.143 Vinkelknæk ved svejsning af stumpsømme som funktion af antal strenge.

Kantsøm - vinkelknæk

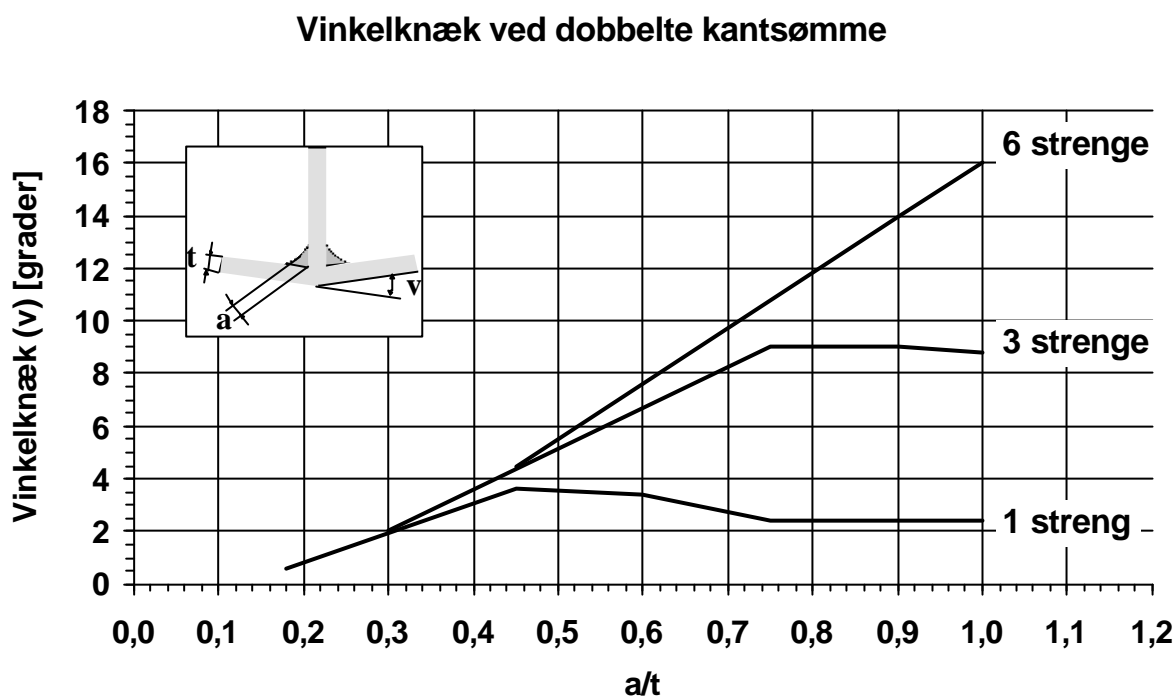
Ved svejsning af dobbelte kantsømme i aluminium er vinkelknækket (v) i høj grad er afhængig af følgende tre parametre: Godstykkelse (t), A-mål (a) og



antal strenge.

På Figur 3.144 kan vinkelknækket aflæses afhængig af a -mål divideret med godstykkelsen (a/t).

De tre viste kurver gælder for svejsning af dobbelt kantsømme med hhv. 1, 3 og 6 strenge på hver side af kropspladen.



Figur 3.144 Vinkelknæk (v) ved dobbelt MIG-kantsøm afhængigt af a -mål divideret med pladetykkelse (a/t).

Vinkelknækkets størrelse er meget afhængig af hvor store temperaturforskelle, der forekommer i en plades tykkelsesretning under afkøling. Hvis temperaturforskellen mellem toppen og bunden af pladen er forholdsvis stor, vil pladen under køling trække sig mere uensartet sammen i pladens tykkelse, og dermed vil vinkelknækket blive større

Vinkelknækket er derfor meget afhængig af forholdet mellem varmetilførslen (og dermed a -målet) og godstykkelsen.

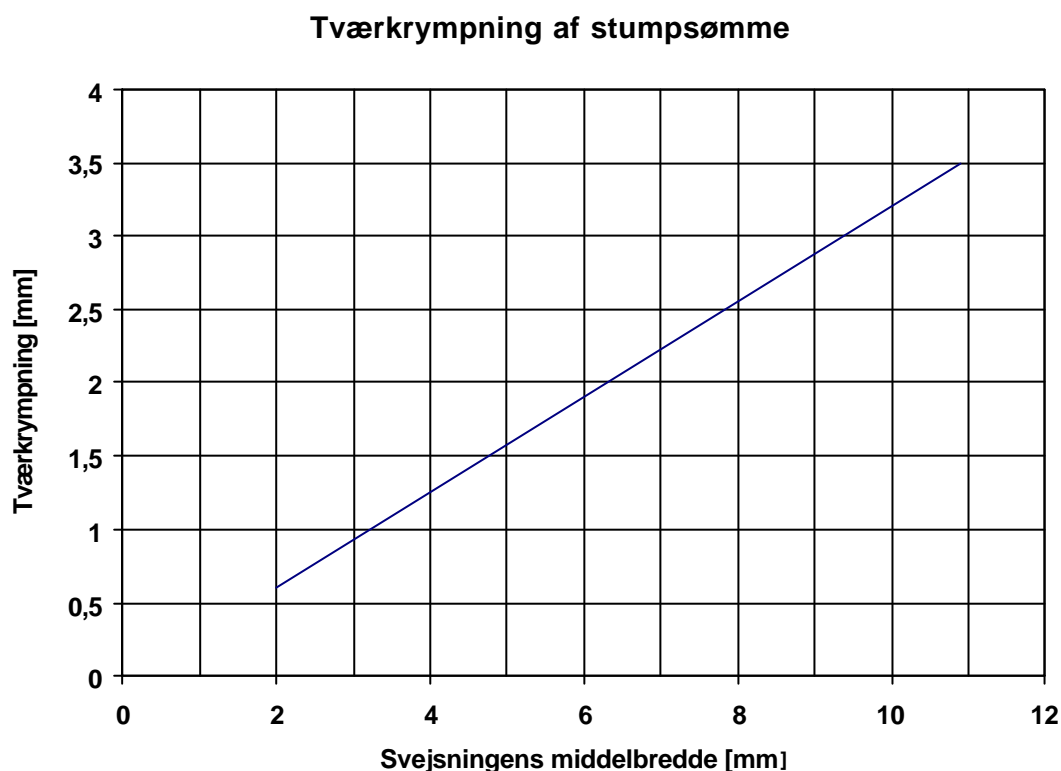
Det forhold mellem a -mål og godstykkelse, der ofte anvendes i praksis ved svejsning med én streng, ligger desværre typisk i området 0,4 – 0,6, hvor det største vinkelknæk forekommer. For nærmere beskrivelse henvises til rapporten: "SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0002-01".

3.14.3 TVÆRKRYMPNING

Tværkrympningen (d) er den længde, som de sammensvejsede plader har trukket sig sammen på tværs af svejseretningen.

Stumpsømme - tværkrympning

Målinger af tværkrympning ved MIG-svejsning af stumpsømme er vist på Figur 3.145.



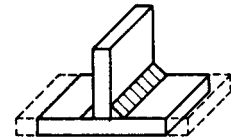
Figur 3.145 Tværkrympning ved MIG-svejsning af stumpsømme som funktion af svejsningens middelbredde.

Svejsningens middelbredde kan betragtes som forholdet mellem svejsesømmens tværsnitsareal divideret med godstykkelsen. I praksis kan man gå ud fra svejsefugens middelbredde, tillagt ca. 2 mm.

Tidligere undersøgelser af tværkrympning ved svejsning har vist, at kun ca. 10% af tværkrympningen kommer fra sammentrækninger i smeltebadet [3]. Resten af sammenkrympningen kommer fra opvarmning og nedkøling af det omgivende materiale.

Kantsømme - tværkrympning

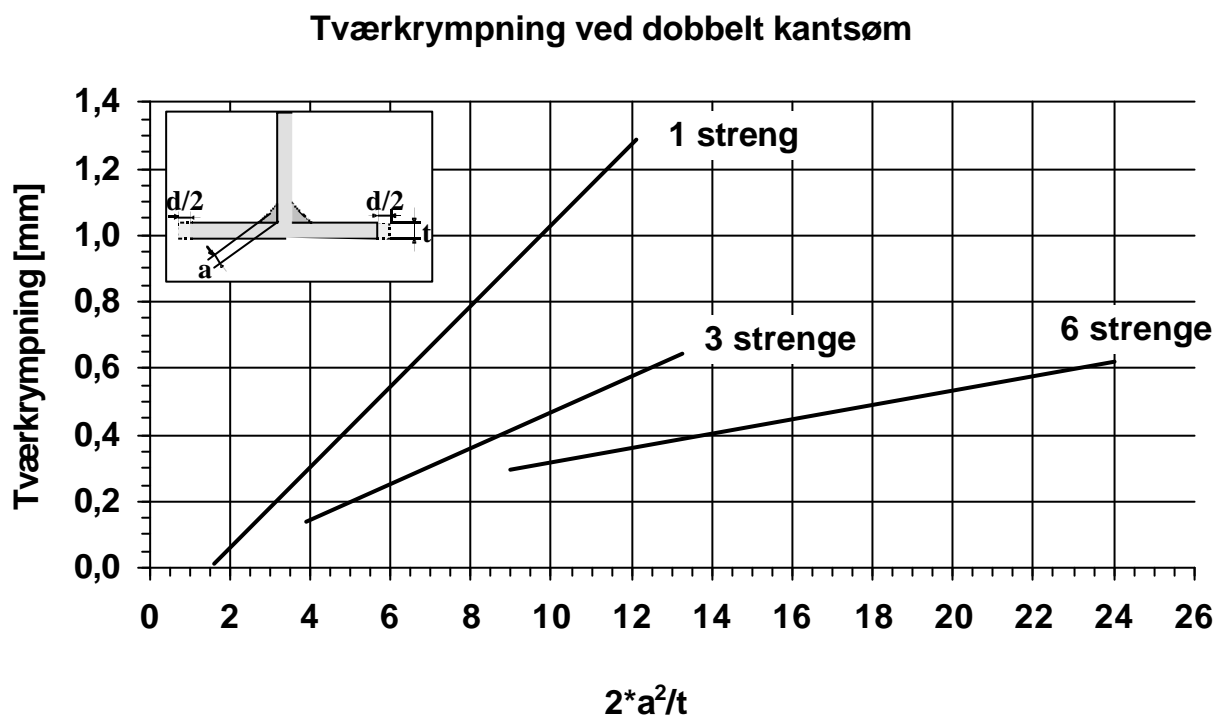
Tværkrympningen ved svejsning af dobbelte kantsømme i aluminium er i høj grad afhængig af forholdet mellem tværsnitsarealet af tilført materiale og godstykkelse.



Arealet af tilført materiale (A_w) i en dobbelt kantsøm kan beregnes af følgende udtryk:

$$A_w = 2 \cdot (amål)^2$$

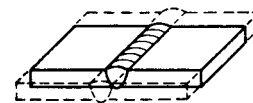
På Figur 3.146 kan vinkelknækket aflæses afhængig af forholdet mellem tværsnitsarealet af tilført materiale og godstykkelsen (A_w/t). Figuren er baseret på et større forsøgsarbejde. Målingerne af tværkrympninger er blevet korrigeret mht. de vinkelknæk, der forekom på de enkelte forsøgsemner.



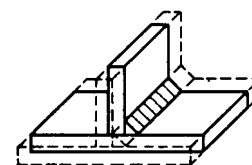
Figur 3.146 Tværkrympning (d) ved dobbelt kantsøm afhængig af forholdet mellem tværsnitsarealet af tilført materiale og godstykkelsen.

3.14.4 LÆNGDEKRYMPNING

Gennem målinger eller beregninger af spændingsniveauer omkring en svejsning er det muligt at forudsige længdekrympningerne i en svejsning.



Til bestemmelse af længdekrympningen ved svejsning af profiler, kan der opstilles en forholdsvis simpel ligning:



$$d = \frac{P \cdot L}{E \cdot A_p} \quad (3.1)$$

d:	Længdekrympning	[mm]	
P:	Krympekraft	[N/mm ²]	
E:	Elasticitetsmodul	[N/mm ²]	(For aluminium: E = 70.000 N/mm ²)
A _p :	Tværsnitsareal af profil	[mm ²]	
L:	Længde	[mm]	

Krympekraften kan beregnes af følgende udtryk:

$$P = C \cdot A_w \quad (3.2)$$

C:	Konstant afhængig af svejseteknik	[N/mm ²]	
A _w :	Areal af nedsmeltede svejsmetal	[mm ²]	(NB.: Ikke opsmeltede areal)

Ved MIG-svejsning i aluminium er konstanten C bestemt til 2100 N/mm². Dette er gjort gennem både en teoretisk og en praktisk bestemmelse af krympekræfter ved svejsning i aluminium under SASAK-projektet, [4].

Af ligning 3.1 og 3.2 kan den simple ligning 3.3 udledes til beregning af længdekrympningen (d) ved MIG-svejsning af et aluminiumsprofil.

$$d = 0,03 \cdot \frac{A_w}{A_p} \cdot L \cdot R \quad (3.3)$$

Længdekrympningen er således afhængig af tværsnitsarealet af det nedsmeltede materiale (A_w) samt af tværsnitsarealet af det profil (A_p), der svejses på. Endelig ses det af ligning 3.3, at længdekrympningen er ligefrem proportional med længden (L) af profilet.

I ligning 3.3 indgår reduktionsfaktoren R, der skal ganges på ved flerstrengssvejsning - se Tabel 3.36.

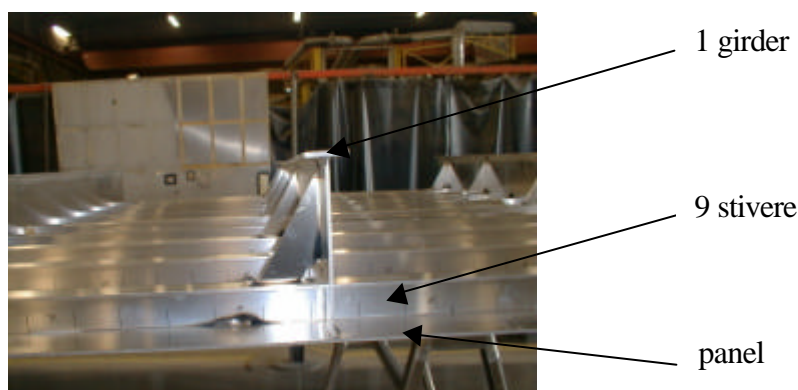
Tabel 3.36 Reduktionsfaktor R ved flerstrengssvejsning

Antal streng	1	2	3	4	5	6 - 8	9 - 13	> 13
Reduktions faktor (R)	100%	80%	60%	50%	45%	35%	30%	20%

3.14.5 EKSEMPEL PÅ BEREGNING AF DEFORMATIONER

I dette afsnit er der givet et eksempel på hvordan formelsamlingen kan anvendes til at estimere størrelsen af svejsedeformationerne på en aluminiumskonstruktion.

Der er taget udgangspunkt i en større aluminiumskonstruktion (2,7 x 4 m), der blev fremstillet i forbindelse med SASAK-projektet – se SASAK-rapport: ”SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0008-01” .



Figur 3.147 I eksemplet er der bidrag til den samlede svejseskrympning fra 1 kantsøm på girders på langs, 9 kantsømme på stivere på tværs samt 2 stumpsømme i panel på tværs.

I eksemplet blev den samlede krympning målt over en girders længde på 2,6 m. Til den samlede krympning fra svejsesarbejdet var der bidrag fra 1 kantsøm på langs af en girder, 9 kantsømme på stivere på tværs samt 2 stumpsømme på tværs i panelet (figur 3.145).

Den reelle samlede krympning blev målt til 5,5 mm.

Beregnet tværkrympning over 2 stumpsømme i panel

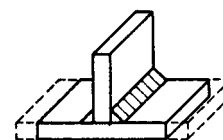


Med udgangspunkt i én stumpsøm med en middelbredde på 4,0 mm i en godstykkelse på 5 mm skulle tværkrympningen ifølge formelsamlingens være ca. 1,2 mm.

Med 2 parallelle stumpsømme giver dette bidrag $2 \cdot 1,2 = 2,4$ mm

Beregnet tværkrympning fra afbrudte kantsømme skiftevis på hver side af 9 stivere

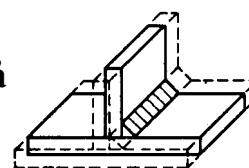
Stiverne blev svejst med afbrudte kantsømme med a-mål ca. 5 mm skiftevis på hver side i 5 mm godstykkelse. Figur 3.146 i formelsamlingen angiver i dette tilfælde tværkrympningen til at være ca. 0,4 mm pr. stiver.



Med kantsømme på 9 stivere bliver det samlede bidrag $9 \cdot 0,4 = 3,6$ mm

Beregnet længdekrympning af dobbeltsidig kantsøm på girder

Længdekrympningen d af en fuldsvejst girder kan beregnes af ligning 3.3 i formelsamlingen.



Med et samlet tværsnitsareal af svejsemetallet (A_w) på 50 mm^2 og et tværsnitsareal af girder-profilet (A_p) på 6900 mm^2 samt en svejselængde L på ca. 1900 mm (udkap fratrukket) er bidraget fra længdekrympningen af en girder ifølge ligning 3.3 beregnet til ca. 0,3 mm.

Til orientering er faktoren R sat til 0,8, idet der er 2 kantsømme.

Samlede krympning i eksempel

Ved at addere bidragene af krympninger fra de implicerede svejsninger fås den samlede krympning ifølge formelsamlingen til $2,4 + 3,6 + 0,3 = 6,3$ mm.

Den mindre afvigelse mellem den målte krympning på 5,5 mm og formelsamlingens 6,3 mm skal findes i en række usikkerheder, hvoraf der eksempelvis kan nævnes konstruktionens stivhed, ophæftningernes størrelse og placering, den manuelle udførsel af svejsningen, måleusikkerheder, svejsning skiftevis på hver side af stiverne m.m.

3.14.6 KONTROL/MINIMERING AF SVEJSEDEFORMATIONER

I det følgende er der givet forskellige råd og anvisninger til at kontrollere og/eller minimere svejsedeformationer. Generelt gælder de samme grundlæggende principper for aluminium som for stål. Aluminium har dog en udvidelseskoefficient, der er næsten dobbelt så stor som ståls, hvilket som regel giver anledning til større svejsedeformationer i aluminium.

A-mål/varmetilførsel

Ved at betragte de viste kurver for vinkelknæk og tvær- og længdekrympning, kan der opnås et godt indtryk af, hvilke mekanismer/parametre, der har væsentlig indflydelse på svejsedeformationers

størrelse. Med en større forståelse for denne sammenhæng er det i højere grad muligt at minimere svejsedeformationerne.

Det kan bl.a. udledes, at især a-målet er bestemmende for hvor store svejsedeformationer der fås ved MIG-svejsning i ikke-indspændte aluminiumskonstruktioner.

Forsøgsresultater i SASAK viser, at man i de fleste tilfælde kan reducere deformationerne betydeligt ved selv en forholdsvis lille reduktion af a-målet.

Som eksempel kan det af Figur 3.146 ses, at tværkrympningen ved en dobbelt kantsømssvejsning i et 8 mm tykt T-profil kan reduceres fra 0,8 mm til 0,3 mm ved at reducere a-målet fra 5,5 til 4,0 mm.

Det skal i den forbindelse nævnes, at a-målet ved enkeltstrengs svejsning kan betragtes som udtryk for varmetilførsels størrelse. Med stigende a-mål og dermed stigende varmetilførsel, opvarmes der til højere temperaturer i et større område omkring svejsningen, hvilket resulterer i større udvidelser og sammentrækninger og efterfølgende større deformationer.

I produktionssituationer forekommer det jævnligt, at det svejste a-mål er noget større end det angivet a-mål. En medvirkende årsag til dette kan være, at svejseren svejser et unødvendigt stort a-mål for at være på den helt sikre side. Samtidig vælger designeren/konstruktøren måske at angive et meget konservativt stort a-mål, ligeledes for at være helt sikker på at konstruktionen opfylder de nødvendige styrkeegenskaber. Samlet kan det resultere i et unødvendigt stort a-mål.

Man skal i sådanne tilfælde være opmærksom på muligheden for at minimere det resulterende a-mål ned til et tilstrækkeligt stort a-mål, hvis man ønsker at reducere svejsedeformationerne.

Godstykkelse

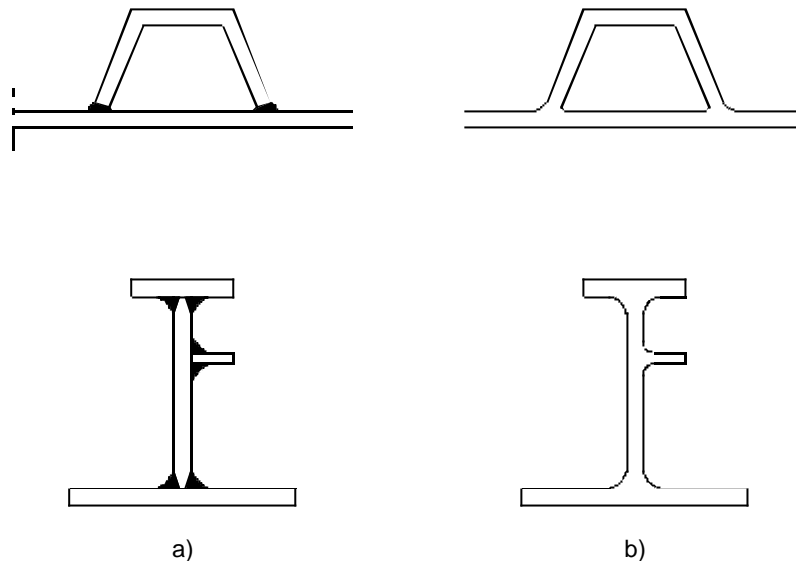
Med stigende godstykkelse, øges stivheden i konstruktionen, hvilket i de fleste tilfælde vil reducere størrelsen af svejsedeformationer.

Vedrørende længdekrympning er det hele tværsnitsarealet der svejses på, der har afgørende betydning, mens det ved vinkelknæk og tværkrympning kun er godstykkelsen, der har afgørende betydning.

Reducer det samlede svejsevolumen

Det bedste råd man kan give i forbindelse med at minimere svejsedeformationer, er at forsøge at minimere antallet og størrelsen af svejsningerne.

Aluminiumslegeringer generelt og især legeringer i 6000 og 7000 serierne er ekstruderbare. Man bør derfor være opmærksom på at udnytte mulighederne for ekstrudering til at undgå svejsninger. Figur 3.148 viser to eksempler på, hvordan svejsninger kan undgås ved at anvende ekstrudering.

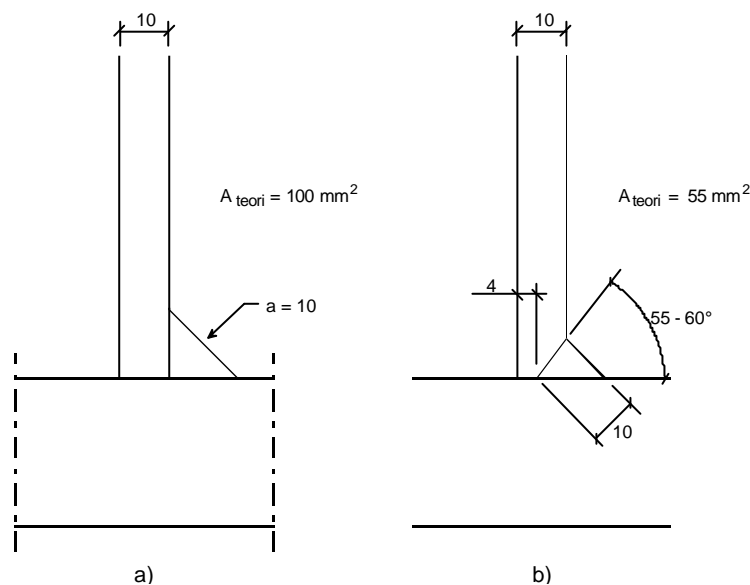


Figur 3.148 Ekstrudering kan i nogle tilfælde anvendes til at undgå svejsninger og dermed undgå svejsedeformationer.

Fugegeometri

Ved at ændre fugegeometrien er det i nogle tilfælde muligt, at reducere tværsnitsarealet af svejsesømmen og dermed reducere svejsedeformationerne.

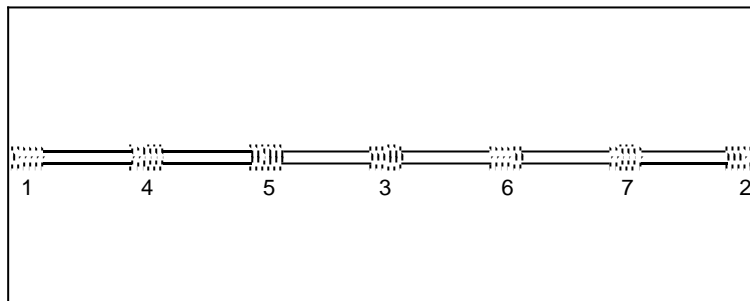
På Figur 3.149 er der vist et eksempel på hvordan en mindre ændring af fugegeometrien næsten halverer tværsnitsarealet af svejsesømmen.



Figur 3.149 Eksempel på at en ændret fugegeometri kan reducere svejsesømmens tværsnitsareal, hvilket vil reducere svejsedeformationerne.

Hæftning.

Normalt hæftes der først ved enderne og midten og derefter passende steder i mellemrummene – se eksempel på Figur 3.150.



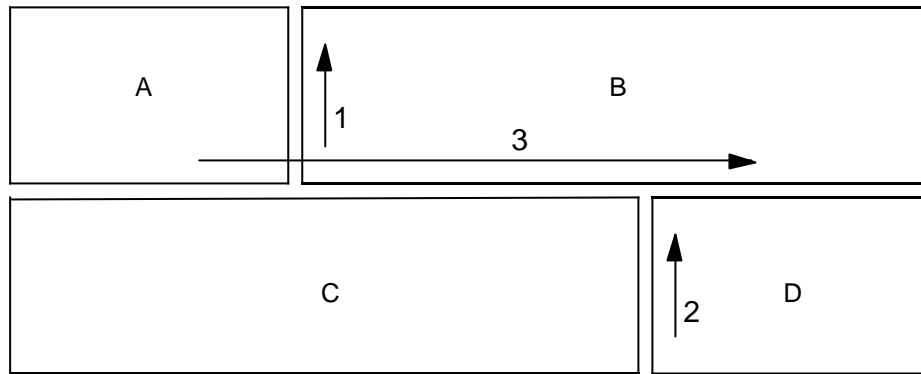
Figur 3.150 Typisk rækkefølge af hæftninger.

Svejserækkefølge

Ved flere svejsninger på samme konstruktion er svejserækkefølgen meget afgørende for, hvor store de resulterende svejsedeformationer bliver. Hvilken svejserækkefølge, der skal vælges for at reducere svejsedeformationerne, er meget afhængig af den enkelte konstruktions udformning. I det følgende er der givet nogle generelle betragtninger vedrørende svejserækkefølge og svejsedeformationer.

Som hovedregel bør svejsearbejdet udføres så tværkrympning af svejsesømme så vidt muligt kan ske frit.

På Figur 3.151 er der vist et grundlæggende eksempel på en anbefalet svejserækkefølge. For at reducere svejsedeformationerne i det pågældende tilfælde, bør de tværgående sømme A/B og C/D først svejses, uden at der er hæftet i den langsgående søm AB/CD. Derved kan udvidelser og sammentrækninger fra de første to svejsninger foregå frit, hvilket vil reducere udbulinger/svejsedeformationerne.

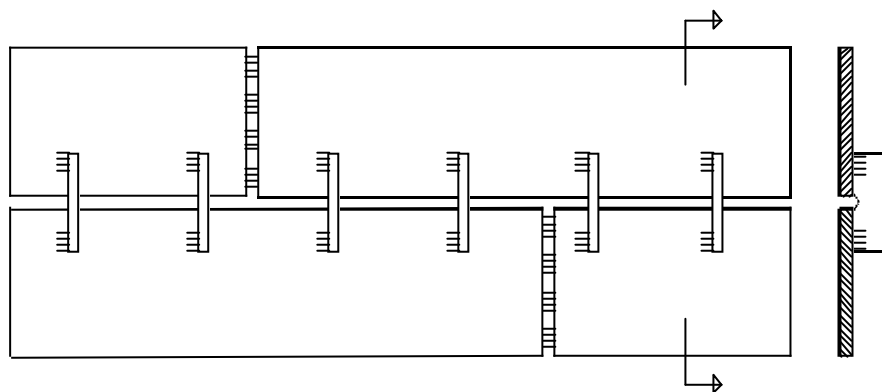


Figur 3.151 Eksempel på anbefalet svejserækkefølge.

For at opnå en bedre tilpasning af den langsgående svejsesøm AB/CD er det dog ofte ønskeligt, at denne søm er fikseret under svejsning af A/B og C/D.

Ved svejsning i tyndere godstykkelser kan man ophæfte alle tre svejsesømme, hvorefter den nævnte svejserækkefølge anvendes. Søm C/D svejses dog i modsat retning.

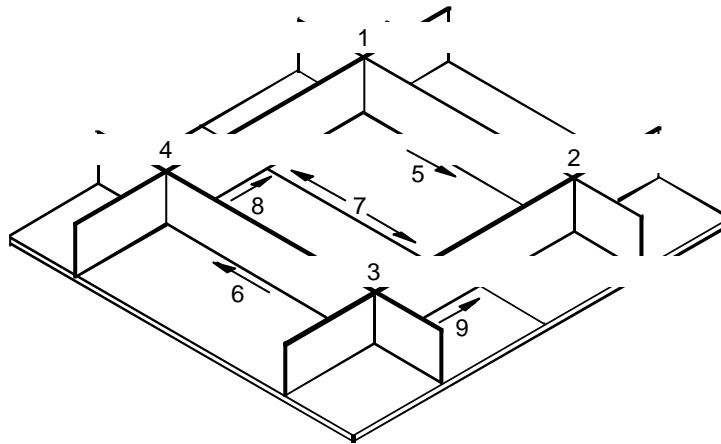
Ved svejsning i tykkere godstykkelser kan svejsningerne A/B og C/D hæftes, mens svejsningen AB/CD kan fikseres ved påsvejste beslag. Med anvendelse af beslag tillades der en mere fri tværkrympning under svejsning af A/B og C/D – se Figur 3.152.



Figur 3.152 Ved svejsning på store godstykkelser kan beslag anvendes til fiksering af svejsningen AB/CD under svejsning af A/B og C/D (se Figur 3.151).

I mindre godstykkelser kan svejsedeformationer i nogle tilfælde minimeres på bekostning af øgede svejse-spændinger. Det er i den forbindelse vigtigt at være opmærksom på den øgede risiko for revnedannelser, der forekommer som følge af tilstedeværelsen af øgede svejse-spændinger.

Figur 3.153 viser et eksempel på en svejserækkefølge, der reducerer svejsedeformationerne på bekostning af øgede svejse-spændinger.



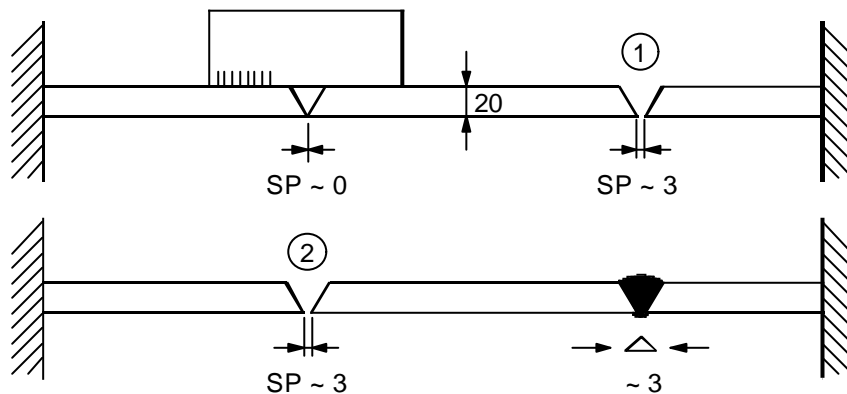
Figur 3.153 Eksempel på svejserækkefølge der reducerer svejsedeformationer på bekostning af øgede svejse-spændinger [5].

Det ses af den valgte svejserækkefølge, at også i dette tilfælde svejses stumpsømme før kantsømme, hvor disse sømme løber sammen.

Glideteknik

Ved den såkaldte glideteknik, der er kendt fra svejsning i stål, anvendes påsvejste beslag til at kontrollere fugetilpasningen af efterfølgende stumpsømssvejsninger.

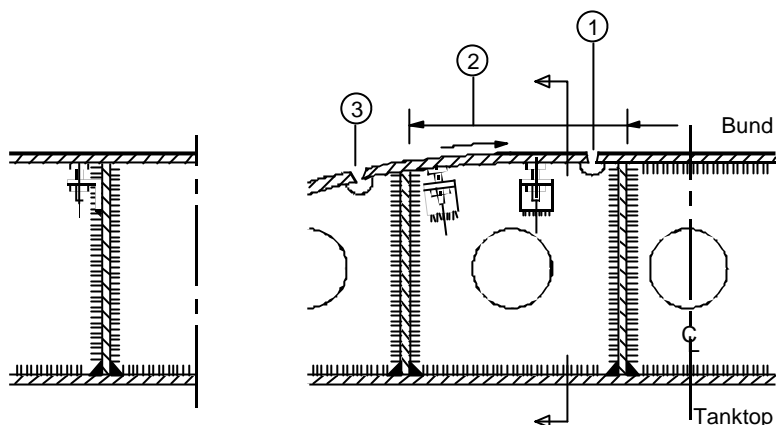
Princip: På Figur 3.154 er princippet for glideteknikken skitseret.



Figur 3.154 Princip for ”glideteknik”.

I eksemplet vist på Figur 3.154 skal to indspændte parallelle stumpsømme svejses. Beslaget øverst til venstre, svejses kun fast i den venstre side af fugen, hvorefter den højre stumpsøm svejses. Beslaget bevirker at der kan ske en fri tværkrympning og samtidig holdes vinkelknækket nede, så der fastholdes en god fugetilpasning før svejsning af den venstre stumpsøm. Når den højre stumpsøm er færdigsvejst hæftes den venstre stumpsøm, beslagene fjernes og sømme svejses færdigt.

Eksempel fra skibsværft: På Figur 3.155 ses et eksempel på anvendelse af glideteknikken ved svejsning af en dobbeltbund.

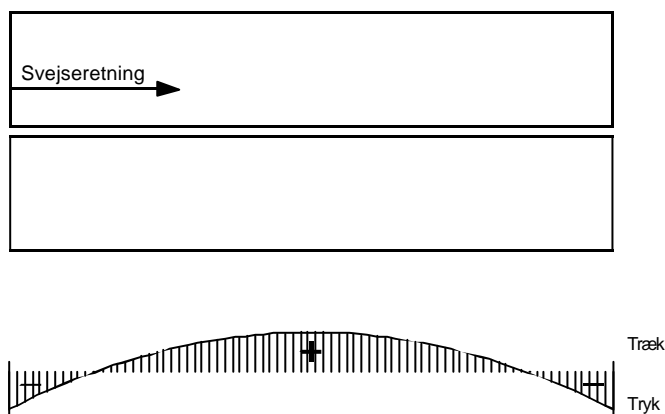


Figur 3.155 Eksempel på anvendelse af ”glideteknik”.

Først svejses den højre stumpsøm (1). Herved glider klædningspladen hen over bundens web'er uden at dobbeltbunden udsættes for kræfter, der kan deformere den. Fugetilpasningen sikres ved at bundpladen holdes nede af to påsvejste beslag og bolte. Herefter svejses kantsømmen (2) samt stumpsømmen (3).

Spændinger

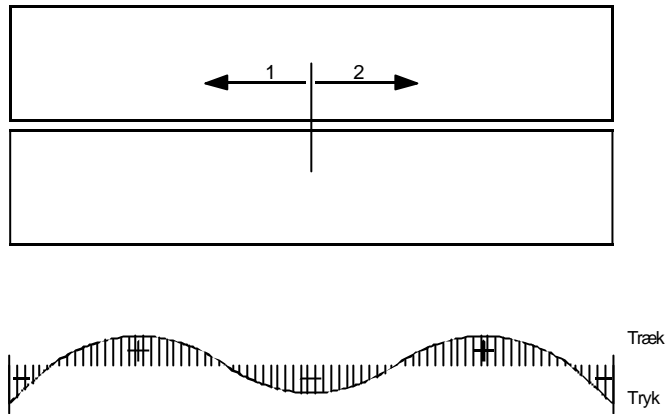
Figur 3.156 viser en typisk fordeling af tværspændinger i en svejst plade.



Figur 3.156 Tværspændinger i en svejst plade.

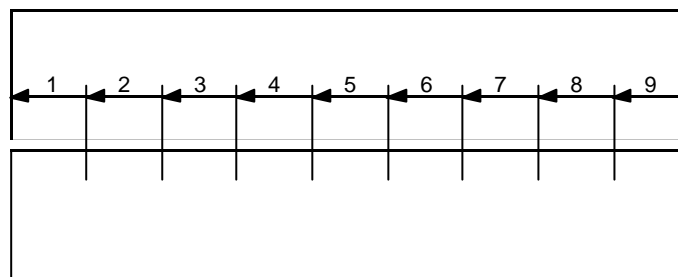
Tværspændingerne vist på Figur 3.156 kombineret med de langsgående spændinger vil typisk give anledning til udbulinger i tyndere plader.

Svejsning fra midten af pladen og ud giver en anderledes fordeling af tværspændingerne – se Figur 3.157.



Figur 3.157 Tværspændinger i en plade svejst som vist.

Svejsning med pilgrimsskridt som vist på Figur 3.158 kan anvendes til at reducere risikoen for især udbulinger. Fordelen ligger i, at der opstår en langt mere ensartet tværkrumning hen over svejse sømmen.



Figur 3.158 Svejsning med pilgrimsskridt.

Pilgrimsmetoden er uproduktiv, med mange skift med risiko for fejl og bør kun bruges i yderste konsekvens og kun ved bundstrengene.

3.14.7 SVEJSEPROCESSER

Svejsedeformationernes størrelse er meget afhængige hvilken svejseproces, der anvendes. Dette skyldes først og fremmest at svejseprocesserne svejser med forskellige energitætheder, hvilket også er beskrevet under kapitel 3.13 Styrketab.

Generelt gælder det, at jo større energitæthed der svejses med ved svejsestedet, jo mindre svejsedeformationer fås der.

Lasersvejsning udmærker sig i den forbindelse ved, at der typisk opnås forholdsvis små svejsedeformationer, hvilket skyldes processens høje energitæthed ved svejsestedet. Ved lasersvejsning opnås der typisk en dyb og smal indbrænding, hvilket bevirker at tværkrumningen i svejsningen foregår mere ensartet i hele godstykkelsen, og dermed fås et forholdsvis lille vinkelknæk .

Størrelsen af tværkrympningen er ligeledes typisk mindre ved lasersvejsning end ved andre svejseprocesser, pga. at varmetilførslen er mindre.

I modsatte ende af skalaen ligger TIG- og MIG-svejsning, hvor der typisk fås større svejsedeformationer pga. en mindre energitæthed i lysbuen og en større varmetilførsel.

Ved plasma-keyhole-svejsning er svejsedeformationerne (især vinkelknækket) forholdsvis små, pga. den indsnævrede lysbue og dermed større energitæthed i lysbuen. Ved plasma-melt-in-svejsning er svejsedeformationerne i højere grad sammenlignelige med TIG- og MIG-svejsning.

3.14.8 REFERENCER

Litteratur

- [1] **Hansen, B.**
Svejsespændinger og svejsedeformationer, Formelsamling
Publikation K 72001/15 2. udgave, Svejscentralen, 1973.
- [2] **Hansen, B.**
Svejsedeformationer og svejsespændinger
Publikation 68.02, Svejscentralen, 1968.
- [3] **Verhaeghe, G.**
Predictive formulere for weld distortion – a critical review
TWI, 1999.
- [4] **Schotti, P. R.**
Bestemmelse af krympekræfter i aluminium
Afgangsprojekt, Ingeniørhøjskolen Københavns Teknikum, 1999.
- [5] **Kongshavn, E.**
Forholdsregler til redeuktion af svejsespændinger og –deformationer
Kompendiemateriale, Svejscentralen, 1987.

Tekniske rapporter

SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0002-01, *Krympninger og deformationer ved svejsning af aluminium.*

SASAK-RAP-VA-AKS-DTU-0003-00, *Simulering af svejsedeformation af et 2-D T-profil*

SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0004-00, *Krympninger og deformationer ved svejsning i aluminium – del 2.*

SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0006-01, *Krympninger og deformationer ved svejsning i aluminium – formelsamling.*

SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0008-00, *Svejsedeformationer på model A1 og A2.*

SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0009-01, *Deformationer ved simultan, énsidig og dobbeltsidig TIG-svejsning i aluminium.*

3.15 RETNING AF ALUMINIUM

3.15.1 INTRODUKTION

Som udgangspunkt bør man forsøge at undgå uacceptable store svejsedeformationer ved at anvende egnede svejserækkefølger, forspænde emner, reducere varmetilførslen m.m. Allerede i designfasen bør man være opmærksom på at minimere svejsedeformationer, eksempelvis ved at placere svejse sømmene passende steder – se afsnit 3.14.

I de tilfælde hvor man ikke kan undgå uacceptable store svejsedeformationer, er der forskellige muligheder for efterfølgende at rette en aluminiumskonstruktion op. Metoderne kan deles op under hhv. mekanisk retning og varmretning.

3.15.2 MEKANISK RETNING

Mekanisk retning i aluminium kan sammenlignes med mekanisk retning i stål. De to væsentligste metoder er hamring og presning.

Hamring

Hamring er en hurtig og effektiv metode til at rette svejsedeformationer op med. Derudover vil hamring som oftest reducere størrelsen af spændinger omkring svejsefugen.

Man skal dog være opmærksom på risikoen for revner især ved hamring af bundstrengene. Af andre ulemper kan det nævnes, at hamring afsætter mærker de steder, hvor der hamres, og at det er forbundet med en kraftig støj

Eksempel fra SASAK-projekt:

Ved MIG-svejsning af 2 stumpsømme på store 2,7x4 m paneler i 5 mm godstykkelse, blev pilehøjderne reduceret ved hamring fra gennemsnitlig ca. 12 mm til gennemsnitlig ca. 2 mm – se Figur 3.159. Se evt. SASAK-rapporten: SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0008-01.



Figur 3.159 Svejste plader med sprædd, der efterfølgende blev rettet op ved hamring.

Presning

Regulære udbøjninger af profiler eller vinkelknæk kan i nogen tilfælde rettes op i en presse. Hvis eksempelvis en bøjet plade skal rettes op, skal pladen kontrabøjes tilstrækkelig i pressen, så pladens elasticitet efter udtagning af pressen får pladen til at rette sig op til at være lige.

Sikkerhedsmæssigt skal man være opmærksom på, at genstande, der ikke er fastlåste, kan komme flyvende ud af pressen.

3.15.3 VARMRETNING

Varmretning i aluminium adskiller sig noget fra varmretning i stål, hvilket især skyldes den noget større varmeudbredelseshastighed i aluminium. Ved opretning af svejsedeformationer i aluminium er det mest anvendelige TIG- og MIG-svejsning.

For at varmretning af aluminium skal lykkes, kræver det en god erfaring med den forestående retteopgave, og det kan i visse tilfælde være nødvendigt først at udføre praktiske forsøg på prøveemner, inden varmretningen på den egentlige konstruktion påbegyndes.

Princip ved varmretning

Ved en lokal opvarmning på en metalplade, vil det opvarmede område forsøge at udvide sig. Med stigende temperatur falder flydespændingen imidlertid, og pga. det omkringliggende koldere materiale forekommer der i en eller anden udstrækning en stukning af det opvarmede materialet. Efterhånden som materialet nedkøler trækker det sig sammen, hvilket giver anledning til store spændinger omkring det nedkølet område. Når spændingerne overstiger materialets flydespænding deformeres konstruktionen.

Ved varmretning udnyttes i princippet de samme temperatur- og spændingsforhold, der forårsagede svejsedeformationerne.

For at opnå den største retteeffekt er det vigtigt, at der forekommer en hurtig koncentreret opvarmning gennem en passende varmetilførsel og en efterfølgende hurtig nedkøling. Dette giver den største retteeffekt, hvilket kan opnås med bl.a. TIG- eller MIG-svejsning.

MIG og TIG

MIG-svejsning er den mest effektive metode til varmretning i aluminium, da processen giver en koncentreret varmpåvirkning dvs. hurtig opvarmning og hurtig nedkøling i et lille område, hvilket resulterer i en forholdsvis stor retteeffekt. Ulempen er, at man i mange tilfælde ikke kan acceptere svejse sømmen, hvilket betyder, at den efterfølgende skal fjernes evt. ved slibning.

TIG-svejsning anvendes ligeledes til varmretning, selvom der ikke i samme grad er muligheder for at opnå en koncentreret varmpåvirkning som ved MIG-svejsning.

Ved TIG-svejsning anvendes der ofte tilsatsmateriale af hensyn til risikoen for revner, og den resulterende svejse søm skal ligeledes fjernes, hvor den ikke kan accepteres.

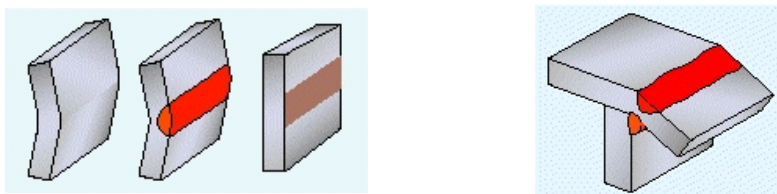
Især varmetilførselsniveau (J/m) ved både TIG- og MIG-svejsning er meget afgørende for retteeffektens størrelse. Hvis varmetilførslen bliver for stor, opvarmes et stort område og den efterfølgende sammentrækning ved afkøling bliver mere ensartet over et større område, hvilket resulterer i en ringe retteeffekt. Hvis varmetilførslen derimod bliver for lille, opnås der ikke tilstrækkelig udvidelse og efterfølgende sammentrækning, og retteeffekten bliver derfor ligeledes lille.

Den optimale varmetilførsel, som resulterer i den maksimale retteeffekt, afhænger meget af:

- Legering. De forskellige aluminiumlegeringer har især forskellige varmeledningsevner. For 6000-serien (de ekstruderbare AlMgSi-legeringer) gælder ydermere, at varmeledningen varierer med modningsgraden (leveringstilstanden). Se også afsnit 3.3.
- Pladetykkelse

Vinkelknæk

Hvis vinkelknæk skal rettes op, varmpåvirkes der på bagsiden af den oprindelige svejsning enten med en TIG- eller en MIG-brænder, som vist på Figur 3.160. Den overflødig svejsning på bagsiden fra varmretningen kan om nødvendigt efterfølgende fjernes ved slibning. Som nævnt ovenfor er varmetilførslen i den forbindelse meget afgørende for vinkelknækkets størrelse.

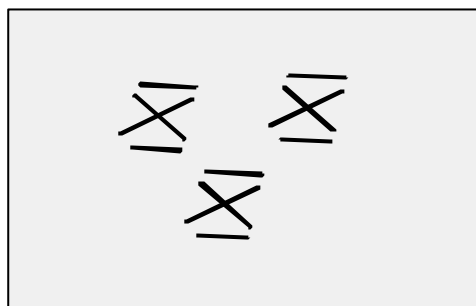


Figur 3.160 Eksempler på varmretning af stump- og kantsømme.

Buler

Buler kan være uønskelige af kosmetiske grunde, eller uacceptable af strukturelle grunde. Således vil der ofte være kriterier hos skibsklassifikationsselskaberne for maksimale buler på skibskonstruktioner.

Ved opretning af buler kan der ligeledes anvendes både TIG- og MIG-svejsning. Placeringen og størrelsen af passende svejsninger afhænger af en kompleks sammenhæng mellem bulernes størrelse, bulernes placering, pladetykkelse m.m., og det bestemmes som regel på baggrund af tidligere erfaringer med varmretning af den konkrete konstruktion.



Figur 3.161 Eksempel på placering af MIG-svejsning til opretning af buler.

Svejsninger på udbulinger kan evt. udføres som mindre krydsende svejsninger i passende omfang – se Figur 3.161. Der svejdes i den forbindelse på den side, der buler ud (konvekse side).

Gasbrænder

Ved varmretning af stålkonstruktioner er det i visse tilfælde muligt at anvende gasbrændere til opvarmning med efterfølgende bratkøling med vand. Denne teknik er mindre egnet til aluminiumskonstruktioner, da man med en gasbrænder uundgåeligt vil opvarme et forholdsvis stort område, hvilket pga. den forholdsvis hurtige varmeudbredelse i aluminium hurtigt bliver endnu større. Hvis det opvarmede område bliver for stort, bliver stukningen og den efterfølgende sammentrækning ensartet over et stort område, og retteeffekten bliver lille.

I sjældne tilfælde kan en gasbrænder dog anvendes til opretning af buler, ved at opvarme gennem en plade med et passende antal huller. Med denne teknik opnås en mere koncentreret opvarmning, hvilket resulterer i en større retteeffekt. Der varmes i det tilfælde på den side, der buler ud (konvekse side). Teknikken kræver stor erfaring med den forestående retteopgave.

Styrketab

Ved varmretning skal man være opmærksom på at styrkeegenskaberne i det varmepåvirkede område i en vis udstrækning vil være reduceret. Modningshærdbare legeringer (6000- og 7000-serierne) mister styrke, når temperaturen overskrider ca. 270°, mens valselegeringer (ikke-modningshærdbare - 1000, 3000 og 5000-serierne) mister styrke, når temperaturen overskrider ca. 370°. Man bør derfor så vidt muligt begrænse størrelsen af de områder, der opvarmes til mere end disse temperaturer, hvis styrkeegenskaberne i disse områder ønskes bevaret.

Ved gennemvarmning for stukning af områder med buler må man regne med, at styrken i de varmede zoner er faldet til blødgødet tilstand i fuld tykkelse, altså svarende til en svejsning.

Ved linievarmer med MIG eller TIG skal man regne med, at der sker et styrketab i en del af pladetykkelsen. Det kan dreje sig om ca. halv pladetykkelse for legeringer i 5000-serien, hvis retningen vel at mærke bliver udført korrekt. Orienterende forsøg på FORCE på 5 mm plade har vist, at der ved en maksimal retteeffekt opstod en meget lille, smeltet zone i overfladen, mens maksimaltemperaturen på bagsiden nåede i størrelsesorden 150-200°C.

Man kan risikere at stå i et dilemma mellem at skulle acceptere enten lokale, delvise styrketab eller deformationer.

Øvrige ulemper

En anden ulempe ved varmretning især med MIG-svejsning er, at der pålægges svejsmetal, der om uønsket efterfølgende skal fjernes. Hvis svejsningerne fjernes ved slibning vil der stadig være spor og mærker tilbage på konstruktionen fra slibearbejdet.

Endeligt må det generelt siges, at varmretning er en kompliceret affære, der kræver erfaring med den retteopgave, man står overfor.

3.15.4 VARMRETNING MED TIG-BRÆNDER – ORIENTERENDE FORSØG

I forbindelse med SASAK-projektet blev der udført orienterende forsøg med varmepåvirkning oven på forsøgsplader med en TIG-brænder. Se SASAK-rapporten: SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0007-01

Forsøgsemnerne var plader i legeringen AlMg₃ (5754) med dimensionen 5 X 200 X 500 mm

Forsøgsemnerne blev påvirket med strømstyrker på 80, 100 og 125 ampere med fremføringshastigheder varierende mellem 100 og 800 mm/min i pladernes længderetning.

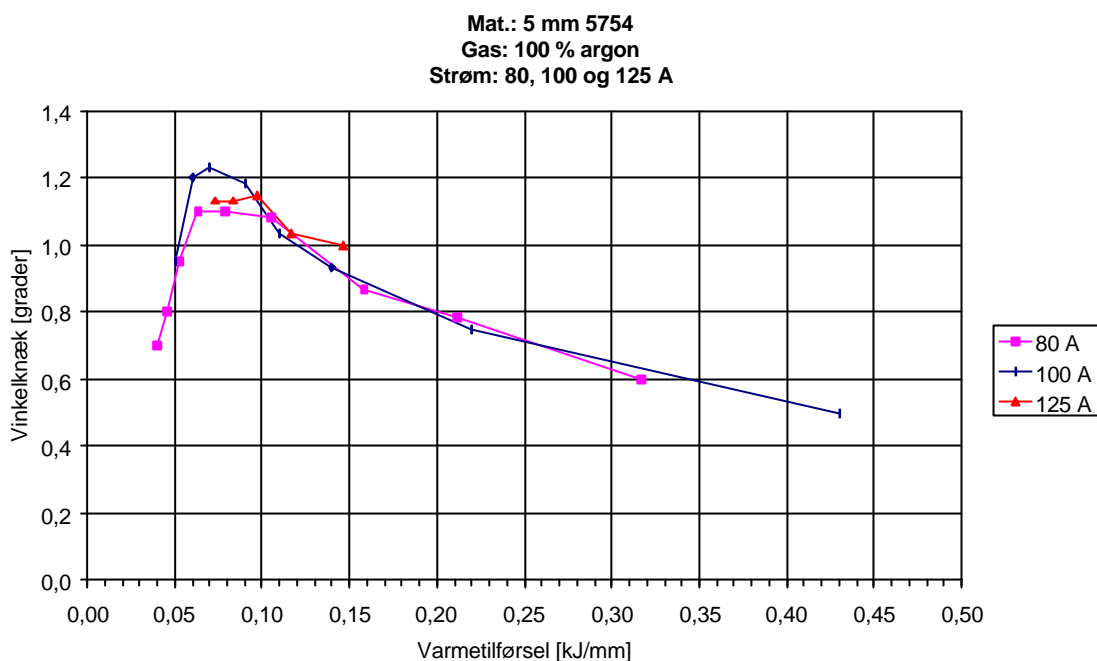
Vinkelknækkene i forsøgspladerne, der er vist på Figur 3.162, blev målt med en speciel egnet vinkelmåler.

Varmetilførsels indflydelse

Resultaterne viste, at det især er varmetilførslen, der er bestemmende for hvor stor retteeffekten bliver, og at strømstyrken i den forbindelse er mindre afgørende.

Dette resultat hænger godt sammen med andre erfaringer opnået i forbindelse med arbejdet med svejsedeformationer under projekt varmepåvirkning. Det afgørende for hvor stort et vinkelknæk bliver, er den temperaturforskelle som materialet oplever i tykkelsesretning.

Hvis materialet opvarmes for kraftigt, bliver temperaturen mere ensartet i godstykkelsens retning, og den efterfølgende sammentrækning på tværs af pladen blive ligeledes mere ensartet, hvilket giver et lille vinkelknæk .



Figur 3.162 Vinkelknæk i 5 mm AlMg3 efter varmpåvirkning fra TIG-brændere med 80, 100 og 125 A med varierende varmetilførsel.

Hvis varmetilførslen derimod bliver for lille, bliver pladen ikke opvarmet tilstrækkelig, hvilket ligeledes giver et lille vinkelknæk .

Det kan derfor med rimelig sikkerhed konkluderes, at retteeffekten har et maksimum ved et bestemt niveau af varmetilførsel.

Kort sagt handler det om at finde en passende varmetilførsel, så der er en passende temperaturforskel i godstykkelsens retning, hvilket giver en efterfølgende uensartet sammentrækning i godstykkelsens retning, og dermed et større vinkelknæk .

Ifølge denne undersøgelses resultater vil man ved varmpåvirkning med en TIG-brænder på en 5 mm tyk aluminiumsplade i legeringen AlMg3, opnå den største retteeffekt med en varmetilførsel i området 0,07 til 0,1 kJ/mm.

Legeringens indflydelse

For at opnå en god retteeffekt er det afgørende, at der opnås en stor termisk gradient (temperaturforskel) ned gennem pladens tykkelse. Dette hænger som beskrevet ovenfor sammen med svejsedata. Den opnåede termiske gradient hænger imidlertid også sammen med den termiske ledningsevne.

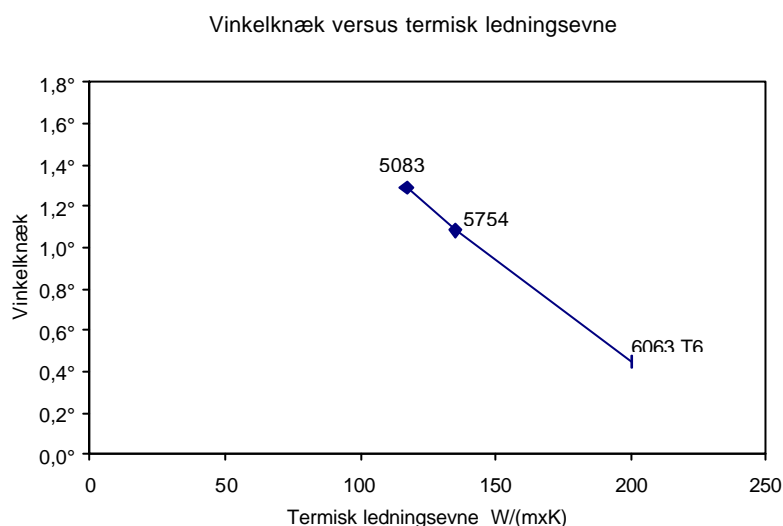
Jo højere termisk ledningsevne, desto sværere bliver det at få en mærkbar retteeffekt – pladen bliver for nemt gennemvarm. Omvendt nytter det ikke noget, hvis kun et meget lille område i overfladen bliver varmet op. Der skal være et vist tværsnit, som varmes op.

Den termiske ledningsevne for de mest anvendte valselegeringer i 5000-serien ligger relativt lavt i forhold til renaluminium og legeringerne i 6000-serien. For 6000-serien gælder i øvrigt typisk, at den termiske ledningsevne varierer selv inden for den samme legering, afhængigt af leveringstilstanden. En kvalitet T6 kan således have 25% lavere varmeledningsevne end en blød kvalitet.

Øvrige faktorer: Den termiske udvidelse har også betydning for retteeffekten. Den er til gengæld temmeligt ens for alle aluminiumslegeringerne. Det samme gælder den specifikke varmekapacitet. Styrken for den enkelte legering ved forskellige temperaturer spiller også ind.

Orienterende forsøg er gennemført for at sammenligne retteeffekten for forskellige legeringer med det sæt data, som viste sig optimalt for 5754 i 5 mm tykkelse.

På Figur 3.163 er retteeffekten (vinkelknækket) sammenstillet med den termiske ledningsevne, idet alle andre parametre er holdt konstant. Det fremgår, at retteeffekten som tidligere nævnt falder, når den termiske ledningsevne stiger.



Figur 3.163 Sammenstilling af vinkelknæk som funktion af termisk ledningsevne. Pladetykkelse: 5 mm. Strøm: 100 amp. Fremføringshastighed: 600 mm/min.

Figuren skal dog også aflæses med et gran salt: De anvendte data er optimerede for legering 5754. Det er ikke sikkert, at de ligeledes er optimale for legering 6063. Det er muligt, at en anden strøm og fremføringshastighed vil give en (lidt) større retteeffekt

3.15.5 REFERENCER

Tekniske rapporter:

SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0007-01, *Retning af aluminium*

SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0008, *Svejsedeformationer påmodel A1 og A2*

3.16 FUGEFORBEREDELSE VED SVEJSNING

Dette afsnit behandler skæring i almindelighed og fugeforberedelse i særdeleshed. Svejsefugers form og kravene til tolerancer hænger nøje sammen med valget af svejsemetode samt økonomi.

3.16.1 GENERELT OM SKÆRING OG FUGEFORBEREDELSE

En generel sammenligning af de almindelige kantbearbejdningsmetoder er sammenfattet i Tabel 3.37.

Tabel 3.37 Sammenligning mellem skæreprocesser.

Skæremetode	Egnethed
Flammeskæring	Ikke mulig i aluminium
Plasmaskæring	Meget velegnet
Mekanisk skæring	Meget velegnet
Laser skæring	Anvendelig
Abrasiv vandstråleskæring	Anvendelig

Skæremetode	Skærehastighed (mm./min.)		Kommentar
	t = 2 mm	t = 40 mm	
Plasmaskæring	> 6000	1200	Ar/H ₂ , 240A
Laserskæring	5000	ikke mulig	CO ₂ , 2600W
Abrasiv vandstråle	800	80	DIAJET

Savning og andre mekaniske skæremetoder er de mest almindelige ved skæring i aluminium. Aluminium er almindeligvis nemt og pænt skåret med mekaniske processer, forudsat udstyret er i en god stand.

Selv om fugeforberedelsen normalt udføres tørt med mekanisk bearbejdning, hvor det overhovedet er muligt, kan det være nødvendigt, at tilføre et smøremiddel. Skærevoks kan ikke anbefales, da det er svært at fjerne bagefter, når der skal svejses i fugen. I ethvert tilfælde er det korrekte værktøj med den rigtige spånvinkel/friskærevinkel forskellen mellem god og dårlig overflade på fugen.

Optimal mekanisk skæring i aluminium ligner på mange måder skæring i træ. Mange træskæremaskiner af passende kvalitet og styrke kan med fordel anvendes til fugeforberedelse i aluminium.

Inden for termisk skæring er det kun laser- og plasmaskæring, der kan anvendes til skæring i aluminium. Flammeskæring kan ikke anvendes til skæring i aluminium. Laserskæring i aluminium kan være svær pga. refleksioner fra aluminiumsoverfladen. Udskæring af aluminium med laser er normalt kun til mindre emner pga. prisen.

Plasmaskæring er hurtig og præcis, men udstyret er relativt dyrt. Udgiften til plasmaskæredestyret kan dog hurtig tjenes hjem, hvis der skal produceres mange ens emner eller der skal skæres i tykke emner, 25 mm. eller derover, samt ved parketskæring (mange tynde aluminiumsplader samtidig). Hvor kompliceret geometri skal udskæres kommer plasmaskæring hurtig til sin ret.

Man må ikke glemme, at savning eller automatisk/kontur styret fræsere, der bliver håndteret rigtigt kan være mere økonomiske end plasmaskæring.

Fugeforberedelse skal ofte udføres på emner, der er skåret på mål. For pladetykkelser under 3-5 mm er en I fuge normal og den billigste. Over 5 mm vælges der ved MIG- og TIG-svejsning en V, X eller J fuge.

Mekanisk fugeforberedelse kan udføres i en mængde variationer: high-speed fræsere, el-høvl, niplere samt forskellige save. Udstyret skal vælges så det er egnet til opgaven. Normalt anbefales kraftigt industriværktøj, da det kan arbejde længere tid ad gangen.

Luftforsynet værktøj har en høj effektivitet, men der skal tænkes på, at værktøjet ofte kræver, at der tilsættes olie i luften til at smøre udstyret. Olieforurening fra luftværktøjet kan være med til at forårsage porer i svejsningen.

Anvendelsen af rystepudser eller brug af vinkelsliber er normalt ikke at foretrække. Sandpapiret eller skiverne skal være beregnet for opgaven for ikke at give afsmitning på fugefladen. Endvidere skal man huske på, at løsevne sandkorn fra sandpapiret vil lægge sig omkring arbejdsstedet og måske give anledning til ridser på andre plader. Alt sand og forureninger fjernes fra aluminiumsoverfladen inden svejsning. Sandet og forureninger vil give mulighed for indeslutninger og porer i svejsningen.

Hvor en grov skæreooperation efterlader en ru overflade kan en sekundær operation være nødvendig for at give en tilstrækkelig glat overflade der er fri for oxider før svejsning.

3.16.2 LASERSKÆRING

Laserskæring er i dag en veletableret proces i industrien. Der er generelt to forskellige typer laserskæresystemer til skæring i aluminium. CO₂ laseren er den mest udbredte og anvender en blanding af (CO₂, He og N₂) som lasergenererende medium. Alternativet til CO₂ laseren er faststoflaseren, hvor det lasergenererende medie er en glasstav indeholdende Nd:YAG.

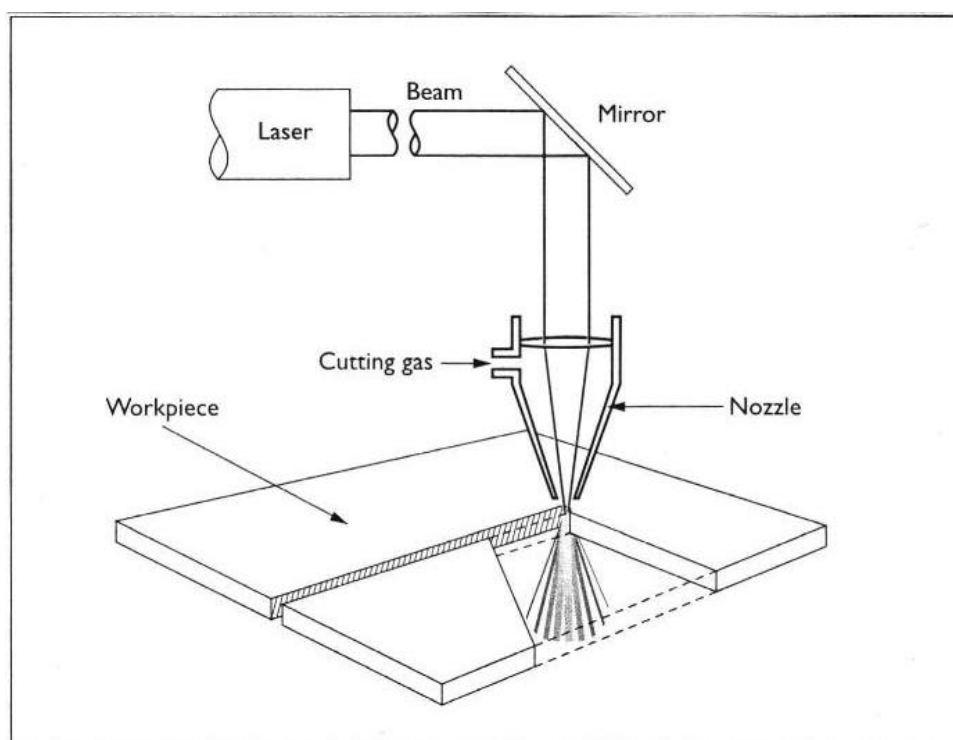
CO₂ lasere i effektklassen 500W – 3000W er de mest anvendte til skæring i næsten alle materialer. Nd:YAG-laseren kan skære i aluminium, men anvendes for det meste til svejse og graveringsarbejde pga. den mindre effekt der typisk ligger mellem 100W-500W. Nd:YAG-laseren sælges i dag i effekter helt op til 5000W.

Skæring i aluminium med CO₂ lasere er forbundet med besvær pga. aluminiums refleksioner og høje varmeledningsevne. Anodiseret aluminium er lettere at skære, fordi den anodiserede overflade ikke

reflekterer laserlyset således, at varmen afsættes i overfladen. Aluminiumslegeringer er ligeledes lettere at skære med laser end ren aluminium. For at skære økonomisk forsvarligt i aluminium skal der anvendes en CO₂ laser med en effekt på over 2000W og en god "mode". Linsens brændvidde skal være kort ved skæring i tynde plader for at få så kraftigt et brændpunkt så mulig. Den maksimale pladetykkelse i aluminium der i øjeblikket kan skæres ligger på omkring 6-8 mm.

Laserskæring - procesbeskrivelse

En laserstråle er en stråle af lys med én veldefineret, fast bølgelængde, som ved fokusering indeholder en høj energiintensitet. Absorberes denne energi i en pladeoverflade genereres en høj temperatur, som kan bruges i forbindelse med svejsning eller skæring. Lyset udsendes fra det laser-producerende materiale, normalt enten CO₂-gas eller en Nd-YAG-stav, og ledes ned i skærehovedet.



Figur 3.164 Skematisk fremstilling af laserskæreprocessen.

Ved CO₂-laserskæring ledes strålen ved hjælp af spejle gennem lukkede rørsystemer, mens der ved YAG-laserskæring kan anvendes spejle eller optiske fibre.

Skærehovedet består af et gaskammer afgrænset af en linse i den ene ende og en gasdysse i den modsatte. Laserlyset fokuseres af linsen ned gennem hullet i dysen til en lille brændplet. Brændpletten er normalt 5 mm under dysen. Brandpletten smelter og fordamper materialet medens gassen skal blæse det smeltede materiale væk og derved give et spor i pladen når den eller skærehovedet flyttes.

Valg af gasser til laserskæring (skæregas)

Valget af skæregas afhænger af, hvilket materiale der skal skæres i, krav til skærekvalitet og skærehastighed samt den totale skæreøkonomi.

Aluminium kan skæres med både nitrogen og oxygen som skæregas uden synderlig forskel i skærehastigheden. Umiddelbart skulle man forestille sig, at oxygen kunne skære hurtigere i aluminium, da det er en aktiv gas, men det er ikke tilfældet. Grunden til oxygen's negative effekt på skærehastigheden ligger i det høje smeltepunkt for slaggen. Aluminiums slagge er aluminiumsoxid med et smeltepunkt på 2072°C. Aluminiums oxiden danner en hinde omkring skærefronten og derved hindrer skæreoxygenet i at få kontakt med det rene aluminium nedenunder. På grund af turbulensen i skæresporet brækkes oxidfilmen hele tiden så skæreoxygenet kan komme til det rene aluminium, men det reducerer faktisk skærehastigheden.

Snitkvaliteter ved laserskæring

Skæring med et lavt oxygentryk på skæregassen (under 6 bar) anvendes undertiden til aluminium. Laserstrålen skal fokuseres på overfladen af pladen. Standard oxygen anvendes, da det ikke giver højere skærehastighed at anvende en specielt ren gas. Skæring med lavt oxygentryk giver en ru overflade med skæreskæg.

Ved anvendelse af højtryksskæring med enten nitrogen eller oxygen kan der opnås skæresnit, der er frit for skæreskæg. Normalt anvendes nitrogen til aluminiumslegeringer og oxygen til ren aluminium. Overfladeruheden på skæresnittet er altid højere når oxygen anvendes i stedet for nitrogen.

Når der anvendes højtryksskæring skal fokuspunktet flyttes ned til bunden af pladen.

Kapaciteter og skærehastigheder

Typiske CO₂ – laserskærehastigheder i legering 6082 (ISO: Al SiMgMn / DIN: AlMgSi1) er vist i Tabel 3.38 fra Firmaet Bystronic LASER AG.

Tabel 3.38 Typiske skærehastigheder ved CO₂-laserskæring (Bystronic).

Materiale tykkelse (mm)	Laser effekt (W)	Dyse diameter (mm)	Gastryk (bar)	Gas	Skærehastighed m/min	
					Maksimum	Minimum
1.0	2811	1.5	8.0	N ₂	8.0	5.6
2.0	2811	1.5	8.0	N ₂	5.0	3.5
3.0	2811	1.75	10.0	N ₂	2.6	1.8
4.0	2811	2.0	10.0	N ₂	2.0	1.4

5.0	2811	2.0	11.0	N ₂	1.00	0.70
6.0	2811	2.0	11.0	N ₂	0.65	0.46

x.x er et grænseområde, hvori der frembringes grater på undersiden af skæresnittet.

Krav til efterbearbejdning ved laserskæring

Laserskårne emner vil altid have en fortykket oxidfilm på snitfugen, som skal fjernes ved en mekanisk proces. Denne bearbejdning skal udføres således at jernafsmiining og forhøjet temperatur undgås, da disse vil forårsage henholdsvis galvaniske elementer og nye fortykkelser i oxidfilmen.

3.16.3 PLASMASKÆRING

Plasmaskæring har nu været anvendt i industrien i over halvtreds år, og har gennemlevet en stor udvikling. I starten var plasmaskæring den eneste mulighed for termisk skæring i aluminium, idet flammeskæring ikke kan anvendes. De første plasmaskærelæg anvendte argon med tilsætning af hydrogen eller nitrogen alt efter hvilket materiale der skulle skæres i.

I 1963 kom der en revolution i hele plasmaskæreteknologien, da der kunne tilbydes udstyr, der anvender trykluft som plasmagas. Lige siden trykluft kunne anvendes til plasmaskæring er priserne faldet drastisk på de håndholdte plasmaskæremaskiner. De billigste udstyr til håndskæring har således kunne købes fra ca. 5000 kr. (pris i 2001). Med så billige priser blev processen meget hurtig kendt og populær.

Desværre er trykluft en dårlig plasmaskæregas med hensyn til miljøet, idet den giver store mængder nitroøse gasser samt en stor røgdudvikling. Trykluft er ikke særligt egnet til aluminium, da snitkanten bliver kraftigt oxideret. Udover gas og røg fra processen er støj en væsentlig faktor i miljøvurderingen. Støjniveauer på 120 – 130dBA er ikke ualmindelige. Støj, røg samt UV-stråling som også kommer fra processen bliver reduceret ved at skære aluminiumspladerne neddykket i vand. Som miljøforanstaltning er der i de senere år kun installeret plasmaskæremaskiner i forbindelse med skærebord i hvilke aluminiumspladerne kan skæres under vand.

Trods små mangler i processen er plasmaskæring i al udskæring fra tynde pladetykkelser op til omkring 150 mm.

Hvad er plasma

Ordet plasma stammer fra græsk og betyder ”det frembragte” eller ”form”. Plasma betegnes som den fjerde tilstand ud over de tre kendte tilstandsformer:

- Fast
- Flydende
- Gasformigt

For at forklare fænomenet nærmere kan vi tage vand som eksempel (Tabel 3.39).

Tabel 3.39 Forskellige tilstandsformer for vand.

4	Plasma, ioniserbar	9000°C	Ionisering
3	Gasformig, damp	4000°C	Spaltning
		100°C (373K)	Kogepunkt
2	Væske, vand	0°C (273K)	
1	Fast form, is		Frysepunkt

Plasmatilstanden: Et atom har en kerne opbygget af protoner og neutroner. Kernen har en vis positiv elektricitetsladning og omgives af et antal elektroner, som tilsammen har samme elektricitetsladning som kernen, men med omvendt tegn. Elektronerne har altså negativ elektricitetsladning.

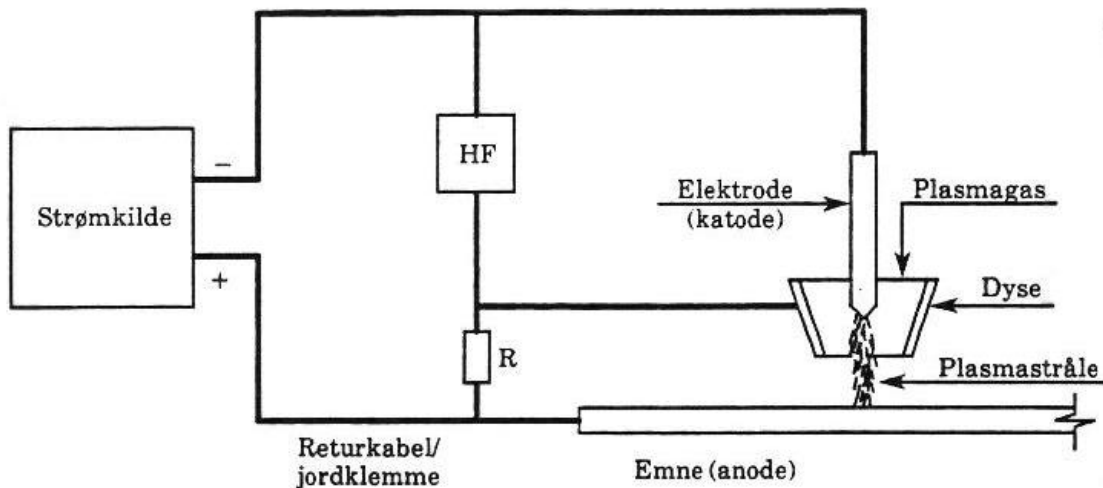
Når en gas overgår til plasmatilstanden frigøres elektroner fra kernen. De dannede frie elektroner og positive ioner gør, at vi siger gassen er ioniseret. Dermed bliver gassen elektrisk ledende, hvilket er det afgørende for plasmaskæreprocessen.

Plasmaskæreudstyret

Udstyr til plasmaskæring omfatter:

- Strømkilde (jævnstrøm/ pulserende jævnstrøm)
- Højfrekvensgenerator (til frembringelse af pilotlysbuen)
- Kontrolenhed (for strømstyrke og gastilførsel)
- Brænder

Den principielle opbygning af plasmaskæreudstyr er skitseret på **Figur 3.165**.



Figur 3.165 Plasmaskæreudstyr – principskitse.

Plasmaskærebrænderen

Brænderen til plasmaskæring kan være opbygget efter to principper afhængigt af den benyttede skæregas - henholdsvis for **oxiderende gasser** og **ikke oxiderende gasser**.

Brænderen for **oxiderende gasser** er opbygget med en flad katode af kobber med en indsats af zirkonium/ zirkoniumligende (hafnium) materialer.

De oxiderende gasser vil typisk være:

- Trykluft (ren og uden vand/olie)
- Oxygen.

Brænderen for **ikke-oxiderende gasser** er normalt opbygget med en spids katode af wolfram, som dog kan være flad ved store strømstyrker. Wolframet i katoden kan ikke tåle oxygen ved høje temperaturer.

Af ikke-oxiderende plasmagasser kan nævnes:

- Nitrogen
- Nitrogen / hydrogen blandinger
- Argon (bruges dog aldrig alene pga. dårlig varmeledning)
- Argon / hydrogen
- Argon / nitrogen / hydrogen
- Metan (naturgas), propan

Gasserne omtales mere udførligt i det følgende.

Plasmaskæring med vandindsnøring

I forbindelse med skæring med både oxiderende og ikke oxiderende gasser er der på større anlæg mulig at tilsætte vandindsnøring omkring plasmastrålen. Vandindsnøringen kan så at sige komprimere plasmastrålen. Plasmastrålen bliver ved vandindsnøring ”varmere” fordi den samme energi skal igennem et mindre hul.

Vandindsnøring bliver brugt for at få en langt bedre skærekvalitet sammen med trykluft eller nitrogen. Vandindsnøringen har samme effekt på snitkvaliteten, som hvis der blev skåret med hydrogen.

Valg af gasser til plasmaskæring

For at opnå de højeste skærehastigheder og god skærekvalitet er det vigtigt, at plasmastrålen har et højt energiindhold og giver en god varmeledningsevne til metallet, der skal skæres. Ligeledes skal gassen have høj kinetisk energi, som kan drive det smeltede materiale ud af spalten.

Høj kinetisk energi opnås ved, at anvende en tung gas som f.eks. argon.

Tabel 3.40 Oversigt over de normalt anvendte gasser.

	N₂/N	H₂/H	O₂/O	Ar	He	Ne
Ionisations-energi (eV)	15,5/14,5	15,6/13,5	12,5/13,6	15,7	24,5	21,0
Dissociations-energi (eV)	9,8	4,4	5,1			
Atomvægt (u)	14	1	16	40	4	20
Varmeledningskoefficient ved 0°C	24,5	168	24,7	16,7	148	46

Tabel 3.40 indeholder ikke data for luft, som ellers er den mest anvendte plasmagas. Luft består af 21% O₂ og 78% N₂ samt en rest af alle de andre gasser, og vil ligge mellem de nævnte gasser med hensyn til fysiske karakteristika.

Udfra skemaet kan det ses, at nogle gasser er bedre end andre i de forskellige grupper. Når de ”bedste” gasser alligevel ikke altid anvendes, skyldes det hensynet til det materiale, der skal skæres i, eller brænderopbygningen.

Fordele og ulemper ved alternative plasmagasser

a) Oxiderende plasmagasser

Trykluft, ren og uden vand/olie

Trykluft er den mest anvendte plasmagas i Danmark, idet de fleste plasmahåndskæremaskiner er beregnet til trykluft.

Trykluft indeholder en mængde oxygen (21%), der vil reagere med aluminium og danne aluminiumoxid. Før en efterfølgende svejsning vil det være nødvendigt, at foretage en mekanisk efterbearbejdning (fræsning/høvling/filing) for at fjerne den tykke oxidfilm. Ved opbevaring af udskårne emner i længere tid må opmærksomheden henledes på, at den tykke og "nubrede" oxidfilm vil kunne optage fugt, der hvis den ikke fjernes vil kunne give kraftige porer i svejseømmen.

Trykluft giver høj skærehastighed og udstyret let og billigt. Skærekvaliteten er ikke særlig god, men kan forbedres væsentligt ved vandindsnøring af plasmabuen. Anvendelsen af metan/propan som sekundær gas har samme kvalitetsforbedrende egenskab.

Oxygen

Oxygen som plasmagas er blevet meget udbredt på nye plasmaskæremaskiner, idet der opnås fine skærekvaliteter i stål.

Oxygen giver ligeledes høje skærehastigheder i aluminium, men skærekvaliteten er ringe med meget kraftige oxideringer på snitfladerne, men kan forbedres væsentligt ved vandindsnøring af plasmabuen. Anvendelsen af metan/propan som sekundær gas har samme kvalitetsforbedrende egenskab .

b) Ikke-oxiderende plasmagasser

Nitrogen

Nitrogen som plasmagas bliver oftest anvendt på større maskinelle udstyr ved høje strømstyrker. Nitrogen er ikke nogen perfekt plasmagas, men har ofte været anvendt som et billigt alternativ til argon ved høje strømstyrker. Nitrogen har ikke en god varmeledningkoefficient, tæt på argon og vægten (kinetisk energi) er den halve. Nitrogen har en stor fordel i forhold til argon, nemlig at den er to-atomig. To atomige gasser skal først dissocieres før de kan ioniseres, hvilket omvendt medfører at når plasmastrålen afkøles ned igennem sporet, bliver den oplagrede energi frigivet, hvilket forbedrer skærekvaliteten.

Skærekvaliteten er ikke særlig god, men kan forbedres væsentligt ved at anvende vandindsnøring af plasmastrålen.

Nitrogen / vandindsnøring

Som nitrogen, men med bedre skærekvalitet.

Nitrogen/hydrogen.

Hydrogen tilsættes for at forbedre varmeledningsevnen af plasmastrålen. Tilsætningen af hydrogen er typisk mellem 10-20 %. Formiergas, der anvendes som baggas dækning kan anvendes som en færdiggas.

Når hydrogen anvendes som plasmagas må det forventes, at en del af hydrogenet optages i snitfladen. Hydrogenet må forventes at give anledning til porer i svejsesømmen.

Argon

I mangel af bedre kan argon selvfølgelig anvendes, men argon anvendes normalt aldrig alene på grund af gassens dårlige varmeledningsevne.

Argon / hydrogen.

Argon / hydrogen er det gas-mix, der har været anvendt længst. Hydrogen tilsættes for at forbedre varmeledningsevnen af plasmastrålen. Tilsætningen af hydrogen er typisk mellem 10-20 %.

Snitfladen er med et lille oxidlag, og skærehastigheden er ca. det halve af skærehastigheden med trykluft som plasmagas.

Snitkvaliteten er den bedste, der kan opnås med de gamle plasmaskæreudstyr. Hydrogenet hæmmer oxideringen på snitfladerne. Hydrogens store varmeledningsevne er medvirkende til, at plasmaskæring kan anvendes i godstykker op til 150 mm.

Selv om snitkvaliteten er god, er der en oxidfilm på snitfladen, der skal fjernes før svejsning.

Oxidfilmen er let at fjerne når der er anvendt Ar/H₂ til skæringen - i modsætning til andre skæregasser

Hydrogenet må forventes at kunne give anledning til porer i svejsesømmen, hvis ikke snitkanterne bearbejdes yderligere.

Formiergas

Er betegnelsen på to typer gasblandinger hvor der indgår hydrogen. Formiergas kan købes færdigblandet nitrogen med 10 % hydrogen eller argon med 10% hydrogen.

Oxidfilmen er let at fjerne når der er anvendt formier til skæringen, i modsætning til andre skæregasser

Hydrogenet må forventes at kunne give anledning til porer i svejsesømmen, hvis ikke snitkanterne bearbejdes yderligere.

Ved en efterfølgende svejsning på fugen vil det være nødvendigt med en efterbearbejdning (fræsning/høvling/filing). Denne bearbejdning skal udføres således, at jernafsmitning og forhøjet temperatur undgås, da disse vil bevirke galvaniske elementer og fornyet oxidfilmsfortykkelse.

Argon/nitrogen/hydrogen.

Er en gasblanding, der typisk bliver anvendt på gamle maskiner, hvor der bedste fra gasserne kombineres.

Hydrogenet må forventes at kunne give anledning til porer i svejsesømmen, hvis ikke snitkanterne bearbejdes yderligere.

Luft / metan (CH₄), propan (C₃H₈)

En af de sidste nye gasblandinger til plasmaskæring er luft/metan. Luften anvendes som skæregas og metan (naturgas) anvendes som dækgas. Blandingen skulle give meget fine skæreflader på aluminium.

Det Japanske firma Kormatsu anvender propan som sekundærgas på deres finstråle plasmaskæremaskine. Det skal erindres, at propan er tungere end luft!

3.16.4 KRAV TIL EFTERBEARBEJDNING VED PLASMASKÆRING

Ved undersøgelser af plasmaskåret aluminium er der konstateret et tykt lag aluminiumsoxid på de skårne kanter, som har givet anledning til oxidinklusioner og porefejl ved efterfølgende svejsning.

Tykkelsen af oxidfilmen er afhængig af den anvendte plasmaskæremetode. Er der oxygen i plasmagassen bliver oxidfilmen tyk og efterbearbejdning er nødvendig. Når der anvendes hydrogen, metan, propan eller vand sammen med plasmagassen, vil hydrogenet reducere dannelsen af oxidfilmen og efterlade en pæn overflade.

Ved en efterfølgende svejsning på en plasmaskåren fuge vil det altid være nødvendigt med en efterbearbejdning (fræsning/høvling/filing). Selv en pæn overflade vil dog også have en oxidfilm, som må fjernes.

Denne bearbejdning skal udføres således, at jernafsmitning og forhøjet temperatur undgås, da disse vil forårsage henholdsvis galvaniske elementer og nye fortykkelser af oxidfilmen.

Efterbearbejdningen bør foregå umiddelbart før svejsning, og skal udføres på en måde så jernafsmitning og forhøjet temperatur undgås.

3.16.5 SIKKERHED VED PLASMASKÆRING AF ALUMINIUM I VANDBAD

For at reducere mængden af de skadelige stoffer, som fremkommer ved plasmaskæring, er næsten alle nye plasmaskære installationer udført med et skærebord med vand. Skærebordet er udført således, at vandstanden kan hæves og sænkes omkring pladen, der skal skæres.



Figur 3.166 Plasmaskæring på vandbord sikrer det bedste arbejdsmiljø.

Ved skæring af aluminium i vandskærebord, altså med aluminiumpladen er nedsænket i vand, er der stor risiko for, at det smeltede aluminium fra skæresporet kan trække oxygen ud af vandet og derved frigive hydrogen.

Hydrogen, som bobler op af skærekaret, kan give risiko for eksplosionsfare i arbejdslokalet.

Fra den Internationale Svejseorganisation (IIW) er der givet 5 forslag til at reducere dannelsen af hydrogen. IIW dokument IE – 054 – 85:

1. Vigtigste punkt: Skærekaret tømmes for vand og renses for de små aluminiumspartikler ofte. Skærekaret fyldes med frisk vand.
2. Efterlad ikke aluminiumsplader i skærekaret under vand natten eller week-end'en over.
3. Installer en ventilator til at give luft under aluminiumspladen, når der skæres i vand. Trykluft kan evt. sendes igennem en porøs slange i skærekaret.
4. Ryst/vibrer skærebordet når det ikke har været i brug for en længere periode, inden den første plade lægges til rette. Vibrering af skærebordet vil give accumuleret hydrogen mulighed for at boble op i det fri. En rystelse af skærebordet kan gøres ved at lægge den første plade med et bump for derefter at løfte pladen over vandet et øjeblik, hvorefter pladen positioneres igen.
5. Oprethold et pH niveau på omkring 7 (neutral). Dette skulle reducere den kemiske reaktion mellem vand og aluminium.

3.16.6 KORROSIONSPROBLEMER SOM FØLGE AF SKÆRING I VANDBAD

Et gammelt plasmaskærebord kan have været brugt til skæring i stål / rustfrie stål, og vil derfor indeholde en mængde jernpartikler.

Jernafsmitning fra bearbejdnings- og transportværktøjer samt jernpartikler fra et plasmaskærekar vil være ædlere end aluminiumsmaterialet, og vil derfor ved befugtning med vandholdige medier give anledning til galvanisk korrosion på overfladen af aluminiumspladen. Når først aluminiumsoverfladen er aktiveret grundet den galvaniske korrosion kan korrosionsprocessen være svær at stoppe igen, hvorved korrosionen kan blive levetidsforkortende for aluminiumsemnet.

Jernpartiklerne undgås ved enten at udføre plasmaskæringen i et aluminiumskar eller i et vel coated kar, som udelukkende anvendes ved bearbejdning af aluminium.

3.16.7 VANDSKÆREBORDE SOM TIDLIGERE HAR VÆRET BENYTTET TIL JERNHOLDIGE EMNER

I forbindelse med de to foregående problemstillinger med jernafsmitning samt hydrogen opbygning i skærekaret, kan det drages i tvivl om et eksisterende skærebord kan anvendes.

I relation til det førnævnte forslag fra IIW forslag kan en løsning være:

1. Almindelig rengøring af skærekaret ofte.
2. Normalt ikke noget problem, at man ikke må efterlade aluminiumplader i karet.
3. Montering af en perforeret slange/rør forbundet til trykluft på oversiden af den luftklokke et vandskærebord normalt er udstyret med. Den perforerede slange skal give luftbobler under den aluminiumsplade, der skal skæres. I handlen er det muligt at købe disse slanger.
4. Hvis skærebordet er i brug hele tiden er der ingen problemer. Skærebordet tømmes for vand før en ferie og rengøres.
5. Køb af en pH-måler/lakmuspapir gør det muligt at kontrollere løbende, om det er nødvendigt at foretage ændringer af vandet ved at tilføre nyt.

Med hensyn til jernafsmitningen fra løftegrej og anlægsbjælker i skærekaret kan pladehåndteringen klares ved at aluminiumspladerne lægges i aluminiumsrammer, som håndteres ind til skærebordet.

Et andet problem stammer fra jernpartiklerne i skærekaret, som hvirvles op når vandstanden hæves og sænkes. Disse partikler vil lægge sig som en tynd film over aluminiumspladen, når vandstanden hæves. En filtrering af vandet er normalt ikke nok til at fjerne problemet med jernpartikler.

En løsning til et eksisterende skærebord er at montere et skærekar oven på den gamle luftklokke. Aluminiumskarret fyldes med rent vand, således at der ikke bliver med jernafsmitning fra det gamle system. Ved at anvende aluminiumsrammer til at understøtte aluminiumspladerne under skæring kan rammen løftes ud når pladen er skåret færdig og en ny ramme løftes ind medens de færdig skårne emner plukkes fra den første. At vandstanden ikke kan hæves/sænkes skønnes ikke at være et problem, når bare hele rammen løftes ind og ud af skærebordet.

Udledning af vandet i skærekaret til kloakken skønnes ikke at give problemer, når der bare ikke kommer aluminiumstøv med.

Det er stadig vigtigt, at montere et ”boblebad” i aluminiumskarret.

3.16.8 KAPACITETER OG SKÆREHASTIGHEDER VED PLASMASKÆRING

Ved plasmaskæring er kapaciteter og skærehastigheder afhængige af den strømstyrke, der tilføres brænderen. For at få et overblik over skærehastigheden er det nødvendigt at kende begrænsningerne for udstyr og gasser.

Tørplasmaskæring

Tørplasmaskæring er en betegnelse, der anvendes om plasmaskæring, hvor der ikke tilsættes vand til plasmastrålen. Når der tilsættes vand til plasmastrålen er det for at indsnævre plasmastrålen og gøre den mere koncentreret samt forbedre snitkvaliteten.

Fra Firmaet Hypertherm i USA, der er meget anvendt i industrien, leveres udstyret HT 4400* HySpeed™ som er noget af det kraftigste på markedet.

Tabel 3.41 angiver nogle skærehastigheder for forskellige tykkelser ved skæring af aluminium med oxygen og beskyttelsesgas af O₂-N₂.

Tabel 3.41 Skærehastigheder ved forskellige godstykkelser.

Skærestrom A	Materialetykkelse, mm	Skærehastighed, m/min
200	6	4300
200	12	2150
200	15	1850
200	20	1210
200	22	900

At strømstyrken kun er sat til 200 A skyldes, at katoden inde i brænderen ikke kan tåle en højere strømstyrke, uden at levetiden forringes væsentligt.

Vådplasmaskæring – plasmaskæring med vandinjektion

Plasmaskæring med vandinjektion giver en fin overflade på aluminium. Der må påregnes tid til efterbearbejdning af skårne snit med vandindsnøring, men mindre end ved tørplasmaskæring.

Hvis der skal skæres i tykkere godstykkelse, er det nødvendigt at anvende en anden plasmagas.

Tabel 3.42 Vejledende skæredata for plasmaskæring med vandinjektion ved tykkelser op til 75 mm (fra Hypertherms skæretabel til PAC-500 udstyret).

Skæreparametre		Dyse mm.	Materiale- tykkelse mm.	Gas type	Skærehastighed m/min
Strøm A	Volt V				
250	125	3,0	1	N ₂ (vand)	14.225
250	135	3,0	2	N ₂ (vand)	9.525
260	145	3,0	3	N ₂ (vand)	5.715
260	160	3,0	6	N ₂ (vand)	5.080
300	140	4,2	3	N ₂ (vand)	5.715
325	145	4,2	6	N ₂ (vand)	5.080
350	150	4,2	10	N ₂ (vand)	3.555
375	155	4,2	13	N ₂ (vand)	3.050
400	160	4,2	19	N ₂ (vand)	1.780
400	165	4,2	25	N ₂ (vand)	1.445
500	165	4,75	25	N ₂ (vand)	2.030
600	170	4,75	38	N ₂ (vand)	1.140
600	170	4,75	50	N ₂ (vand)	760
700	190	5,6	50	N ₂ (vand)	1015
750	200	5,6	75	N ₂ (vand)	635
900	210	6,35	75	Ar/H ₂	760
900	210	6,35	100	Ar/H ₂	760
1000	210	6,35	130	Ar/H ₂	255
1000	210	6,35	150	Ar/H ₂	180

Når der anvendes argon/hydrogen er vandinjektionssystemet taget fra. Vandinjektionen bruges kun til at køle dysen med.

Tabel 3.42 ses det, at dysestørrelsen følger med strømstyrken. Hvis strømstyrken skal øges, er det nødvendigt at forøge hullet i dysen, hvilket igen bevirker at skæresporet i pladen ligeledes bliver større og mere groft.

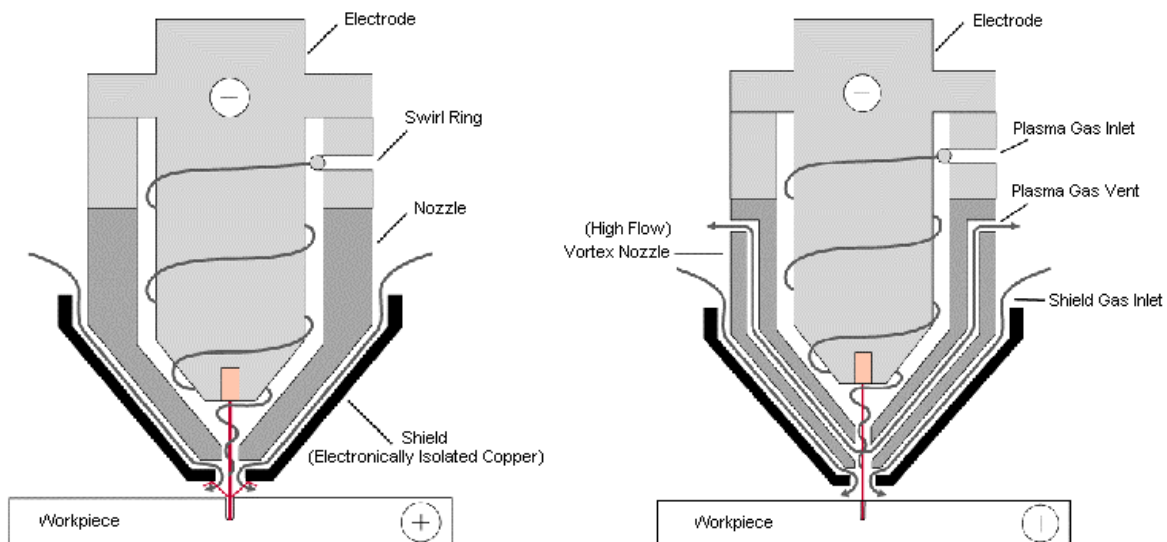
Finstråleplasmaskæring

Til den mere ”forfinede” skæring er der i de senere år kommet en ny type plasmaskæreudstyr på markedet. Fælles for de nye udstyr af denne type er, at de kan koncentrere plasmastrålen bedre hvilket giver langt bedre skærekvaliteter, med mere skarpkantede snit.



Figur 3.167 Foto af plasmafinstråleskæring.

Skærekvaliteten er det bedste, der kan opnås med plasmaskæring og med den mindste efterbearbejdning af snitfladen.



Figur 3.168 Til venstre opbygningen ved "gammeldags" plasmaskæring, til højre opbygningen ved generering af finplasmastråle.

Tabel 3.43 Vejledende data ved finplasmastråleskæring (Hypertherm HD 3070 HyDefinition Plasma 70 A).

Skærestrom A	Materiale- tykkelse mm	Gasser	Skærehastighed m/min
70	1,2	Luft / metan	3810
70	1,9	Luft / metan	2540
70	3,2	Luft / metan	1778
70	6,4	Luft / metan	1143
70	12,7	Luft / metan	635

3.16.9 ABRASIV VANDSTRÅLESKÆRING

Abrasiv vandstråleskæring er en nyere skæreforproces til skæring i aluminium. Processen blev introduceret i Danmark i 1985. Siden da er det gået stærkt, og i 2001 var der omkring 40 anlæg i drift. Vandstråleskæring uden sandtilsætning er ikke egnet til skæring af metaller.

Stråle Betegnelse	Vandstråle Ren	Vandstråle Injektion	Vandstråle Suspension
(Vol. %)			
 Vand Abrasiv Luft			
	Rengøring Skæring	Rengøring Skæring	Skæring

Figur 3.169 Oversigt over de forskellige typer vandstråleskæring.

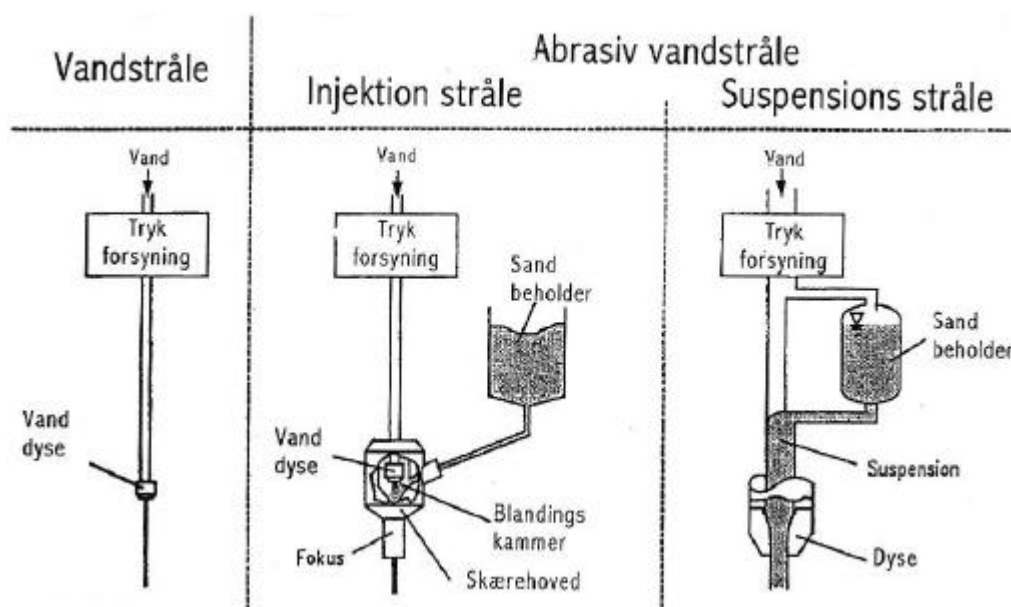
Abrasiv vandstråleskæring har i de senere år fået luset sine børnesygdomme ud. Dyseslid er ikke længere et problem, og automatisk udkæring er selvfølgelig mulig.

Den seneste udvikling i England og Tyskland har flyttet skærehastigheden op til et yderst interessant niveau.

Hvad er abrasiv vandstråleskæring

Abrasiv vandstråleskæring bliver udført på to måder. Den almindelige metode for abrasiv vandstråleskæring er, at sand blandes ind i en vandstråle, der kommer ud af en dyse med høj hastighed. For at styre den proces anbringer en styredyse foran/under vanddysen, således at vandstrålen kommer ud af styredysen uden at ramme væggene i denne.

Et sådant system virker som et **injektorsystem**, hvis der er et kammer imellem de to dyser. Injektorsystemet giver et vakuum inde i kammeret, og hvis et rørsystem kan lade sand komme ind i kammeret bliver sandet automatisk suget ind og med ud gennem styredysen.



Figur 3.170 Oversigt over principper for vandstråleskæring.

Gennem styredysen ledes sand med meget høj hastighed, vand med samme hastighed samt store mængder luft. Systemet bygger på, at vandet fra vanddysen bruges til at accelerere sandet med. Vandstrålen har en hastighed på 600 m/s når den kommer ud af vanddysen, og sandkornene bliver accelereret op til samme høje hastighed ned gennem styredysen. Når sandkornene rammer et materiale under styredysen skærer de materialet væk.

Indholdet af luft i strålen efter styrerøret ligger på omkring 90%, og luft skærer ikke.

Et andet system bygger på at lade sandet blive mixet sammen med vandet før dysen. Systemet hedder **suspensionsystemet** og er udviklet af englænderne og raffineret af tyskerne. Det nye system har egentlig været kendt de sidste 10 år, men det er først for nylig, at der virkelig er kommet udvikling i systemet.

Indholdet af luft i strålen er 0%, hvilket gør den utrolig effektiv.

Pumperne til abrasiv vandstråleskæring

Der er to typer pumper til abrasiv vandstråleskæring nemlig de hydrauliske og de direkte/mekaniske.

De vandpumper, der arbejder med en hydraulikpumpe, der opnår et olietryk på omkring 200 bar er de kraftigste. De hydrauliske pumper kan give et tryk på op til 4000 bar. De hydrauliske pumper virker ved en trykomsætter, dvs. at hydraulikolien presser på et stempel der er 20 gange større end stemplet i vandsiden. Principielt kunne trykket blive større, men tætninger har for kort levetid ved større tryk og der opnås ikke en større skærehastighed.

Vandtrykket ved abrasiv vandstråleskæring er optimalt ved 2500 bar ved injektionssystemet. Ved højere tryk bliver sandkornene knust af vandhastigheden ned gennem styredysen. Derfor er pumperne til abrasiv vandstråleskæring normalt ikke bygget til et større tryk end 2500 bar. Når pumperne er begrænset til 2500 bar kan de give en lidt større vandmængde, hvilket er vigtig for at kunne drive så mange dyser så mulig pr. pumpe.

De mekaniske pumper eller direkte pumper bruger ikke en hydraulisk omsætter, men har stemplerne på en krumtap, der drives af en motor. De mekaniske pumper har normalt ikke tryk over 1500 bar, men de kan give en masse vand.

De mekaniske pumper er især brugt til suspensions systemerne, der kræver meget vand. Til de første suspensions systemer fra England kaldet "DIAJET" blev der typisk anvendt et vandtryk på 700 bar og omkring 20 liter vand pr. min. i dag kan det Tyske firma "Hammelmann" levere udstyr på op til 1500 bar. Med de tryk skal man tænke på, at sandet skal ind i vandet ved det høje tryk. At få sandet ind i vandet er egentlig nemt nok, fordi sandet er i en trykbeholder som vandet ledes igennem. Resultatet når vand og sand ledes ud gennem en dyse er fantastisk effektivt fordi der ikke er luft i strålen. Suspension abrasiv vandstråleskæring har en skærehastighed der er fra 5 – 10 gange så hurtig som den almindelige injektionsstråle.

Sand til abrasiv vandstråleskæring

Til abrasiv vandstråleskæring har alle fra start været enige om at skæringen skulle være så miljørigtig så mulig, hvorfor sand der indeholdt alfa-kvarts har været bandlyst. Strandsand, som vi har så meget af i

Danmark, kan dermed ikke bruges. Danmark har dog en anden ressource, nemlig tungsand, der har næsten samme skæreevne i aluminium som importerede sandtyper.

De mest almindelige anvendte sandtyper er:

- **Granatsand.** Granatsand er rødt, og importeres typisk fra USA og indien. Granatsand er det bedste abrasiv til alle materialer og også det dyreste og det mest hårde ved styredysen.
- **Kobberslagger.** Kobberslagger er sort og er et spildprodukt med gode skæreegenskaber, mildere ved styredysen.
- **Olivinsand.** Olivinsand er grønt og kommer fra Norge med gode skæreegenskaber. Produktet er billigt og meget venligt ved styredysen, hvilket giver en meget lang standtid og dermed en større skærenøjagtighed på emnerne.

Det førnævnte danske såkaldte **tungsand**, som kom på markedet i 1998, er afprøvet til skæring i aluminium med resultater som angivet i Tabel 3.44.

Tabel 3.44 Skærehastigheder med Tungsand sammenlignet med Granatsand.

Materiale tykkelse mm	Vand tryk bar	Vand dyse mm	Styre dyse mm	Skærehastighed Tungsand 60-80 mesh mm/min	Skærehastighed Granatsand 60-80 mesh mm/min
1.5	2500	0.33	1.15/60	2000	2490
3.0	2500	0.33	1.15/60	1110	1350
6.0	2500	0.33	1.15/60	700	800
8.0	2500	0.33	1.15/60	540	620
10.0	2500	0.33	1.15/60	450	555
20.0	2500	0.33	1.15/60	180	245
40.0	2500	0.33	1.15/60	75	104

Tabellen viser den højst opnåelige skærehastighed for gennemskæring af aluminium. Skærehastigheden er ikke et udtryk for skæring af høj kvalitet, men blot en sammenligning mellem to typer sand. Skærekvaliteten ligger i område 3, og er kun beregnet til deling af en plade.

Fugetyper og tolerancer ved vandstråleskæring

Udskæring med vandstråle har været mulig i mange år. Med injektions abrasiv vandstråle har det imidlertid været yderst besværligt at få tørt sand frem til blandekammeret.

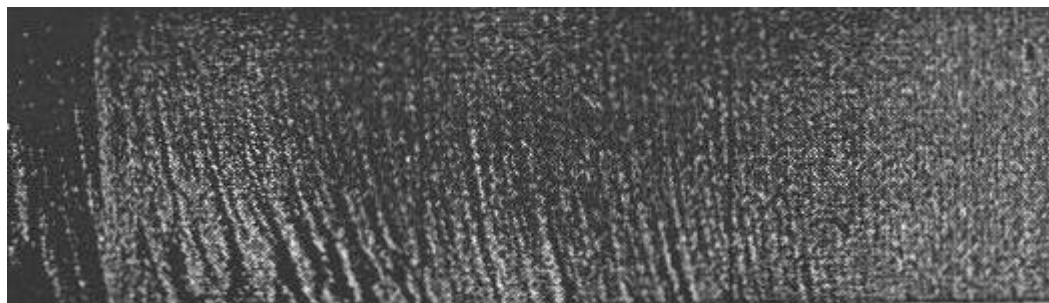
Med indførelsen af det nye suspensionsystem kan dysen ganske enkelt monteres i en robot. Dette betyder, at snit i alle vinkler er mulig.

Normalt er abrasiv vandstråleskæring monteret på en CNC-styret 2-akset skæremaskine med en styrbar Z-akse. Der kan skæres snit under alle vinkler i lige snit, men det er de færreste der har håndterings udstyr til dette.

Tolerancerne på emnerne er gode, da abrasiv vandstråleskæring er en kold proces. De største variationer i tolerancerne skyldes spændinger i pladerne. Dysesliddet er med de nyeste dyser så lille, at der kan ses bort fra dette.

Snitkvaliteter og overfladeruhed

Snitkvaliteten på det skårne snit bestemmes udelukkende af skærehastigheden. En for høj skærehastighed giver en stor overfladeruhed som det fremgår af Figur 3.171.



Skærehastighed 400 mm/min.

Skærehastighed 200 mm/min.

Figur 3.171 Ændring af snitkvalitet afhængigt af skærehastighed.

Krav til efterbehandling ved vandstråleskæring

Normalt opnås der en meget fin overfladekvalitet, men under skæring bliver det metallisk rene aluminium udsat for vandets påvirkning og oxideres derved. For at undgå oxidfilmsfortykkelse på skærefladerne og dermed forstyrrelser i den senere svejsning skal kanterne efterbehandles.

Denne bearbejdning skal udføres således, at jernafsmitning og forhøjet temperatur undgås, da disse vil forårsage henholdsvis galvaniske elementer og nye, tykke oxidfilm.

3.16.10 MEKANISK FUGEFORBEREDELSE

Mekanisk fugeforberedelse er relativt billig og alsidig. Det meste af udstyret bliver også brugt i træbranchen, og i aluminium skal værktøjet arbejde med næsten de samme hastigheder. Den største forskel fra udstyr til træbearbejdning er, at udstyret til aluminium kræver mere energi for at opnå de samme skærehastigheder. Når der vælges udstyr, skal der tænkes på, om værktøjet giver anledning til senere problemer som f.eks. jernafsmitning. Jernafsmitningen vil kunne give korrosionsproblemer senere hen.

Værktøjet til aluminium skal være beregnet til arbejde i et blødt og sejt materiale. Fræsehoveder og lignende til bearbejdning af stål vil hurtigt stoppe til, når der arbejdes i aluminium. Selvom aluminium

er et blødt materiale, er det altid dækket af aluminiumoxid. Aluminiumoxiden vil være meget slidende på værktøjet.

Savning

Save er alsidige til fugeforberedelse og giver en god overflade i snittet.

I forbindelse med effektiv savning af aluminium er der tre væsentlige parametre:

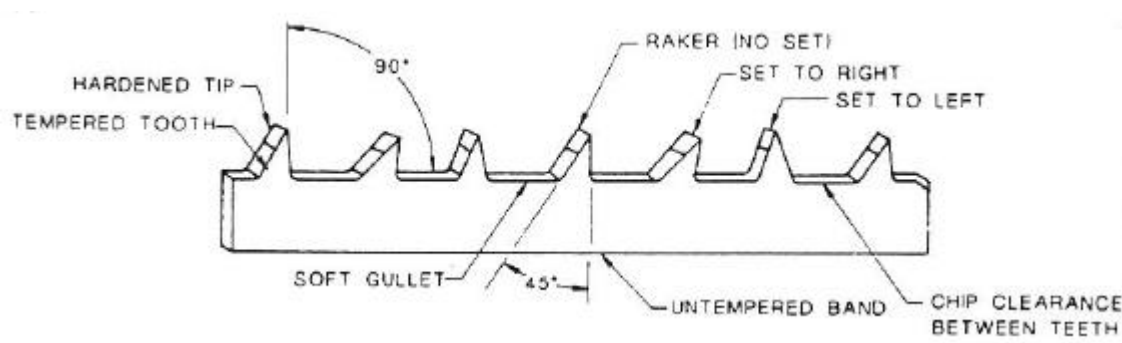
- Savklings hastighed
- Tandgeometrien
- Tandmellemmrummene.

Et savblad til aluminium er således konstrueret, at tænderne på savbladet er forholdsvis grove, samt at der skal anvendes stor hastighed på savbladet.

Båndsave, som almindeligvis anvendes til skæring af små emner, der kan håndteres med hænderne skal have 1-1,5 tænder pr. cm. og en båndhastighed på 1800 m/min under skæring.

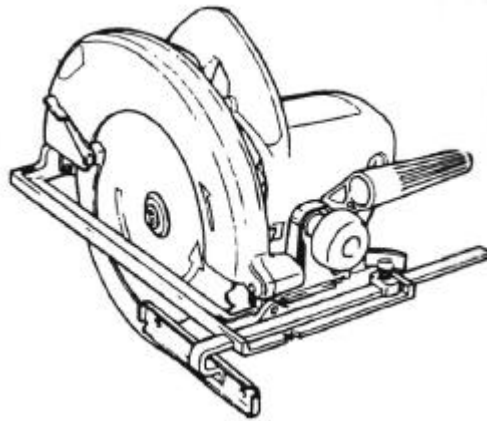
En tommelfingerregel er, at der normalt ikke skal være mere end 2-4 tænder i indgreb i den plade der skæres.

Et typisk båndsavblad er vist på Figur 3.172.



Figur 3.172 Savklinge til båndsav egnet til aluminium.

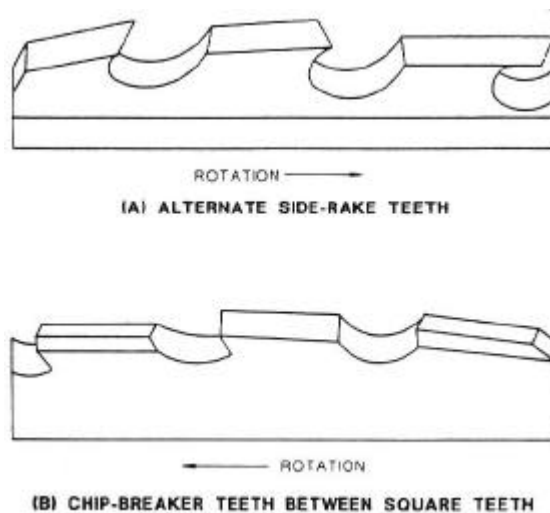
Håndholdte eller stationære rundsawe er til skæring i aluminium normalt udstyret med et high-speed savblad, der roterer med 2400 m/min. eller hurtigere. For almindelige klinger er rotationen sat ned til 1200-1800 m/min.



Figur 3.173 Rundsav.

For savklinger med hårdmetal tænder, der skal anvendes på steder, hvor der ikke må anvendes køle/smøremidler, anvendes periferihastigheder i størrelsesorden 3600 m/min.

To typer rundsavsgeometri, som begge er velegnede til aluminium fremgår af Figur 3.174. En hensigtsmæssig tandforsætning vil typisk være 15°.



Figur 3.174 Tænder til rundsav egnet til aluminium.

Rundsave er velegnede for skæring i aluminiumsplader eller ekstruderede profiler, hvad enten det er et retsnit eller en vinkel.

Elektriske stiksawe er gode til at udskære huller inde på en plade eller tilskæring af store plader, der ikke kan flyttes.

Normalt kan der svejdes på et savet snit uden yderligere forberedelse. Hvis yderligere rengøring/glatning af fugen er nødvendig kan der anvendes filning, elektrisk høvl eller fræsning.

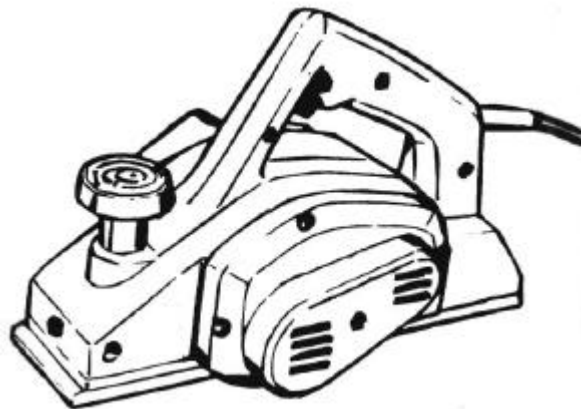
3.16.11 FRÆSNING

Små luftdrevne fræsemaskiner fås med mange forskellige skær alt efter opgaven. De kan være praktiske i forbindelse med opfugning fra rodsiden ved tosidig svejsning, eller i forbindelse med reparation af svejsefejl.



Figur 3.175 Lille luftdrevet fræser til oprensning af rodside eller fjernelse af svejsefejl.

Til større opgaver findes der eldrevne fræsere til bearbejdning af fuger. På de lidt større maskiner kan fugevinklen stilles. Skærene er oftest af hårdmetal og kan udskiftes til den korrekte geometri.



Figur 3.176 El-håndfræser til kantbearbejdning.

Overfladekvaliteten af de to typer fræsning er god, og der er ikke behov for yderligere efterbearbejdning.

3.16.12 KLIPNING

En saks til klipning af aluminiumplader behøver rene og skarpe skær for at kunne give en ordentlig kvalitet. Ved indstilling af knivene i saksen er det vigtigt, at frigangen mellem knivene er korrekt.

I godstykkelser op til ca. 5 mm kan pladekanter klippet på en god klippemaskine svejdes umiddelbart uden yderligere efterbehandling. Dog bør en klippet kant altid afgrates før svejsning.

Klipning af aluminiumsplader med et indhold af magnesium på mere end 3.5 % kan ikke anbefales, da kanterne kan blive følsomme overfor spændingskorrosion.

3.16.13 NIBBLING

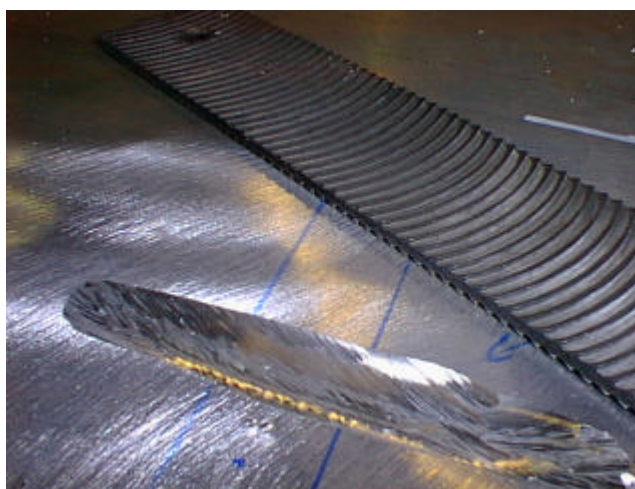
En nibblemaskine er egentlig en slags saks. De lange knive er skiftet ud med et stempel der enten kan være firkantet eller rundt. Princippet er enkelt: Ved at trykke stemplet ned igennem pladen fremkommer et hul. Ved at flytte pladen i forhold til nibblemaskinen bliver der trykket en række brikker ud, hvilket - hvis de er i forlængelse af hinanden - giver en deling af pladen. En nibblemaskine er god til at udskære kurvede konturer og huller.

Nibblemaskiner kan fås både som håndholdte samt CNC-styrede.

De nibblede kanter skal behandles på samme måde som ved klipning. Det kan være nødvendigt at slibe kanterne.

3.16.14 FILNING

En panserfil eller en karrosserifil er den mest anvendelige til aluminium (Figur 3.177).



Figur 3.177 Panserfil.

Filen er karakteriseret ved sine vinkler og mellemrum på tænderne, således at filen kan arbejde sig fri uden at tilstoppe. Den type fil giver en blød og fin overflade, klar til at svejse på.

3.16.15 RYSTEPUDSERE

Når der vælges skiver til rystepudseren er det vigtigt, at skiverne er beregnet til at arbejde i aluminium. Skiverne skal være fri for smøremidler eller andre fremmede materialer.

Skiver med en kornstørrelse 36-80 grit vil fjerne kraftig oxidation og aflevere en glat og acceptabel overflade.

Polerskiver kan anvendes, hvor der er tale om lette oxidbelægninger.

3.16.16 VINKESLIBERE

Slibning af aluminium med undtagelse af den sidste tildanning af svejsefugen skal generelt undgås. Ved anvendelse af vinkelsliber på aluminium får man en ru og flosset overflade som er svær at rengøre.



Figur 3.178 Slibeskive til aluminium.

Når der vælges vinkelsliber til arbejde på aluminium, er det vigtigt at der vælges skiver af nonload typen specielt beregnet for aluminium. Skiverne skal være fri for smøremidler og andre afsmittende materialer.

Vinkelslibning anvendes ofte til opslibning af bagsømmen ved reparations svejsning. Tilfredsstillende svejse kvalitet kan opnåes, hvis der tages hensyn til at slibeskiverne hele tiden skal være rene og fri for fastsiddende slagge/materiale.

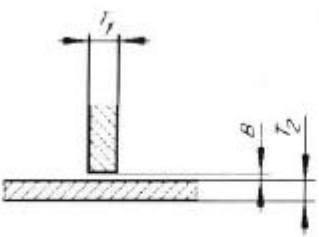
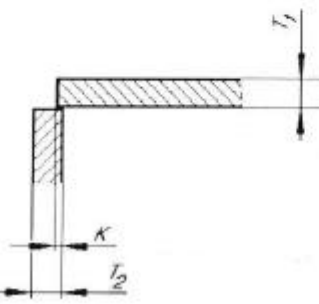
3.16.17 OVERSIGT OVER FUGETYPEN SAMT TILHØRENDE SVEJSEPROCESSER

Ved svejsning af godstykkelser under 3-5 mm forestrækkes en I-fuge ofte, mens der ved TIG- og MIG-svejsning i tykkelser over 5 mm anvendes enten enkelt eller dobbelt skærping alt efter

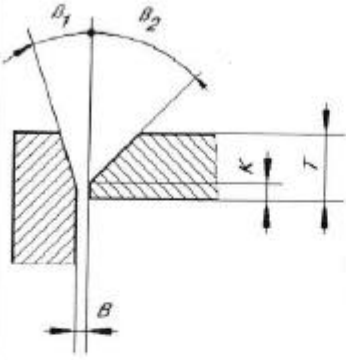
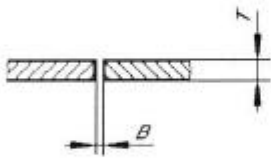
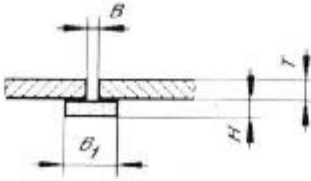
hvordan svejseren kan komme til. Valg af enkelt eller dobbelt skærpning kan også bero på kravet til vinkelknækket efter endt svejsning. En symmetrisk dobbeltskærpning giver mindre vinkelknæk end en enkelt skærpning.

Tabel 3.45 anviser forslag til skærpningsformer i aluminium ud fra godstykkelse og geometri samt den tilhørende egnede svejseproces.

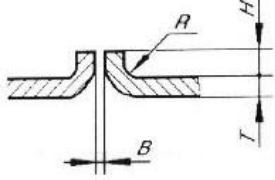
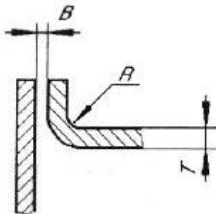
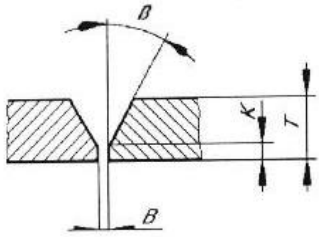
Tabel 3.45 Vejledende skærpningsformer til MIG- og TIG-svejsning af aluminium.

Benævnelse	Fugetype	Svejsemetode	Dimensioner mm.	Kommentarer
Kantsøm		TIG	$T_1 \approx T_2 \geq 1$ $B = 0 - 1$	
		MIG	$T_1 \approx T_2 \geq 2$ $B = 0 - 1$	
Udvendigt hjørne		TIG	$T_1 \approx T_2 \geq 1$	Med tilsatsmateriale. Kan også svejses med bagstreng.
		MIG	$T_1 \approx T_2 \geq 2$ $K \geq 1$	

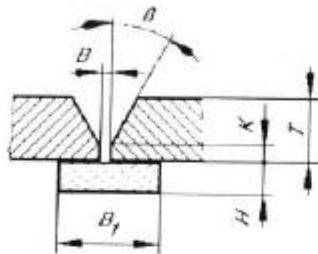
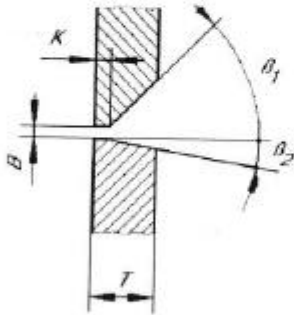
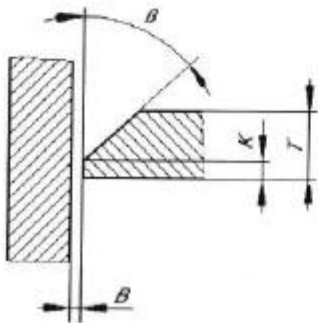
(Tabel 3.45 Vejledende skærpninger til MIG- og TIG-svejsning af aluminium, fortsat)

Benævnelse	Fugetype	Svejsemetode	Dimensioner mm.	Kommentarer
½ V-fuge		MIG	$T \geq 10$ $\beta_1 = 0 - 15^\circ$ $\beta_2 = 40 - 50^\circ$ $K = 1 - 3$ $B = 0 - 1$	
I-fuge		TIG	$T^* = 0,5 - 4$ $B^* = 0 - 1$ $T^{**} = 3 - 7$ $B^{**} = 0 - 2$	* Ensidig svejsning ** svejsning fra begge sider
		MIG	$T^* = 3 - 5$ $B^* = 0 - 1$ $T^{**} = 5 - 8$ $B^{**} = 0 - 1$	
I-fuge med alu-backing		TIG	$T = 2 - 5$ $B \approx T$ $H = 4$ $B_1 = B + 20$	Indtrængningen i bagpladen bør være $0,5 * H$
		MIG	$T = 3 - 6$ $B \approx T$ $H = 4$ $B_1 = B + 20$	

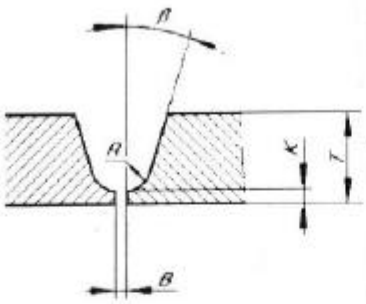
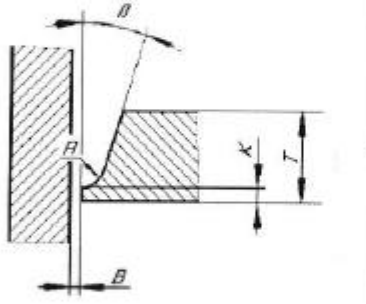
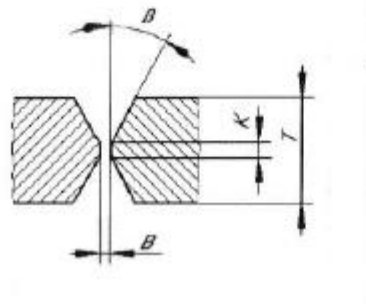
(Tabel 3.45 Vejledende skærpninger til MIG- og TIG-svejsning af aluminium, fortsat)

Benævnelse	Fugetype	Svejsemetode	Dimensioner mm.	Kommentarer
Bertling søm		TIG*	T = 0,5 - 3 R (se materiale data) B = 0 - 0,5	*Kanterne smeltes uden tilsatsmateriale. Denne fugetype bør ikke anvendes for hærdbare legeringer
Bertling søm		TIG*	T = 0,5 - 3 R (se materiale data) B = 0 - 0,5	*Kanterne smeltes uden tilsatsmateriale. Denne fugetype bør ikke anvendes for hærdbare legeringer
V - fuge		TIG	T = 4 - 12 $\beta = 30 - 40^\circ$ K = 0,5 - 2 B = 0 - 1	
		MIG*	T = 5 - 15 $\beta = 25 - 35^\circ$ K = 0,5 - 2 B = 0 - 1	* Kvalitetsmæssigt er det en fordel at lægge rodstrengen med TIG svejsning.

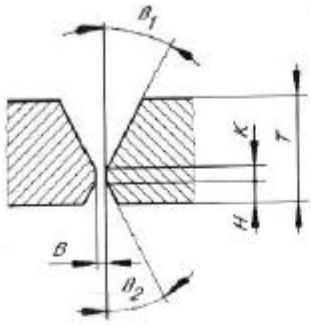
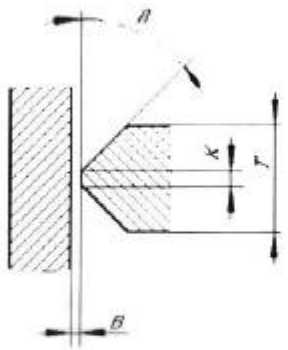
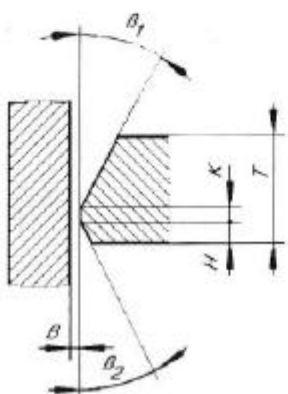
(Tabel 3.45 Vejledende skærpnings til MIG- og TIG-svejsning af aluminium, fortsat)

Benævnelse	Fugetype	Svejsemetode	Dimensioner mm.	Kommentarer
V-fuge med alu-backing		TIG*	$T = 5 - 20$ $\beta = 20 - 25^\circ$ $K = 1 - 2$ $B = 3 - 7$ $B_1 \geq B + 20$ $H = 0,5T \geq 3$	* Indtrængningen i bagpladen bør være $\approx 0,5H$
		MIG*	$T = 6 - 30$ $\beta = 20 - 25^\circ$ $K = 1 - 2$ $B = 3 - 7$ $B_1 \geq B + 20$ $H = 0,5T \geq 4$	
Liggende vertikal V-fuge		TIG	$T = 4 - 10$ $\beta_1 = 40 - 50^\circ$ $\beta_2 = 5 - 10^\circ$ $K = 1,5 - 2$ $B = 0 - 1$	
		MIG	$T = 5 - 25$ $\beta_1 = 40 - 50^\circ$ $\beta_2 = 5 - 10^\circ$ $K = 1,5 - 2$ $B = 0 - 1$	
1/2 V-fuge		TIG	$T = 2 - 8$ $\beta = 50 - 60^\circ$ $K = 0,5 - 2$ $B = 0 - 2$	
		MIG	$T = 3 - 20$ $\beta = 40 - 60^\circ$ $K = 1 - 3$ $B = 0 - 1$	

(Tabel 3.45 Vejledende skærpninger til MIG- og TIG-svejsning af aluminium, fortsat)

Benævnelse	Fugetype	Svejsemetode	Dimensioner mm.	Kommentarer
U-fuge		TIG	$T \geq 8$ $\beta^* = 25 - 30^\circ$ $K^* = 2,0 - 2,5$ $B = 0$ $R = 6$	
		MIG**	$T \geq 12$ $\beta^* = 25 - 30^\circ$ $K^* = 2,0 - 3,0$ $B = 0$ $R = 6$	** Kvalitetsmæssigt er det fordelagtigt at lægge rodstrengen med TIG svejsning.
J-fuge		TIG	$T \geq 8$ $\beta^* = 25 - 30^\circ$ $K^* = 2 - 3$ $B = 0$ $R = 8$	
		MIG	$T \geq 12$ $\beta^* = 25 - 30^\circ$ $K^* = 2,0 - 3,0$ $B = 0$ $R = 8$	
X-fuge		TIG*	$T = 10 - 25$ $\beta = 30 - 40^\circ$ $K = 1 - 2$ $B = 0 - 2$	* Rodstrengen skæres op på bagsiden
		MIG	$T = 8 - 30$ $\beta = 25 - 35^\circ$ $K = 2 - 3$ $B = 0 - 2$	

(Tabel 3.45 Vejledende skærpninger til MIG- og TIG-svejsning af aluminium, fortsat)

Benævnelse	Fugetype	Svejsemetode	Dimensioner mm.	Kommentarer
Usymmetrisk X-fuge		TIG	$T = 10 - 12$ $\beta_1 = 20 - 25^\circ$ $\beta_2 = 25 - 30^\circ$ $K = 1 - 2$ $H = T/3$ $B = 0 - 2$	* bør vælges frem for symmetrisk X-fuge
		MIG*	$T = 8 - 30$ $\beta_1 = 20 - 25^\circ$ $\beta_2 = 25 - 30^\circ$ $K = 2 - 3$ $H = T/3$ $B = 0 - 3$	Svejses først fra β_2 siden
K-fuge		TIG	$T \geq 8$ $\beta = 50 - 60^\circ$ $K = 1 - 3$ $B = 0 - 2$	
		MIG	$T \geq 10$ $\beta = 40 - 60^\circ$ $K = 1 - 3$ $B = 0 - 3$	
Usymmetrisk K-fuge		MIG*	$T \geq 10$ $\beta_1 = 40 - 50^\circ$ $\beta_2 = 50 - 60^\circ$ $K = 1 - 2$ $H = T/3$ $B = 0 - 3$	*Svejses først fra β_2 siden Fugen bør vælges frem for symmetrisk K-fuge

(Tabel 3.45 Vejledende skærpninger til MIG- og TIG-svejsning af aluminium, fortsat)

Benævnelse	Fugetype	Svejsemetode	Dimensioner mm.	Kommentarer
Dobbelt U-fuge		MIG	$T \geq 25$ $\beta = 20 - 25^\circ$ $K = 2,0 - 3,0$ $B = 0 - 2$ $R = 6$	
Dobbelt J-fuge		TIG*	$T \geq 15$ $\beta = 25 - 35^\circ$ $K = 1 - 2$ $B = 0 - 2$ $R = 8$	* Rodstrengen skæres op før svejsning af bagsiden.
		MIG*	$T \geq 20$ $\beta = 25 - 35^\circ$ $K = 1 - 2$ $B = 0 - 2$ $R = 8$	

3.16.18 REFERENCER

Litteratur

- [1] **Larsen, Per Faxøe**, *Abrasiv Vandstråleskæring*, FORCE Instituttet, 1988.
- [2] **Larsen, Per Faxøe**, *Abrasiv vandstråleskæring med Tungsand*, Udført for Dansand Silkeborg A/SMarts 1999.
- [3] **Larsen, Per Faxøe Larsen**, *Plasmaskæring, en grundbog i de grundlæggende principper*, FORCE Instituttet, 1994.
- [4] **Larsen, Per Faxøe**, *Alternative "kæremetoder"* DIAM- 83.
- [5] Bearbejdning af pladekanter, for rationel storproduktion i grovplader af blødt stål. Delrapport 1, Kantbearbejdningsmetoder og deres egnethed for tildannelse af svejsefuger. Publikation nr. 6901.
- [6] American Welding Society
Guide for Aluminium Hull Welding
ANSI/AWS D3.7-90.
- [7] *Successful Welding of Aluminium*
WTIA Technical Note No. 2
Welding Technology Institute of Australia, 1997.
- [8] *Goda råd vid Aluminiumsvetsning*
Svetskommissionen, 1997.
- [9] *Materials and applications – Part 1*
Welding Handbook - eighth edition,
American Welding Society, 1996.
- [10] *Sammenføjning af aluminium*
Efteruddannelse i materialeteknologi, FORCE Instituttet, DTI, Danmarks Ingeniørakademi og Forskningscenter Risø, 1995.

- [11] *Guide for Aluminum Hull Welding*
An American National Standard
ANSI/AWS D3.7-90, 1989
- [12] **Haas, B.** (DVS)
Schutzgasschweißen von Aluminium
Der Praktiker, 9/97
- [13] **Runnerstam, O., Persson, K.A., and Lund, T.** (AGA)
The importance of a good quality gas shield
Svetsaren No. 3, 1995
- [14] **Aastrup, P.**
Arbejdsområder for MIG-svejsning af kantsømme i aluminium AlMg3 og Al99,5
Rapport 93.20, FORCE Institutet, 1993.
- [15] **Zerner, I.**
Trends in der Schweißtechnik – Schweißen von Aluminium
Schweissen & Schneiden, 51 (1999) Heft 8
- [16] **Altshuller, B.**
A guide to GMA Welding of Aluminium
Welding Journal, June 1998
- [17] *Facts about TIG-svejsning*, AGA
- [18] **Dye, S.A.**
Gas shielding for arc welding aluminium and its alloys – part 1: Gas mixtures for MIG welding
WI Research Bulletin Vol. 13 1972. 301-305.
- [19] **Fukui, T., Sugiyama, Y. and Terai, S.**
Effects of Nitrogen, Oxygen and Hydrogen Gases Added to Argon Gas on MIG welding of Aluminium Alloys
Transactions of J.W.S., april 1970
- [20] **Harris I.D.**
A review of porosity formation and recommendations on the avoidance of porosity in TIG welding
The Welding Institutet, 1988
- [21] **Harris I.D.**
A review of literature on porosity formation and recommendations on the avoidance of porosity in MIG welding
The Welding Institutet, 1988

- [22] **Lindstrom, J.** (AGA)
Adding NO to the argon or argon/helium mixture does the trick
 Inalco 98, 7th International Conference, Joints in aluminium, vol. 1., 1998.
- [23] **Weiping Liu, Dalian and Dorn, L.**
Improved filler wires for aluminium alloy welding – a review, part 1.
 ALUMINIUM – 70, 9/10, 1994
- [24] **Ellis, M.B.D. and Spiller, K.R.**
Gas shielded fusion welding of aluminium alloys – a review of the techniques
 Welding and Fabrication, November/December 1993.
- [25] **Blewett, R.V.**
Welding aluminium and its alloys
 Welding and Fabrication, October 1991.
- [26] **Dye, S.A.**
Gas shielding for arc welding aluminium and its alloys – part 2: D.C. helium-shielded TIG welding of horizontal/vertical joints in aluminium
 WI Research Bulletin Vol. 13, 1972, 301-305.
- [27] **Farwer, A.** (FRG)
Recent Investigation on MIG and TIG aluminium welding with different shielding gases
 IIW Doc. XII – 1436 – 1996
- [28] HEDE NIELSEN
Svejseshåndbogen for TIG- MIG- og MAG-svejsning
 1997
- [29] **Aichele, G.** (Breisgau)
 Aluminium – ein Thema für die Schweißtechnik
 ALUMINIUM, 71. 1995

Tekniske rapporter

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0008, *Fugeforberedelse ved svejsning i aluminium*

3.17 BIMETALLER

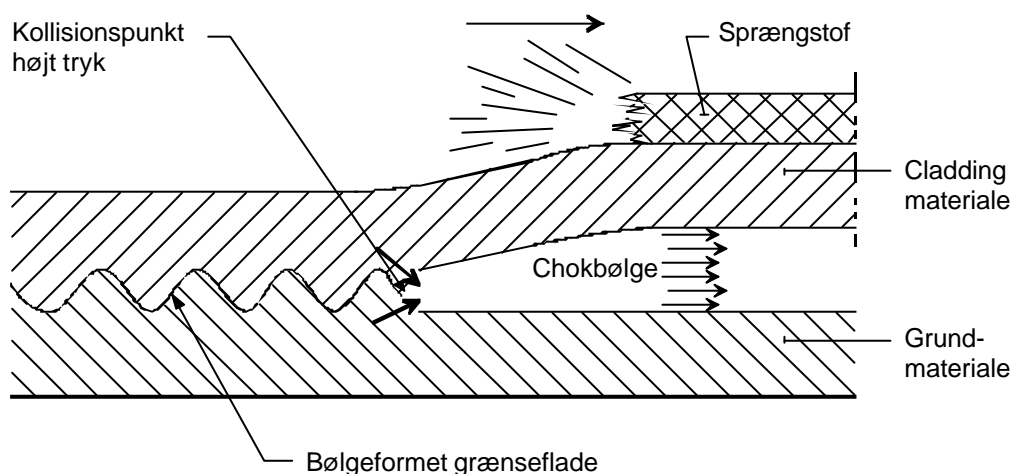
Inden for ikke mindst skibsbygning står man ofte overfor at skulle samle aluminium til stål. Typisk drejer det sig om aluminiumsoverbygninger til stålskrog (krydstogtskibe, fiskefartøjer, m.v.). Man kan også omvendt komme ud for at skulle fastgøre stålkompnenter til aluminiumsskrog, såsom maskinfundamenter eller dæksudstyr.

Den traditionelle måde har været anvendelse af bolte under passende hensyn til isolering mellem de forskellige indgående materialer, af hensyn til risikoen for galvanisk korrosion.

Alternativt kan overgangsstykker af bimetall benyttes til at udføre helsvejste samlinger mellem aluminium og stål.

Bimetall består i princippet af 2 lag vidt forskellige materialer, såsom aluminium og stål. På grund af disse to materials grundlæggende forskelle i atomar gitterstruktur, kan de ikke uden videre smeltesvejses sammen.

Ved hjælp af eksplosionssvejsning mellem to oven på hinanden liggende plader kan man imidlertid "tvinge" de to materialer til metallisk binding, se Figur 3.179. Herefter skæres disse op i strimler.

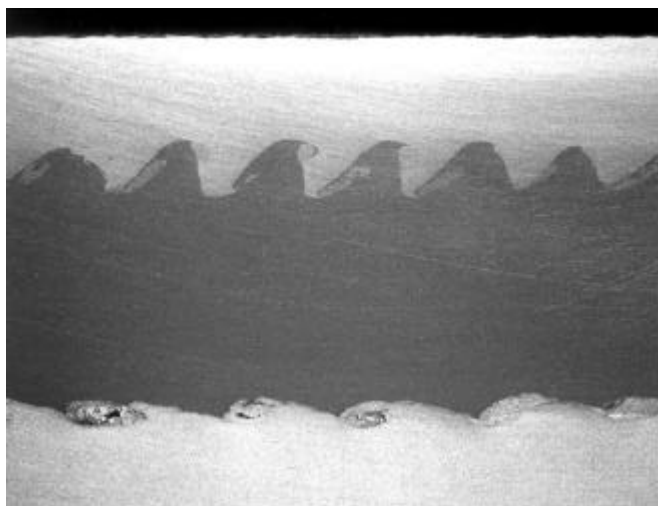


Figur 3.179 Princip for fremstilling af bimetall ved eksplosions-svejsning.

I praksis er det nødvendigt at anvende et bufferlag af renaluminium mellem stålet og det legerede aluminium, som bruges til skibsbygning og andre bærende konstruktioner.

Figur 3.180 viser et makroslib med et tværsnit af et bimetall (udsnit). De bølgeformede skillelag skyldes eksplosionssvejsningen. I skillefladen mellem stål og aluminium ses nogle let porøse lommer med intermetalliske faser. På grund af det relativt store tværsnit, bimetall strippen har i forhold til de plader, der kan svejses til denne, giver disse lommer ikke styrkemæssige problemer.

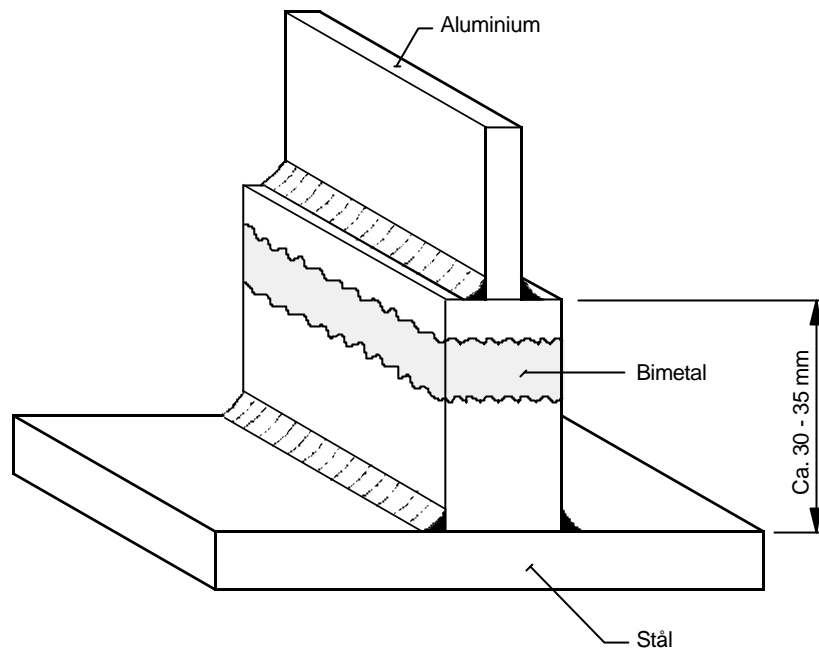
Procesparametrene ved fremstillingen af bimetall-ræmmerne ved eksplosionssvejsning har i øvrigt stor indflydelse på tendensen til at danne sprøde faser i overgangszonen mellem aluminium og stål [3].



Figur 3.180 Tværsnit af bimetal samling (øverste halvdel). Reelt er der tale om 3 lag: Øverst legering 5086 (AlMg4Mn), i midten 1050 (Al 99,5), nederst et C-Mn stål. [2].

Bimetal strips er typisk 30-35 mm høje og 10-30 mm brede. Som en tommelfingerregel kan man regne med, at bredden skal svare til 4 gange tykkelsen af den aluminiumsplade, der skal svejses til. Således skal man ved påsvejsning af en overbygning i 6 mm aluminium anvende en 24 mm bred bimetal-strip.

Der findes også bimetaller til samling af aluminium (5083) og rustfrit stål (AISI 316L). Bufferlaget er i så fald et tyndt lag titanium. [2]



Figur 3.181 Bimetal-strip'en isvejses mellem ståldel og aluminiums-del ved hjælp af kantsømme.

3.17.1 SVEJSEANVISNINGER

Svejsningen af overgangsstykker i bimetal er relativt simpel. Den væsentligste betingelse, man skal være opmærksom på, er at man skal passe på risikoen for overophedning af grænsefladen mellem stål og aluminium.

3.17.2 MAKSIMUM TEMPERATURER

Bimetal samlinger er følsomme overfor forhøjede temperaturer. Ved temperaturer over 400°C opstår en intens intermetallisk diffusion, som hurtigt resulterer i dannelsen af sprøde, intermetalliske faser. Man kan ikke se disse sprøde faser visuelt, og de kan endda være vanskelige at opdage metallografisk, dvs. på microslib.

Det må tilstræbes, at **temperaturen i skillefladen** mellem stål og aluminium aldrig overstiger **300-350°C** [1],[2].

Den **maksimale mellemstrengstemperatur** (interpass temperatur) bør ikke overstige **200°C**. Med andre ord skal man ved svejsning af flere strenger oven på hinanden vente, til den foregående streng er kølet til under 200°C.

Temperaturene kan kontrolleres ved hjælp af termochrom stifter, "Tempilsticks" eller en digital termoføler.

Man skal være opmærksom på, at der ved måling med digitale termofølere kan være lidt dårlig kontakt mellem termoføler og bimetallet, så man måske ikke får registreret den absolutte spidstemperatur, men får en værdi, der erfaringsmæssigt kan ligge op til 50°C lavere.

Der findes også særlige malinger, som skifter farve, hvis de opvarmes over bestemte temperaturer.

Temperaturbegrænsningerne betyder, at **store, kraftige svejsestreng**e skal undgås. Det er mindre afgørende, hvilken strøm, der anvendes. En høj strøm skal blot følges af en tilsvarende høj svejsehastighed, så sømtværsnittet ikke bliver for stort. Vil man være sikker, anvender man tilsatsmaterialer i små dimensioner, og anvender en lav strøm (men også en lav svejsehastighed). Skal et større a-mål laves, må man anvende flere streng

Man må prøve sig frem for at se, hvor store streng

3.17.3 SVEJSEPROCESSER

På aluminiumssiden kan både TIG og MIG i princippet anvendes, men det må anbefales at bruge MIG, da risikoen for overophedning ved (for) langsom svejsning hermed er mindre.

På stålsiden kan beklædte elektroder eller pulverfyldt rørtråd anvendes. MIG-svejsning med massiv tråd kan også bruges, men det anbefales i så fald at bruge puls-MIG. Dette skal ses på baggrund af, at MIG-kortbue medfører en temmelig høj risiko for bindingsfejl, og MIG-spraybue nemt kan vise sig for varme-intensiv.

3.17.4 TILSATSMATERIALER

På stålsiden anvendes tilsatsmaterialer, som passer til normale konstruktions- eller skibsbygningsstål.

På aluminiumssiden anvendes tilsvarende en svejsetråd, der svarer til resten af aluminiumsstrukturen. Det kan typisk være en tråd af legeringen 5183.

Som beskrevet under punkt 2.1 vedrørende maksimale temperaturer skal man være varsom med at anvende tilsatsmaterialer i for store dimensioner. Ved MIG- og rørtrådssvejsning foreslås det, at man holder sig til $\varnothing 1,2$ mm.

3.17.5 HÆFTNING

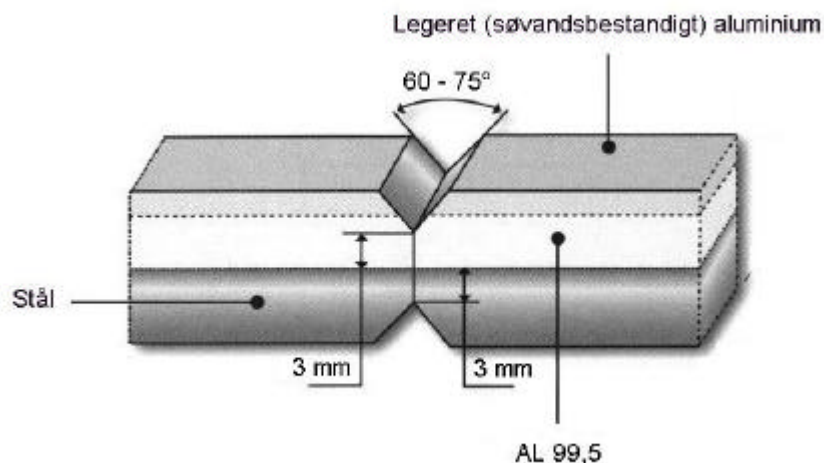
Hæftninger bør være korte, og slibes i start og stop

3.17.6 FORVARME

Forvarme bør så vidt muligt undgås, og burde normalt ikke være nødvendig. Skulle det være nødvendigt at forvarme, skal det undgås at varme på bimetallet.

3.17.7 STUMPSØMME I BIMETAL

Det er ikke muligt at svejse tværs over grænsefladen mellem aluminium og stål med godt resultat. Skal bimetalstrimler samles i forlængelse af hinanden eller i T-stød, må der stå et usvejst stykke tilbage på hver side af grænsefladen. Dette stykke skal være minimum 3 mm til hver side (se Figur 3.182).



Figur 3.182 Skærpning for sammensvejsning af bimetal strips. Et stykke på min. 3 mm på hver side af stål-aluminium skillefladen skal lades usvejst.

Hvis der ikke er noget gab mellem de to stykker før svejsning, vil tværkrympningen i svejsningerne bevirke, at materialet i det usvejste område bliver presset hårdt sammen. Ellers kan man ty til overhamring af dette område, hvis vandtæthed ønskes. En anden mulighed er at injicere en fugemasse eller epoxy gennem et hul.

3.17.8 KONTROL EFTER SVEJSNING

Efter svejsning kan der foretages en inspektion ved hjælp af **penetrantprøvning** (kapillarfarve). Man skal være opmærksom på, at grænsefladen mellem stål og aluminium normalt er lidt porøst, hvilket ikke påvirker samlingens egenskaber.

3.17.9 SKÆRING

Skæring af bimetal bør foretages mekanisk, altså ved savning eller anvendelse af skæreskive. Det vil ofte også være det mest oplagte og praktiske.

Abrasiv vandstråleskæring kan bruges, men snitbredden vil være lidt forskellig i henholdsvis stål- og aluminiumssiden.

Flammeskæring eller plasmaskæring må **ikke** bruges. Dog kan plasmaskæring under vand kan i princippet anvendes, men snitfladerne bør bearbejdes mekanisk før anvendelse i en konstruktion.

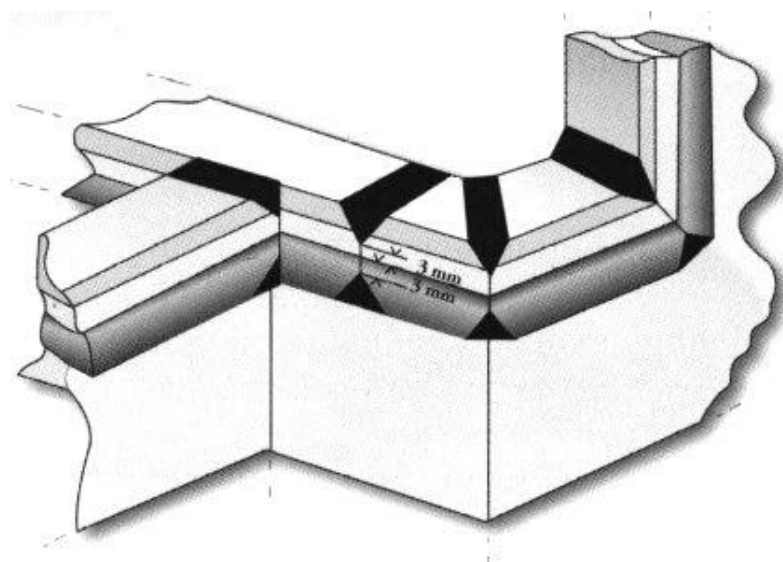
3.17.10 BUKNING

Bimetalstrips kan bukkes, men bukeradius skal typisk være minimum 10 gange strippens bredde eller højde, afhængigt af, i hvilket plan der bukkes. Det er naturligt nok den dimension, som ligger i plan med bukeradien, der er afgørende. Se også eksempel Figur 3.184.

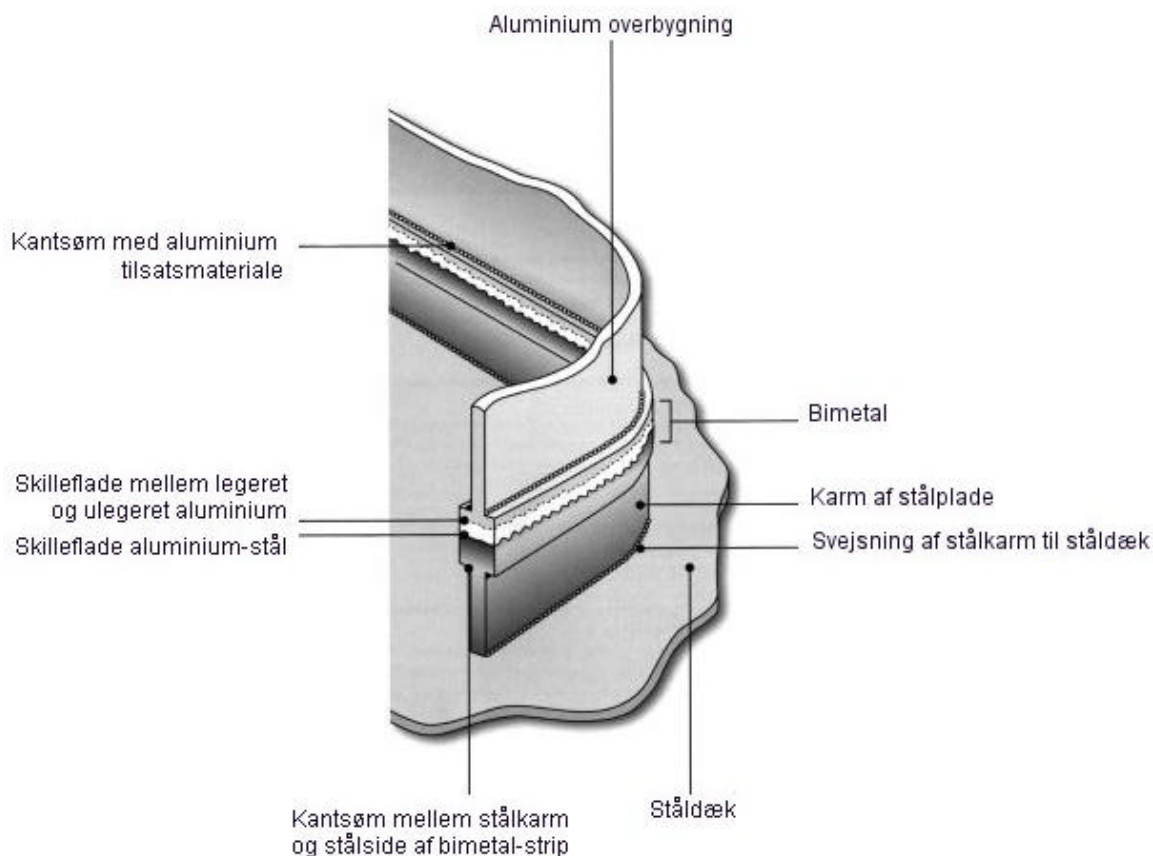
3.17.11 KONSTRUKTIVE RÅD

Forslag til samlinger i bimetal strips fremgår af Figur 3.183.

På skibsdæk kan det ofte være en fordel at anvende en ca. 100 mm høj stålkarm, som kan tilpasses eventuelle ujævnheder. Dette skyldes, at ståldæk på grund af svejsedeformationer o.l. sjældent er helt plane. Se Figur 3.184.



Figur 3.183 Forskellige samlingstyper mellem sektioner af bimetal. Bemærk, at skærpnings skal stoppe minimum 3 mm fra grænsefladen mellem aluminium og stål i bimetallet.



Figur 3.184 Anvendelse af stålkarm mellem bimetal og et let ujævnt staldæk, [2].

3.17.12 KORROSIONASPEKTER

Aluminium har et væsentligt højere galvanisk potentiale end stål, hvorfor man kunne forvente en voldsom galvanisk korrosion på aluminiumssiden. Som udgangspunkt må det da også anbefales, at der foretages en god overfladebehandling ved maling for at beskytte samlingen, men herefter går det i praksis normalt overraskende godt.

En hollandsk leverandør af bimetalstrips til skibsbrug fortæller, at man ved accelererede korrosionsforsøg i salttågekammer hurtigt fik nogle meget hårde, inaktive korrosionsprodukter i skillefladen mellem aluminium og stål. Herefter foregik korrosionen meget langsomt [2]. Tilsvarende har man foretaget korrosionsforsøg på malede emner med gennemgående ridser i malingslaget med lignende, positive resultater.

Ovenstående skal dog ses i kontrast til FORCE Instituttets egne erfaringer for, at der også kan opstå mærkbare korrosionsproblemer med bimetalsamlinger, hvis ikke disse er beskyttet med en fornuftig overfladebehandling med maling.

3.17.13 TYPISKE FEJL

Bimetalsamlingen kan ødelægges af følgende årsager:

- Overhedning af samlingen under svejsning (se afsnit 3.17.2).
- Svejsning for tæt på – eller hen over – skillefladen mellem aluminium og stål.
- Overbelastning af samlingen under montage på grund af dårlig tilpasning og/eller svejsekrympninger.
- Bukning af bimetal-strippen med for lille radius (se afsnit 3.17.10).

3.17.14 REFERENCER

Litteratur

- [1] **Nouri Levy and Jan Lablans**; *Effects of anode current and alumina-cover thickness on the temperature at the bimetal joint in an anode-rod assembly.*

Alcan International Ltd.

- [2] *Triclad – Welding aluminum to steel*

Technical Information brochure

Merrem André de la Porte B.V.

- [3] **R.F. Tylecote**

The Solid Phase Welding of Metals

Edward Arnold (Publishers) Ltd., 1968.

Tekniske rapporter

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0037, *Sammensvejsning af aluminium og stål ved hjælp af bimetalsamlinger.*

3.18 KVALITETSSTYRING OG KONTROL VED SVEJSNING

3.18.1 KVALITETSSTYRING GENERELT

For svejsning bør virksomhedens kvalitetsstyringssystem indeholde en række procedurer / instruktioner, der er nødvendige for at sikre produktets kvalitet :

- Kontrakt- og konstruktionsgennemgang
- Underleverandører af svejsearbejde, inspektion(NDT) og varmebehandling
- Svejsere og svejsekoordinatorer
- Personale til inspektion(NDT).
- Vedligehold af svejseudstyr.
- Liste over svejseudstyr.
- Produktionsstyring af svejseprocessen.
- Svejsespecifikationer(WPS'er) og svejseprocedurer(WPAR'er)
- Tilsatsmaterialer til svejsning.
- Opbevaring af grundmaterialer.
- Varmebehandling efter svejsning.
- Inspektion før, under og efter svejsning.(inklusive acceptkriterier)
- Afvigelser og korrigerende handlinger.
- Kalibrering.
- Identifikation og sporbarhed.
- Kvalitetsdokumentation.

NDT : Non Destructive Test

WPS : Welding Procedure Specification

WPAR : Welding Procedure Approval Record

Denne række emner svarer stort set til indholdet af EN 729-2 (Kvalitetskrav for svejsning Smeltesvejsning af metalliske materialer Fuldstændige kvalitetskrav), og ved udarbejdelsen af procedurer og instruktioner kan der udover denne standard, søges yderligere oplysninger i EN 1011-4. (Retningslinier for svejsning af metalliske materialer Del 4 Lysbuesvejsning af aluminium og aluminiumlegeringer)

Hvis en virksomhed også foretager udvikling og konstruktion bør der som minimum være procedurer/instruktioner for udførelse og check af beregninger.

3.18.2 SVEJSEKVALITET IFØLGE EN 30042

Den europæiske standard DS/EN 30042 (Lysbuesvejste samlinger i aluminium og dets svejsbare legeringer. Vejledning om kvalitetsniveauer for svejsefejl) og må betragtes som det væsentligste dokument for svejsekvalitet for de 3 mest benyttede svejseprocesser til aluminium, MIG-, TIG- og plasmavejsning.

DS/EN 30042 klassificerer 3 kvalitetsniveauer for svejsefejl :

B : Skærpet

C : Mellemliggende (opfattes normalt som god håndværksmæssig kvalitet)

D : Moderat

EN 30042 er den oftest anvendte standard for kvalitetsniveauer, og der refereres generelt til denne fra andre europæiske standarder. Der findes strengere krav, f.eks. for udmattelsespåvirkede konstruktioner ifølge Eurocode 9 Part 2.

Når der refereres til gældende standarder som EN 30042, kan lempelser principielt ikke accepteres. Derfor behøver man ikke automatisk at gå efter kravene i EN 30042. Ved et ethvert projektarbejde kan man prøve at aftale et reduceret acceptniveau med bygherre og eventuelle myndigheder, og henvise til de relevante rapporter eksempelvis fra SASAK-projektet. Som guideline for eventuelle lempelser kan man anvende skemaet for vægtning af fejltypen på næste side.

Den enkelte fejltype kan vurderes i sammenhæng med kvalitetskriteriet eller omvendt, afhængig af om skemaet læses lodret eller vandret. Overordnet ses, at udmattelse er den mest kritiske påvirkning.

Vægtning af forskellige fejltypers ved svejsning i aluminium

Kvalitetskriterie Typiske Fejltype ↓	→	Styrke, Statisk træk / Brudforlængelse	Styrke, Statisk tryk	Styrke, Udmattelse	Tæthed (Trykprøve - kontrol)	Overflade-finish Korrosion	Overflade-finish Visuel	Overflade-finish Maling	Målfasthed (buler, vinkelknæ)	NDT-metode
Indvendige porer		** ¹⁾			*					RT
Overfladeporer		** ¹⁾			*	*	***	*		VT, PT
Bindingsfejl Indv. fejl Fejl til overfladen		** ***		* ***	*	*	*	*		UT, RT, PT udv. fejl
Mangelfuld indtrængning Indv. fejl Fejl til overfladen		** ***		* ***		*	*	*		RT, VT udv. fejl
Kraterrevne / -pore						*	*	*		VT, PT
Konveks kantsøm				**			*	*		VT
Kantsøm mæd for stort a-mål									**	VT
Sidekærv		*		**		*	*	*		VT
Overvulst				**			*		**	VT
Gennemløb				***			*			VT
Forsætningaf fugekanter		* Svejst ensidig	**	**			*			VT
Indadhvælvning i rod				*		*	*	*		VT
Mangelfuld opfyldning		**					*			VT
Overfladeridser				**		*	*	*		VT
Slibespor				**			*	*		VT
Reduceret (Slibefejl)	godstykkelse	*	*							VT, UT
Tændsår				*			**	**		VT
Svejsesprøjt							**	*		VT
Slagmærker				*		**	***	***		VT

¹⁾ Porer i svejsesamlingen i moderat omfang har typisk ikke indflydelse på styrken, hvis svejsemetallet er stærkere end grundmaterialet eller den varmpåvirkede zone (HAZ)

Fejltypens indflydelse på de forskellige egenskaber/kvalitetskriterier:

* Mindre ** Nogen *** Væsentlig

3.18.3 ACCEPTKRITERIER / REPARATION

Reparation generelt

Ved reparation anvendes generelt den oprindelige WPS til opsvejsning, og kvalitetskriterierne vil være de samme som de oprindelige krav. Dog skal følgende overvejes:

- Skal kunde eller myndighed underrettes ved reparationer?
- Hvor mange gange må der repareres ved slibning og genopsvejsning?
- Bør der foretages NDT-undersøgelse i forbindelse med reparationen, f.eks. penetrant af slebne/bearbejdede overflader inden svejsning?

Acceptkriterierne i EN 30042 beskriver 24 indre og ydre fejltypen i svejsninger, og for at undgå dem, er det vigtigt at kende sammenhængen mellem fejl og procesdata. Herunder er der udarbejdet en tabel, der for hver enkelt fejltypen angiver den eventuelle årsag til fejlen, og hvordan den forebygges. Tabellen er delvis baseret på en tilsvarende tabel i EN 1011-4, og de opnåede resultater i SASAK-projektet. Efter hver fejltypen er angivet nr. ifølge EN 30042 og et 3 eller 4-cifret referencenummer for fejltypen ifølge EN ISO 6520-1 Klassifikation af geometriske fejl i metalliske materialer – Del 1: Smelte-svejsning.

Tabel 3.46 Oversigt over fejltypen, deres hovedårsag og forholdsregler.

1-2) REVNER (100) VARMREVNER / KRATERREVNER(104)

Hovedårsag	Forholdsregler
Dårlig størkningsprofil af smeltebadet.	Vælg et tilsatsmateriale med bedre svejselighed. Afslut svejsestrengen på udløbsplade eller brug slope down funktion. Hvis man ikke råder over slope down funktion føres lysbuen tilbage i den størknende svejsesøm, og efterføder denne. (SASAK-RAP-SV-AKS-MIG-0031-00) Afslibning af afslutningskrater. (SASAK-RAP-SV-AKS-MIG-0031-00)
Indre spændinger.	Anvend svejserækkefølge, der reducerer spændinger og deformationer.
Opsmeltning i HAZ-korngrænserne af sejringer med lavt smeltepunkt.	Reduktion af varmetilførsel og interpass-temperatur. Brug 1-strengssvejsning. Reduktion af svejse-spændinger. Vælg et passende tilsatsmateriale f.eks. AlSi.

Se også SASAK-RAP-E2-AKS-FI-0001-00.

3-7) PØRER (lineær porøsitet 2014, poresamling 2013)

Hovedårsag	Forholdsregler
Forurennet tilsatstråd, fugt på tilsatsmateriale.	Rensning af tilsatsmateriale. Opbevaring i rent lagerrum med temperatur over dugpunktet.
Forurennet sømområde, fugt på fugeflader	Rensning og tørring af fugeflader. Evt. anvendes forvarme. Grundmateriale skal mindst have samme temperatur som omgivelserne.
For højt hydrogenindhold i grundmateriale, beskyttelsesgasser og/eller tilsatsmateriale.	Kontakt leverandør.
Gasser kan ikke nå at undslippe smeltebadet.	Varmetilførsel øges og eventuelt anvendes forvarme eller en anden sømform.
Uegnede svejsestillinger som side-ind, under-op og faldende.	Brug fortrinsvis hvor det er muligt oven-ned, stående kantsøm og stigende.
Uren beskyttelsesgas på grund af læk i slanger fra vandkølesystem eller til beskyttelsesgassen.	Lækage elimineres.
Uren beskyttelsesgas på grund af fugtindtrængning gennem slanger. Dårlig slangekvalitet.	Brug beskyttelsesgasser i overensstemmelse med EN 439 Beskyttelsesgasser for lysbuesvejsning. Anvend bedre slangekvalitet. Anvend kortest mulige slanger. Anvend flekslange forstærket med metalnet. Udskift defekte slanger.
Turbulens i gasflow på grund af for høj eller lav hastighed.	Optimer flowhastighed og undgå træk.
Lysbuespænding for stor.	Lysbuespænding optimeres.(reduceres)
Pistolhældning for lille.	Brug korrekt pistolhældning.

8) OXIDINDESLUTNINGER (303)

Hovedårsag	Forholdsregler
Oxyddannelse i lysbuen eller smeltebadet ved indtrængning af ilt(oxygen) på grund af afbrudt eller utilstrækkelig gasflow.	Forhindres ligesom porer. Optimer gasflow og undgå træk.
Utilstrækkelig rensning af fugeoverflade og/eller allerede svejste strenge.	Rensning af svejsestedet.
Itoverskud ved forvarmning med gasbrænder.	Indstilling af gasbrænder forbedres.
Ukorrekt føring af TIG-tilsatstråd.	Tilsatstråd holdes inde i beskyttelsesgassen.

9-10) INDESLUTNINGER METALLISKE(304) WOLFRAM(3041) KOBBER(3042)

Hovedårsag	Forholdsregler
Wolframindeslutninger ved TIG- eller Plasma-svejsning på grund af for høj svejsestrøm på wolfram-elektroden eller wolframelektroden stikkes ned i smeltebadet.	Tilpas svejsestrømmen til den aktuelle type og diameter af wolframelektroden, og undlad kontakt mellem wolframelektrode og smeltebad.
Kobberindeslutninger ved MIG-svejsning kan opstå ved overhedning eller nedsmeltning af kontaktdyse.	Vælg svejsepistol og kontaktdyse, der passer til svejsestrømmen. Brug kortere lysbuelængde.
Kobberindeslutninger ved MIG-svejsning kan også stamme fra kobberbacking.	Udskift kobberbacking med rustfrit stål, keramik eller aluminium.

11-12) BINDINGSFEJL(401), MANGELFULD INDTRÆNGNING (402)

Hovedårsag	Forholdsregler
For ringe varmetilførsel ved MIG-svejsning.	Varmetilførslen øges. Større svejsepænding og strømstyrke og mindre svejsehastighed.
Uhensigtsmæssigt valg af svejseparametre ved krav til konstant varmetilførsel.(f.eks. kantsøm)	Svejsepænding og strømstyrke øges sammen med svejsehastigheden. (SASAK-RAP-SV-AKS -FI-0016-00, SASAK-RAP-AKS-FI-0017-00)

14) SIDEKÆR V (5011)

Hovedårsag	Forholdsregler
For stort luftgab ved MIG-svejsning af kantsøm. For stor varmetilførsel.	Reduktion af luftgab ved kantsømme. Reduktion af varmetilførsel. Hvis der anvendes argon/helium blandinger, kan der evt. skiftes til ren argon.(SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0026-01) Det bør sikres, at indtrængningen stadig er tilstrækkelig.

15) OVERVULST (502)

Hovedårsag	Forholdsregler
For lav svejsepening ved MIG-svejsning.	Øgning af svejsepening, eller skift fra argon som beskyttelsesgas til argon/helium blanding. (SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0016-00)

TILLADTE DEFORMATIONER OG RETNING

Konsekvenserne ved for store deformationer vil enten være retning eller reparation.

Retning bør udføres efter procedure/instruktion godkendt af egen virksomhed og kunde, da retning med eksempelvis varmebrænder er kritisk for aluminiumskonstruktioner. Afsnit 3.15 kommer nærmere ind på retning af deformationer.

Reparation kan foretages ved udskæring af af den deformede del, og indsvejsning af nye materialer. Der bør ligeledes udarbejdes en specifik procedure/instruktion for denne type reparation med angivelse af svejserækkefølge. Afsnit 3.12 behandler svejsereparationer nærmere.

For at undgå for store deformationer kan der iagttages en række forholdsregler. Det er muligt, at beregne både krympninger og vinkelknæk som anvist i afsnit 3.14.

Man kan så på forhånd tage højde for de forventede deformationer. Af formelsamlingen ses det, at vinkelknækket ved kantsømme kan reduceres ved at anvende færre strenge med større tværsnits-areal. Hvis man vil reducere tværkrympningen gøres dette med flere strenge med mindre tværsnits-areal. Generelt skal man reducere tværsnitsarealet mest muligt, hvor det kan accepteres, idet selv små reduktioner af f.eks. α -målet formindsker deformationerne væsentligt (SASAK-RAP-VA-AKS-FI-0004-01).

Vinkelknæk og buler kan minimeres ved en passende svejserækkefølge, se afsnit 3.14.

3.18.4 KONTROLMETODER

Kontrol eller inspektion kan udføres med en række forskellige ikke-destruktive metoder af svejse-sømme. I NDE-ståbien[2] er der beskrevet 38 forskellige metoder, hvoraf de fleste kan anvendes for aluminium. Blandt de mest almindelige metoder kan nævnes :

Metode	Forkortelse	Princip	Sammenligning med stål
Visuel inspektion	VT	Visuel bedømmelse	Ingen forskel
Radiografi	RT	Gennemstråling	Større godstykkelser ved Al.
Ultralyd	UT	Gennemstråling	Ingen større forskel
Penetrant	PT	Kun overfladefejl	Ingen forskel
Hvirvelstrøm	ET	Stor indtrængning	Særdeles velegnet til Al.

3.18.5 PRODUKTIONSMÆSSIGE KONSEKVENSER VED INDFØRELSE AF ALUMINIUM

Sammenlignes aluminiumskonstruktioner med stålkonstruktioner, vil der være en række produktionsmæssige konsekvenser for en virksomhed, der vil begynde at bruge aluminium i værkstedet.

Disse forhold er beskrevet herunder i afsnit med referencer til denne rapport.

Udstyr/værksted

- Investering i nye svejsemaskiner og udstyr til skæring.(afsnit 3.18.4)
- Værksteder med fremstilling af aluminiumskonstruktioner skal fysisk adskilles fra sort produktion.

Svejsere

- Certificering af svejsere tager længere tid, og beståelsesprocenten er en del lavere.
- Der kan være behov for at svejsere udfører en specifik arbejdsprøve, når adkomstforholdene er dårlige og/eller konstruktionsdetaljerne er komplicerede (afsnit 3.18.11).
- Det vil ofte være nødvendigt at rengøre både grundmaterialer og svejsetilsatsmaterialer

Opmærkning

- Der skal bruges blød tuschpen / speedmarker for at undgå ridser, der kan reducere udmattelsesstyrken og give anledning til korrosion.

Skæring / bearbejdning / formning

- Plasma-skærebord skal være ”tørt”, da vandbaseret skærebord for plasma kan medføre optagelse af hydrogen og dermed give risiko for porer.
- Anvendes der stålunderlag ved skæring skal gennembrænding undgås for ikke at aluminium skal kontamineres med stål.

- Ved mekanisk bearbejdning skal benyttes rene og oliefrie smøremidler, evt. på methylbasis, som giver god køling og smøreevne, og som fordamper med intet eller kun lidt rensbehov efter svejsning.
- Fugekanter bør sand-/glasblæses eller slibes før samling, da indeslutninger kan forårsage dårlig svejsekvalitet.
- Værktøjer skal have afrundede kanter og passende krumningsradius, da ridser og skarpe kanter reducerer udmattelsesstyrken.

Svejsning

- Ved MIG-svejsning er der større risiko for reparationer ved start og stop og generelt er denne svejseproces svær at styre for svejseren, da toleranceområderne for udførelsen er mere snævre.
- Kvalifikation af svejseprocesser ved procedureprøvning kan være mere tidskrævende, da trækprøver kan have for ringe styrke, og ved hærdbare legeringer kan der oftere forekomme revner.
- Reparation af svejseømme er mere kritiske og kræver yderst velkvalificerede smede og svejsere.

Tilsatsmaterialer

- Ved MIG-svejsning sikres, at trådspole er monteret fedtfrit og beskyttet mod støv og slibegnistre, og eventuelt kan tråden passere et rensfilter før tråden løber ud igennem trådlinerens for at undgå fremføringsproblemer.
- Ved TIG-svejsning opbevares tilsatstråden tørt og varmt i lufttæt beholder eller i original-pakning

Samling

- Konstruktioner eller delelementer skal være tilpassede for samling for at undgå alt for store spændingskoncentrationer, idet dårlig tilpasning er ødelæggende for udmattelsesstyrken, og kan resultere i reparationer.

Håndtering og lagring

- Aluminium skal opbevares tørt, da længere tids lagring i fugtigt klima forringer svejsningernes kvalitet.
- Ved lagring og transport i virksomheden skal det sikres ved passende metoder, at der ikke forekommer afsmitning fra ståloverflader, såsom stålreoler, gafler på trucks, bukkemaskiner, valser, sakse, skærebørde.
- Da aluminium har mindre styrke end stål skal udvises større forsigtighed ved løft af plader, og delkonstruktioner skal afstives bedre ved transport.

- Aluminium er et blødere og mere sårbart materiale og skal håndteres mere varsomt end stål. Ved udmattelsepåvirkede konstruktioner er det især vigtigt at undgå kærverdannede fejl, som ridser og skærespor, og det gælder både under håndtering og selve svejsearbejdet (afsnit 3.18.1).

3.18.6 REPARATIONER OG UDBEDRINGER

Reparation af svejsninger i aluminium bør udføres meget omhyggeligt, da der er stor risiko for at slutresultatet bliver endnu ringere. Det er derfor nødvendigt at undersøge følgende forhold inden reparation :

- Er svejseren kvalificeret. Et EN 287-2 svejsercertifikat vil ofte ikke være tilstrækkeligt, men eventuelt udvides med en passende arbejdsprøve som beskrevet i afsnit 3.18.11.
- Hvis dårlig adkomst har været årsagen til fejlen, skal tilstrækkelig adkomst sikres.
- Legeringstype skal være oplyst, således at det kan checkes, at der anvendes egnet WPS. Hvis legeringstypen ikke er kendt bør der foretages en materialeanalyse af emnet (analyse af materialet giver ingen oplysninger om varmebehandlingen.)
- Hvis der er foretaget gentagne reparationer, bør det undersøges om der skal foretages en udskiftning af materialet omkring svejsningen. Nogle standarder og specifikationer har max krav til antal reparationer, f.eks. DS 419 med 2 gange.
- Ved gentagne reparationer ses ofte en forringelse af styrkeegenskaberne omkring svejseømmen på grund af varmepåvirkningen fra hver svejsning. Også udmattelsesstyrken forringes. Det skyldes, at reparationen ikke udføres under optimale betingelser, og slibespor/ ridser, ujævn sømovergang, sidekærv og bindingsfejl vil være medvirkende den forringede udmattelsesstyrke. Det er til gengæld vist i SASAK-projektet med forsøg, at hvis reparationer udføres under optimale betingelser, kan styrkeegenskaberne bevares efter reparation. (SASAK-RAP-E5-FI-0001-00, SASAK-RAP-LE-AKS-KEH-0006-03)

3.18.7 DOKUMENTEREDE GODE RÅD OM DESIGN

Design kan i forbindelse med fremstilling af aluminiumskonstruktioner opfattes som en kombination af beregninger og konstruktiv udformning, som sikrer at konstruktionen kan holde til de forventede påvirkninger, og at udformningen sikrer , at der er adkomst for virksomhedens udstyr og svejsere/smede.

Hensigtsmæssige regler for udformning af detaljer, er udførligt beskrevet i afsnit **2.12**.

Designreglerne for aluminium set i forhold til stål er beskrevet i afsnit **1.3**.

3.18.8 ADKOMST- OG ARBEJDSFORHOLD

”Rummeligheden” er ofte lille i aluminiumskonstruktioner. Dette skyldes at aluminium har mindre stivhed end stål, og derfor skal afstives mere. For store konstruktioners vedkommende anvendes oftest kun MIG-svejsning. Dette betyder at man, som ved stål, ikke blot kan ”bøje elektroden” for at opnå en bedre ”tilgængelighed”. En håndregel ved MIG-svejsning er at svejseudstyret skal kunne komme ind mod fugen i en 45° vinkel til svejsestedet, og endvidere skal man kunne få hovedet næsten helt frem til svejsningen. Dette skulle sikre at der er rimelige pladsforhold til at udføre svejsningen på. (SASAK-RAP-MO-AKS-KEH-001-03)

Et andet aspekt, som er af væsentlig betydning, når talen går på adkomst- og arbejdsforhold er sundheds- og sikkerheds aspektet. I denne forbindelse er her primært tænkt på røg- og strålingsudviklingen, og her er især dannelsen af ozon et væsentligt parameter, der skal tages højde for.

Maksimal koncentration på arbejdsplads er normalt 0,1 ppm eller 0,2 mg/m³. Det anbefales derfor, at der ved svejsning i aluminium altid anvendes friskluftsmaske, udsugningsanlæg eller anden alternativ måde at fjerne forureningen på.

3.18.9 NORMER OG STANDARDER

Ved svejsning af aluminiumskonstruktioner vil der oftest blive foreskrevet standarder og specifikationer, således at der kan henvises til et grundlag for konstruktion, udførelse og anvendelse. Dette sikrer, at virksomheder, der fremstiller aluminiumskonstruktioner, teknisk og juridisk vil stå langt stærkere, hvis der forekommer fejl og havarier. Tages der udgangspunkt i de overordnede standarder og normer for aluminiumskonstruktioner vil der i disse være henvisninger til alle øvrige standarder, der vedrører aluminium. Det gælder kvalitetsstyring, materialer, kvalifikation af svejseprocesser og personale, acceptkriterier og inspektion. Herunder er omtalt nogle af de primære standarder, der kan bruges ved svejsning af aluminium.

DS 419	Norm for aluminiumskonstruktioner
Eurocode 9	Design of aluminium structures
	Part 1-1 General rules and rules for buildings
	Part 1-2: General rules – Structural fire design
	Part 2 Structures susceptible to fatigue
BS 8118	Structural use of aluminium
ANSI/AWS D1.2	Structural Welding Code - Aluminium

(ANSI : American National Standards Institute, AWS : American Welding Society)

For en mere udførlig oversigt over standarder henvises til rapport SASAK-RAP-KV-AKS-MIG-0007.

Når man bruger disse standarder må man gøre sig klart, at grundlaget for beregning og konstruktion hænger sammen med kravene til udførelse og inspektion. Man kan ikke beregne en konstruktion ifølge f.eks. DS 419, og så undlade certificering af svejsere og inspektion med NDT-metoder. Forudsætningerne for beregningerne er netop at de foreskrevne retningslinier følges og de anførte acceptkriterier overholdes.

For certificering af svejsere og svejseopstillere er der 2 europæiske standarder :

Godkendelsesprøvning af svejsere Smeltesvejsning

EN 287-2 + A1 Del 2 - Aluminium og aluminiumlegeringer (ISO 9606-2, prEN ISO 9606-2)

Godkendelsesprøvning af svejsepersonale til smeltesvejsning og opstillere til modstandssvejsning.

EN 1418 Fuldt mekaniseret og automatisk svejsning af metalliske materialer. (ISO 14732)

3.18.10 ØKONOMISKE KONSEKVENSER

Problematikken ved fremstilling af svejste aluminiumskonstruktioner svarer på en række områder til stålkonstruktioner, men på nogle punkter er der væsentlige forskelle.

For det første er materialeprisen højere på aluminium, og det medfører at udover anskaffelsen er omkostningerne ved reparationer og kassationer noget større.

Desuden bruges der også aluminiumemner ved certificering af svejsere og kvalifikation af svejseprocedurer, og tilsatsmaterialerne er også dyrere.

Disse ekstra omkostninger kan forudses og beregnes, men det må påregnes, at uddannelse og certificering af svejsere også er mere kostbar. Ved certificering af svejsere til MIG-svejsning ses almindeligvis, at beståelsesprocenten er lavere bl.a. på grund af porer og bindingsfejl end ved tilsvarende prøver i stål.

Der kan ikke gives nøgletal, men hvor måske 10% ikke består ved stål er det ikke ualmindeligt at 50% ikke klarer det ved aluminium. Når der er problemer med bøjepøverne kan det somme tider være en fordel at vente 3-4 uger efter svejsningen med at lave bøjepøverne, således at emnerne når at modne ved stuetemperatur.

Kvalifikation af svejseprocedurer i aluminium medføre også øgede omkostninger i forhold til stål.

Her kan der være problemer med for lav styrke i HAZ, og i hærdbare aluminiumslegeringer ses ofte revner. Alt sammen forhold der medfører omprøvning og dermed øgede omkostninger.

Lagring af grundmaterialer er også mere kostbar, idet lagring bør foregå indendørs og pladerne skal helst opbevares stående med tilstrækkelig luftspalte for at sikre ventilation.(SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0008-01)

Fugeforberedelse er også dyrere, da aluminium ikke kan flammeskæres på samme måde som stål. Der er langt større kapacitet hos underleverandører af traditionelt skærearbejde, så alt andet lige vil også udgiften her være højere (SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0008-01).

Som et sidste punkt kan nævnes at svejsemaskiner for TIG- og MIG-svejsning typisk er dyrere, og der stilles større krav til udstyr, f.eks. push-pull og slope-down funktion (SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0025-01).

3.18.11 UDDANNELSE

Generelt

Træning og uddannelse bør i en fremstillingsvirksomhed omfatte personale i konstruktionsafdelinger, svejsere, smede, maskinarbejdere, værkførere og svejsekoordinatorer og inspektionspersonale.

Ved skift fra stål til aluminium vil det være rimeligt at gennemføre aluminiumsspecifikke kurser for disse personalegrupper, idet grunduddannelserne er mest fokuseret på stål. Sådanne kurser bør omfatte :

- Materialekendskab, metallurgi, fysiske og mekaniske egenskaber, legeringer, korrosion.
- Designmæssige krav til konstruktion
- Fremstillingsprocesser for aluminium, skæring, bukning, smedning, bearbejdning, svejsning, limning og mekanisk sammenføjning.
- Kendskab til potentielle fejl samt procedure for at undgå disse, herunder vurdering af svejsningers kvalitet, udbedring og reparation af svejsefejl
- Overfladebehandling.
- Opbevaring og håndtering af materialer

Uddannelse af svejsepersonale

Der findes en række forskellige skoler og institutioner, der udbyder kurser i fremstilling og svejsning af aluminium :

- Tekniske Skoler (lærlingeuddannelse, certificering af svejsere, virksomhedstilpassede kurser)
- AMU-centre (certificering af svejsere, virksomhedstilpassede kurser)
- Ingeniørskoler (grunduddannelse)
- Godkendte Teknologiske Serviceinstitutter, GTS (grundkurser og virksomhedstilpassede kurser)

FORCE Institutet, der tilhører gruppen af GTS-Institutter, udbyder en række uddannelser for svejsepersonale. Udover certificering af svejsere og temadage om aluminium tilbydes uddannelse af svejseteknikere på forskellige niveauer :

- EWP (European Welding Practitioner)
- EWS (European Welding Specialist)
- EWT (European Welding Technologist)
- EWE (European Welding Engineer)

Disse uddannelser følger retningslinierne fra den europæiske svejseorganisation EWF, European Welding Federation, og indtil videre er hovedvægten lagt på stål, mens aluminium behandles i mindre omfang.

AWS (American Welding Society) er den amerikanske pendant til EWF, men med en tiltagende internationalisering og gensidig anerkendelse af hinandens regelværk, er der en meget stor grad af overlap i de to uddannelsessystemer, og den internationale svejseorganisation, IIW, International Institute of Welding, har indledt et samarbejde med begge parter.

Svejsercertificering og arbejdsprøver

Svejsere, der udfører svejsearbejde på aluminiumskonstruktioner ifølge DS 419, skal være kvalificerede, og i standarden henvises til EN 287-2 og EN 1418, men det er ikke et ”skal” krav.

Til gengæld skal svejserne være kvalificeret efter tilsvarende krav, hvilket i praksis vil sige certificering ifølge EN 287-2 og EN 1418.

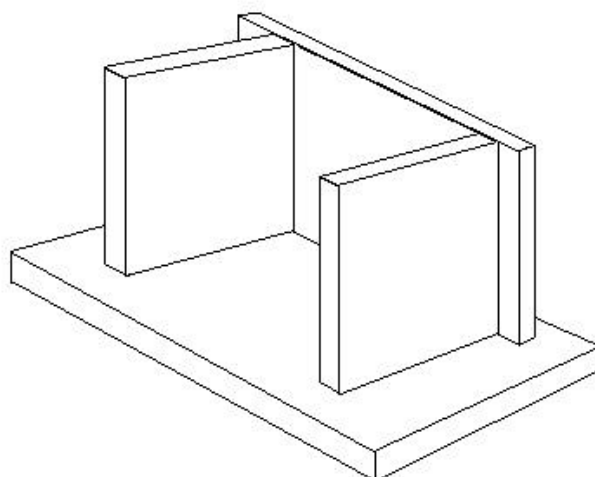
Udover svejsercertificeringen bør virksomheden også overveje, om et svejsercertifikat alene nu også er tilstrækkelig ved MIG-svejsning. Ved certificering til kantsømme ifølge EN 287-2 skal der svejses en 150 mm lang kantsøm, men i arbejdssituationen skal der svejses rundt om hjørner, og der skal vælges rækkefølge for at slippe godt fra et ”indvendigt” hjørne.



Figur 3.185 Vanskelige adkomstforhold kan betyde, at man bør overveje specifikke tillægsprøver, som afspejler den aktuelle arbejdssituation, (Bilcon A/S).

Det vil derfor være hensigtsmæssigt at lade svejseren udføre en tillægsprøve, som svarer til arbejdet. F.eks. kunne arbejdsprøven se ud som vist på Figur 3.186. Der er ikke angivet dimensioner, da de skal tilpasses, så de svarer til den aktuelle konstruktion. Der kan desuden tilføjes andre konstruktionsdetaljer, såsom knæ og afspændings-huller. Især de sidste kan give svejseren mange problemer, så det vil være passende at få afprøvet teknikken inden man giver sig i kast med den endelige konstruktion.

Acceptkriterier for arbejdsprøven kunne vælges fra EN 30042 eller et acceptniveau, der er aftalt med bygherren.



Figur 3.186 Eksempel på emne for arbejdsprøve, [1].

3.18.12 REFERENCER

Litteratur

- [1] **Troels Christensen**, FORCE Instituttet.
- [2] **Knud G. Bøving**, *NDE ståbi* - Metoder til ikke-destruktiv tilstandskontrol.

Tekniske rapporter

SASAK-RAP-KV-AKS-FI-0007, *Kvalitetskriterier for svejsning*

3.19 ØKONOMISKE ASPEKTER

I afsnit 3.4 er en række generelle aspekter vedrørende valg af svejseproces behandlet. I forbindelse med valg af proces indgår også økonomiske betragtninger som:

- **Svejseshastighed** (mandtimer, evt. maskintimer)
- **Behov for fugeforberedelse** (mandtimer, evt. maskintimer)
Herunder hører også betragtninger om tolerancekrav for svejséfuger – af hensyn til processen
- **Evt. behov for efterbearbejdning** (mandtimer, evt. maskintimer)
En relativt langsom proces
- **Afskrivning og forrentning af udstyr** (svejsseudstyr og evt. mekanisering / robotisering)
Visse processer såsom plasma, laser og Friction Stir er ikke egnet til manuel svejsning, og vil kræve mekanisering / robotisering.
- **Øvrige udgifter til produktionsudstyr** (vedligehold, reservedele, evt. licensafgifter)
- Eventuelle **omkostninger til uddannelse og certificering** af svejsere.
- Eventuelle **omkostninger til procedureprøvning**
Svejsprocedureprøvning kan være et krav fra klassifikationsselskab, myndigheder eller kunde. En eftervisning af, at man får de resultater, man ønsker kan også være dikteret af almindelig sund fornuft.

Andre faktorer vil dog også spille ind:

- **Kan processen levere den nødvendige kvalitet** både geometrisk og metallurgisk?
*Under geometrisk kvalitet hører dels svejsfejl som revner og porer dels overfladebeskaffenhed. Nogle gange gør det ikke noget, at en svejseproces er relativt langsom, hvis den til gengæld med stor sikkerhed leverer den ønskede geometriske kvalitet. Det er eksempelvis nemmere at undgå porer ved TIG-svejsning end ved MIG-svejsning.
Ved metallurgisk kvalitet forstås materialeegenskaber såsom typisk styrke.*
- Mestrer virksomheden processen, og er det **nemt eller svært at skaffe medarbejdere** med den nødvendige kompetence?

3.19.1 INVESTERINGSBEHOV FOR ALTERNATIVE SVEJSEPROCESSE

For strømkilder kan nedenstående, vejledende prisniveauer opstilles. I forbindelse med automatiseringsopgaver skal der yderligere påregnes investeringer i fiksturer og føring eller robot.

TIG De billigste AC TIG-strømkilder koster fra ca. 20.000 kroner, men er typisk begrænset til max. 160-180 ampere. Et anlæg til max. 250 ampere koster typisk 30-35.000 kroner. Alle disse mindre anlæg leveres uden vandkøling.

Til industrielt brug må der typisk regnes med en investering på **50-70.000 kr.** alt inklusive (håndbrænder og reduktionsventil, og normalt med vandkøling).

- MIG** De billigste svejsemaskiner kan fås fra ca. 4.000 kroner – til hobbybrug.
Til industriel brug må der påregnes med en investering på **50-100.000 kr.** (enkelttråd, synergisk puls).
For tandem-anlæg skal der typisk regnes med en investering i størrelsesorden **250.000 kr.**
- Plasma** De billigste AC 250 ampere anlæg koster typisk ca. 125.000 kr. Et anlæg bestående af en 4500 ampere AC/DC strømkilde, plasmaforsats (evt. indbygget), brænder, koldtrådstilførsel samt separat køleenhed koster omkring **150-200.000 kr.** Anlæg op til 700 ampere findes kommercielt.
- Friction Stir** Listepriiser starter typisk ved godt **1 million kr.** for et mindre anlæg, som kan svejse aluminium fra 1,5 til 6 mm tykkelse.
Det kan dog ikke afvises, at ”hjemmelavede” løsninger baseret på eksempelvis en konverteret CNC fræsemaskine kan realiseres noget billigere.
Store anlæg, som kan sammensvejse paneler i store længder, vil hurtigt koste et tocifret millionbeløb.
- LASER** **CO2-lasere:** Typisk regnes der med **knapt ½mio. kr. per kW** for selve laseren. Hertil kommer håndteringsudstyr (fra simpelt rundbord til større 5-aksede installationer, til håndtering af emnerne).
YAG-lasere: Typisk regnes der med **godt ½mio. kr. per kW.** I dette beløb indgår fiberoptik til transmission af laserlyset, men ikke håndteringsudstyr.
Som en groft vejledende tommelfingerregel behøves 1 kW lasereffekt per millimeter svejsedybde.
- Robotter** Priser starter typisk ved et par hundrede tusinde kroner for en mindre robot, som kan håndtere en lysbuesvejsepistol. Til gengæld er der forståeligt nok ikke nogen egentlig øvre grænse for, hvor kostbar en robotinstallation kan laves.
- Føringer** En langføring til samling af plader koster fra ca. **100.000 kr.** (svejsning af ca. 1 meter).

De ovennævnte prisindikationer var gældende på redigeringstidspunktet, i 2001.

3.19.2 FAKTORER AF BETYDNING FOR OMKOSTNINGER OG BESPARELSER

Det er væsentligt at identificere de faktorer, som medfører omkostninger ved indførelse af processer, som kræver større investeringer, eller automatiseret / robotiseret svejsning.

Følgende faktorer kan betragtes som typiske og væsentlige, omend ikke altid lette at kvantificere:

Faste omkostninger:

- **Afskrivning** af udstyr (slid / teknologisk forældelse)

Udstyr:

- Svejsestrømkilde / maskine
- Fremføringsenhed (føring, robot el.lign.)
- Evt. fiksturer, manipulatorer, fugefølgeudstyr
- Særligt fugeforberedelsesværktøj (f.eks. spåntagende fugeforberedelse ved svejsning af stumpsømme på grund af tolerancekrav – kan være nødvendigt ved eksempelvis lasersvejsning).

Variable omkostninger:

- **Vedligeholdelse** af udstyr
- **Forbrugsmaterialer** (Tilsatsmaterialer, beskyttelsesgas, m.m.). Ved sammenstilling af forskellige produktionsmetoder, som betinger forskellige design og/eller materiale-godstykkelser, skal råmaterialer som plader, profiler m.m. ligeledes medtages i beregningerne. Priser på **tilsatsmaterialer** varierer voldsomt fra leverandør til leverandør, afhænger af individuelle rabataftaler og i øvrigt naturligvis af legeringstype. Listepriiser ligger typisk på godt 100 kr. per kilo aluminium-svejsetråd til MIG- eller TIG-svejsning (priser i 2001).
- **Lønomkostninger** (mandtimeforbrug pr. produceret enhed)
I forbindelse med vurderingen af lønomkostninger ved indførelse af en mere avanceret produktionsmetode kan det være hensigtsmæssigt at være opmærksom på følgende faktorer:

- Besparelse i **timeforbrug ved opsvejsning** af emne – altså den direkte svejsetid. Her er det naturligvis ikke nok at se på selve lysbuetiden alene. Der skal også tages højde for *intermitensen*, som i øvrigt kan være yderst variabel afhængigt af opgavetype og svejserens rutine og motivation.

Som *vejledende* udgangspunkt kan man forsøge sig med følgende værdier:

- Generel, manuel svejsning (MIG og TIG), gode forhold: 25-30%
- Mekaniseret svejsning: ca. 50%
- Vanskeligt tilgængelige svejseopgaver, knæ, lapper o.l.: 15%

NB: Det er forfatterens erfaring, at nogle medarbejdere (og virksomheder) for præcist det samme arbejde vil kunne præstere en intermitens, som er dobbelt så høj som andres. De mest markant høje intermitenser har forfatteren oplevet ved en kombination af god tilrettelæggelse af arbejdet, velkvalificerede medarbejdere og et aflønningssystem, som

muliggør en mærkbar, direkte personlig gevinst, når produktiviteten øges. Forskellene er mest mærkbare, når man står overfor nye, komplicerede opgaver, mens de er mindre ved rutinearbejder.

Lysbuetid = Svejste længde divideret med Svejsehastigheden

Svejsetid = Lysbuetid divideret med Intermitens

Svejsetiden kan naturligvis også findes ved at sammenstykke alle de enkelte operationer og pauser, som sammen med lysbuetiden danner den totale tid, svejseren er om at præstere et stykke arbejde.

- Evt. meromkostning til **fugetildannelse** (f.eks. med bedre tolerancer) og øvrig forberedelse før svejsning (f.eks. tid til opsætning af backing for stumpsømme).
- Evt. mindre **efterbearbejdning**, herunder f.eks.:
- Mindre **slibearbejde** (fjernelse af svejsesprøjt og / eller overvulst).
- Mindre **rettearbejde** (Friction Stir svejsning og i nogen grad ved plasmavejsning).
- Evt. besparelser ved mindre **sygefravær** på grund af mindre fysisk belastende arbejdsprocesser (overgang fra manuel svejsning under ergonomisk dårlige forhold, fjernelse af svejseren / operatøren fra røg / ozonkilde).
- Kortere **gennemløbstid** for produkt, dvs. likviditetsgevinst, mindre **renteudgifter**.

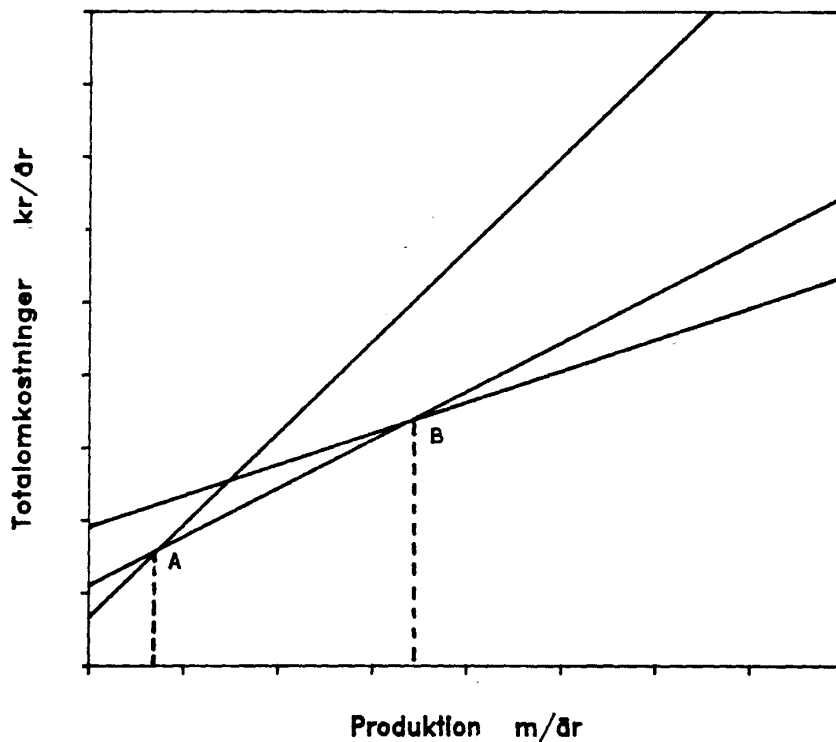
Startomkostninger

Omkostningerne forbundet med indførelsen af en produktionsteknik hører med til den totale investering, og skal derfor medtages, når de økonomiske analyser foretages. Følgende omkostninger ved indførelse af mekaniseret svejsning blev identificeret under projektet:

- Udgifter til **konstruktionsændringer**
- Udgifter til **forsøgsproduktion**:
 - Fremstilling af prototype
 - Forsøg med alternative konstruktive løsningsmuligheder
 - Evt. forsøg med alternative svejseprocesser (f.eks. rørtråd eller puls-MIG med massiv tråd)
- **Generering af svejsedata** til løbende produktion
- **Omskoling af personale** (skal mestre svejseproces samt lære at betjene og evt. vedligeholde udstyr).
- Udgifter i forbindelse med **indkøring** (lavere produktivitet i starten, mens operatøren bliver fortrolig med den nye produktionsform. Tidsforbrug og andre udgifter i forbindelse med eliminering af de småproblemer, som næppe kan undgås i startfasen).
- **Forhøjede reparationsomkostninger i start** i forbindelse med indkøring af ny proces.

3.19.3 UDSKIFTNINGSTÆRSKEL

Indførelse af mere "sophistikeret" svejsning såsom Friction Stir, lasersvejsning eller blot robotiseret lysbuesvejsning betyder typisk større faste og til gengæld mindre variable omkostninger. Derfor kan det være interessant at vide, hvor stor produktionen skal være, før en investering i det mere avancerede udstyr er rentabel. Punktet "A" på fig. 1 kan eksempelvis illustrere overgang fra en manuel lysbuesvejsning til en lidt mere avanceret metode. "B" kan markere mekaniseret svejsning med dyrere udstyr, men mindre eller intet tilsatsmateriale (såsom eksempelvis laser eller Friction Stir).



Figur 3.187 Eksempel på årlige totalomkostninger som funktion af produceret mængde.

Udskiftningstærsklen for den produktionsmængde, hvorved det lønner sig at skifte fra en produktionsmetode til en anden kan findes ved hjælp af formlen

$$\frac{FO_2 - FO_1}{VO_1 - VO_2}, \text{ hvor}$$

FO_1 = Faste omkostninger for metode 1

FO_2 = Faste omkostninger for metode 2

VO_1 = Variable omkostninger for metode 1

VO_2 = Variable omkostninger for metode 2

Til de faste omkostninger regnes:

- Afskrivning og forrentning af produktionsudstyr
- Afskrivning og forrentning af startomkostninger
- Husleje

Til de variable omkostninger regnes:

- Arbejdsløøn
- Forbrugsmaterialer (tilsatsmaterialer, beskyttelsesgas, backing m.m.)

Kravet til en given minimumsforrentning af den investerede kapital kan der tages højde for ved fastlæggelsen af det regningsmæssige renteniveau under de faste omkostninger.

3.19.4 REFERENCER

Tekniske rapporter

SASAK-RAP-SV-AKS-FI-0025, *Økonomiske beslutningsværktøjer ved valg af svejse- og produktionsproces*

4 Limning

4.1 INTRODUKTION

Limningsteknologien har rødder helt tilbage til før 2. Verdenskrig. I teknologiens vorden blev den primært drevet frem af behovet for at skabe lette og stærke samlinger som et led i udviklingen af flyvemaskiner. Et af de mest succesfulde fly under 2. Verdenskrig, De Havilland's Mosquito, var baseret på et sandwichmateriale bestående af en kerne af balsatræ med et dæklag af birkefinér. Imidlertid gav den anvendte limtype anledning til problemer, idet den ikke havde tilstrækkelig fleksibilitet og sejhed til at binde de to meget forskellige typer træ sammen under de virkelige belastningsforhold.

Allerede i 1942 blev den første anvendelige højstyrke lim til metal (REDUX) udviklet af DeBruyne [1]. På dette tidspunkt var aluminium allerede i anvendelse i en stor del af flyindustrien pga. af de materialeegenskabsmæssige fordele som aluminium kan tilbyde i forhold til f.eks. træ og stål. I løbet af en kortere årrække vandt limning frem som samlingsmetode blandt mange flyfabrikanter. I 1955 havde alle de europæiske flyfabrikanter som f.eks. Fokker taget limning af aluminium til sig med produktet REDUX. Et af de mest succesfulde fly overhovedet, Fokker F27 Friendship, var blandt de sidste som blev fremstillet med netop denne limtype.

Parallelt med udvikling af kommercielt tilgængelige limtyper blev der skrevet en lang række videnskabelige afhandlinger samt artikler om emnet. Behovet for værktøj til analyse samt design af limsamlinger var/er næsten lige så stærkt som behovet for gode limtyper. Blandt pionererne indenfor analyse af limsamlinger kan nævnes M. Goland & E. Reissner og J.D. Minford [1], som udgav den første artikel omkring limning af aluminium. Et projekt under navnet Primary Adhesively Bonded Structure Technology (PABST), blev i 1975 sponsoret af det Amerikanske Flyvevåben, U.S. Air Force. På baggrund af dette arbejde blev uddraget at limning af primære lastbærende flydele kunne fremstilles med den højeste tillid til langtidsegenskaberne [2].

4.1.1 ANVENDELSE AF LIMTEKNOLOGI

Flyindustrien

Limsamlinger har fundet stor anvendelse i forbindelse med lette lastbærende konstruktioner, og det har specielt været indenfor fly- og rumfartsindustrien, at behovet har gjort sig gældende. Fokuseres der specielt på letvægtskonstruktioner udført i aluminium, har samlingsproblematikken traditionelt vedrørt mekaniske samlinger kontra svejste samlinger. Denne problemstilling har primært været begrundet i markant forringede udmattelsesegenskaber af svejste aluminiumskonstruktioner set i forhold til mekanisk sammenføjede aluminiumskonstruktioner. Dette understreges af at stort set ingen flykonstruktioner i dag er samlet med anvendelse af svejsning. Dette skyldes også, at højstyrkelegeringerne i aluminium er svære at svejse.



Figur 4.1 Billede af katamaranfærge fra Century Marine; skrogets sideklædning er monteret med dobbeltklæbende VHB tape.

Mekaniske samlinger har imidlertid også givet anledning til væsentlige problemer mht. udmattelsesegenskaber, tæthed, overfladefinish mm., og limede samlinger blev allerede sidst i 50'erne (Fokker F27 Friendship) anvendt som erstatning for mekaniske samlinger i forbindelse med flykonstruktioner. Siden da har limsamlinger vundet stadig større indpas som samlingsmetode indenfor fly- og rumfartsindustrien, hvor indførelsen og anvendelsen af limningsteknologi samtidig har været betinget af muligheden for at opretholde en meget høj standard vedrørende proces- og kvalitetskontrol (QA). Flykomponenter og flykonstruktioner fremstilles således traditionelt under iagttagelse af meget store og omkostningstunge anstrengelser til produktions- og kvalitetskontrol, herunder Non Destructive Inspection (NDI).

Automobilbranchen

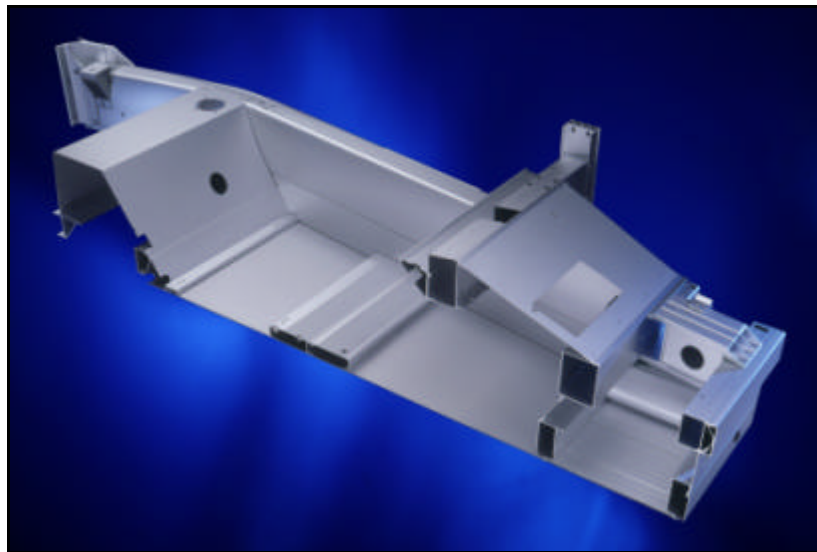
Bilindustrien har været tøvende med at integrere limteknologien som en naturlig del af deres produktionsapparat. Problemer med lange procestider samt uafklarede spørgsmål omkring håndtering af reparationer har ofte givet anledning til denne tøven. Eftersom en stadig større grad af fokus lægges på forbedret brændstoføkonomi, som bla. kan opnås vha. vægtreduktion, og på større sikkerhed, forstærkes behovet for udvikling i bilindustrien.

Bilindustriens svar på flyindustrien er de lette og hurtige sportsvogne. Det er fra denne nicheproduktion at limteknologien forventes at vandre ind i de almindelige biler.



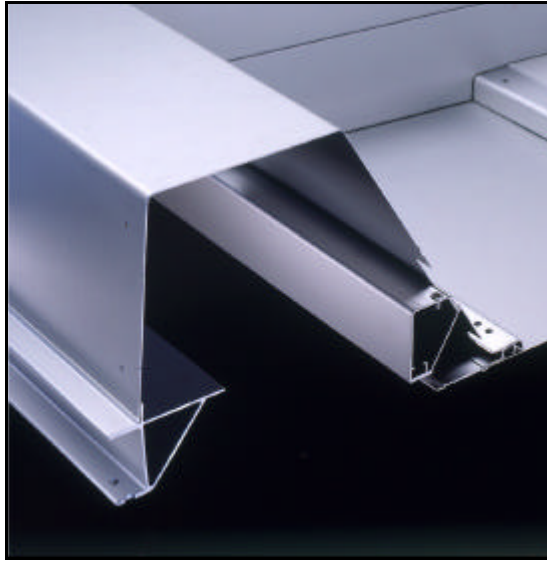
Figur 4.2 Billede af Lotus Elise (© Peter Bandtholtz).

I midten af 90'erne lancerede Lotus i samarbejde med Hydro Aluminium en ny lille og hurtig sportsvogn ved navn Lotus Elise (Figur 4.2). Det specielle ved Lotus Elise er den bærende ramme af aluminium, den såkaldte spaceframe vist på Figur 4.3, med en vægt på bare 68 kg.



Figur 4.3 Billede af SpaceFrame produceret hos Hydro Automotive Structures, Tønder. (© Peter Bandtholtz).

Rammen til Lotus fremstilles af anodiserede, ekstruderede aluminiumsprofiler samt aluminiumsplader (Figur 4.4), der samles vha. en stærk 1-komponent epoxylim.



Figur 4.4 Illustration af ekstruderede profiler. (© Peter Bandtholtz).

Konstruktionen er et godt eksempel på de attraktive fordele som limteknologien kan tilbyde. I konstruktionen er der anvendt legeringer, hvis egenskaber ville blive væsentligt forringede ved svejsning. Limning har givet mulighed for at spare mange kilo aluminium med forbedring af bilens samlede præstationer til følge.

Specialkøretøjer

Opbygning af specialkøretøjer er en branche, hvor seriestørrelserne er små og hvor fleksibilitet således er afgørende for at kunne løse de forekommende opgaver. Et godt eksempel er Ringe Karosserifabrik ApS, der bla. fremstiller brandbiler; her har limning vha. elastisk klæbeteknologi givet mulighed for frit at kunne kombinere materialer med hinanden.



Figur 4.5 Billede af Crash Tender fremstillet af Ringe Karosserifabrik ApS.

I de brandbiler, der fremstilles i dag, anvendes både rustfrit stål, aluminium, glasfiber og sandwichpaneler.



Figur 4.6 Billede af komposit skabsdel med pålimet hængselramme udviklet af Ringe Karosserifabrik ApS.

Limteknologien har givet attraktive fordele i form af mere rationel produktion samt bedre finish på produkterne. Svejsning giver som oftest anledning til problemer med kastninger af pladerne i konstruktionen pga. varmpåvirkningen. Ved at undgå svejsning løses dette problem fuldstændigt.

Transportbranchen

I kompositbranchen, som blandt andet er stærkt repræsenteret af køletrailerproducenterne, har limning en central position, idet selve glasfiberlaminaterne består af en blanding af lim (polymert harpiksmateriale) og glasvæv. Sammenføjning af glasfiberlaminater, skum mm. vha. svejsning er udelukket, hvorfor limning, enten alene eller i kombination med nitter, er den eneste mulighed.



Figur 4.7 Billede af køletrailer fremstillet hos Krone-Wabash A/S, Hvam.

Til fremstilling af en enkelt køletrailer indgår adskillige kilo lim, som anvendes til samling af kølekassens sider samt til fastgørelse af aluminiumskantlister mm. Kompositbranchen anvender som oftest 2-komponent polyuretanlime, da de binder bedre på de fleste polymermaterialer end f.eks. epoxylim.

4.1.2 FORDELE OG ULEMPER VED LIMTEKNOLOGIEN

Ved enhver teknologi findes både fordele og ulemper, og her er limteknologien ingen undtagelse. Der er en række forhold, som bør overvejes når der arbejdes med limning eller hvis det påtænkes at starte en produktion, hvor limning indgår.

Motivationen for at anvende limsamlinger frem for andre samlingsteknologier såsom mekanisk sammenføjning eller svejsning er bla.:

- Gode udmattelsesegenskaber,
- Mulighed for at samle forskellige materialer,
- Gode dæmpningsegenskaber,
- Galvanisk korrosion kan reduceres,
- Vægtreduktion (specielt i forhold til svejste samlinger) og
- Reduktion af kastninger forårsaget af temperaturpåvirkninger.

Anvendelse af limsamlinger frem for andre samlingsmetoder medfører også en række ulemper, som i visse anvendelser kan udgøre væsentlige tekniske problemer:

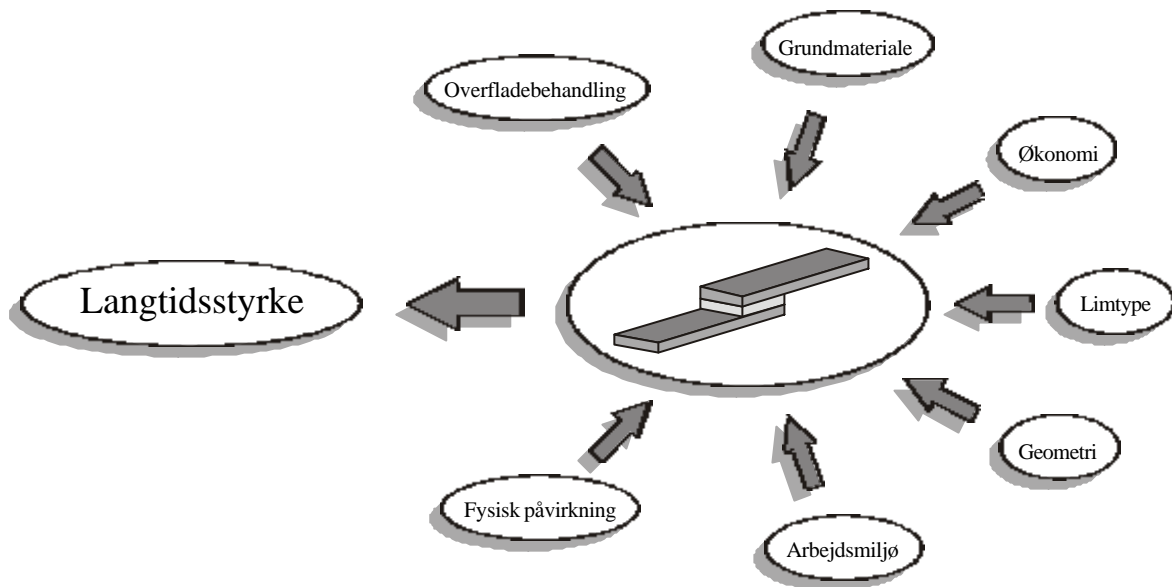
- Øget krav til renhed af emner samt produktionsfaciliteter,
- Krav til limfugegeometri i form af tykkelse samt evt. affasning af kanter,
- Styrke og stivhed kan forringes væsentligt ved forhøjede temperaturer,
- Begrænset tolerance overfor påvirkning af aggressive miljøer,
- Forbehandling af metaloverflader er ofte nødvendig (f.eks. primning el. anodisering),
- Lang procestid pga. udhærdningstid for limen. Kan dog ofte accelereres væsentligt vha. varmetilførsel,
- Fiksturer til at holde emner på plads under udhærdning,
- Ikke destruktiv inspektion af limfuger (NDI) er vanskelig og
- Iagttagelse af specielle forholdsregler vedrørende arbejdsmiljø og beskyttelse af medarbejdere er påkrævet.

Dette afsnits formål er at vise nogle af mulighederne i limteknologien samt at afdække, at ulemperne udgør overkommelige problemer. Førnævnte eksempler fra forskellige virksomheder viser, at limteknologien har bidt sig fast i dansk industri og at den med succes kan anvendes til andet og mere end pålimning af småting.

I det følgende gennemgås de mekaniske egenskaber for limsamlinger og der gives beregningseksempler på nogle udvalgte limede sammenføjninger.

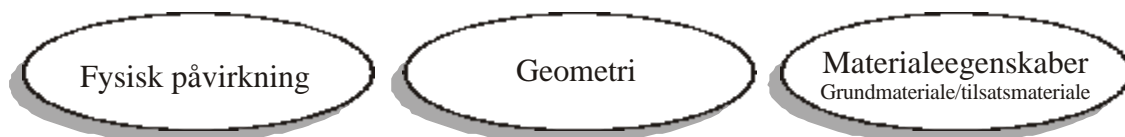
4.2 MEKANISK DIMENSIONERING AF LIMSAMLINGER

I de senere år er der fremkommet en række limtyper, som i væsentlig grad har åbnet muligheden for at almindelige industrivirksomheder med succes kan anvende limning. Ved tidligt i designfasen at inddrage limning konstruktivt kan der på fordelagtig vis opnås stærke og holdbare sammenføjninger. Det er afgørende i denne fase at være bevidst om de valg der træffes og specielt deres indflydelse på limsamlingen som helhed. En limsamling skal betragtes som et samlet mekanisk system baseret på en række elementer, som er indbyrdes afhængige. Dette er skitseret på Figur 4.8:



Figur 4.8 Illustration af faktorer som influerer på en limsamling.

På Figur 4.8 er illustreret de vigtigste faktorer med indflydelse på langtidsstyrken af en limsamling. Langtidsstyrken er det spørgsmål, der oftest udgør kernen i den skepsis som limning betragtes med. Langtidsstyrken er svær at håndtere kvantitativt, men i princippet adskiller en limsamling sig ikke væsentligt fra f.eks. en svejset konstruktion. En svejsning kan betragtes som en limsamling, hvor limen har samme materialeegenskaber og stivhed som grundmaterialet. I begge tilfælde tages der udgangspunkt i belastningens størrelse og karakter, grundmaterialets og tilsatsmaterialets (el. limtypens) materialeegenskaber og endelig samlingens geometri. Der er således tre grundpiller ved dimensionering af sammenføjninger, som vist på Figur 4.9:



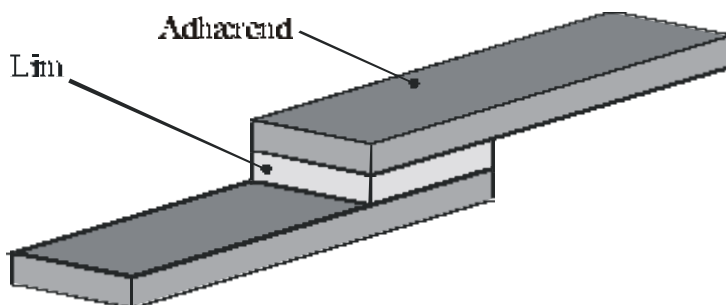
Figur 4.9 Illustration af faststofmekanikkens 3 grundpiller i relation til sammenføjning.

På baggrund af den sammenhæng hvori limsamlingen indgår skal der, på samme måde som for en svejsning, skabes overblik over indholdet af de tre grundpiller før samlingen kan dimensioneres korrekt. Forskellen ligger i mængden af erfaringer samt manglen på officielle standarder og normer

indenfor limteknologien. For at forstå, hvordan limsamlinger dimensioneres korrekt, er det vigtigt at vide, hvordan laster overføres i en limsamling.

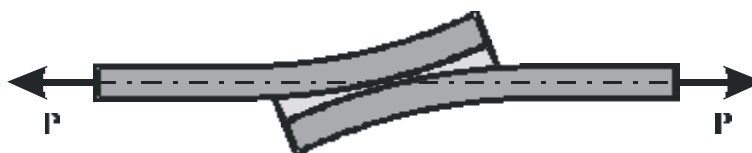
4.2.1 LASTOVERFØRINGSMEKANISMER

Polymermaterialet, der udgør limen i en limsamling, har næsten altid væsentlig mindre styrke end grundmaterialet, kaldet adhærenden. Dette nødvendiggør et overlap i sammenføjningsområdet, for at hele belastningen på samlingen kan overføres gennem limfugen. Uden et sådan overlap vil samlingen få en meget lille styrke og limen således hurtigt blive overbelastet. Princippet er vist på Figur 4.10:



Figur 4.10 Illustration af lim og adhærend.

I overlapzonen overføres belastningen gradvist fra den ene adhærend til den anden. I limfugen opstår herved forskydningspændinger, hvis størrelse samt fordeling er afhængig af stivheden af de enkelte elementer i limsamlingen. Udføres limsamlingen som vist ovenfor på Figur 4.10, giver overlappet anledning til ekscentricitet i den kraftoverførende mekanisme, hvilket resulterer i bøjning af adhærenderne. Denne bøjning skyldes at samlingen forsøger at rette sig ud. Denne effekt benævnes *peeling* (skrælning), hvilket er afledt af at adhærenderne forsøger at *skrælle sig af hinanden* (heraf peel-spændinger også benævnt transverse normalspændinger) som vist på Figur 4.11:



Figur 4.11 Illustration af enkeltoverlapslimsamling under belastning.

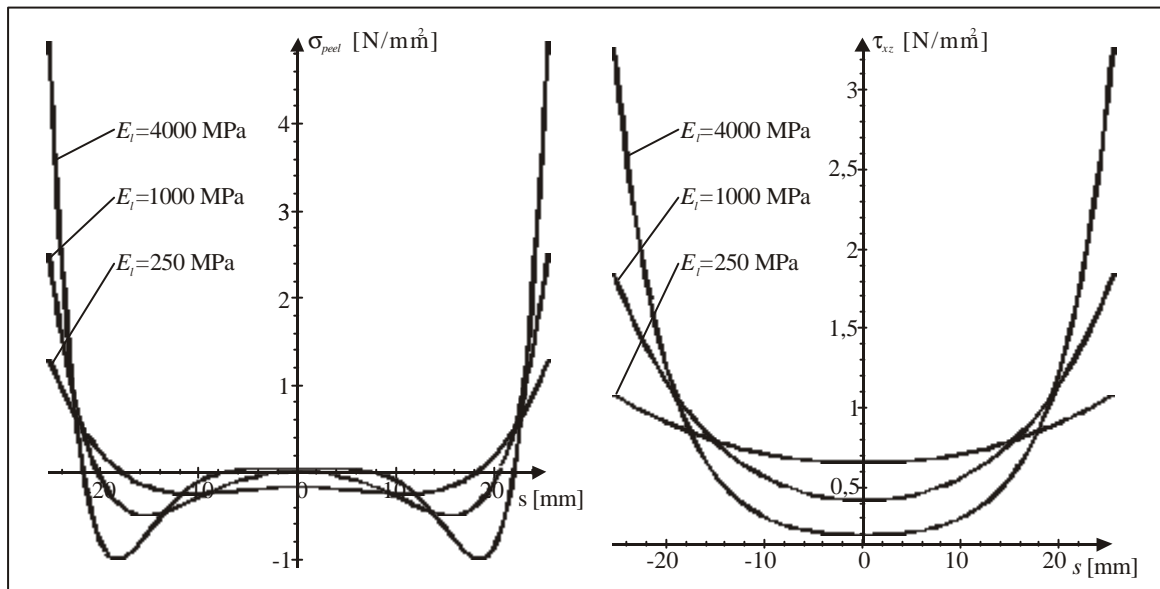
Peel-spændinger optræder primært ved limfugens ender og kan let blive meget store sammenlignet med forskydningspændingerne i limen. Effekterne fra peel-spændingerne kan derfor ikke uden videre ignoreres. Essensen af design af limsamlinger er derfor at minimere peel-spændinger således, at belastningssituationen i limfugen domineres af forskydningspændinger. I praksis er dette ikke altid let at overskue, da der er en række variable at justere på. Problemstillingen kan eksemplificeres på følgende vis.

Som udgangspunkt betragtes en stiv limsamling, dvs. en samling hvor limens E-modul er højt. For en sådan samling vil geometrien (areal, fugetykkelse og fugeudformning) have kraftig lokal indflydelse på spændingsniveauet samt spændingsfordelingen. For at belyse dette er udført en analyse af spændingsfordelingen i en limsamling; input data til analysen er givet i Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Standard værdier i analyserne.

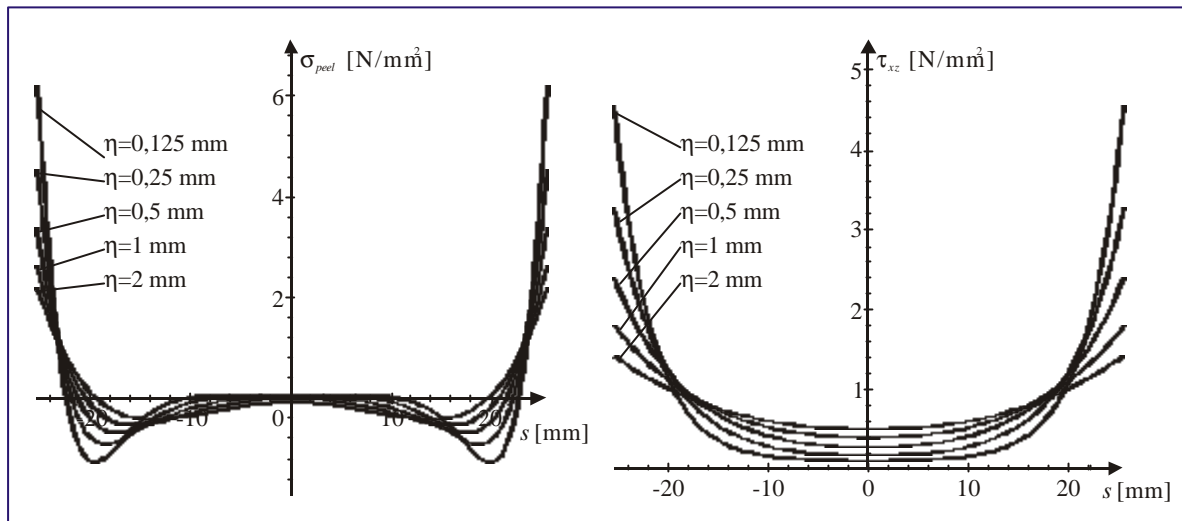
Beskrivelse	Værdi
Adhærend længde udenfor overlapzone	100 mm
Adhærend tykkelse	5 mm
Adhærend bredde	25 mm
Overlap længde	50,8 mm
Fugetykkelse	1 mm
Adhærend stivhed	70.000 MPa
Belastning på limsamling	1000 N

Resultatet kan ses på Figur 4.12 og Figur 4.13, hvor hhv. afhængighed af limstivhed og fugetykkelse er vist.



Figur 4.12 Illustration af indflydelsen af limstivhed på spændingsfordelingen; (TV) fordeling af peel-spændinger og (TH) fordeling af forskydningspændinger langs limfugelængden for en simpel enkeltoverlaplimsamling.

For elastiske limsamlinger, dvs. samlinger hvor limens E-modul er lavt, er indflydelsen af geometrien blot givet ved en lineær afhængighed mellem belastning og fugeareal. Det kan betragtes som om den elastiske limfuge udnytter al limen i limfugen i modsætning til en stiv lim, der kun udnytter limen delvist. Ses isoleret på dette forhold, er det oplagt at tro, at elastiske limfuger generelt er det bedste valg. Men en række faktorer gør, at det ofte forholder sig anderledes i praksis, hvilket diskuteres nærmere i et senere afsnit.



Figur 4.13 Illustration af limfugetykkelsens indflydelse på spændingsfordelingen; (TV) fordeling af peel-spændinger og (TH) fordeling af forskydningsspændinger langs limfugelængden for en simpel enkeltoverlapslimsamling (limens stivhed er 550 MPa).

Det er vigtigt at bemærke at der for stive limfuger af en vis overlapslængde opstår et område i midten af limfugen, som næsten er ubelastet i ovenstående belastningssituation. For korrekt at kunne analysere belastningssituationen i en stiv limsamling kræves avancerede værktøjer, som i praksis ikke er særligt anvendelige til applikationer uden for aerospaceindustrien og lignende. For stive limsamlinger kan imidlertid med god tilnærmelse benyttes begrebet *effektivt areal* som er det areal, der effektivt bærer hele belastningen. Størrelsen af det effektive areal er imidlertid afhængigt af mange faktorer og lader sig derfor ikke umiddelbart generalisere. I praksis ses ofte anvendt et beregningsmæssigt areal på 10-20 gange fugetykkelsen for stive lime.

Det kan således udledes, at kravene til i praksis at kunne styre fugegeometrien skærpes ved valg af en stiv lim. Som beskrevet i det foregående er en limsamling stærkt afhængig af fugens beskaffenhed; i det følgende beskrives hvordan fugen kan udformes geometrisk.

4.2.2 FUGEOMETRI

Som tidligere nævnt bør limfuger ideelt udformes så de kun belastes med forskydningskræfter, men i praksis er det dog kun sjældent muligt at opnå ren forskydningspåvirkning. I de hyppigt anvendte enkelte overlapsamlinger giver den elastiske deformation ved belastningen af samlingen anledning til peel-påvirkning i limfugens kant (se også afsnit 4.2.1). Generelt tåler limsamlinger kun relativt dårligt peeling, som koncentrerer lasten i et lille område af limen. Allerede ved forholdsvis små belastninger kan det give anledning til revner i fugekanten, og således initiere et brud. For at opnå bedre sikkerhed mod brud kan det derfor være nødvendigt at udforme fugen så peelingeffekter begrænses samt at vælge en lim, som i et vist omfang kan modstå peeling.

Elastiske lime

Elastiske lime er bløde og gummiagtige, med stor brudforlængelse og en relativt lille forskydningsstyrke, typisk 2–5 MPa. De benyttes ofte i samlinger med et stort limeareal til at

overføre dynamiske belastninger af moderat størrelse. Med tykke fuger, som tillader elastisk forlængelse af limen flyttes en stor del af belastningen fra området ved limfugens kant til det indre af fugearealet. Det giver mindre spændingskoncentrationer i limsamlingen og dermed en større sikkerhed mod brud. Ved direkte peel-belastning bevirker kombinationen af en elastisk lim og en tyk fuge også en vis udjævning af spændingskoncentrationerne, som gør samlingen mere tolerant overfor denne påvirkning.

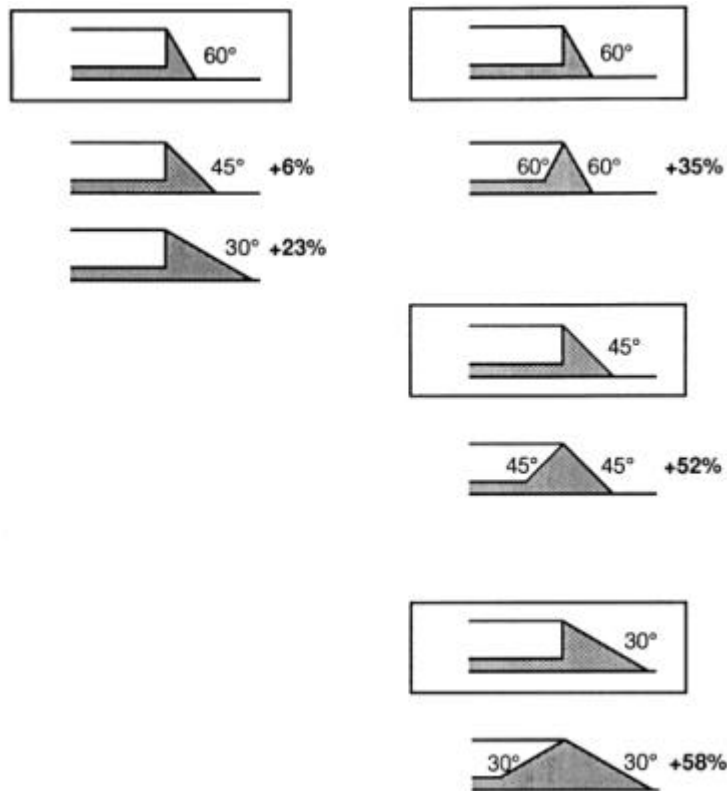
Med en elastisk lim i tykke limfuger kan limemnerne bevæge sig mærkbart i forhold til hinanden ved belastning. Overmaling kan herved blive problematisk, fordi malingen kan revne ved bevægelserne.

Krybestyrken for de elastiske lime er generelt forholdsvis lav, hvorfor samlinger med væsentlig statisk belastning bør undgås; som retningsgivende designværdi kan bruges højst 3% af limens trækforskydningsstyrke [3].

Stive lime

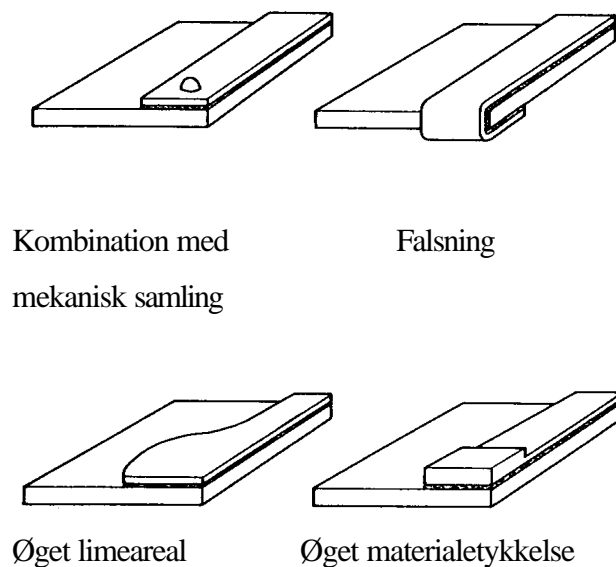
Stive lime har en høj forskydningsstyrke, typisk 20–40 MPa. De benyttes sædvanligvis i samlinger, hvor store laster skal overføres gennem et lille limeareal, hvor der ikke kan tolereres mærkbar indbyrdes bevægelse af emnerne under belastningen, eller hvor samlingen er udsat for en væsentlig statisk belastning.

På grund af den store stivhed har limen ringe evne til at føre belastningen fra området ved limfugens kant til det indre af fugearealet. Derfor er det især områderne ved limfugens kant, der overfører lasten (se også afsnit 4.2.1). Spændingskoncentrationerne i disse områder bliver derfor store, og ved for høje spændingsniveauer initieres revner. Ved at vælge hensigtsmæssige geometrier ved fugeranden kan spændingsniveauet sænkes, hvorved der opnås en øget brudstyrke for samlingen, se Figur 4.14.



Figur 4.14 Ændring af fugekantens geometri kan give større lastoverføringsevne [4]. Bemærk at limfugens tykkelse er vist i større målestok; limfugen er 0.1 mm tyk i alle eksempler.

Samlinger med stive lime er relativt mere følsomme for peeling og slagpåvirkning end samlinger udført med elastiske lime. Peel-spændingerne i limfugekanten kan begrænses ved at kombinere limsamlingen med mekaniske samlemetoder, eller ved at øge arealet eller stivheden af limemnet, se Figur 4.15.



Figur 4.15 Forskellige metoder til reduktion af peel-spændinger i limfugeranden, [4].

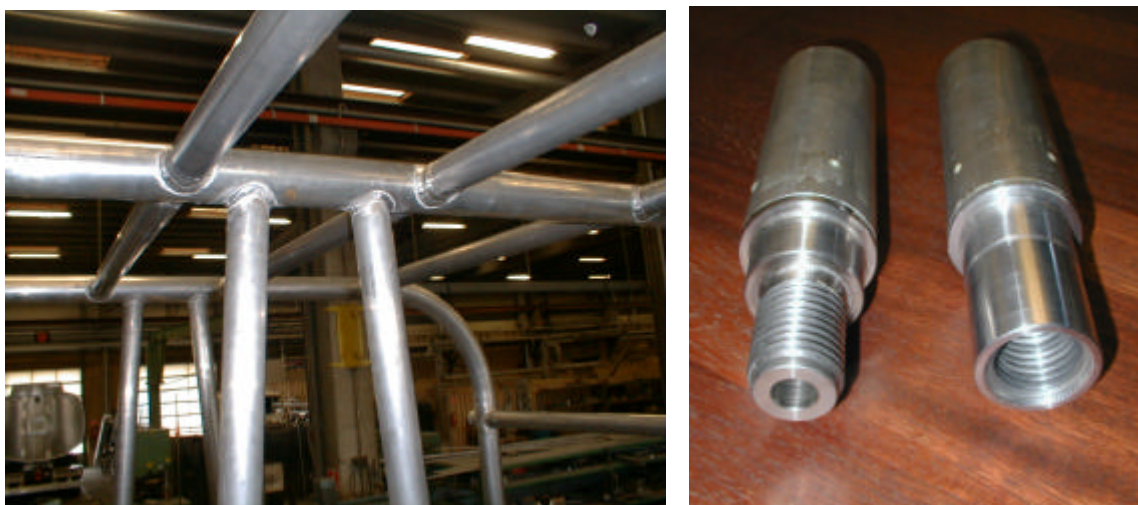
Med metoderne beskrevet i dette afsnit er det muligt at tilpasse fugegeometrien, så limsamlingen opnår en tilstrækkelig styrke. Principperne fra dette kapitel illustreres i det følgende med et beregningseksempel for en limsamling.

4.2.3 DIMENSIONERINGSEKSEMPEL

Følgende eksempel er baseret på et udviklingsprojekt hos HMK Bilcon A/S for en anonym kunde.

Beskrivelse af samling

Konstruktionen består af et antal stangelementer, der er samlet i en række knudepunkter (se Figur 4.16 (TV)). Kundens ønske til adskillelighed har betydet at der i konstruktionen indgår en række skruesamlinger i form af bøsninger, som afbilledet på Figur 4.16 (TH).

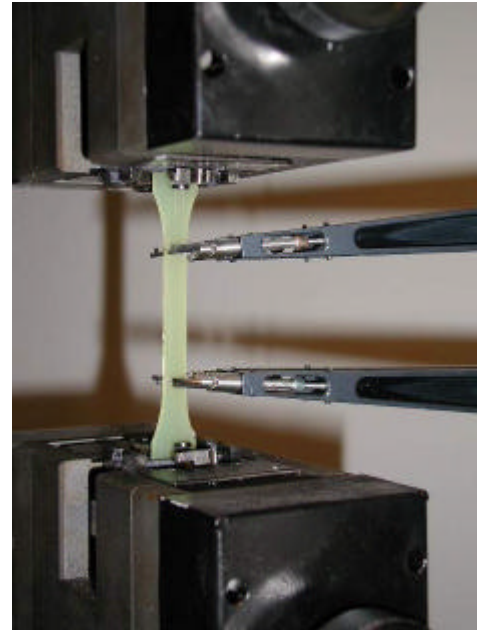
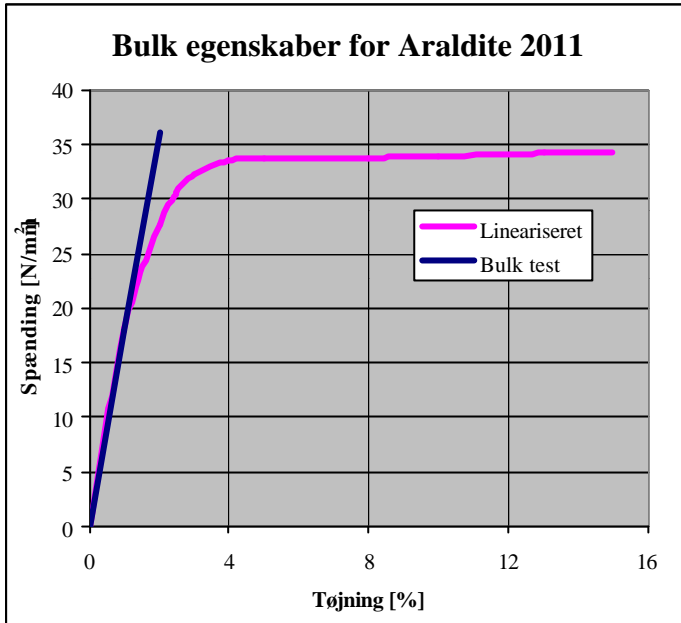


Figur 4.16 Billede af samlinger i overdækning (TV) og ende bøsninger (TH).

For at designe en let konstruktion med skruesamlinger, der samtidig både er korrosionsbeskyttet og slidstærk, blev valgt at anvende bøsninger af rustfrit stål i kombination med høj-styrke aluminiumsrør.

Bestemmelse af materialeegenskaber for Araldite® 2011

Det blev valgt at anvende en stærk epoxy lim med forholdsvis lang åbentid (ca. 1½time). Limleverandøren kunne imod forventning ikke stille de nødvendige dimensioneringsgivende materialeegenskaber til rådighed, hvorfor det blev valgt at fastlægge dem ud fra egne forsøg som vist på Figur 4.17.



Figur 4.17 Arbejdskurve (TV) samt bulk test (TH) af Araldite® 2011.

Følgende materialeegenskaber blev bestemt ved forsøget:

Tabel 4.2 Materialeegenskaber for Araldite® 2011.

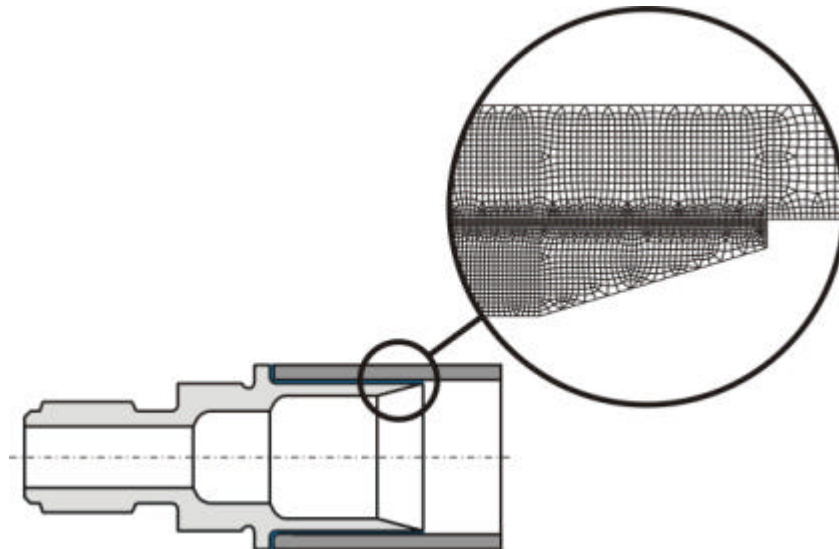
Betegnelse	Normal spænding [MPa]	Forskydning [MPa]
Brudspænding ¹	34	19,5
Tilladelig lineær spænding ¹	20	11,5

1. Barsmark A/S samt HMK Bilcon A/S påtager sig intet ansvar i forbindelse med værdierne i Tabel 4.2.

Elasticitetsmodulet blev bestemt til ca. 1750 MPa.

Dimensionering af limsamling

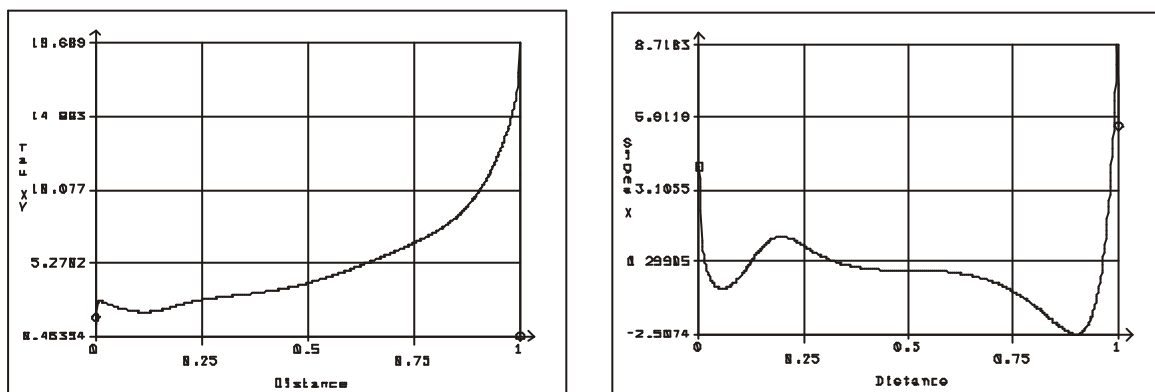
På baggrund af en finite element analyse af konstruktionen foretaget i samarbejde med det rådgivende ingeniørfirma Barsmark A/S, blev de enkelte stangelementers styrke anslået. Der blev samtidig fundet en række dimensionsgivende belastninger i de samlingspunkter, hvor der var valgt at anvende limning. Den kritiske belastningssituation var givet ved en kombination af en normalkraft og et bøjningsmoment. Der lægges et snit på langs af limsamlingen, hvor det på forhånd vides, at hovedspændingerne er størst. Udfra disse antagelser blev opbygget en lineært elastisk, rotationssymmetrisk finite element model, med en ensartet belastningssituation svarende til ovenstående. Belastningssituationen svarede til 50 kN påført som rent træk.



Figur 4.18 Illustration af endebøsningsgeometri og udsnit af FE-model.

FE-modellen omfatter de yderste 30 mm af aluminiumsrøret udenfor overlapzonen (dvs. til højre for emnet i Figur 4.18) samt 5 mm til venstre for overlapzonen (dvs. umiddelbart på den anden side af brystet på emnet i Figur 4.18), hvor stålemnets stivhed vurderes for stor til at have indflydelse på limsamlingen.

Modellen har ca. 240.000 frihedsgrader og er modelleret med højere-ordens ”solid”-elementer. I det følgende ses bort fra ringsspændingerne i limsamlingen.



Figur 4.19 Billede af forskydningsspænding (TV) og transverse normalspænding (TH) i lumsamlingens langsgående retning; 1. akse enhed: mm, 2. akse enhed: MPa.

På den baggrund blev valgt at benytte en fugetykkelse på 0,25 mm, hvilket er 0,15 mm mere end limproducenten Vantico® A/S anbefaler, af produktionstekniske årsager. I dette tilfælde udføres limningen vha. injektion af lim, opvarmet til ca. 60°C, igennem fire indsprøjtningshuller. Fugetykkelsen blev styret ved ilægning af fiskesnor i den korrekte tykkelse.

Der blev endvidere valgt en markant større overlaplængde (50mm) end det principielt er nødvendigt for at sikre centreret og parallelitet af endebøsningen i forhold til aluminiumsrøret. Hverken forskydningsspændingen eller peel-spændingen bliver på noget tidspunkt kritiske under den påførte belastning på 50 kN. For at undertrykke spændingsspidser langs den yderste rand af samlingen, blev det valgt at integrere en 20° rejfning af kanten. Ved den anden ende af overlappet blev det skønnet

unødvendigt af lave sådanne tiltag, da spændingsniveauet er lavere (se Figur 4.19). Spændingsniveauet langs den yderste rand er lokalt højere end linearitetsgrænsen. Ikke-lineariteten af limens arbejdskurve bevirker her at belastningen fordeles til det omkringliggende materiale, hvorfor disse høje spændingsspidser ikke er fysisk tilstedeværende. Dette kan vises ved at medtage den materialemæssige ikke-linearitet i FE-modellen. Imidlertid retfærdiggør formålet med denne limsamling ikke den mere komplicerede beregning.

Ved dimensionering af mere kritiske samlinger kan med fordel anvendes ulineære beregningsmodeller. Betragtes Figur 4.17 ses umiddelbart at den tøjning hvor limen ophører med at opføre sig lineært er ca. 12 gange mindre end brudtøjningen. De lineære beregningsmodeller kan derfor kun anvendes til simple beregninger for limsamlinger, da de er for konservative. Dette er en problemstilling som primært knytter sig til limsamlinger med stive limtyper.

I det foregående afsnit er fokuseret på de lastbærende egenskaber af limsamlinger. I det følgende afsnit gennemgås hvordan langtidsegenskaberne er for limsamlinger og hvilke faktorer, der påvirker deres levetid.

4.3 LANGTIDSEGENSKABER

4.3.1 KEMISK ÆLDNING

En limet samling kan opfattes som et system bestående af limemnematerialerne – med en given udformning – disses overflader samt lim og eventuel primer. Systemets egenskaber afhænger både af disse elementer, og af omstændighederne ved samlingens tilblivelse såsom fremgangsmåde ved forbehandling af overfladerne, miljø, tidsrum mellem forbehandling og limning, tilberedning og påføring af lim og eventuel primer, samt tid, temperatur og tryk ved limens afbinding.

Samlingens holdbarhed ved den efterfølgende anvendelse afhænger desuden af driftsbetingelserne herunder belastningens størrelse og art, temperatur, fugtighed og andre kemiske påvirkninger. Lime er principielt også følsomme overfor ultraviolet stråling, men ved limning af uigennemskinnelige materialer er i givet fald kun fugekanten eksponeret, og påvirkningen derfor begrænset hertil.

Limens vedhæftning til aluminiumoverfladen beror på en kombination af mekanisk forankring og bindinger af kemisk natur, hvor de sidstnævnte er mest væsentlige (se også afsnit 4.5.1). En limeteknik, der giver de bedst mulige betingelser for molekylær kontakt til hele aluminiums(oxid)overfladen er derfor gavnlig for holdbarheden. Brugen af varmhærdende lime er her en fordel, fordi de bedre end rumtemperaturhærdende lime kan flyde ned i overfladens mikroskopiske sprækker, og ved den høje hærdetemperatur bedre kan blande sig med og fortrænge eventuelle restforureninger fra overfladen, så der skabes kontakt mellem selve overfladen og limen (se i øvrigt afsnit 4.5.1).

Det er vigtigt at sondre mellem limingens begyndelsesstyrke og dens langtidsstyrke. En høj begyndelsesstyrke er ikke nødvendigvis ensbetydende med, at samlingen også bevarer styrken i lang tid i et givent miljø.

Miljøpåvirkninger

Fugtigt miljø

Tilstedeværelse af vand i miljøet, hvad enten det er som damp og væske, må anses for en af de vigtigste bestemmende faktorer for levetiden for limede samlinger. Vand kan trænge ned til aluminiumsoverfladen under limen enten ved at diffundere gennem limen, eller, særligt hvor limens kontakt med oxidoverfladen ikke er optimal, ved at krybe langs grænsefladen mellem lim og metaloxid. Hvor vandmolekyler trænger frem til grænsefladen, kan de binde sig til polære grupper i limen og således påvirke dens binding til oxidoverfladen (se [1], side 283).

Når limsamlingen eksponeres for et fugtigt miljø, vil vandmolekyler diffundere ind i limen indtil en ligevægtstilstand er nået. Hvor hurtigt ligevægtstilstanden nås afhænger af miljøets fugtighedsgrad, limens diffusionskoefficient og diffusionsvejen til limsamlingens midte. Forhøjet temperatur og spændinger i limfugen kan øge indtrængningshastigheden. Ved dårlig kontakt, for eksempel som følge af utilstrækkelig forbehandling, kan indtrængning langs grænsefladen skabe en hurtigere vej for vandmolekylerne end diffusionen. I ligevægtstilstanden er koncentrationen af vandmolekyler ved en given temperatur afhængig af limtypen og dens tværbindingegrad.

Baseret på erfaringer fra praksis kan man i almindelighed rangordne eksponeringsmiljøer efter faldende aggressivitet som kystatmosfære > jungleatmosfære > industriatmosfære > landzoneatmosfære > ørkenatmosfære (se [1], side 385). En række praktiske eksponeringsforsøg med udvalgte kombinationer af lime og forbehandling på en given legering har vist, at selv ubelastede limsamlinger med få undtagelser tabte hele deres styrke efter otte år i kystatmosfære, mens styrketabet i almindelighed var ganske begrænset efter otte år i industriatmosfære. Forsøgene viste, at det er nødvendigt at forebygge korrosion af oxidoverfladen under limen gennem en egnet forbehandling for at få holdbare samlinger (se [1], side 386-387).

Med baggrund i sådanne erfaringer suppleres forbehandlingen undertiden med en udvendig fugtbeskyttelse, for eksempel ved at forsegle limfugens overflader med et høg fugemasse. Også samlingens design har betydning; konstruktioner som kan samle fugt og salte langs fugekanten er u hensigtsmæssige, fordi det skaber et konstant fugtigt mikroklima for limen.

En sandsynlig forklaring på den begrænsede holdbarhed af mange limsamlinger i fugtigt miljø er, at limen i disse er bundet til oxidoverfladen med svage kemiske bindinger. Hvis vandmolekyler kommer frem til grænseområdet mellem lim og oxid, kan de binde sig til limen eller oxidoverfladen med hydrogenbindinger, og derved ødelægge limens vedhæftning. Når enkelte lime som eksempelvis nogle phenolepoxy-produkter giver samlinger med glimrende bestandighed i vådt miljø, skyldes det formentlig eksistensen af stærke kemiske bindinger mellem limen og oxidoverfladen. Den gunstige indvirkning af nogle silanprimere på bestandigheden forklares på samme måde. En forudsætning for at opnå bestandighed er tillige, at oxidoverfladen under limen ikke nedbrydes kemisk under påvirkning af vand, og en effektiv forbehandling er derfor nødvendig.

De omtalte phenolepoxylime er for det meste meget stive, og de hærdes ved så høje temperaturer, at de mekaniske egenskaber for modningshærdede aluminiumlegeringer forringes (se også afsnit 4.4.2). Desuden skal hærdeningen ske under tryk, som stiller krav om særligt udstyr. Der kan derfor være grund til at benytte andre limtyper, hvis evne til at give bestandige limninger ikke på forhånd er veldokumenteret.

Også aluminiumlegeringen har betydning for samlingens levetid. De stærke legeringer i 2000- og 7000-serien er særlig problematiske i miljøer med fugt og chlorid, mens helt ren aluminium giver bedre bestandighed. Ren aluminium anvendes dog aldrig til konstruktionsformål. Forekomst af magnesium i grænseområdet mellem oxid og lim kan også reducere levetiden for samlingen.

Forsøg til bestemmelse af miljøpåvirkninger

Med så mange faktorer af betydning for samlingens bestandighed er man i praksis henvist til at udføre forsøg for at bestemme levetiden i et givet miljø. Uden erfaringsdata er den eneste sikre måde til at bestemme levetiden på at udføre mange samlinger og bruge dem i praksis. Det er formentlig kun sjældent gennemførligt, og man er da henvist til at anvende accelererede metoder til at indikere bestandigheden.

Der er flere problemer ved den fremgangsmåde. Accelererede metoder kan give andre nedbrydningsmekanismer end dem, der forekommer i virkeligheden, og det gør resultaternes validitet tvivlsom. Forskellige accelererede metoder giver undertiden modstridende resultater. Endelig giver metoderne i almindelighed ikke grundlag for at sætte tal på levetiden.

Accelererede metoder kan derimod være nyttige til at rangordne forskellige kombinationer af lime, aluminiumlegeringer og forbehandlinger. En simpel metode består i at fremstille et antal overlapsamlinger og måle trækstyrken for nogle af dem. Resten anbringes i et fugtkammer eller i vand med en given temperatur, og med eksempelvis en måneds intervaller måles trækstyrken for de eksponerede prøver. Forholdet mellem begyndelsesstyrken og styrken efter eksponering giver et mål for samlingens bestandighed, og tabet af styrke som funktion af tiden giver en indikation af, om styrken fortsat falder, eller om den stabiliserer sig. Ved at variere vandets temperatur og chloridindhold kan man gøre miljøet mere eller mindre aggressivt. En bedre simulering af et udendørs miljø kan opnås med klimacyklung mellem fugtig varme, kondenserede fugt og frost. Det er vigtigt at sørge for en veldefineret fugegeometri, ikke mindst omkring fugeranden, for ikke at få for stor spredning af måleresultaterne.

Limen mister før st sin vedhæftning i området ved fugeranden, mens limfladens indre er upåvirket ved korte eksponeringstider, fordi vandmolekylerne kun langsomt diffunderer gennem limen. Metoden kan gøres mere følsom ved at benytte prøveemner med et hul midt i overlappet, så diffusionsvejen forkortes. Da spændingerne midt i overlappet er relativt små ændrer man ikke afgørende på spændingsniveauet ved trækprøvningen.

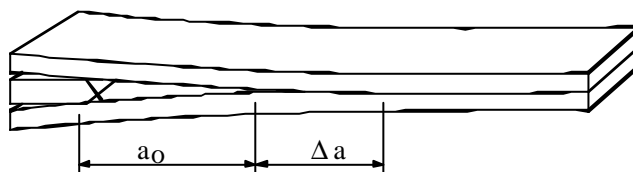
Hvis samlingen udsættes for mekanisk belastning i et fugtigt miljø, kan levetiden reduceres dramatisk; det er vist eksperimentelt, at samlinger som i ubelastet tilstand tålte fugtig varme igennem måneder eller år, kunne gå itu i løbet af minutter eller timer, når de samtidig blev udsat for mekanisk belastning (se [1], side 155). Allerede så lav en belastning som 3–5% af begyndelsesbrudlasten kan undertiden påvirke levetiden for samlingen mærkbart.

Dette forhold udnytter man til en mere følsom accelereret metode, som består i at belaste overlapsamlingerne med eksempelvis 10 eller 20% af begyndelsesbrudlasten under fugteksponeringen, som kan vare 1000 timer eller længere. Som ovenfor er det relative styrketab et mål for bestandigheden. Metoden simulerer måske bedre de virkelige forhold, da limsamlinger i praksis som regel er udsat for belastning.

I en variant af metoden belastes prøverne så meget, at der opstår brud i emnerne indenfor den planlagte varighed af forsøget. Efterhånden som prøverne går itu, registreres tiden til svigt (time to failure, TTF), og når halvdelen af prøverne er brudt, måles reststyrken i de resterende prøver. Det giver dels en talværdi for TTF, og som før et mål for bestandigheden udtrykt ved tab af styrke. I et givet miljø har både forbehandlingsmetode og spændingsniveau stor indflydelse på TTF. Levetidsforsøg i varmt, fugtigt miljø med legering 6061 T6 limet med en varmhærdet énkomponent nitrilmodificeret epoxylim har således vist, at ved en spænding på 5 MPa øges TTF fra ca. 1000 minutter til mere end 10.000 minutter, når man i stedet for dampaffedtning vælger enten chromsvovlsyreætsning, chromsyreanodisering eller phosphorsyreanodisering som forbehandlingsmetode. Svovlsyreanodisering er mindre effektiv end de ovenfor nævnte, idet levetiden kun forbedres med en faktor 2 –10 i forhold til dampaffedtning. Uanset forbehandlingsmetoden falder TTF omtrent med en faktor 10, når spændingsniveauet hæves fra 5 MPa til 15 MPa (se [1], side 474).

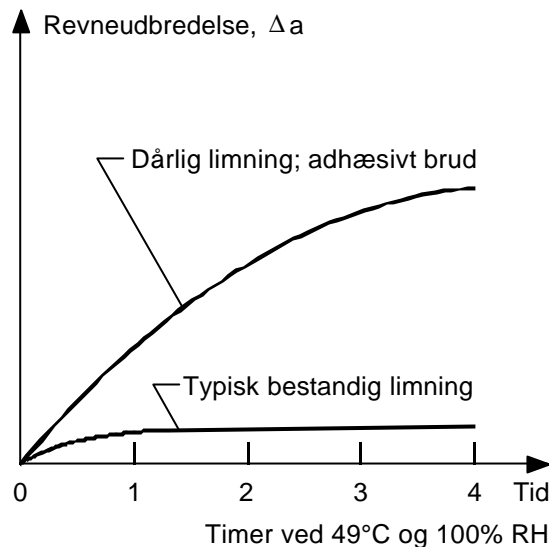
For at kunne påvise forskelle mellem forskellige limsystemer med disse metoder kan det være nødvendigt at justere forsøgsparametrene, så følsomheden bliver passende. Det er fælles for de beskrevne metoder, at de er temmelig tidskrævende. Når man betragter brudfladerne efter en fugteksponering vil man ofte se, at limen tilsyneladende har mistet vedhæftningen langs fugeranden, så brudformen her er adhæsiv, mens man i det indre af limearealet har kohæsivt brud i limen. Forekomsten af adhæsivt brud er mere udbredt, når prøverne har været belastet under eksponeringen, og herved ligner brudfladerne mere dem, der kan observeres efter svigt af samlinger i praksis. Forskellige brudmekaniske metoder giver en hurtig og formentlig mere sikker indikation af den relative bestandighed for forskellige prøvede limsystemer, men i almindelighed mangler grundlaget for at forudsige levetiden for et givet system.

Kileprøven [9] er en simpel og hurtig, kvalitativ brudmekanisk metode. Ved prøven bankes en kile ind midt i limfugen, så der opstår en revne. Aluminiumpladerne skal være så tykke, at de ikke deformeres plastisk i nævneværdigt omfang. Kilen skal være så tyk, at længden a_0 af den dannede revne bliver stor nok til at kunne måles med rimelig sikkerhed, og sådan, at pladerne tilføres tilstrækkelig spændingsenergi, se Figur 4.20.



Figur 4.20 Principskitse af kileprøveemne, hvor a_0 er startrevnens længde og Δa er revneudbredelsen i eksponeringstiden.

Når startrevnelængden er målt, anbringes prøven i et fugtkammer, typisk ved 49°C og 100% relativ fugtighed. Efter en, to og tre timer måles revneudbredelsen, hvorefter prøven flækkes helt. God bestandighed er kendetegnet ved meget lille revneudbredelse og et brud, som i hele sin udstrækning er kohæsivt, mens dårlig bestandighed må påregnes, når revnetilvæksten er stor, eller hvis bruddet er helt eller delvis adhæsivt. Figur 4.21 viser typiske revneudbredelser ved henholdsvis god og dårlig bestandighed.



Figur 4.21 Revneudbredelse som funktion af eksponeringstid for god og dårlig limning.

Ved at sammenholde et meget omfattende erfaringsmateriale for levetider og brudformer fra praksis med resultatet af kileprøvning definerede Boeing-fabrikkerne deres acceptkriterium som en revneudbredelse på højst 0,75" efter 1 time ved 49°C og 100% relativ fugtighed [10]. Erfaringerne stammede fra et stort antal limninger gennem mange år, men kun få limsystemer. Så længe man holder sig til sådanne systemer, kan man formentlig benytte de samme acceptkriterier, mens det må være mere usikkert, om det er tilladeligt med afvigende systemer.

Selv uden muligheden for at opstille eksakte acceptkriterier er kileprøven af værdi, fordi den giver en hurtigere indikation af bestandigheden end den, man får ved måling af styrketabet i fugteksponerede overlapsamlinger. Det er særlig interessant, når man vil rangordne flere forskellige limsystemer. Kileprøven viser overfladernes evne til at modstå fugtigt miljø, og ved at kombinere kileprøven med belastede overlapsamlinger kan man få en indikation af styrketabets størrelse.

Selv hvor man forsøger at styre produktionen af limede samlinger nøje, kan man som regel konstatere en del spredning i samlingernes holdbarhed. Noget kan formentlig forklares med forskelle i driftsbetingelserne, men også små variationer i forbehandlingen vil have indflydelse. Kileprøven kan her være en mulighed til at indikere, om forbehandlingsprocessen er under kontrol.

Hvad enten man opnår information om en samlings bestandighed gennem driftserfaringer eller accelereret prøvning, er denne information specifik for de benyttede produkter og procesbetingelser. Resultaterne kan således ikke umiddelbart overføres til eksempelvis samlinger udført med en lim af et andet fabrikat, selv om den måtte være af samme type.

4.3.2 KORROSION AF GRUNDMATERIALET

Så længe limens vedhæftning er intakt, er grundmaterialet under limen godt beskyttet mod korrosion. Hvis indtrængende vandmolekyler kan ødelægge limens vedhæftning og helt eller delvis omdanne den oprindelige oxidoverflade til et hydroxid, vil resultatet være en mekanisk svækkelse i limfladen. Det er derfor væsentligt at forbehandle aluminiumoverfladen med en metode, der giver et oxid med øget stabilitet i vådt miljø som for eksempel phosphorsyreanodisering. En alternativ mulighed er brugen af

en primer, som kan beskytte oxidoverfladen og forbedre styrken i vådt miljø. Silanprimere kan på grund af deres evne til at etablere stærke bindinger til både oxid og lim tjene begge formål, men styrken i tør tilstand kan blive forringet, da primeren kan være det mekanisk svageste led i samlingen.

Ved udvendig korrosion langs samlingen kan der opstå en undergravning af fugeranden, hvor der dannes korrosionsprodukter. I den dannede lomme vil der være et mere fugtigt miljø, og korrosionsprodukterne vil kunne skabe lokale kløvningsspændinger, som accelererer nedbrydningen. Hygroskopiske salte og chlorider vil forværre situationen. Forholdsregler mod udvendig korrosion kan være brug af primer, anodisering og maling.

4.3.3 KRYBNING

Ved langvarig belastning af en lim vil den krybe. Det skyldes, at deformationen af en lim principielt består af tre bidrag:

- En næsten øjeblikkelig elastisk deformation, som er uafhængig af temperaturen.
- En forsinket elastisk deformation, som skyldes en gradvis udretning af polymermolekylerne. Hastigheden af denne deformation er temperaturafhængig.
- En flydning, som skyldes at polymermolekylerne flytter sig i forhold til hinanden under påvirkning af belastningen igennem lang tid. Hastigheden af denne deformation er tilnærmet konstant for en given kombination af spænding og temperatur.

Hvis deformationen overvejende skyldes de to første bidrag, vil limen genvinde sine oprindelige dimensioner nogen tid efter aflastningen. Hvad angår bidraget fra flydning er deformationen permanent.

Ved lave temperaturer kan polymermolekylerne kun vanskeligt bevæge sig i forhold til hinanden, men over glasomdannelsesstemperaturen ændres limens egenskaber, så den bliver mere fleksibel og får flydeevne. Definition af glasomdannelsesstemperatur er givet i afsnit 4.5.3. Glasomdannelsesstemperaturen afhænger af limens kemiske struktur. Generelt betyder større molekylvægt og tværbindingsgrad en højere glasomdannelsesstemperatur. En forhøjet hærde temperatur giver alt andet lige en højere tværbindingsgrad, og dermed en højere glasomdannelsesstemperatur. Indhold af blødgørere fremmer polymermolekylernes bevægelighed og sænker glasomdannelsesstemperaturen. Absorption af vand eller opløsningsmidler kan have samme virkning.

Krybehastigheden for en hærde lim kan vokse dramatisk med luftfugtigheden; et forsøg med en given lim har således vist, at krybehastigheden steg med en faktor 28 ved at hæve den relative luftfugtighed fra 20% til 70% ved den samme spænding (se [1], side 331).

Glasomdannelsesstemperaturen for polymerer kan være fra under 0°C til mere end 250°C. Eksempelvis kan mange lime således tåle nogen statisk belastning uden nævneværdig krybning ved stuetemperatur, mens de ved en temperatur på eksempelvis 100°C kryber uacceptabelt ved den samme belastning.

Krybning i limsamlinger modvirkes ved at vælge lim med en glasomdannelsesstemperatur, som er højere end samlingens drifttemperatur, og ved at kun tillade statiske spændinger, som er meget små i forhold til samlingens brudspænding.

I det følgende behandles de faktorer, der spiller ind ved valg af limtype.

4.4 VALG AF LIM

4.4.1 LIMFAMILIER

Det forholder sig for limning som for lodning og svejsning; resultatet er afhængigt af valget af tilsatsmateriale. Ved lodning kan der vælges mellem forskellige typer loddetin, hver med forskellige smeltepunkter, alt afhængig af om der skal hård- eller blødloddes. Ved svejsning findes der tilsvarende forskellige tilsatsmaterialer med forskellige specifikationer og anvendelsesområder.

Ved limning findes der tilsatsmaterialer svarende til omkring 80 forskellige plasttyper og ud af disse basistyper findes der i dag mere end 30.000 forskellige plastformuleringer. Plasterne har intet egentligt smeltepunkt eller blødgøringspunkt, men bliver gradvist blødere ved en øget temperatur.

Ved lodning eller svejsning smeltes tilsatsmaterialet som derved varmer/smelter de materialer, der ønskes sammenføjet. Ved limning tages der udgangspunkt i en plast som enten:

- opløses i et opløsningsmiddel eller dispergeres i vand (tørrende lime)
- smeltes (smeltelime)
- ved tilsætning af en hærdet skaber polymerisation

For at sikre optimale løsninger er det derfor vigtigt at have et kendskab til nogle af de mest anvendte lime der anvendes i strukturelle sammenhænge.

Efterfølgende er angivet de mest anvendte lime til aluminium, omtalt sammen med et par eksempler på deres anvendelsesområde. Mange leverandører af limprodukter fører et meget varieret produktprogram indenfor de enkelte limtyper (limfamilier) og ofte findes store forskelle i egenskaber imellem to produkter fra samme familie.

Forskellige limfamilier og afbindingsmetoder, [6]

Tørrende lime

De tørrende lime er plasttyper eller elastomerer (syntetisk gummi), som enten er opløst i et opløsningsmiddel, eller er bittesmå partikler af plast eller elastomer, der holdes svævende i vand. Efter en fordampning af bærematerialet overgår elastomeren til fast form og derved limes flader sammen.

Smeltelime

Smeltelime har deres største udbredelse inden for træindustrien (f.eks. til montering af kantlister på plader) og indenfor emballageindustrien, hvor deres hurtighed kommer til nytte. Derfor er der her ikke medtaget en større beskrivelse af disse lime; der henvises i stedet til anden litteratur.

Varmereaktivérbare lime

Varmereaktivérbare lime består af opløsninger eller dispersioner, som efter tørring bliver helt klæbefri. Ved hjælp af varme reaktiveres limen, så den kan befugte den modstående flade. Reaktivértiden er forholdsvis kort og kan ske ved hjælp af varmluft, UV-lys, varmevalser, strygejern osv.

Hæfte lime

Hæftelime ændrer form langsomt og størkner overhovedet ikke! Hæftelime er en meget trægflydende væske, som uhyre langsomt "løber" ned i overfladens ujævnheder. Der findes i dag hybrider, hvor hæftelimen kombineres med epoxyegenskaber ved hjælp af varmetilførsel.

Cyanoakrylater

Cyanoakrylaterne (også kaldet sekundlim) fås i dag i bittesmå flasker og kan lime alt på et øjeblik. De fleste cyanoakrylater er klare som vand og er almindeligvis meget lavviskøse (næsten som vand) men findes dog også i viskositeter op til geléform. Disse limtyper er afhængige af fugt for at hærde.

Anaerobe lime

Disse produkter er 1-komponent lime, som ved fravær af ilt og kontakt med aktive metalioner eksempelvis jern og kobber overgår til fast form. Hærdningen sker altså først, når limen er inde i den forseglede fuge.

UV-hærdende lime

Nogle af de anaerobe lime er blevet udviklet til at hærde under ultraviolet lys. Hærderen er her iblandet limen og frigøres af UV-lys.

SGA lime (Second Generation Acrylics)

Denne limtype gør det muligt i ro og mag at påføre lim på den ene fugeflade og hærder på den anden. Hærdningen sker hurtigt ved sammenpresning (~1–3 min. ved 20°C til håndterbarhed). Limfugen har gode mekaniske og kemiske egenskaber.

Silikonelime

Silikonelimene findes som 1- og 2-komponente produkter og er de eneste, som giver en kontinuerlig arbejdstemperatur på ca. 200°C uden at kræve varmhærdning. Alle silikonelime giver bløde, elastiske limfuger. De 1-komponente lime hærder ved hjælp af fugt. De 2-komponente silikoner hærdes i tykke sektioner og på store overflader. Før krævedes en primer og varmhærdning for at opnå vedhæftning på

andre materialer. I dag findes der 2-komponente silikonelime, som hæfter på andre materialer efter hærkning ved stuetemperatur og uden priming.

Andre lime

Udviklingen inden for limområdet går meget hurtigt og bemærkelsesværdigt er det, at eksempelvis 1-komponent epoxylimene og de modificerede acryllime i nogle tilfælde er i stand til at arbejde sammen med olieholdigt materiale (eks. processer hvori der indgår dybtrækning).

Der findes i dag lime, der er i stand til at klare meget høje temperaturer, helt op til 350–400°C. Man finder endda uorganiske lime (limtyper der ikke er baseret på plastmaterialer), der kan anvendes ved temperaturer på ~1000°C. Som regel er disse baseret på oxider og silikater (keramiske materialer).

Fordele og ulemper ved epoxy- og polyurethanlime

Epoxylime [6]

Epoxylime findes på både 1- og 2-komponent form. De findes også med meget forskellig varmebestandighed. Nogle har mistet det meste af deres styrke allerede ved 60–70°C. Andre kan anvendes ved 150°C. 2-komponent epoxyerne, der hærder ved stuetemperatur, er formodentlig den mest anvendte metallim.

De langsomt hærdende epoxylime giver et bedre resultat sammenlignet med de hurtigt hærdende. Epoxylime er udmærkede metallime og modificeret med gummi udviser de en øget peelstyrke. For at opnå et ensartet produktionsresultat kræves det, at der doseres meget omhyggeligt. Typiske værdier for en 2-komponent epoxylim med fyldstoffer kunne være:

- Anvendelsestemperatur: -60°C til +80°C
- Forskydningsstyrke (ved enkelt overlappingsfuge, hærdet i 5 min. ved 120°C): 26–28 MPa
- Ved 80°C er korttidsstyrken ca. 50%

Polyurethanlime [6]

Disse lime blev oprindeligt udset til at erstatte epoxylimene, hvilket de også gjorde til bla. sandwichlimning takket være bedre vedhæftning og bedre kile-/peelstyrke. Polyurethanlimene spænder fra gummielastiske til hårde og forekommer i både 1- og 2-komponent versioner. De 2-komponente hærder ved stuetemperatur uden at krympe og 1-komponent typerne hærder normalt i forbindelse med fugt. Hærdetiden for 2-komponente polyurethanlime påvirkes ikke lige så meget af varme som f.eks. epoxylim. Højeste hærdetemperatur er normalt 70°C. Som rene metallime udviser de en lavere styrke end epoxylime. Nedenstående kan betragtes som maksimalværdier.

- Anvendelsestemperatur: -60°C til +80°C
- Forskydningsstyrke (ved enkelt overlappingsfuge v/20°C): 15-20 MPa
- Anvendelsesområde: Sandwichkonstruktioner, køle-/frysebeholdere, ilimning af bilruder

Det er svært at klassificere disse limtyper, og der bør derfor tages kontakt til limleverandørerne for at få specifikke oplysninger. I Tabel 4.3 findes en oversigt over forskellige limtyper og nogle af deres typiske anvendelsesområder.

Tabel 4.3 Limtyper og deres mest anvendte applikationer, fra [14].

Familie	Anvendelsesområde	Kommentarer
1 – komponent Epoxy	Konstruktioner med høje styrkekrav	<i>Nogle typer kan anvendes på olierede overflader</i>
2 – komponent Epoxy	Ekstremt forskellige applikationer (også kaldet “multi-purpose” lim)	
2-komponent Polyurethan	Sandwichkonstruktioner	
En-komponent Polyurethan	Reducerer vibrationer; giver tætte semistrukturelle sammenføjninger	<i>Typisk opskummende</i>
2. generation Acrylic / Modificeret Akryl	Konstruktioner med høje styrkekrav	<i>Stor spændvidde i fugetykkelse</i>
Anaerobe lime	Fixerede muffesamlinger, låselim for skruer og bolte	<i>Kun affedtning, aktivatorer findes, fugetykkelse <0,3mm</i>
Cyanoacrylat	Små komponenter, bør ikke anvendes ved høje belastninger. Velegnet til aluminiums-/gummi-konstruktioner.	<i>Er ikke særlig anvendelig til strukturelle samlinger. Fugetykkelser: <0,05 mm</i>
Silikonelime	Fleksible, modstandsdygtige overfor høje temperaturer. Tætte fuger.	<i>Sammenføjning af eksempelvis glas/aluminium. Der kan være krav om en Silan primer</i>

En lim kan kun opnå de specificerede egenskaber, hvis den hærder på den rigtige måde. Forskellige lime hærder forskelligt, hvilket er beskrevet i det følgende.

4.4.2 AFBINDING AF LIME

For at en lim kan opnå sin styrke kræves det, at limen afhærder, dvs. går fra flydende til fast form. Limen når først sin fulde styrke, når den er fuldstændig afhærdet. En lim, der kun delvist er afhærdet, har ikke ret stor styrke, men kan i mange tilfælde tåle en videre håndtering i produktionen. Hærdeprocessen kan foregå i ethvert temperaturområde fra rumtemperaturer op til 200 °C (f.eks. 1-komponent epoxy med ultra-hurtig hærkning) afhængigt af limen. Generelt gælder at lave temperaturer medfører langsom afhærdning, mens høje temperaturer medfører hurtig afhærdning.

Afhærdning

Afhærdningen kan opdeles i tre hovedgrupper, som hver kort beskrives i det følgende.

Kemisk hærdende lime (Polyurethan)

Kemisk hærdende lime findes både som 1- og 2-komponent lime. 1-komponent limene hærdes enten ved at benytte luftens fugt (fugthærdende) ved en katalytisk proces, hvor limen reagerer med de materialer der limes på, eller ved opvarmning (varmehærdende), hvor en hærdning sættes i gang ved en bestemt temperatur. 2-komponent lime hærdes ved at de to komponenter er reaktive og reagerer med hinanden når de sammenblandes.

Fysisk tørrende lime (Epoxy)

Typisk hærdes fysisk tørrende lime ved fordampning af opløsningsmiddel eller vand. De vandige lime findes som regel som dispersioner, hvor vandet er iblandet limen og så skal diffundere ud for at limen tørrer. Disse findes både som 1- og 2-komponent lime og vandmængden kan nærme sig op mod 50% af indholdet. Generelt gælder for disse typer af lime at der forekommer et stort svind i limen under hærdning. Derfor er det nødvendigt at anvende et applikationstryk under afhærdningen for at sikre en konstant kontakt mellem limen og overfladerne, som skal limes.

Fysisk størknende lime

Fysisk størknende lime kaldes også smeltelime (reaktiv hot-melt), da de skal påføres i opvarmet (smeltet) tilstand. Styrken opstår under afkøling. Der findes smeltelime, hvor hærdningen frigives samtidig med at limen opvarmes, og der findes typer som efterfølgende skal afhærdes ved højere temperaturer.

Tabel 4.4 Hærdeprocesser for forskellige limfamilier, fra [14].

Familie	Hærdeproces
1-komponent Polyurethan	Hærdes ved luftens fugtighed indenfor 24 timer til nogle få dage
2-komponent Polyurethan	Hærdes i løbet af få timer i rumtemperatur og ca. 45 min. ved ca. 80°C
1-komponent Epoxy	Hærdes ved høj temperatur imellem 120 og 200°C, fra 15 min. til 1 time
2-komponent Epoxy	Hærdes i løbet af få timer i rumtemperatur og ca. 45 min. ved ca. 80°C
Modificeret Akryl	Hærdes i løbet af få minutter
Anaerobe	Hærdes i løbet af få minutter, hvis tilstedeværelsen af ilt kan forhindres
Cyanoacrylat	Hærdes i løbet af få sekunder eller minutter ved rumtemperatur

Silikone lime	Samme som ved Polyurethan lim
Hæfte lime	Max. egenskaber efter 72 timer

Hærdemetodernes indvirkning på aluminiumlegeringer

Hvis varme bruges til at forøge hastigheden af limens afhærdningsproces ved limning af aluminium, kan aluminiumets legering have indflydelse på hvilken proces, der bør vælges. Det skyldes, at limens hærdetemperatur kan overlape temperaturen for varmebehandling af aluminium. Afhængig af hvor lang tid varmebehandlingen foregår, kan dette have en indflydelse på egenskaberne af forskellige aluminiumlegeringer. Det er derfor vigtigt at sammenligne limens hærdecyklus med hærdetemperaturen for specielt modningshærdbare legeringer. Ved temperaturer under 100°C [14], har hærdeprocessen ingen betydelig indflydelse på aluminiumlegeringerne. Kommer temperaturen over 100°C er indvirkningen afhængig af, hvilken legering der anvendes. Se endvidere kapitlet om aluminiumlegeringer og egenskaber.

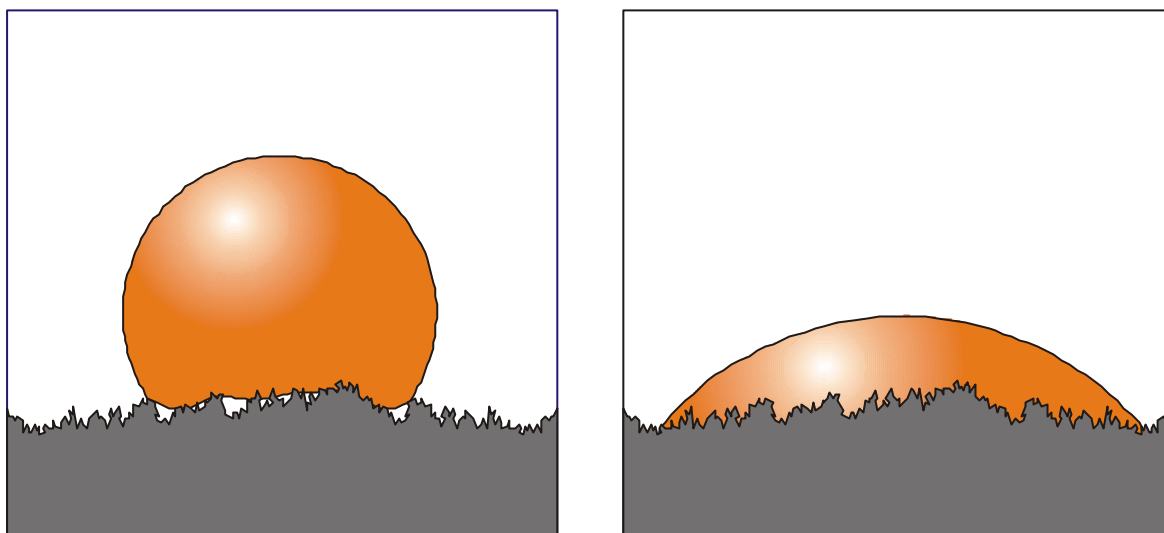
4.5 UDFØRELSE - VALG AF FOR- OG EFTERBEHANDLING

4.5.1 FORBEHANDLING

Forbehandling af overfladerne som skal påføres lim, er det vigtigste enkeltstående element i udførelsen af en limsamling; det er altafgørende for at en limsamling bliver succesfuld. Overfladebehandling skal betragtes som en generel klargøring af kontaktfladerne med henblik på at opnå det ønskede resultat og ikke kun en rengøring for smuds. Indledningsvis diskuteres kort mekanismerne bag limning for at give de nødvendige forudsætninger til at behandle problemstillingen.

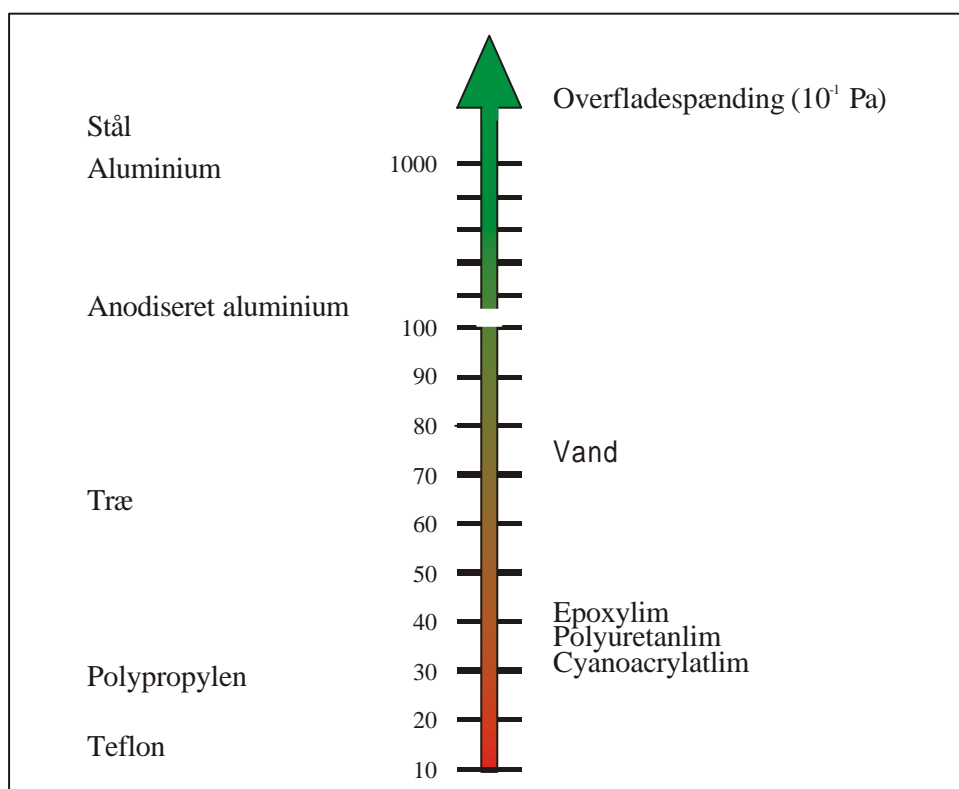
Mekanismer bag klæbning

Klæbning er baseret på at et polymermateriale hæfter til en overflade gennem en hærde- eller størknep proces, og der er en række faktorer som har indflydelse på en lims evne til at hæfte på en overflade. Der er udviklet en lang række teorier i forsøget på at forklare interaktionen mellem lim og overflader. Blandt disse anfører den termodynamiske absorptionsteori, som blev præsenteret første gang i 1963 [5], at et af de afgørende elementer er tæt kontakt. Bringes to materialer tilstrækkelig tæt på hinanden, opstår der stærke bindingskræfter mellem dem, som er afhængig af begge materialer. Imidlertid har bindingskræfterne ikke nævneværdig styrke ud over 5Å (1Å = 0,0000001mm), hvilket i praksis er langt mindre end to faste overflader kan opnå.



Figur 4.22 Illustration af en dråbe lim på to forskellige overflader med hhv. mindre (TV) og større (TH) overfladespænding end limtypen.

Den ønskede tætte kontakt beror derfor på befugtning af overfladen, da det ikke på baggrund af mekanisk bearbejdning er muligt at skabe en tilstrækkelig plan overflade. Derfor er overfladespændingen på materialerne et vigtigt element. Som udgangspunkt skal limens overfladespænding være lavere end grundmaterialets for at kunne opnå en effektiv befugtning af overfladen [5] (se Figur 4.22). For mange plasttyper er dette ikke tilfældet og ofte er det nødvendigt med særlige tiltag for at opnå en stærk limsamling. På Figur 4.23 er vist en oversigt over forskellige materials overfladespænding.



Figur 4.23 Overfladespændingsrække for plast, metal og andre materialer, [5].

Forbehandlingsmetoder

Enhver forbehandling starter med en rengøringsproces af overfladen, men i praksis kan dette vise sig vanskeligt at gennemføre. Betragtes f.eks. en plan, glatslebet overflade vil overfladeruheden i forhold til bindingskræfternes beskedne rækkevidde stadig være meget stor. Derfor er det vanskeligt at rengøre en overflade tilstrækkeligt vha. opløsningsmidler, da det ikke er muligt at nå ned i alle hulninger [6]. Endvidere kan der herske tvivl om hvorvidt opløsningsmidlet virker på alle de forekommende urenheder. Og hvis det gør, er risikoen for at smøre et meget fint lag smuds ud på hele overfladen betydelig. Renseprocessen bør derfor alene betragtes som en forudgående afrensning med henblik på en efterfølgende forbehandling. Mulighederne for forbehandling er mange, men kan opdeles i 3 hovedgrupper; *fjernelse af overflade*, *overfladekonvertering* og *påføring af primer*. De tre hovedgrupper er ikke nødvendigvis uafhængige idet f.eks. ætsning ofte udgør det første trin i en overfladekonverteringsproces (f.eks. anodisering).

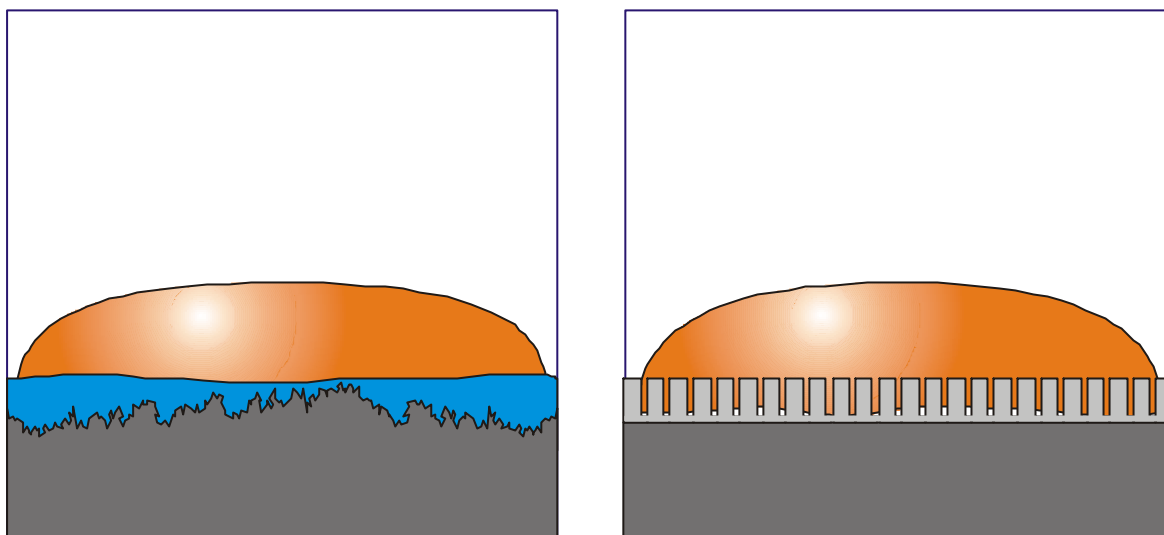
Fjernelse af overfladen

Dette kan udføres vha. slibning eller f.eks. sandblæsning. Metoden er enkel og effektiv. I praksis fjernes et tyndt lag af materialet så det rå grundmateriale står frem. For aluminium er dette imidlertid kun tilfældet i få øjeblikke, da oxidlaget øjeblikkeligt gendannes, men det er uden reel betydning da den fremkomne overflade stadigvæk er helt ren. Efter endt slibning bør overfladen renblæses med oliefri trykluft for at fjerne evt. slibestøv, hvis det ikke er muligt at integrere dette i slibeprocessen. Eftertørring med et opløsningsmiddel kan ikke anbefales, medmindre det kan gøres med fuldstændig sikkerhed for at der ikke introduceres skidt fra klud, rengøringsmiddel mm. Alternativt kan overfladen fjernes vha. syre/base-bade og en efterfølgende skylning i demineraliseret vand.

Overfladekonvertering

Overfladekonvertering er en kemisk eller elektro-kemisk proces der opbygger et nyt oxid, der er bedre end det eksisterende. For aluminium anvendes ofte anodisering som vedhæftningsforbedrende forbehandlingsmetode, med metoden er betinget af at emnerne kan nedsænkes i procesanlæggets kar.

I praksis findes et væld af forskellige metoder, som f.eks. syre/base-bade tilsat forskellige kemiske reagerter (af varierende giftighed), chromatering og eloxering mfl. På Figur 4.24 er vist en primet og en anodiseret overflade.



Figur 4.24 Primet overflade (TV) og anodiseret (TH).

Påføring af Primer

Overfladebehandling ved påføring af en primer, som er et overfladestabiliserende materiale, er en yderst fleksibel metode. Imidlertid kan det være en tidskrævende opgave ved påføring på større overflader. Tidligere har primere været baseret på miljøbelastende kemikalier som tungmetaller og lignende, men i de senere år er der foretaget en række tiltag mod at udarbejde mindre miljøbelastende produkter baseret på f.eks. silanholdige forbindelser.

Primere er typisk tyndtflydende væsker, der med fordel kan anvendes til at skabe det rigtige fundament (se Figur 4.24), således at en højviskos lim bedre kan anvendes på overfladen. Selvom en stor forskel i overfladespændingen er til stede kan det være et problem at få fugtet overflader indenfor limens åbentid, når limen er meget tykflydende.

Limning af malede eller coatede aluminiumsoverflader kan med fordel udføres ved anvendelse af reaktiv primer.

4.5.2 PRODUKTIONSTEKNISKE ASPEKTER

Arbejds miljø og limning

Siden den 26. marts 1985 er arbejdet med epoxyharpikser og isocyanater regelsat i en bekendtgørelse "*Bekendtgørelse nr. 199 af 26. marts 1985 om epoxyharpikser og isocyanater med ændringsbekendtgørelse nr. 799 af 15. oktober 1999*". Denne bekendtgørelse omhandler de risici, der er ved at arbejde med bla. lim samt råd om, hvorledes arbejde med disse bør tilrettelægges.

Det er forkert at angive at nogen form for lim med sikkerhed er ufarlig ved daglig anvendelse over en længere periode. Det vides at epoxy- og akrylatlim kan give anledning til hudallergier og at isocyanater i høj grad påvirker åndedrætsorganerne. Derfor har *Arbejdstilsynet (AT)* udarbejdet *bekendtgørelse nr. 651 af 23. juli 1992, Personlige værnemidler*.

Epoxyprodukter

Epoxyprodukternes sundhedsfare stammer både fra harpiksdelen - epoxyharpikser, hvor de lavmolekylære er farligst - og fra hærdere - aminer, amider, hvor de aromatiske aminer har kræftfremkaldende egenskaber. Epoxyharpikser kan forårsage hudirritationer og allergiske kontakteksemmer.

Isocyanatholdige produkter

Isocyanatholdige produkters sundhedsfare er knyttet til hærdere - isocyanaten - men også til visse typer aktivatorer - aminer. Damp eller dråber fra isocyanater er farlige at indånde. Stoffet irriterer næse, svælg og lunger.

Personlig hygiejne

En betingelse for at arbejdet kan udføres forsvarligt er, at den personlige hygiejne gennemføres omhyggeligt. AT's bekendtgørelse beskriver, hvilke krav der stilles til den personlige hygiejne samt de midler, der skal være til rådighed.

Limning behøver ikke være en arbejdsmiljørisiko – limarbejdet skal blot være velplanlagt og konsekvent gennemført.

Yderligere information kan findes i referencerne [7] og [8], samt i kapitlet om Arbejdsmiljøpunkt 7.5.3.

Klargøring til limning

Limning kræver grundighed i alle faser, og for at udføre et optimalt limarbejde skal fire faser gennemgås:

- Gennemtænke hele limningsprocessen.
- Nedskrive en detaljeret arbejdsbeskrivelse der skal overholdes.
- Foretage grundige tests for at afprøve processen.
- Udføre arbejdet med præcision og kontinuitet, så der ikke forekommer variationer.

Der er mange delelementer der foretages under arbejdet, og hvert enkelt element skal udføres ens hver gang for at sikre at slutresultatet bliver det samme hver gang.

Generelt

Overfladerne, som limes, skal være defineret nøjagtigt for at opnå et optimalt resultat. Dette kan opnås ved at følge tre grundregler:

- Ingen ukontrolleret opbevaring i produktionslokalerne eller på åbne hylder.
- Ingen berøring af limflader med bare hænder.
- Forbehandling og limning bør udføres så tæt på hinanden som muligt, både tidsmæssigt og fysisk.

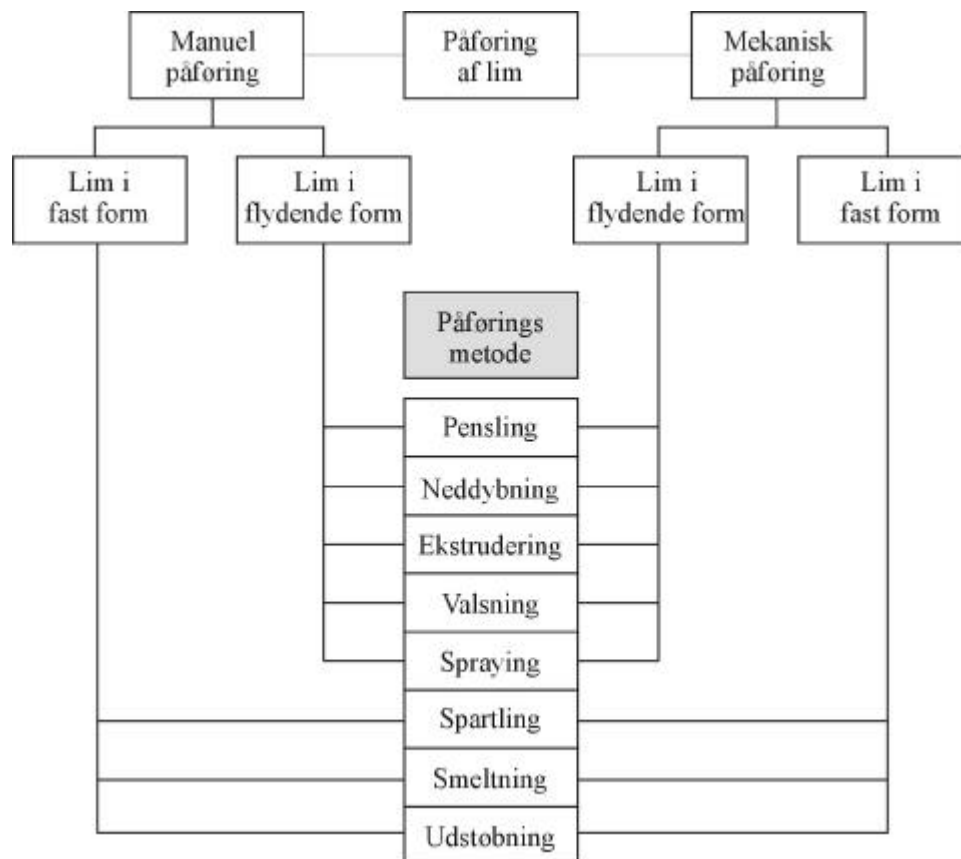
Påføring af lim

Udviklingen af påførings- og styreudstyr er kommet langt. Det er i dag muligt at påføre lim i praktisk taget alle mønstre og former. Springet fra pensel eller limtube til robotpåføring er dog forholdsvis stort, og der kan være grunde til at tage kortere skridt. Størrelsen på de overflader som skal påføres lim, antallet af produkter der skal fremstilles per tidsenhed, samt ikke mindst limtypen vil selvfølgelig have betydning for, hvilket udstyr der kræves. Lime kan have meget lave viskositeter (f.eks cyanoakrylater), de kan være tyktflydende pastaer eller faste stoffer som pulver, granulater eller klumper.

Påføringsmetoder

Limning i produktionen bliver som regel ikke vellykket, før lim og udstyr er afstemt efter hinanden. Der findes en mængde forskelligt udstyr til påføring af lim, og der bør derfor meget tidligt i et konstruktions- og produktionsforløb tages kontakt til en limleverandør for at få råd og vejledning.

På Figur 4.25 er vist en skematisk oversigt over påføringsmetoder, opdelt efter klæbestoffets konsistens.



Figur 4.25 Metoder til påføring af klæbestof afhængig af stoffets konsistens, fra [14].

Fiksering/Samling af limfuger

Klæbestoffer behøver, afhængig af type, tryk, temperatur osv. et bestemt tidsrum for at opnå det der kaldes "håndteringsstyrke" - altså styrke nok til at tillade håndtering af emnet uden fiksering. Indtil denne tilstand er opnået, er det nødvendigt at fikserer den limede konstruktion enten ved hjælp af

mekanisk fiksering, eller ved at kombinere limning med andre typer sammenføjningsmetoder. Endvidere er der mulighed for at anvende limtyper der ved tilføring af varme eller tryk hurtigere opnår håndteringsstyrke.

Mange af de limtyper, der anvendes i dag, har kun et ringe hærdesvind og kræver ikke noget egentligt presstryk. Spændinger i konstruktionen kan dog gøre det nødvendigt at presse overfladerne sammen. Kontaktlime kræver det højeste applikationstryk og kræver endvidere at trykket skal være jævnt fordelt over hele limfugen. Formålet er dels at overvinde spændinger i materialet og dels at kompensere for limens svind under hærdning.

Muligheder for fiksering

Mulighederne for fiksering er mange og kan foruden planpresser og skruetvinger omfatte:

- Clinching
- Falsning
- Punktuel fixering
- Punktsvejsning
- Punkthærdning af lim
- Autoklaver

Yderligere information kan findes i referencerne [6] og [15].

4.5.3 EFTERBEHANDLING

I forbindelse med limning er efterbehandling ofte ikke nødvendig. Ønsket om at kunne udelade efterbehandling kan være den motiverende faktor for at vælge limning som udgangspunkt, men for at anvende limning i et bredt perspektiv vil efterbehandling altid være et aktuelt emne. Efterbehandling af en limfuge kan antage flere forskellige former som f.eks. afrensning, slibning og overmaling.

Mekanisk efterbehandling

Efterbehandling af en limfuge vha. slibende bearbejdning kan stort set altid foretages med et godt resultat. Der er dog en række forhold som i almindelighed bør gøres til genstand for opmærksomhed. Mange limtyper har et specifikt temperaturpunkt, kaldet glasomdannelsesstemperaturen, hvor limen ændrer karakter fra fast til en mere flydende form. Ved slibning med mekanisk værktøj er det således risiko for at smelte limen. I praksis kan dette let undgås ved at *slibe fra*, således at det afslebne materiale ikke trækkes henover emnet. Slibning af lim kan afhængig af omstændighederne frigøre sundhedsskadelige stoffer, og personlige værnemidler skal derfor anvendes hvis påkrævet.

Overfladebehandling af limfuger

Ved overmaling af en limfuge er det vigtigt som udgangspunkt at sikre en god binding mellem malingen og selve limen. Bindingsenergien er afhængig af forskellen mellem overfladerne på de to materialer. Limen har sædvanligvis lavere overfladespænding end de øvrige materialer som males i

forbindelse med samlingen (se i øvrigt afsnit 4.5.1). Der vil derfor være et dårligere grundlag for at få en god vedhæftning på en limfuge end på f.eks. aluminium. For mange limtyper er dette ikke et væsentligt problem, men det er en problemstilling som skal tages i betragtning ved valg af limtype.

4.6 KVALITETSSIKRING

4.6.1 KVALITETSSTYRING OG KONTROL

For at kunne bedømme et produkts kvalitet, må der opstilles kriterier ud fra hvilke en bedømmelse kan foretages. I produktionsøjemed opstilles typisk nogle objektive egenskaber, som produktet skal kunne opfylde. Det er størrelser der kan måles, og som køberen kan kontrollere. Limteknologien medfører imidlertid en række vanskeligheder med udførelse af fyldestgørende kontrol. Det er generelt anerkendt, at høj kvalitet ikke nødvendigvis er resultatet af omfattende kontrol, hvorfor dette forhold ikke umiddelbart tilskrives videre betydning i denne sammenhæng. Kvalitetsstyring i forbindelse med limning er et spørgsmål om udarbejdelse af enkle og gode procedurer for de enkelte arbejdsprocesser. Et godt og veldefineret konstruktionsgrundlag, afstemt efter produktionsapparatet, kan være en af forudsætningerne for god produktionskvalitet samt produktivitet.

Acceptkriterier

For limning er det ikke realistisk (under normale omstændigheder) at udføre NDI, da det både er dyrt og ofte ikke helt pålideligt. Reparation er mere besværlig i forbindelse med limning end f.eks. ved svejsning, da overfladebehandlingen forud for limning i nogle tilfælde ikke kan genskabes (f.eks. anodiserede overflader). Kan der enten vha. visuel inspektion, NDI eller parallelemner konstateres uregelmæssigheder i produktionen skal den forhåndenværende sag ofte behandles individuelt. Der er mange trin undervejs i en limsamling som kan give anledning til fejl, men ikke alle er lige kritiske. F.eks. er en lim med et lettere forkert blandingsforhold sjældent så kritisk som en fejlbehæftet overfladeafrensning.

Følgende bør som udgangspunkt tages i betragtning:

- Medtag reparation vs. kassation i forbindelse med designfasen.
- Ved konstatering af fejl: vurder hvorvidt det er muligt at genskabe den samme kvalitet og styrke.

Kontrolmetoder

Styrken af en limsamling er resultatet af en lang række komplicerede forhold, som ikke alle let lader sig inspicere på enkel vis. Ideelt set kan disse forhold opdeles i to overordnede grupper efter hvilken indflydelse de har på styrken af en limsamlingen: den kohæsive styrke af selve polymeren eller den adhæsive styrke imellem emnet og polymeren. Herudover findes også en række fysiske fejl i form af f.eks. inklusioner, luftblærer, hærdefejl mm.

Den adhæsive styrke lader sig ikke let inspicere, da den er et grænseflade fænomen, som kun har ringe udstrækning. I interfacelaget optræder bl.a. de stærke kemiske bindingskræfter, som binder emne og limen sammen. Imidlertid kan det selv med moderne metoder ikke entydigt afgøres, hvilken grad af adhæsion der er opnået. Derfor er dette aspekt af kvalitetskontrol som oftest begrænset til inspektion af overfladerne forud for limning.

Den kohæsive styrke er den letteste at bestemme, hvorfor den er en essentiel del af de fleste testprogrammer (både ikke-destruktive (NDI) samt destruktive).

Testmuligheder forud for samling

Disse er hovedsageligt baseret på overfladeinspektion ud fra ønsket om særlige overfladeegenskaber. Der er gode muligheder for at kontrollere overfladeruhed (i visse situationer kan overfladeruheden have betydelig indflydelse på styrken) samt overfladebehandlingen. Det er altid emne for diskussion, hvorvidt rengøringen har været tilstrækkelig. En simpel test baseret på befugtningsgraden kan udføres vha. vand eller de mere effektive Dynes penne [5]. Er der ikke udført tilstrækkeligt rengøring, spredes væsken ikke fra hverken pennene eller vandet. Det fordelagtige ved Dynes penne er at overfladebehandlingen også kan kontrolleres, hvis den har haft til formål at f.eks. hæve overfladespændingen over en minimumsgrænse (af særlig interesse for plastlimning). Flyindustrien har udviklet en række mere avancerede værktøjer som f.eks. Fokkers Contamination Tester [2]. Denne metode er baseret på analyse af selve overfladen (electron emission energy), som afhænger stærkt af elementerne, som er til stede på overfladen.

Non Destructive Inspection

Der er udviklet en lang række forskellige metoder til ikke destruktiv testning af bl.a. limsamlinger. Fælles for dem alle er, at de i praksis er bedst til at lokalisere uregelmæssigheder i form af manglende lim samt revner og fremmedlegemer i limfugen. Det kan derimod ikke umiddelbart anbefales at benytte NDI metoder til karakterisering af en limsamling styrke. Metodernes styrke ligger indenfor testning af hvorvidt limfugen har den ønskede udfyldningsgrad samt kontinuert overvågning af revnevækst. Sidstnævnte er særdeles vigtigt for krævende limsamlinger i f.eks. aerospace applikationer.

Den mest udbredte metode til inspektion af limsamlinger er ultralyd. Ved anvendelse af puls-ekko ultralydsscanning er det således muligt at konstatere områder med manglende vedhæftning f.eks. som følge af manglende lim eller tilstedeværelse af fremmedlegemer (f.eks. beskyttelsesfolier) i limfugen. Ved anvendelse af automatiseret ultralydsscanning er det muligt at afdække og arealbestemme fejlbehæftede områder meget nøjagtigt [11]. Automatiseret ultralydsscanning giver endvidere optimale muligheder for, operatør uafhængigt, at foretage periodiske inspektioner til karakterisering af skadesudbredelsen [12]. Ofte benyttes der også lavfrekvent vibrationsanalyse udstyr til undersøgelse af limsamlinger. Denne type udstyr er knapt så følsom overfor fejl som ultralydbaseret scanningsudstyr.

Destruktiv testning

Ved mekanisk prøvning af limsamlingen kan opnås et entydigt billede af den umiddelbare styrke. Imidlertid er metoden mest anvendelig på prototypeetadiet eller for større serier af mindre emner,

hvor det er muligt at udtage prøveemner. Alternativt kan udarbejdes parallelemner i form af standardiserede prøveemner (f.eks. ASTM 1002-72), som gennemgår de samme produktionstrin som de rigtige emner.

Produktionsmæssige konsekvenser

For at sikre kvaliteten bør der være særskilte produktionsfaciliteter med klimastyring. Dette er særligt vigtigt, hvis der er risiko for støv i luften samt store udsving i temperatur eller fugtighed.

Konsekvenser for reparation/udbedring

Reparation af en limsamling er ikke let. Under reparation skal sikres, at der opnås en kvalitet svarende til resten af limsamlingen. Det er vigtigt at vurdere, om det er rationelt at udføre reparation eller om emnet blot skal kasseres ved konstatering af fejl. Det er som regel overfladebehandling, udhærdning vha. varme samt evt. geometrien, der kan være svær at genskabe. Se endvidere afsnit 4.7.

Dokumenterede gode råd om design

Holdbarheden af en limsamling er som oftest kilde til størst bekymring. Der kan sjældent gives et pålideligt svar på levetiden, da den er afhængig af mange faktorer (se afsnit 4.3). Der er foretaget afprøvning af talrige overfladebehandlingsmetoder og limtyper udsat for en række forskellige typer kraft- og miljøbelastninger. I praksis er langtidsegenskaber et spørgsmål om korrekt valg af forbehandling samt lim og omhyggelig renhed i alle produktionsled.

For at opnå en god limsamling skal følgende som minimum tages i betragtning:

1. Vælg en korrosionsbestandig overfladebehandling
2. Vælg en limtype med bestandighed overfor de tilstedeværende kemikalier og vejrlig
3. Vælg en limtype med så lavt E-modul som muligt indenfor de rammer som den overordnede stivhed tillader
4. Vælg en limtype som er kompatibel med grundmaterialet
5. Vælg en limtype med lang åbentid
6. Design limfugen så kærsvirkninger minimeres
7. Placer/udform limfugen så den primært belastes i forskydning
8. Placer limsamlingen så den ikke samler vand
9. Placer limsamlingen så den evt. efterfølgende kan repareres
10. Følg anvisninger fra producenter omkring åbentid, holdbarhed osv. for limen samt evt. primer
11. Afrens alle overflader i kontakt med limen meget grundigt.

Kvaliteten af en limsamling ligger primært i udførelsen, hvorfor det er af fundamental betydning at have styr på produktionsprocessen. I det følgende gennemgås limteknologiens typiske produktionsfaciliteter samt krav til samme. Til industriel limning består det samlede produktionsanlæg

af doseringsanlæg, afrensningsværktøj og evt. kemikalier, forbehandlingsværktøj og evt. kemikalier, fiksturer, evt. accelererede hærdefaciliteter samt personlige værnemidler.

4.6.2 KRAV TIL PRODUKTIONSFACILITETER

Produktionsfaciliteter

Området hvor limningen udføres skal som udgangspunkt overholde de gældende arbejdsmiljømæssige regler. Herved opnås personlig sikkerhed for operatørene, men også fordele for limsamlingen i sig selv. Ved isolation af området, hvor der arbejdes med limning, minimeres risikoen for støvforurening fra resten af fabriksområdet. Desuden opnås fordelagtige muligheder for klimastyring i lokalet. Af særlig betydning er styring af temperaturen, da den har direkte indflydelse på åbentiden samt hærdetid for de fleste limtyper.

Følgende bør som udgangspunkt tages i betragtning:

- Fysisk adskillelse af limproces og øvrige arbejdsprocesser.
- Minimering af støv og lign. i luften i og omkring produktionsfaciliteterne.
- Temperaturstyring er særlig vigtigt hvis limtyper med kort åbentid anvendes.

Doseringsanlæg samt påføring af lim

De fleste limtyper opnår deres egenskaber på baggrund af kemiske reaktioner mellem forskellige komponenter i limen. Blandingsforholdet er afgørende for at limen opnår de ønskede egenskaber, hvilket bedst opnås ved automatiserede blandingsanlæg eller 1-komponente limtyper. Der opnås herved også en række fordele i form af mindre risiko for forurening af limen, hvis den kommer direkte fra originalemballagen igennem et automatiseret blandings- og doseringsanlæg. Denne forurening behøver ikke nødvendigvis være i form af fremmedlegemer, men kan også være luftbobler introduceret under f.eks. manuel omrøring.

Ved påføring af lim skal der kunne udlægges en jævn og ensartet limfuge i henhold til det under dimensionering af konstruktionen/limsamlingen specificerede. Limen skal påføres i et mønster der sikrer at der ikke indesluttet luft i limfugen ved sammenpresningen af emnerne, hvis der er tale om større fugebredde.

Følgende bør som udgangspunkt tages i betragtning:

- Anvend automatiserede blandings- eller doseringsanlæg for 2-komponente limtyper.

Forbehandling

Forbehandling af overfladerne har til formål at sikre at overfladebeskaffenheden er som specificeret i designfasen. Det er mindst ligeså vigtigt at sikre, at overfladerne ikke forurenes efter forbehandling som det er at udføre forbehandlingen korrekt. Anvendes f.eks. primere til forbedring af korrosionsmodstandsevnen, skal samlingen udføres indenfor primerens specificerede aktive periode. Dette betyder at emnerne normalt ikke kan primes og derefter lagerføres med henblik på senere brug.

Følgende bør som udgangspunkt tages i betragtning:

- Afrens og slib overfladerne som minimum.
- Rens emnerne i sidste øjeblik og hold dem i øvrigt altid (også før afrensning!) adskilt fra potentielle forureningskilder.

Fiksering

Det er vigtigt for en limsamling at opnå den specificerede geometri i samlingen, hvorfor fiksering af emnerne under udhærdning er vigtig. Herunder bør understreges at emnerne aldrig skal presses helt sammen, da der skal være en velkontrolleret fugetykkelse i henhold til det specificerede. Som oftest er det mest kritisk hvis fugetykkelsen bliver for lille da spændingsniveauet i samlingen herved kan blive kritisk stort (se afsnit 4.2.1).

Følgende bør som udgangspunkt tages i betragtning:

- Overhold den specificerede fugetykkelse.
- Lav fiksturer til sikring af optimale forhold under udhærdning.

Udhærdning af limen

En lim opnår gradvist sin fulde styrke under en hærdeproces, hvor limens kemiske grundelementer reagerer. Her er tale om en ikke-reversibel proces, hvorfor det er vigtigt at limen påføres inden åbentiden (dvs. i det tidsrum hvor limen er i stand til kemisk at binde på en overflade) er overskredet. Limen har ingen reel styrke før der er opnået en delvis hærdning, som først indtræffer længe efter åbentiden er overskredet. I praksis betyder dette ofte at hærdeprocessen skal accelereres, hvilket som regel kan gøres vha. opvarmning. Alternativt kan etableres mere permanente fiksturer, som kan følge emnet videre i produktionen.

Følgende bør som udgangspunkt tages i betragtning:

- Overhold åbentid for limen.
- Tilføj om muligt varme under udhærdning.

Adkomstforhold, arbejdsforhold

For limning gælder ofte at adgangsforholdene ikke er så kritiske som ved f.eks. svejsning da der ikke behøver at være fysisk adgang til limfugen i samlet tilstand. Limen kan påføres i adskilt tilstand og med henblik på efterfølgende at fordele sig selv under sammenpresning. Det gælder dog altid at emnerne skal kunne samles direkte ved sammenpresning således at emnerne ikke forskydes i limfugens eget plan efter kontakt er opnået mellem lim og emnerne.

4.6.3 NORMER OG STANDARDER

Tabel 4.5 indeholder en liste over en række standarder og normer som er interessante for limning (jf. evt. SASAK-RAP-KS-AKS-BIL-0003).

Tabel 4.5 Eksempler på standarder for limning.

Betegnelse	Beskrivelse
DS/EN 1066	Klæbestoffer prøveudtagning
ISO 4578	Adhesives – Determination of peel resistance of high - strength adhesive bonds – Floating-roller method.
ISO 4588	Adhesives – Preparation of metal surfaces for adhesive bonding
ISO 9142	Adhesives – Guide to the selection of standard laboratory ageing conditions for testing bonded joints.
EN/ISO 9653	Adhesives – Test method for shear impact strength of adhesive bonds.
Eurocode 9	Design of aluminium structures – Part 2 : Structures susceptible to fatigue. (afsnit 4.4.3, 5.2.3 og 5.3.4)
ASTM D1002-64	Strength properties of adhesives in shear by tension loading.

4.6.4 ØKONOMISKE KONSEKVENSER

Limteknologien savner fortsat rationelle samt økonomisk overkommelige kontrolmetoder, hvorfor teknologien ofte er dyr, hvis man ønsker et kvalitetsstyringssystem der er sammenligneligt med de systemer, der anvendes ved svejsning. Limning er derfor, som tidligere nævnt, et godt eksempel på at kontrol ikke er det rigtige værktøj til at fremme god kvalitet. For limning handler det om udfærdigelse af gode konstruktioner, procedurer samt uddannelse af håndværkerne. Resultatet af manglende tillid til limning medfører som regel en væsentlig grad af overdimensionering, hvilket er fordyrende for processen.

4.6.5 UDDANNELSE

Limning, eller det at udføre en limsamling er et håndværk som så mange andre. For at kunne udføre limning industrielt (strukturel limning) er god uddannelse en nødvendighed. Haves ikke den rette forståelse for limteknologiens elementer hos operatører samt designere, kan der ikke opnås en tilstrækkelig ensartethed af produktet til at kvalitetsbegrebet giver mening.

Der findes i princippet to grupperinger af uddannelser i forbindelse med limning, de lovpligtige (f.eks. Epoxy og Isocyanat bekendtgørelsen) og resten. De lovpligtige har i praksis intet med limning at gøre, men fokuserer i stedet på håndteringen af farlige kemikalier (f.eks. maling og lignende).

Grunduddannelse i håndteringen samt udførelse af limsamlinger på operatørniveau savnes derfor i Danmark. De fleste af de højere læreanstalter (Ingeniørhøjskoler samt Universiteter) besidder i dag uddannelseskompetence indenfor limning på et niveau svarende til det de fleste almindelige danske virksomheder kan få brug for. Dybere forståelse for limsamlingers mekanik samt forbehandling er områder forbeholdt specialister.

Egentlige specialiserede uddannelser indenfor limning findes endnu ikke i Danmark, men på globalt plan findes en mindre række tilbud.

4.7 REPARATIONER

Reparation af en limsamling er som udgangspunkt besværlig. Indledningsvis understreges, at der bør skelnes mellem kritiske og ikke-kritiske skader. I sig selv er inspektion af en limsamling vanskelig, hvorfor det at opdage en skade kan være svært. Derfor vil almindeligt forekomne skader typisk opdages i form af havari af konstruktionen. For mere avancerede konstruktioner vil der være mulighed for at detektere en begyndende skade og herefter vurdere hvorvidt den er kritisk for konstruktionen. Det skal i alle tilfælde vurderes, om det er rationelt at udføre reparationen eller om produktet blot skal kasseres.

En reparation kan udføres ved anvendelse af forskellige metoder. Hvilken der er mest attraktiv hænger nøje sammen med den aktuelle applikation. For at en samling kan repareres med succes skal alle trin under valg af lim, overfladebehandling, afrensning osv. gentages eller udføres på anden vis, således at den ønskede kvalitet af samlingen reetableres.

Valg af samlingsgeometri.

I enkelte tilfælde kan det være besværligt eller umuligt at genskabe den oprindelige samlingsgeometri. Her kan ofte med fordel anvendes overlaminering af samlingen i stedet for at genetablere den oprindelige samling.

Overfladebehandling.

Det er meget vigtigt at sikre den korrekte overfladebehandling under reparationsforhold. Er der f.eks. anvendt overfladekonverteringsmetoder (som f.eks. anodisering eller lignende), er det i praksis umuligt at genskabe dette lokalt. Her vil anvendelse af primere kunne løse dette problem.

Valg af lim

For mange limtyper er udhærdning ved høj temperatur særdeles attraktiv, da det mindsker hærdetid samt øger styrken og vedhæftningsevnen. Der findes en række gode 1-komponent limtyper som kræver høj hærdetemperatur (160-180°C) for at blive aktiveret. Ved reparation er det svært at genskabe denne høje temperatur under kontrollerede forhold. Endvidere skal sikres, at de omkringliggende elementer kan tåle den høje temperatur. For malede emner vil dette uundgåeligt give anledning til problemer. Det kan derfor anbefales at anvende en anden og mere tolerant lim til eventuel senere reparation.

Faglært personale til reparation er vigtigt, da det sjældent kan foregå under velkontrollerede forhold. Reparationen vil ofte ikke kunne udføres hos producenten, hvorfor servicefolk skal særligt uddannes. Her skal specielt lægges vægt på gode og enkle retningslinier for proceduren. Her kan f.eks. nævnes bilindustrien, i hvilken limteknologien er i stærk vækst, som et godt eksempel.

4.8 GODKENDELSE

Med udgangspunkt i den nye EuroCode 9 kan opstilles en række krav, som en limsamling kan designes samt produceres efter. Normen tager højde for den manglende erfaring med samlingsmetoden, samt risikoen for produktionsafvigelser mm., ved at introducere store partialkoefficienter. Sammenlignes limning med svejsning haves ikke tilsvarende detaljerede procedurebeskrivelser for processen samt inspektion. På grund af dette er det svært at opstille entydige krav med henblik på godkendelsesprocedurer. For at råde bod på dette er f.eks. Det Norske Veritas løbende med i projekter som omhandler limning. Senest er gennemført et projekt med navnet Aluminium in Ships [16], hvor bl.a. NDI af skibsdele er undersøgt. I Danmark har Vindmøllebranchen allerede har taget de første skridt med introduktion af NDI af de limede samlinger i vingerne.

4.8.1 KRAV TIL CONTAINERE TIL SØTRANSPORT

Udvikling af containere til søtransport er omfattet af en række krav, som er formuleret i et antal ISO Standarder, som konstruktionerne skal kunne leve op til. Kravene er minimumskrav, som ofte bliver suppleret af yderligere kundekrav. For at en container kan blive godkendt til søtransport skal den kunne bestå en fuldskala mekanisk prøvning (jf. ISO 1496-2 Thermal Containers - Specification and testing). Til dette formål har Mærsk Container Industri A/S en 40 fods mekanisk prøvestand, som kan påføre en container de påkrævende belastninger. I standarderne er ikke direkte krav til konstruktionen skal sammenføjes vha. svejsning, hvorfor der i princippet er metode valgfrihed hos producenten. Imidlertid er det ofte i forbindelse med dette områder kunderne supplerer med kvalitetskrav til svejsningerne.

Nyudvikling af containere hos Mærsk Container Industri A/S kan derfor uden problemer indbefatte limning.

4.8.2 KRAV TIL TANKBILER

Transport af olie og benzin er omfattet af Trafikministeriets bekendtgørelsen omkring transport af farligt gods af 1996. Denne bekendtgørelse er den nationale implementering af den internationale ADR-Norm. Alle dele på køretøjet, som er i direkte kontakt med den brandfarlige væske, er derfor omfattet af dette regelsæt. Der gælder således for tank, rør og lignende at de skal være sammenføjet vha. svejsning, hvilket er et ufravigeligt godkendelseskrav. Køretøjet, som er godkendt lokalt efter den nationale bekendtgørelse, kan frit køre internationalt da bekendtgørelsen bygger på den internationalt gældende ADR-norm. Dette giver en række fordele for hele opbyggerbranchen, men bevirker samtidigt at reglerne ikke umiddelbart kan ændres da de p.t. gælder for 46 lande. Derfor er limning af dele til tankbiler, der er omfattet af bekendtgørelsen, ikke umiddelbart muligt.

De øvrige dele på en tankbil som f.eks. domekarm, skabe, slangehylder osv. er ikke direkte omfattet af bekendtgørelsen og kan derfor monteres eller sammenføjes med en metode efter eget ønske. Færdselsstyrelsens generelle krav til syn og produktansvar skal imidlertid altid overholdes.

4.9 PRAKTISKE MODELFORSG

For at vise nogle anvendelser af limteknologien gennemgås i de følgende afsnit nogle praktiske modelforsøg udført af hhv. Mærsk Container Industri A/S i Tinglev og HMK Bilcon A/S i Aalborg. Først beskrives begge virksomheder kort.

4.9.1 BESKRIVELSE AF CASE VIRKSOMHEDERNE

Mærsk Container Industri A/S Tinglev



Figur 4.26 Mærsk Container Industri AS, verden største producent af kølecontainere.

Mærsk Container Industri A/S er verdens største producent af kølecontainere, med en samlet produktion i år 2000 på ca. 20.000 stk. svarende til et forbrug på ca. 9.900 tons aluminium fra Tinglev fabrikken. Mærsk Container Industri AS (MCI) er dermed den største enkeltforbruger af aluminium i Danmark.

En kølecontainer er opbygget som en sandwich-konstruktion, der udvendigt består af en stålskal og indvendigt er opbygget i hhv. aluminiumprofiler og aluminiumsplademateriale i forskellige dimensioner. For at minimere kulde/varmetabet er der imellem yder- og inderskallen foretaget en opskumning med polymert skum. I hver ende af containeren er monteret en ramme, hvorpå der monteres hhv. døre og en køleenhed (køleunit).

Når containeren er i drift sørger køleuniten for at holde den specificerede temperatur.

Som et fortsat led i udviklingen af produktionen af kølecontainere foregår der en konstant søgen efter muligheder, som kan medvirke til at optimere konstruktionen af containeren. Traditionelle

sammenføjningsmetoder har alle nogle velkendte fordele og ulemper og påfører naturligt nok virksomheden nogle produktionsomkostninger. Klæbeteknikker kan give nogle nye og interessante muligheder.

Hos MCI har der i forbindelse med SASAK projektet været gennemført en undersøgelse af hvilke limtyper og limteknologier der kunne finde anvendelse ved to specifikke samlinger. Målet har været at finde frem til muligheder indenfor klæbeteknologi, der ville være velegnet til sammenføjnning af forskellige konstruktionsdetaljer på kølecontaineren. Der er i forbindelse med SASAK projektet etableret to demonstrationsprojekter:

- Limning af bagbeklædning til køleunit.
- Limning af indvendig header til tag.

Disse projekter skulle medvirke til at afdække de muligheder en eventuel indførsel af klæbeteknologi kunne medføre.

HMK Bilcon A/S

HMK Bilcon A/S har gennem mere end 45 år har specialiseret sig i udvikling og produktion af tankvogne til transport af olie, benzin, gas og CO₂. De første konstruktioner i aluminium blev udviklet i 1965 og siden da har letvægtstankbilerne domineret markedet. HMK Bilcon A/S har ca. 100 ansatte og producerer til hele Norden fra fabrikken i Aalborg.



Figur 4.27 Billede af 4 akslet forvogn (TV) og 3 akslet sættevogn (TH).

HMK Bilcon A/S tilbyder desuden højt kvalificeret aluminiumsunderleverandørarbejde. Opgaverne svinger i størrelse samt kompleksitet, men fokuserer som oftest på afgørende kvaliteter som f.eks. høj finish. Produktion af tankbiler er forbundet med de strengeste krav til høj finish af svejsning samt pladeforarbejdning. Det har igennem mange år har været medvirkende til opbygning af kernekompetencer indenfor både aluminiumsforarbejdning samt udvikling af tankbiler. Den største opgave, som HMK Bilcon A/S har løst, var produktionen af pontonerne til katamaranfærgerne som besejler ruten imellem Ebeltoft og Odden.



Figur 4.28 Billede af fra HMK Bilcons specialværksted

HMK Bilcon A/S producer tankbiler ud fra krav som specificeres i samarbejde med kunden. Herved opnås i reglen et forskelligt produkt for hver eneste ordre. Det betyder, at udformning af skabe og rørføringer fra tankrum samt forskellige afdækninger osv. varierer i placering, antal samt udformning. Den primære sammenføjningsmetode hos HMK Bilcon A/S er svejsning. I mange områder giver svejseprocessen, på trods af den store erfaring inden for området, stadigvæk anledning til problemer med f.eks. termisk introducerede kastninger. Der anvendes derfor i nogle områder forholdsvis tykke plader, som giver en uønsket høj vægt af tankbilen. Det forventes, at en vægtbesparelse på 1 kg giver mulighed for at transportere 15000 l ekstra brændstof i en tankbils levetid. Derfor er reduktion af vægt en vigtig parameter under den stadige udvikling af nye og mere avancerede tankbiler.

4.9.2 CASE #1 – LIMNING AF BAGBEKLÆDNING TIL KØLEUNIT

Indledning

En kølecontainer leveres normalt med en køleunit til at holde det fragtede gods ved en specificeret temperatur. Denne køleunit monteres i containeren. Køleunittens komponenter er monteret på en skal, fremstillet af aluminium. Køleunitten er på den indvendige side forsynet med isolering for at mindske varmegennemstrømningen under drift.

Aluminiumskallen består bl.a. af støbte komponenter, ekstruderede profiler samt valsede plader, som p.t. svejses sammen. Denne case omhandler substitution af en svejsning, der forbinder aluminiumskallens bagplade til den resterende del af konstruktionen. Der henvises i øvrigt til teknisk rapport SASAK-RAP-LI-AKS-MCI-0011.

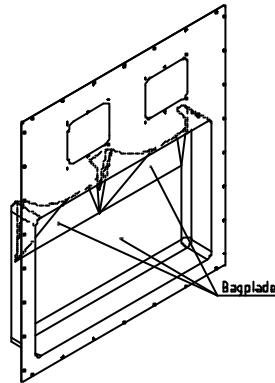
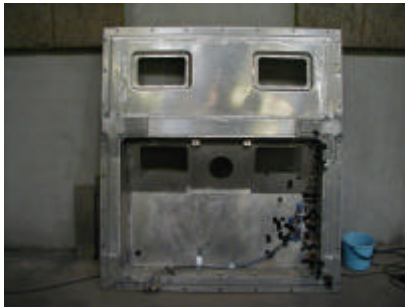
Ideen med at lime bagpladen kan give følgende fordele:

- Materialet kan både være aluminium eller andre alternativer.
- Svejsning sætter krav til minimumstykkelser på aluminium, mens limede samlinger kan medføre muligheder i form af mindre materialeforbrug, vægtbesparelse m.m.
- Spidsbelastninger som forefindes i svejsningerne kan reduceres kraftigt.

- Mulighed for at montere bagplade efter coating af køleunitten

Der er mange krav som pladen skal opfylde:

- Pladen skal kunne overfladebehandles eller indfarves.
- Slagsejheden skal være god.
- Vedhæftning til polyuretan skum skal være god.
- Vedhæftning til lim skal være god.
- Styrken skal være så stor, at blivende deformationer i bagpladen undgås.



Figur 4.29 Billede af aluminiumskallen i køleunitten (TV) og Principskitse af bagplade til køleunit (TH)



Figur 4.30 Stakkede Kølecontainere (TV) og Køleagregat monteret i Kølecontainer (TH).

Projektet

For at finde frem til en optimal løsning, blev der fremstillet 4 forskellige kombinationer af materialer som vist nedenstående:

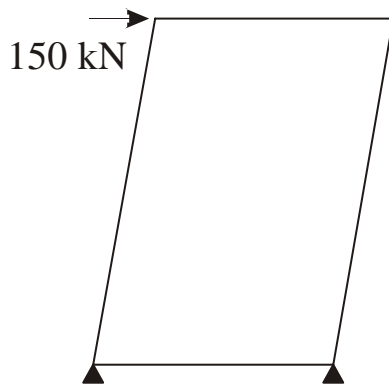
- Valset aluminiumplade med godstykkelse 4 mm limet med én - komponent epoxy lim
- Valset aluminiumplade med godstykkelse 2 mm limet med én - komponent epoxy lim
- Valset aluminiumplade med godstykkelse 4 mm limet med 2 komponent polyurethanlim.

- Valset aluminiumplade med godstykkelse 2 mm limet med 2 komponent polyurethanlim.

Alle samlinger blev fremstillet som laskesamlinger med et overlap på 15 mm. Selve fremstillingen foregik ved hjælp af følgende procedure:

- Aluminium slibes ved limflader
- Affedtning
- Priming
- Limpåføring
- Samling
- Fiksering
- Hærdning

Efter fremstilling af testemner blev disse testet i testriggeren med "Racking" belastning, hvorved opstillingen påvirkes som på Figur 4.31.



Figur 4.31 Principskitse af "Racking" test (TV) og Billede af kølecontainer monteret i testrig (TH).

Ved denne test fikseres containeren i de fire underste hjørneklodser, mens to hjørneklodser i én side, hver påvirkes med 150 kN i både træk og tryk på tværs af containeren. Figur 4.31 viser hvorledes containeren er monteret i testriggeren. Da en container er designet til mange års levetid, vil den blive udsat for den førnævnte last i et stort antal lastcykler.

Konklusion

Ud fra de tests, der blev gennemført på de 4 forskellige testemner, blev det konkluderet, at en relativ fleksibel lim ikke er praktisk anvendelig, idet der er betydelige vanskeligheder med at fremstille limsamlinger med acceptable kvaliteter. Den noget stivere lim viste sig at være anvendelig til fremstilling af limsamlingen, men der optrådte dog et brud efter 75% af den maksimale last i første lastcyklus, og da konstruktionen er udmattelsespåvirket må det derfor konkluderes, at denne lim ej heller er anvendelig ud fra et styrkemæssigt synspunkt. I Tabel 4.6 er de opnåede resultater opsummeret.

Tabel 4.6 Oversigt over opnåede resultater.

	2 mm aluminiumplade	4 mm aluminiumplade
1-komponent epoxy	Procesmæssige vanskeligheder Kan ikke udhærde tilfredsstillende	Procesmæssige vanskeligheder Kan ikke udhærde tilfredsstillende
	Test ikke udført	Test ikke udført
2-komponent polyuretan	Tilfredsstillende procesparametre Kan udhærde tilfredsstillende	Tilfredsstillende procesparametre Kan udhærde tilfredsstillende
	Brud i limfuge under test ved 1. lastcyklus. Brud i aluminium efter 10 lastcykler	Brud i limfuge under test ved 1. lastcyklus

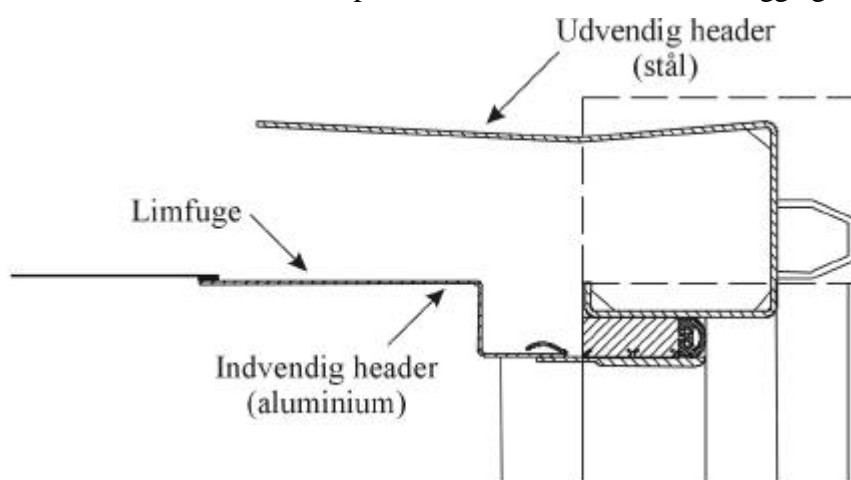
4.9.3 CASE #2 – LIMNING AF INDVENDIG HEADER TIL TAG

Det andet delprojekt, der blev igangsat, var et forsøg på at erstatte en mekanisk sammenføjningsmetode, nitning, med en sammenføjning udført som en limet samling.

Forudsætningerne for at indføre limteknologi i forbindelse med sammenføjning af header og tag var, at processen skulle kunne implementeres direkte i produktionen af kølecontainere uden nogen væsentlig indgriben i den eksisterende produktion. Der henvises til de tekniske rapporter SASAK-RAP-LI-AKS-MCI-0012 og SASAK-RAP-LI-AKS-MCI-0014 for detaljer, men i det følgende gives en kort redegørelse for resultaterne af case #2.

Konstruktionen

Som før nævnt består containeren af 2 skaller én udvendig udført i stål samt én indvendig opbygget i aluminium. Indvendigt i containeren bliver sider og tag fuldsvejst i hele længden og i hhv. front og bagende findes en rammekonstruktion hvorpå der monteres døre eller et køleaggregat.



Figur 4.32 Detalje af dørramme med hhv. indvendig og udvendig header.

Projektet

Hidtil har sammenføjjningen af den indvendige header, som er produceret i 2 mm aluminiumsplade og taget udført i 0,9 mm aluminiumsplade, været nittet sammen. Denne proces er meget tidskrævende og omkostningstung.

For at kunne finde frem til en hensigtsmæssig løsning var det nødvendigt at specificere de påvirkninger containeren udsættes for igennem sin levetid. Blandt de opstillede krav skal nævnes:

- Tæthed
- Kemikalieresistens
- Belastning
- Belastning i ekstreme temperaturer samt
- Produktionsvenlighed

Da containeren markedsføres som en “tæt” container, er det nødvendigt at sikre, at en evt. fremtidig sammenføjjningsmetode ville kunne tilfredsstillere dette krav. Efter hver last gøres containeren ren. Disse metoder til afrensning kan have forskellig karakter forskellige steder i verden, men ofte anvendes meget skrappe rengøringsmidler, og det er derfor vigtigt at samlingen har en vis kemikalieresistens. Som allerede nævnt skyldes de belastninger som containeren udsættes for under drift laster fra andre containere ved skibsfragt. Denne last benævnes “Racking” (se Figur 4.31) og tests med denne last er specificeret i ISO 1496-2. Et andet måske i denne sammenhæng mere interessant område er belastning i ekstreme temperaturområder. En normal kølecontainer nedkøles til -30°C , og denne temperatur holdes konstant ved hjælp af køleaggregatet, der er placeret i containerens front. Denne nedkøling vil maksimalt ske 80 gange i løbet af containerens levetid.

Bestemmelse af spændinger

For at finde frem til spændingsfordelingen, blev der foretaget en strain-gauge måling på 0,9 mm aluminiumpladen. Desuden blev der foretaget en finite element analyse af en 3D model. Analysen blev udført i to trin. Trin 1 omfattende en termisk analyse, der bestemmer temperaturfordelingen i sandwichpanelerne ved en indvendig temperatur på -30°C og en udvendig temperatur på 20°C . Trin 2 omfattede en strukturel analyse, hvor lasterne er de i trin 1 beregnede temperaturer. Herved bestemmes spændingerne fra den termiske påvirkning i panelerne. Konklusionen på måling og analyse viste, at det ville være et fornuftigt designgrundlag at finde metoder, der vil være i stand til at overføre 90 MPa i 0,9 mm aluminiumplade. Dette medfører, at der skal overføres ca. 80 N/mm i bredden af samlingen. Der kan dog drages fordel af, at eventuelle lokale bøjningsfænomener i samlingen elimineres som følge af vedhæftning til polyuretanskummet og svejsning, hvilket vil reducere kravene væsentligt.

Valg af limtype

Af andre væsentlige stillede krav, skal nævnes produktionsvenlighed samt de forudsætninger der var givet, hvis man skulle have succes med at lime headeren til taget. De stive lime blev hurtigt udelukket, da taget, som var fastholdt til headeren skulle have mulighed for at “flyde”. De elastiske lime har en række kvaliteter, men af hensyn til produktionen af containeren, ville det være svært at

anvende en flydende lim idet brug af en sådan stiller en del krav til proces og produktion i form af renhed, åbningstider, hærdetider og internt arbejdsmiljø Valget faldt derfor på anvendelse af en dobbeltklæbende VHB tape (Very High Bonding tape).

Tests

Der blev på baggrund af evaluering af den tekniske rapport etableret en række forsøg, der skulle medvirke til at få konstateret, hvorvidt valget af VHB tape var det rigtige.

Der blev derfor iværksat et forsøg med følgende arbejdsgange:

- Headeren slibes ved limflader.
- Affedtning med Isopropylalkohol.
- Påføring af 50 mm bred tape på headeren.
- Afslibning og affedtning af tag og påføring af protectortape (beskyttelsesfilm).
- Samling.
- Fiksering.
- Hærdning.

Headeren og taget i containeren blev herefter limet sammen og gennemgik en termisk test ved at nedkøle containeren til -20°C og en udvendig temperatur på $+65^{\circ}\text{C}$. Denne test viste ikke nogle målbare deformationer.

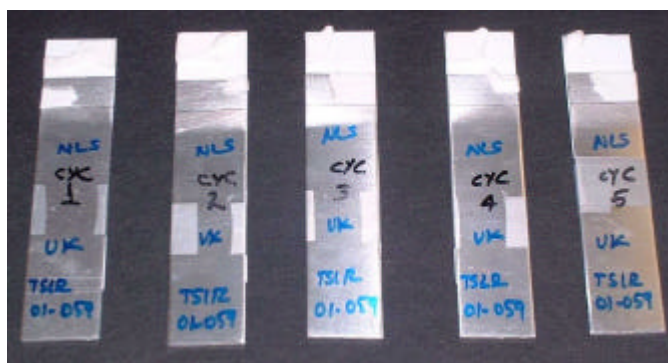
Konstruktionen blev yderligere testet for langtidsholdbarhed, gennemført ved en test i henhold til BS EN 29142 (1993) D-heat, cold and humidity cycle, som omfatter:

- 15 timers opbevaring ved $+40^{\circ}\text{C}$ og 98% RH,
- 2 timer ved -40°C , herefter
- 4 timer ved $+70^{\circ}\text{C}$ og 50%RH, derefter afsluttes med en
- trækprøve ved $+20^{\circ}\text{C}$

For en gennemførelse af testen fremstilledes 2×10 emner, der alle var mekanisk overfladebehandlet og affedtet. Til reference medsendtes andre 5 emner, som 3M's laboratorium i England selv skulle forbehandle og teste efter samme metode.

Der blev foretaget en trækprøve iht. ASTM D1002-64 på de første 5 emner ved RT hvilket viste en gennemsnitlig forskydningsstyrke på 0,8659 MPa.

De efterfølgende 5 testemner samt emnerne 3M selv skulle lime blev herefter udsat for den førnævnte test iht. BS EN 29142. Emnerne viste en reduktion af styrken på ca. 23 %. Emner der var limet på laboratoriet ved 3M i Bracknell viste dog en lidt højere reduktion (26%) hvilket tilskrives udførelsen af overfladebehandlingen. På Figur 4.33 er testemnerne vist efter trækprøvning.



Figur 4.33 Billede af testemner til brug i trækprøvning i henhold til BS EN 29142.

Resultatet af testen udført i England er sammenfattet i Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Resultat af trækprøvning udført i England (se i øvrigt Figur 4.33).

Testemne	Dynamisk forskydningsstyrke (Peak) [MPa]	Fejltype
1	0,6755	50% på malet side, 50% på Al. side
2	0,6508	40% på malet side, 60% på Al Side
3	0,6672	60% på malet side, 40% på Al Side
4	0,5951	50% på malet side, 50% på Al side
5	0,6145	50% på malet side, 50% på Al side
Middel	0,6406	

Til sammenligning vises i Tabel 4.8 resultaterne fra den samme test med de dansk fremstillede emner.

Tabel 4.8 Resultat af trækprøvning udført i Danmark.

Testemne	Dynamisk forskydningsstyrke (Peak) [MPa]	Fejltype
1	0,7034	100% på malet side
2	0,5994	100% på malet side
3	0,6842	100% på malet side
4	0,6585	50% på malet side, 50% på Al side
5	0,6483	100% på malet side
Middel	0,6588	

Konklusion

Tapen udviste så tilpas interessante resultater, at der var basis for at videreudvikle ideen og dermed forsøge at implementere anvendelsen af dobbeltklæbende VHB tape i produktionen af 40 fods kølecontainere.

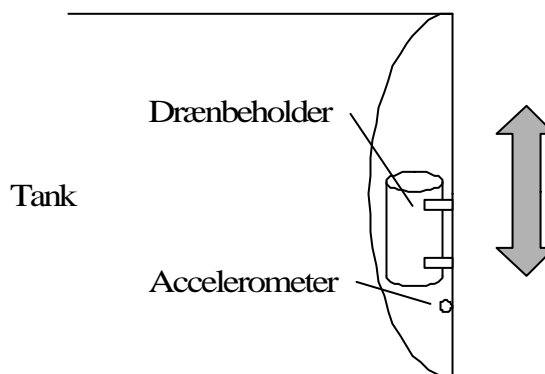
4.9.4 CASE #3 – FASTGØRELSE AF DRÆNTANK VED LIMNING

Følgende er udarbejdet af HMK Bilcon A/S som dokumentation for det gennemførte analyse- og designarbejde i forbindelse med udviklingen af prototyper til dræntanken i slangetromlerummet til en tankbil. For yderligere dokumentation se SASAK-RAP-LI-AKS-BIL-0009 & SASAK-RAP-LI-AKS-BIL-0010.



Figur 4.34 Billede af dræntank i slangetromlerum.

Formålet er at udvikle et koncept baseret på limning med henblik på at udnytte de attraktive muligheder for elimination af kastninger pga. tilført varme fra svejsning. På baggrund af tidligere erfaringer med limning, hvor et additivanlæg blev eftermonteret i slangetromlerummet, er der besluttet at foretage en forudgående grundig analyse af belastningssituationen. Den dominerende belastningsretning er lodret, og derfor koncentrerer målearbejdet omkring udelukkende omkring dette.



Figur 4.35 Illustration af accelerometer påmonteret endebund.

Målingerne er foretaget på en tankbil, venligst stillet til rådighed af HydroTexaco A/S, ved hjælp af et accelerometer monteret i slangetromlerummet.

Design af prototyper

Ud fra de indsamlede måledata er foretaget en detaljeret analyse med henblik på at bestemme den nødvendige mængde lim. Bestemmelsen af levetiden for konstruktionen tager udgangspunkt i at Palmgreen-Miners delskadehypotese [13] er gældende for denne type konstruktion, hvilket er en antagelse forbundet med en vis usikkerhed. Denne antagelse er led i forsøgsarbejdet og evalueres vha. bl.a. prototypeforsøg.



Figur 4.36 Illustration af prototype til dræntankforsøg.

Ovenstående prototypemodell er bevidst udformet således at den skaber en simpel belastningssituation der kan beskrives på lukket form i beregningerne. Efterfølgende kan udvikles et produktionsegnet design ud fra erfaringer fra prototypeforsøgene.

Delene til prototyperne er fremstillet af HMK Bilcon A/S og herefter samlet vha. SikaFlex 254. Limning af prototyperne er foretaget efter Sika's forskrifter suppleret med erfaring fra tilsvarende arbejde. Der er indsat små plastik stykker i midten af limfugerne for at sikre en ensartet fugetykkelse på 0,8 mm. For at sikre det ønskede limfuge areal er det overskydende lim fjernet langs kanten af fødderne.

Mekanisk afprøvning af prototyper

Der er fremstillet en serie prøveemner med henblik på mekanisk afprøvning i en prøvemaskine som er specielt fremstillet på lejligheden. Prøvemaskinen er opbygget omkring to ekscenterhjul som påtrykker et rystebord en veldefineret lodret bevægelse.



Figur 4.37 Mekanisk prøvning af prototype til dræntank.

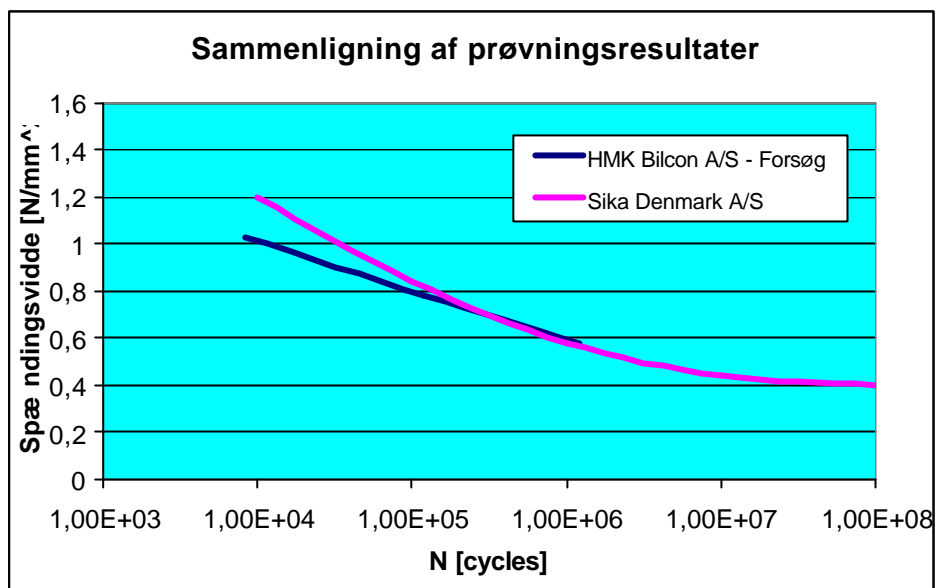
Tabel 4.9 Belastningsniveau.

Serie nr.	Spændingsvidde [MPa]	Accelerationsvidde [m/s ²]	Amplitude [mm]	N [cycles]
1	0,58	21,60	45,7	2,0·10 ⁶
2	0,78	28,67	60,6	2,0·10 ⁵
3	1,03	38,14	80,7	2,0·10 ⁴

På baggrund af den i forbindelse med dimensioneringen anvendte SN-kurve bestemmes tre belastningsniveauer med dertil førende forventede levetider. De angivne accelerationer resulterer i de i Tabel 4.9 viste spændingsvidder for en egenvægt på 18 kg.

Prøvningsresultater

Det har vist sig ikke at være muligt at gennemføre hele det planlagte forsøgsprogram, idet en række mekaniske nedbrud af prøvemaskine medførte at 4 ud af de 10 prøveemner blev påført forkerte belastninger. Resultaterne fra disse er derfor ikke medtaget. På baggrund af forsøgsserien kan SN-kurven på Figur 4.38 optegnes:

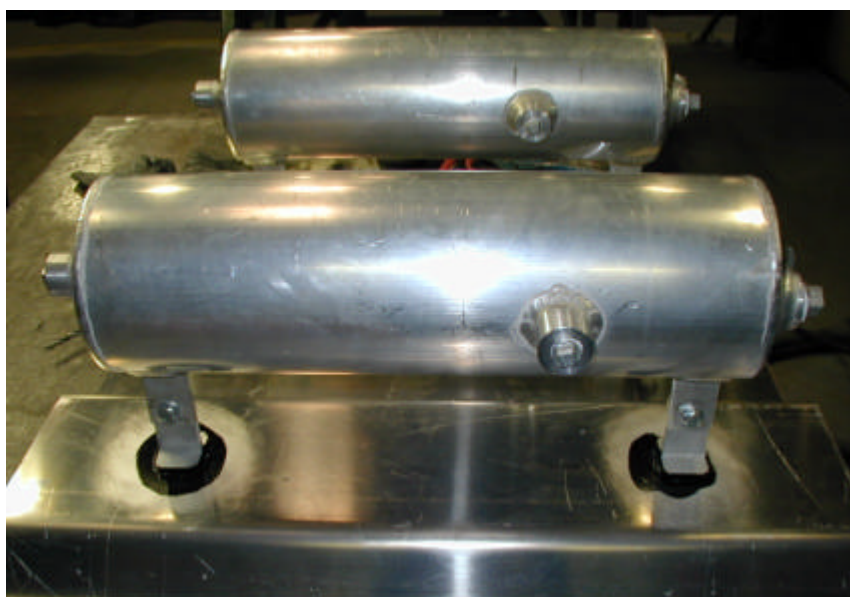


Figur 4.38 Sammenligning af den estimerede SN-kurver med Sika's officielle SN-kurve.

Ovenstående figur viser god overensstemmelse imellem de to kurver. Det bemærkes i øvrigt, at alle prøveemnerne har vist kohæsivt brud i limsamlingerne, og at der er opnået en rimelig god overensstemmelse med Sikas reference SN-kurve.

Produktionsdesign

På baggrund af det gennemførte forsøgsarbejde er sandsynliggjort, at det er muligt at konstruere elastiske limsamlinger på baggrund af von Mises' referencespænding samt en SN-kurve. For at kunne modstå korrosive angreb på limfugen igennem dens levetid anvendes i produktionsdesignet et større areal end det i princippet er nødvendigt. Dette sikrer en god tolerance overfor små fejl i limfugen samt korrosive angreb. Imidlertid er det kun mange års påvirkning som kan eftervise om limfugen rent faktisk holder i længden.

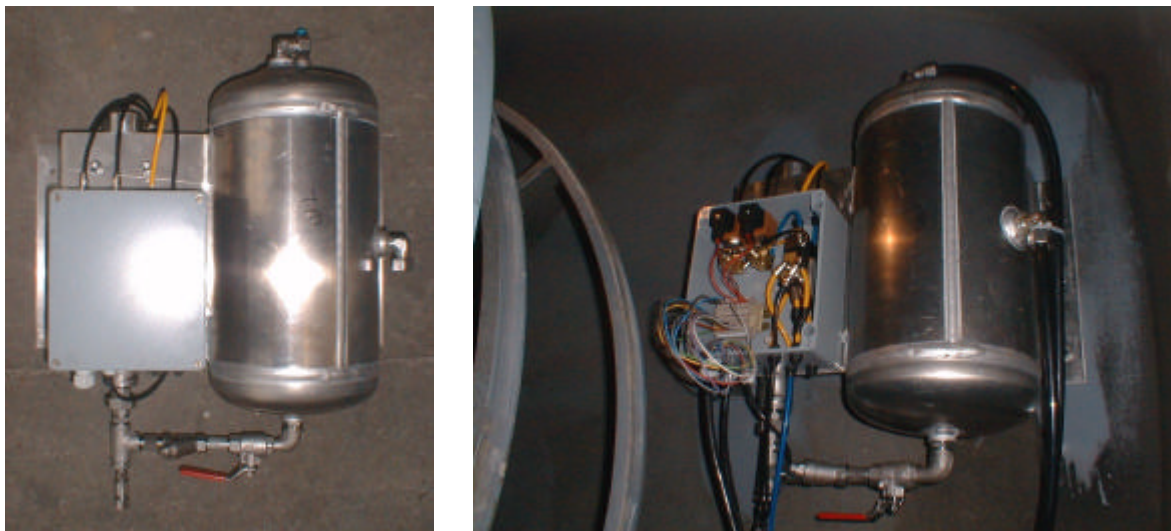


Figur 4.39 Illustration af produktionsdesign og montagefod.

Det har vist sig at den nuværende fod, som svejses på, har en udstrækning som gør den attraktiv til formålet. Derfor anvendes den nuværende fod i uændret form. Herved er det kun montagemetoden som ændres. I produktionsdesignet anvendes en fugetykkelse på 1 mm samt en tilsvarende limtype Sikaflex 265. Fordelen ved denne limtype er, at den hærdes hurtigere, og at der haves lang erfaring fra bl.a. togbranchen med lignede montage arbejde.

4.9.5 CASE #4 – FASTGØRELSE AF ADDITIVANLÆG VED LIMNING

I forbindelse med eftermontering af et anlæg til kontinuerlig iblanding af additiv til brændstof, har HMK Bilcon A/S gennemført et projekt med fokus på limningsteknologien. Anlægget består af en mindre enhed bestående af additivtank, pumpe samt styringsboks. Anlægget er på forhånd samlet og skal derfor blot monteres og tilsluttes el, luft samt brændstofudleveringsrør på det aktuelle køretøj (for yderligere dokumentation henvises til teknisk rapport SASAK-RAP-LI-AKS-BIL-0004). Påmontering af anlæggene er planlagt til at foregå i HMK Bilcon's egne serviceværksteder. Da der er tale om eftermontering, er det afgørende, at HMK Bilcon A/S ikke beslaglægger køretøjerne i længere tid end højst nødvendigt. I løbet af en arbejdsdag skal et køretøj være klar til at indgå i den daglige udlevering af brændstof igen.



Figur 4.40 Billede af additivenhed (TV) og Additivanlæg under montering (TH).

På baggrund af dette kan opstilles en række krav til montageprocessen:

- Procestid skal være kort.
- Minimum efterbehandling.
- Minimum rengøring af slangetromlerum.
- Kolde overflader skal kunne anvendes.
- Valg af montageteknik.

På baggrund af ovenstående beskrives i det følgende valg af limtype samt leverandør.

Valg af limtype

På baggrund af bl.a. erfaringer fra tidligere er vurderet, at et elastisk limkoncept vil være det rigtige til denne opgave. Fordelen ved at vælge dette frem for et stivere og stærkere koncept ligger hovedsageligt i evnen til at reducere de ellers så kritiske forskydnings- samt peelspændingskoncentrationer ved enderne. Evnen til at fordele belastningen på hele limens flade er derfor relativt bedre på grund af den meget store stivhedsforskel mellem lim og emnerne, men til gengæld kræves en relativt større fugetykkelse samt areal end for en stiv og stærk lim. Det elastiske limningskoncept giver større frihed i form af større tolerance overfor variationer af fugegeometrien. For at udpege egnede produkter tages kontakt til Ciba Speciality Chemicals A/S og Sika Denmark A/S, da der forudgående har været god kontakt til disse to leverandører. I samråd med disse er ovenstående krav og ønsker diskuteret.

Følgende to limtyper er umiddelbart interessante.



Figur 4.41 Billede af de to limprodukter Sikaflex-252 og Araldite 2017.

Sikaflex 252 er en 1-komponent polyuretanlim, som hærdet vha. absorption af luftens fugtighed. Imidlertid er hærdeprocessen begrænset af fugtens diffusionshastighed igennem limfugen, hvilket typisk giver en hærdehastighed på 2–4 mm pr. døgn. I praksis er derfor tale om en tørretid på et par uger. Imidlertid haves god umiddelbar styrke pga. limens tixotrope leveringstilstand.

Ciba Araldite® 2017 er en hurtigtørrende 2-komponent epoxylim. Denne er fri for ovennævnte problemer og kan give en særdeles kort hærdeperiode, hvis yderligere varme tilføres under udhærdning. På baggrund af ovennævnte forsøg udelukkes SikaFlex limen til fordel for Araldite® limen, da denne i løbet af kort tid selv kan bære hele belastningen.

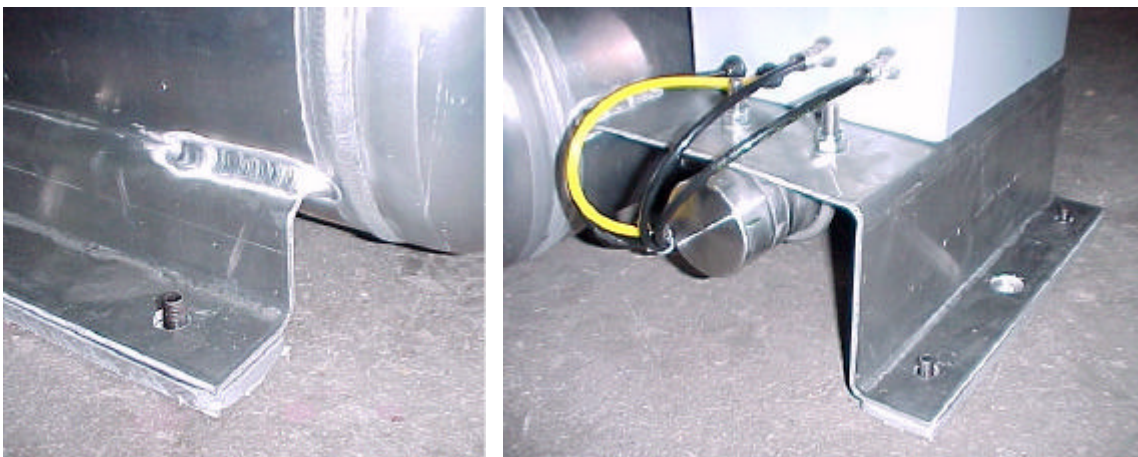
Forbehandling

På malede overflader søges den oprindelige overfladebehandling i form af grundmaling samt vådlak udnyttet. Det forudsætter dog god vedhæftning for malingsystemet. De malede overflader afrenses samt slibes let i overfladen af malingen. Den anden part, som fremstår som rå aluminium, overfladebehandles ikke ud fra en vurdering af sikkerhedsfaktoren anvendt under dimensioneringen samt en forventet levetid på 5 år. Det meget store areal i forhold til belastningen kompenserer i nogen grad for manglende overfladebehandling. Det understreges dog, at der som udgangspunkt altid bør anvendes priming eller anden korrosionsbeskyttelse af overfladen (f.eks. anodisering) ved limning på aluminium.



Figur 4.42 Billede af Rocol Industrial Cleaner (TV) og Billede af fugepistol samt blandespiraler (TH).

Der er valgt at anvende et rensmiddel, som allerede anvendes hos HMK Bilcon A/S ved navn Rocol Industrial Cleaner. Produktet er MAL-kodet 3-1 og stiller derfor større krav til udsugning end den valgte limtype. Araldite[®] limen indkøbes i 200 ml dobbeltrørs fugepatroner med dertil hørende blandespiral. Fordelen ved denne indpakningstype er, at kun den ønskede mængde lim blandes ad gangen foruden et marginalt spild i blandespiralen. Herved sikres mulighed for god kontrol over åbentiden for limen samt at der altid anvendes det korrekte blandingsforhold. Begge dele er særdeles vigtige led i kvalitetsprocedurerne for processen samt arbejdsmiljømæssigt attraktivt.



Figur 4.43 Billede af flige påmonteret additivanlægget samt montageskinnerne med gevindtappene.

Som tidligere beskrevet anvendes dobbeltklæbende tape til fiksering under udhærdning. Denne metode er tidligere udviklet samt testet i anden sammenhæng med stor succes. Den valgte viskose epoxy lim i fugepatronpakningen giver mulighed for indsprøjtning under tryk vha. fugepistolen. Denne metode er yderst velegnet og bør altid anvendes, hvis det er muligt. For en række limtyper, bl.a. den her anvendte, kan metoden suppleres med opvarmning for at øge viskositeten (visse limtyper er fortykket med fyldstoffer og derfor er opvarmning ikke virksom på viskositeten). For at afprøve metoden er udført en række simple forsøg med stor succes.

Implementering i produktion

I samarbejde med sikkerhedsorganisationen på HMK Bilcon A/S blev der udfra et oplæg fra teknisk afdeling aftalt en procedure for opstart i værkstedet samt arbejdsmiljø. For at projektet overhovedet kunne gå i gang blev 12 personer fra de involverede områder i fabrikken samt serviceværkstederne sendt på Epoxykursus på AMU Center Aalborg. Uddannelsen er et specifikt lovkrav for at man må omgås et produkt af denne type. I samarbejde med leverandøren Ciba Speciality Chemicals A/S blev den fornødne tekniske dokumentation tilvejebragt, således at sikkerhedsorganisationen kunne udarbejde en arbejdspladsbrugsanvisning. Et velegnet område, hvor håndtering af produkterne på fornuftig vis var mulig i forhold til Epoxybekendtgørelsen, blev afsat i samarbejde med sikkerhedsorganisationen.

Erfaringsopsamling

Under produktion af de første anlæg opstod problemer, som resulterede i at flere anlæg faldt ned nogle dage efter montering. Derfor blev det besluttet at stoppe produktion vha. limning. Der var flere ting som gik skævt i forbindelse med projektet, men det er tilsvarende vigtigt, at flere anlæg blev siddende og stadig gør det.

Den væsentligste grund til at additivanlæggene faldt ned var problemer med vedhæftningen af selve malingen. Imidlertid er der noteret problemer med selve vedhæftning af limen på aluminiumet mellem tape strimlerne. Der er tidligere udført forsøg med tilsvarende samlingsgeometri, som tydeligt viste bedre binding end der her er observeret. Det vurderes, at der er foretaget utilstrækkelig rengøring af bagsiden af montageskinen. Den primære årsag til dette er, at området mellem tape strimlerne er svært at rengøre tilstrækkeligt, da slibning af overfladen ikke umiddelbart er muligt.

4.10 NØGLETAL FRA PRODUKTION/FORSØG

4.10.1 INDLEDNING

Limning er en alsidig teknologi som ofte kan give muligheder som ikke kan opnås vha. f.eks. svejsning. Teknologien lader sig derfor heller ikke umiddelbart generalisere, da sammenføjning vha. limning kan udføres på mange forskellige måder. Ved design af en limsamling skal tages hensyn til en række ting som beskrevet i afsnit 4.1, heriblandt både virksomhedens praktiske muligheder samt selve produktets økonomi. Derfor vil alle produktionsmæssige tal kun være repræsentative for den aktuelle virksomhed som de stammer fra. I det følgende præsenteres eksempler på tal for manuel montage arbejde vha. limning samt økonomiske rationale bag anvendelse af limning.

4.10.2 EKSEMPLER PÅ PRODUKTIONSTIDER FOR LIMNING

Med udgangspunkt i Case #3 (afsnit 4.9.4) er følgende produktionstider bestemt.

Tabel 4.10 Produktionstider for limning af dræntank.

Funktion	Beskrivelse	Tid [sek]
Afrensning	Udføres med SikaCleaner	30
Slibning	Foretaget med vinkelsliber	15
Renblæsning	Oliefri trykluft	5
Påføring af primer	Begge parter (dvs. 3 dele)	60
Hærdning af primer	Højst 45 min., dog mindst 15 min., efter påføring af primer skal limen påføres.	900
Påføring af lim samt fiksering	Sikaflex 265 på 2 montagefodder	60
Hærdning af lim	Ca. 3-4 mm i døgnet	Ca. 1 uge

Monteres dræntanken ved hjælp af svejsning tager den samlede opgave kun få minutter, hvorfor limning i dette tilfælde er markant dyrere. Imidlertid giver limteknologien både fleksibilitet i form af mulighed for montering af ekstra beslag efter maling og bedre finish. Teknologien er valgt i dette tilfælde da svejsning ikke giver den samme høje finish på baggrund af kastninger osv.

4.10.3 VEJLEDNING I VALG AF PROCES (TEKNISK/ØKONOMISK FORNUFTIGT)

I forbindelse med forsøget med eftermontering af et additivanlæg (case #4, afsnit 4.9.5) ved hjælp af limning er gennemført følgende økonomiske vurdering. Montage af anlægget kan i princippet tænkes udført på adskillige forskellige måder, men reelt ved få forskellige metoder. Nogle af anlæggene kan kun monteres på mellembunden ind til det væskefyldte rum, hvor opsætning vha. gennemgående forbindelser er udelukket. Derfor refterer kun svejsning og limning som mulige teknologier hos HMK Bilcon A/S. Begge metoder har fordele samt ulemper, hvorfor bl.a. en simpel kost-analyse vil ligge til grund for det endelige valg. I praksis handler det om at vælge den mest økonomisk fordelagtige løsning, som i den givne situation stadigvæk lever op til den ønskede kvalitet.

Tabel 4.11 Sammenligning af en række nøgletal fra produktionen.

Arbejdsproces	Limning	Svejsning på mellembund	Svejsning på endebund
Fremstilling af beholder med beslag	162,15	162,15	162,15
Rengøring af monteringssted	162,15	81,07	81,07
Rengøring af kontaktflader	108,10	81,07	81,07
Fiksering	75,00	25,00	25,00
Montering	50,00	54,05	54,05
Efterbehandling	0,00	81,07	2575,00
Prøvning af tank	0,00	324,29	0,00
Specielle materialer	125,00	0,00	0,00
Samlet ^{*)}	682,39 kr	808,70 kr	2978,34 kr

^{*)} Den samlede udgift er baseret på en værkstedstimepris på 300 kr/time og er inklusive tilsatsmaterialer samt øvrige råmaterialer.

Ovenstående viser en økonomisk gevinst ved at vælge limning. Dette skyldes, at fastgørelse vha. f.eks. svejsning kræver total rengøring for brændbare stoffer forud for svejsning på mellembunden. Efterfølgende bør tanken tryk- eller penetratprøves for at kontrollere, at tankanlægget lever op til de krav, som det oprindeligt er godkendt under. Svejses på endebunden i stedet, kan kontrolprøvningen undgås, men i stedet brændes malingen af på bagsiden af køretøjet. Her kræves en omlakering af bagsiden, da der ellers ikke kan opnås en tilstrækkelig god finish. Limteknologien giver her både øget fleksibilitet og en reduktion af omkostningerne i forbindelse med produktion af additivanlægget.

4.11 REFERENCER

Litteratur

- [1] **Minford, J D**, *Handbook of aluminum bonding technology and data*, Marcel Dekker, 1993.
- [2] **Hart-Smith, L. J.**, NASA CR-112236. *Adhesively Bonded single lap joints*.
- [3] **Burchardt, B. et al.**, *Elastic Bonding*, Verlag moderne Industrie, Landsberg/Lech, 1998, p. 29.
- [4] **Karlsson, H.**, *Limma med kvalitet – en handbok*, IVF-skrift 01803, (ISBN 91-89158-41-5) IVF Industriforskning och utveckling AB, Mölndal 2001, p. 114-116.
- [5] **Adams, R. D., Comyn, J. & Wake, W. C.**, *Structural Adhesive Bonding in Engineering*, Champan & Hall, 2. udgave, 1997.
- [6] **Nobel, Casco**, *Limhåndbogen*, 1992
- [7] **Dolk, Åke**, *Konstruktionslimning*, Limprojekt, Stockholm 1997.
- [8] **AMU Centrenes kursus om personlig sikkerhed ved arbejde med Isocyanater og Epoxy**, Industriens Forlag 1997.
- [9] **ASTM-D-3762**, *Standard Method of Test for Adhesive Bonded Surface Durability of Aluminum (Wedge Test)*.
- [10] **Marceau, J. A., McMillan, J. C.**, *Exploratory Development on Durability of Adhesive Bonded Joints*, AFML-TR-76-173, 1976.

- [11] **Rusborg, J.**, *Non-destructive testing of bonds between shells of glassfibre-reinforced polyester laminate and cellular PVC-core*, Centre for Polymer composites, development programme for Materials Technology, FORCE Institute. ISBN 7756-56-241-0, 1992.
- [12] **Rusborg, J.**, *Non-destructive inspection of Glassfibre-reinforced Polyester Laminates in Sandwich Structures*, Centre for Polymer Composites, development programme for Materials Technology, FORCE Institute. ISBN 87-7756-270-4, 1992.
- [13] **Fuchs, H. O. & Stephens, R. I.**, *Metal Fatigue in Engineering*, John Wiley & Sons, 1980.
- [14] **Aluminium – Bonding**, Pechiney/ Rhenalu, 1992.
- [15] **TALAT** (Training Aluminum Application Technology), European Aluminium Association, 1999.
- [16] **Weitzenböck, J. R.**, *State of the Art of Adhesive Bonding in the maritime applications*, Technical Report 97-2027, Det Norske Veritas, 1997.

Supplerende litteratur

- [17] **Aluminium – Sammenføjning**, Skanaluminium, civ.ing. Styrbjørn Backmann (Gränges Aluminium), 1978

Tekniske rapporter

SASAK-RAP-LI-AKS-FI-0001, *Introduktion til limning i aluminium*

SASAK-RAP-LI-AKS-BIL-0004, *Limning af additivanlæg*

SASAK-RAP-LI-AKS-BIL-0007, *Vurdering af beregningsmetoder til elastiske limsamlinger*

SASAK-RAP-LI-AKS-BIL-0008, *Analytisk model til analyse af stive limsamlinger*

SASAK-RAP-LI-AKS-BIL-0009, *Design af dræntank prototyper*

SASAK-RAP-LI-AKS-BIL-0010, *Prøvning af dræntank prototyper*

SASAK-RAP-LI-AKS-MCI-0011, *Limning af bagklædning til containerkøleunit*

SASAK-RAP-LI-AKS-MCI-0012, *Limning af containerheader*

SASAK-RAP-LI-AKS-BIL-0013, *Limning som sammenføjningsmetode hos HMK Bilcon A/S*

SASAK-RAP-LI-AKS-MCI-0014, *Limning af containerheader - konklusion*

5 Mekanisk sammenføring

5.1 INTRODUKTION

Mekanisk sammenføring af aluminiumkonstruktioner omfatter samlinger med bolte, skruer og nitter samt mekanisk interlocking.

Dette kapitel indeholder en gennemgang af reglerne for udformning og beregning af mekaniske samlinger med bolte og nitter på store aluminiumkonstruktioner.

Den mekaniske interlockingsmetode og anvendelse af skruer og nitter bliver beskrevet, og der vises et eksempel på praktisk anvendelse af interlocking til sammenføring af panelplader.

Der opstilles specielle krav til kvalitetsstyring i forbindelse med mekanisk sammenføring af store aluminiumkonstruktioner

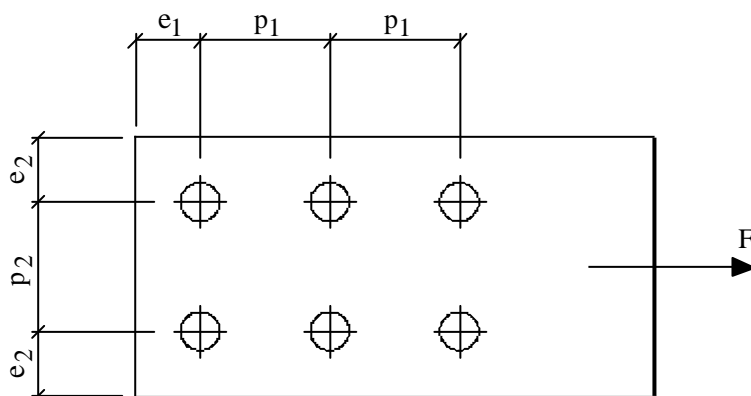
Med hensyn til korrosionsbeskyttelse af mekaniske samlinger henvises til punkt 6.1.4 Særlige forholdsregler i håndbogens kapitel 6. Levetid.

5.2 BEREGNING AF BOLTE- OG NITTESAMLINGER

I dette afsnit opstilles beregningsreglerne for statisk påvirkede bolte- og nittesamlinger i overensstemmelse med den europæiske konstruktionsnorm ENV 1999-1-1:1998 Eurocode 9: Design of aluminium structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings [1].

5.2.1 UDFORMNING AF SAMLINGSELEMENTER

Afstanden fra boltehuller til pladekanter og den indbyrdes afstand mellem boltehuller må ikke være mindre end de angivne minimumsafstande ifølge Figur 5.1 og Tabel 5.1.



Figur 5.1 Bolteafstande og belastningsretning.

Tabel 5.1 Kant- og hulafstande.

optimal	normal	minimal
$e_1 = 3,0 d_0$	$e_1 = 2,0 d_0$	$e_1 = 1,2 d_0$
$p_1 = 3,75 d_0$	$p_1 = 2,5 d_0$	$p_1 = 2,2 d_0$
$e_2 = 1,5 d_0$	$e_2 = 1,5 d_0$	$e_2 = 1,2 d_0$
$p_2 = 3,0 d_0$	$p_2 = 3,0 d_0$	$p_2 = 2,4 d_0$

(d_0 = huldiameter)

Hulrandsbæreevne af samlingselementet afhænger af kant- og hulafstanden.

For de optimale kant- og hulafstande fås den største hulrandsbæreevne af samlingselementet.

Bolteafstandene må ikke være så store, at der kan forekomme foldninger i pladerne ved trykpåvirkning.

Maksimal kantafstande

$$e_1 \text{ og } e_2 \leq 4t + 40 \text{ mm}$$

korrosivt miljø

$$e_1 \text{ og } e_2 \leq \text{den største værdi af } 12t \text{ eller } 150 \text{ mm}$$

ikke korrosivt miljø

Maksimal hulafstande

$$p_1 \text{ og } p_2 \leq \text{den mindste værdi af } 14t \text{ eller } 200 \text{ mm}$$

$$t \quad \text{godstykkelse af samlingselement}$$

Den maksimale tilladelige frigang for bolte og nitter i normalhuller er angivet i Tabel 5.2

Aflange boltehuller anbefales ikke for aluminiumskonstruktioner.

Tabel 5.2 Hulstørrelse.

samlings type	nominel diameter	huldiameter
pasbolte		$d_0 \leq 0,15 \text{ mm} + d$
slipbolte	$d < 13 \text{ mm}$	$d_0 \leq 1,0 \text{ mm} + d$
	$d \geq 13 \text{ mm}$	$d_0 \leq 2,0 \text{ mm} + d$
nitter	$d < 13 \text{ mm}$	$d_0 \leq 0,4 \text{ mm} + d$
	$d \geq 13 \text{ mm}$	$d_0 \leq 0,8 \text{ mm} + d$
højstyrke bolte	$d \leq 24 \text{ mm}$	$d_0 \leq 2,0 \text{ mm} + d$
	$d > 24 \text{ mm}$	$d_0 \leq 3,0 \text{ mm} + d$

5.2.2 FORDELING AF KRÆFTER I BOLTESAMLINGER

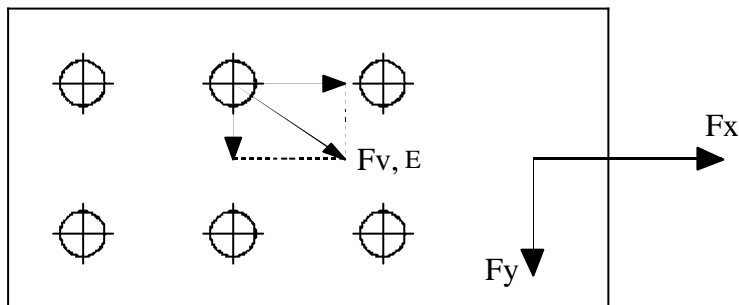
For et samlingselement påvirket af en normalkraft, som vist i Figur 5.1, kan det antages, at belastningen fordeles jævnt på alle bolte.

Forskydningskraften på en enkelt bolt bliver i dette tilfælde

$$F_{v,E} = F / n \quad n = \text{antal bolte}$$

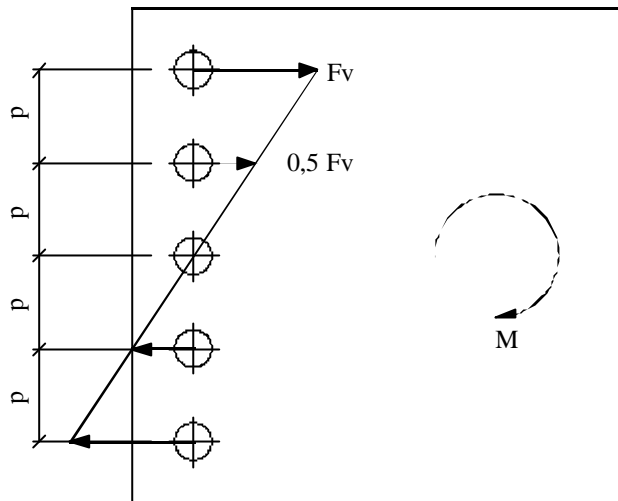
Hvis samlingselementet belastes både af en normalkraft og en forskydningskraft (se Figur 5.2) kan forskydningskraften på en bolt beregnes som

$$F_{v,E} = \sqrt{(F_x / n)^2 + (F_y / n)^2}$$



Figur 5.2 Samlingselement påvirket af normalkraft og tværkraft.

Figur 5.3 viser en momentpåvirket boltesamling, hvor fordelingen af boltekrafterne kan antages at være proportional med afstanden fra rotationscentret.



Figur 5.3 Momentpåvirket boltesamling.

Den største forskydningskraft på den yderste bolt bliver i dette tilfælde

$$M = 2 (0,5 F_v p + F_v 2 p)$$

$$F_{v,E} = M / (5 p)$$

5.2.3 BÆREEVNE AF BOLTE- OG NITTESAMLINGER

Bolte- og nittesamlinger omfatter pasbolte med stram tilpasning, slipbolte med frigang i samlingen og massive nitter. Samlingerne kan opdeles i følgende kategorier (se Tabel 5.3).

Tabel 5.3 Kategorier af bolte- og nittesamlinger.

kategori	bæreevne	bolte og nitter
forskydningspåvirket samling	hulrandsbæreevne overklipningsbæreevne	ikke forspændte bolte og nitter
trækpåvirket samling	trækbæreevne	forspændte højstyrkebolte eller ikke forspændte bolte
friktionssamling	friktionsbæreevne	forspændte højstyrkebolte

Forspændte højstyrkebolte skal være varmgalvaniserede kvalitet 8.8 eller 10.9.

Bolte kvaliteterne fra 4.6 til 10.9 og rustfrie bolte kan anvendes til ikke forspændte bolte.

Nitter kan ikke anvendes til friktionssamlinger og anbefales ikke til trækpåvirkede samlinger.

Forskydningspåvirkede bolte- og nittesamlinger

Den regningsmæssige forskydningskraft $F_{v,E}$ pr. bolt eller nitte må ikke overstige den regningsmæssige hulrandsbæreevne $F_{b,R}$ af samlingselement og den regningsmæssige overklipningsbæreevne $F_{v,R}$ af dornen.

$$F_{v,E} \leq F_{b,R} \quad \text{og} \quad F_{v,E} \leq F_{v,R}$$

Hulrandsbæreevne

$$F_{b,R} = 2,5 a_1 a_2 f_u d t$$

α_1 den mindste værdi af $(e_1/3d_0)$, $(p_1/3d_0-1/4)$, (f_{ub}/f_u) , $(1,0)$

α_2 den mindste værdi af $(e_2/0,9d_0-2/3)$, $(p_2/1,8d_0-2/3)$, $(1,0)$

f_u regningsmæssig trækstyrke af samlingselementet

f_{ub} regningsmæssig trækstyrke af bolte- og nittematerialet

d nominal boltediameter eller hul diameter for nitter

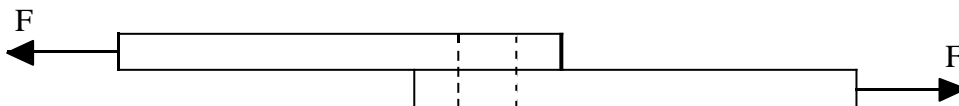
d_0 hul diameter

t godstykkelse af samlingselementet

e_1, e_2, p_1, p_2 fremgår af Figur 5.1

Hulrandsbæreevnen for overlapsamling med kun én bolt (Figur 5.4) beregnes som

$$F_{b,R} = 1,5 f_u d t$$



Figur 5.4 Overlapsamling med en bolt.

Overlapsamling med kun én nitte anbefales ikke.

For undersænkede bolte- og nittesamlinger skal godstykkelsen af samlingselementet reduceres med halvdelen af undersækningsdybden.

Overklipningsbæreevne

$$F_{v,R} = b f_{ub} A$$

β 0,5 for bolte kvalitet 10.9 og rustfri bolte

0,6 for bolte kvalitet mindre end 10.9 og nitter

f_{ub} regningsmæssig trækstyrke af bolte- og nitematerialet

A spændingsarealet af bolt for forskydning gennem rullet gevind

$0,85 \times$ spændingsarealet af bolt for forskydning gennem skåret gevind

skaftarealet af bolt for forskydning gennem skaftet

hularealet for nittesamlinger

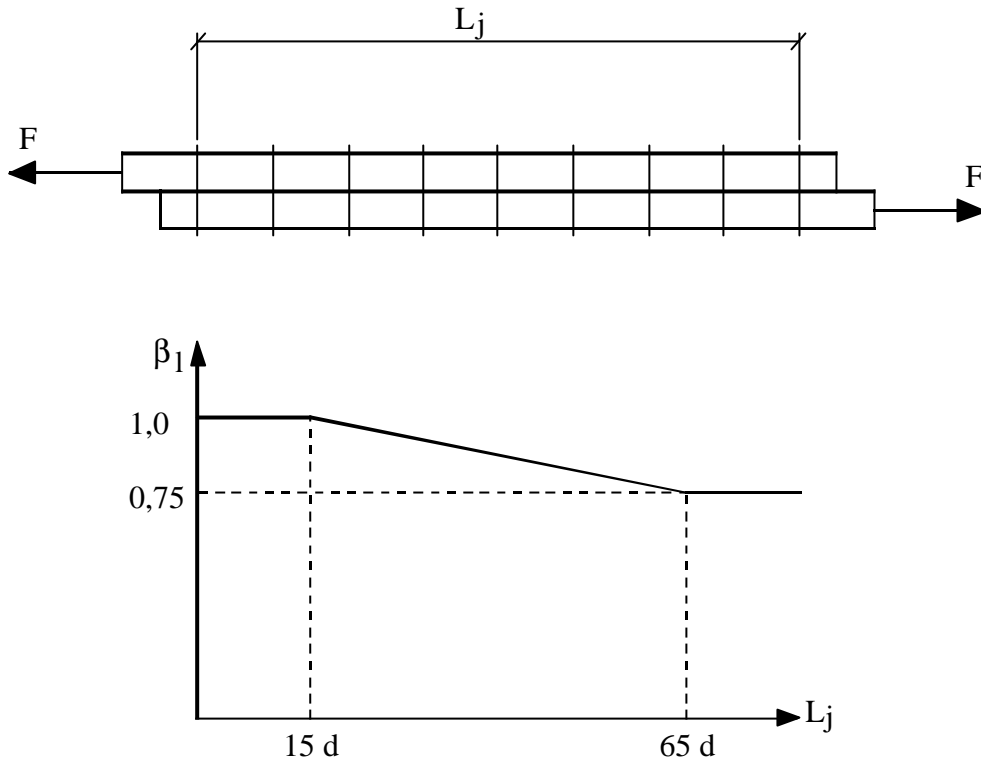
For lange samlinger med afstanden L_j større end 15 gange den nominelle diameter skal overklipningsbæreevnen reduceres med faktoren

$$b_1 = 1 - (L_j - 15d) / 200d \qquad 0,75 \leq b_1 \leq 1,0$$

Reduktionsfaktoren for lange samlinger er vist i Figur 5.5.

Overklipningsbæreevnen skal for bolte- og nittesamlinger gennem pakning med en total tykkelse t_p større end en tredjedel af den nominelle dorndiameter reduceres med faktoren

$$b_p = 9d / (8d + 3t_p) \qquad b_p \leq 1,0$$



Figur 5.5 Reduktionsfaktor for lange samlinger.

Trækpåvirkede boltesamlinger

Den regningsmæssige trækraft $F_{t,E}$ pr. bolt må ikke overstige den regningsmæssige træk bæreevne $F_{t,R}$ af bolten.

$$F_{t,E} \leq F_{t,R}$$

Træk bæreevne

$$F_{t,R} = 0,9 f_{ub} A_s \quad \text{for stål bolte}$$

$$F_{t,R} = 0,6 f_{ub} A_s \quad \text{for aluminium bolte}$$

f_{ub} regningsmæssig trækstyrke af bolt materialet

A_s spændingsarealet af bolt med rullet gevind

$0,85 \times$ spændingsarealet af bolt med skåret gevind

Træk bæreevnen af undersænkede bolte skal reduceres med faktoren 0,7.

Udmattelsespåvirkede træksamlinger bør udføres med forspændte højstyrkebolte, idet forspændingskraften vil medføre en formindskelse af spændingsvariationen i bolten.

Træk- og forskydningspåvirkede boltesamlinger

Det skal eftervises at overklipningsbæreevnen $F_{v,R}$ og træk bæreevnen $F_{t,R}$ af bolten opfylder betingelsen

$$(F_{v,E} / F_{v,R}) + (F_{t,E} / 1,4F_{t,R}) \leq 1,0$$

Friktionssamlinger

Den regningsmæssige forskydningskraft $F_{v,E}$ pr bolt må ikke overstige den regningsmæssige friktionsbæreevne $F_{s,R}$ af kontaktflader og den regningsmæssige hulrandsbæreevne $F_{b,R}$ af samlingselement.

Der skal anvendes forspændte højstyrkebolte af kvalitet 8.8 eller 10.9, og styrken af samlingselementet skal opfylde kravet $f_{0,2} \geq 200$ MPa.

$$F_{v,E} \leq F_{s,R} \quad \text{og} \quad F_{v,E} \leq F_{b,R}$$

Friktionsbæreevne

$$F_{s,R} = m \mu F_{p,C}$$

m antallet af kontaktflader

μ regningsmæssig friktionskoefficient

$F_{p,C}$ regningsmæssig forspændingskraft

Forspændingskraft

$$F_{p,C} = 0,65 f_{ub} A_s \quad \text{for 8.8 bolte}$$

$$F_{p,C} = 0,7 f_{ub} A_s \quad \text{for 10.9 bolte}$$

f_{ub} regningsmæssig trækstyrke af bolt materialet

A_s spændingsarealet af bolt

Friktionskoefficienten afhænger af overfladebehandlingen, og erfaringen viser, at en overfladebeskyttelse vil reducere friktionskoefficienten.

Ifølge Eurocode 9 [1] kan friktionskoefficienterne i Tabel 5.4 anvendes for en sandblæst overflade til kvalitet N19a ISO 1302 svarende til overfladeruhed Ra 12,5.

Tabel 5.5 angiver vejledende friktionskoefficienter for ubehandlede overflader på baggrund af eksperimentelle trækforsøg udført under SASAK projektet [SASAK-RAP-ME-AKS-FI-0003-01].

Tabel 5.4 Friktionskoefficient for overfladekvalitet N10a ISO 1302 [1].

total tykkelse af samling S_t (mm)	friktionskoefficient m
$12 \leq \Sigma t < 18$	0,27
$18 \leq \Sigma t < 24$	0,33
$24 \leq \Sigma t < 30$	0,37
$30 \leq \Sigma t$	0,40

Tabel 5.5 Vejledende friktionskoefficient for ubehandlet overflade [SASAK].

total tykkelse af samling S_t (mm)	friktionskoefficient m
$12 \leq \Sigma t < 18$	0,13
$18 \leq \Sigma t < 24$	0,16
$24 \leq \Sigma t < 30$	0,19
$30 \leq \Sigma t$	0,21

Trækpåvirkede friktionssamlinger

For en træk - og forskydningspåvirket friktionssamling reduceres friktionsbæreevnen til

$$F_{s,R} = n m (F_{p,C} - 0,8 F_{t,E})$$

$F_{t,E}$ den regningsmæssige trækraft på samlingen

5.3 MEKANISK INTERLOCKING (TOX-JOINING)

5.3.1 ANVENDELSESOMRÅDER

Metoden anvendes ved overlapsamlinger af tyndplade op til 3 mm godstykkelse og kan karakteriseres ved følgende:

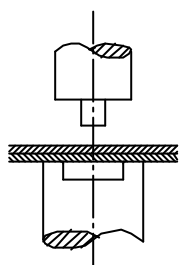
- Er fleksibel overfor anvendelse af forskellige materialer, f.eks.:

Aluminiumplade til stålplade, sandwichplader eller med mellemlæg af plastfolie.

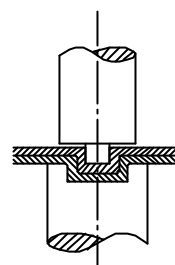
- Overfladebehandlede plader kan anvendes.
- Ingen spåntagende bearbejdning. eller varmetilførsel.
- Enkel og ren proces.
- Kan anvendes i kombination med sealer eller lim, hvor pladerne fiskeres ved hjælp af Mekanisk Interlocking, indtil sealeren/limen hærder.

5.3.2 PROCESS BESKRIVELSE

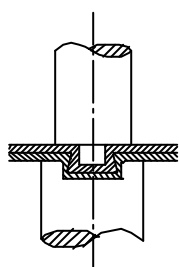
Fremgangsmåden ved mekanisk interlocking er vist i efterfølgende Figur 5.6.



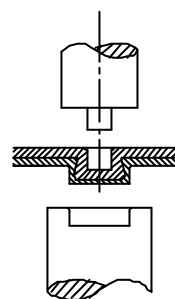
Pladerne presses sammen og fastholdes



Dornen presses ned i materialet, hvorved pladerne dybtrækkes



Materialet på stempelsiden vejnes ind i materialet på matricesiden



Samlingen er udført

Figur 5.6 Beskrivelse af TOX-joining processen.

5.3.3 EGENSKABER

- **Mekaniske egenskaber:**

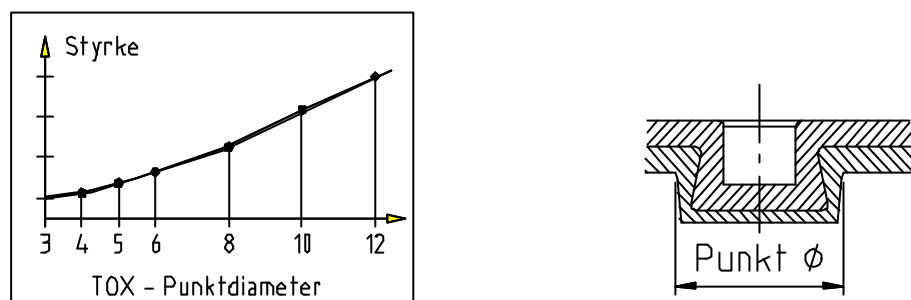
Samlingen er i stand til at optage såvel træk- som forskydningsspændinger, om end i mindre målestok end nitte/svejsforbindelser.

Udmattelsesegenskaber er udmærkede.

De omkringliggende pladefelter bliver kun påført minimale spændinger.

- **Dimensionering:**

Styrken i samlingen er afhængig af plademateriale, punktets udformning samt i høj grad punktets diameter.



Figur 5.7 Styrke af TOX-joining som funktion af punkt diameteren.

Tabel 5.6 TOX-joining styrkeværdier [TOX-pressotechnik].

Pladetykkelse(mm)		Materiale		Brudstyrke	Brudstyrke	Pressekraft (kN)
Stempelside	Matriceside	Stempelside	Matriceside	Forskydning (N)	Træk (N)	
0,80	0,80	AlMg3 F22	AlMg3 F22	1100	800	28
1,00	1,00	AlMg3 W19	AlMg3 W19	1000	900	30
1,00	1,50	AlMg3 W19	AlMg3 W19	1100	1200	32
1,00	2,00	AlMg3 W19	AlMg3 W19	1000	1200	37
1,00	2,00	AlMg1 F19	AlMg1 F19	560	580	18
1,20	1,20	AlMgSi0,5	AlMg3	1700	1400	27
1,50	1,00	AlMg3 W19	AlMg3 F19	2000	1200	40
1,50	1,00	AlMg5 Mn	AlMg5 Mn	2200	1100	35
2,00	1,00	AlMg3 W19	AlMg3 W19	2500	1300	40

Såfremt der anvendes en kombination af TOX og lim, må de mekaniske egenskaber findes ved test af den specifikke samling.

- **Korrosionsforhold:**

Hvis der er krav til korrosionsbestandighed af samlingen, kan man:

1. Anvende forbehandlede plader
2. Indskyde et mellemlæg i samlingen for at opnå tæthed
3. Applikere sealer/tætningsmasse i samlingen

5.4 ANVENDELSE AF SKRUER OG NITTER

5.4.1 INDLEDNING

Aluminiumkonstruktioner sammenføjes ofte med bolte, møtrikker og skruer på grund af krav om demontering, øget fleksibilitet eller specielle montage problemer. Der kan også være andre tekniske eller økonomiske vurderinger, der ligger til grund for anvendelse af denne type for sammenføjning.

Ved valg af skruemateriale bør man udover styrke og bestandighed tage hensyn til temperaturforskelle og omgivelsernes korrosive egenskaber. Sammenlignet med svejste konstruktioner har bolte- og skrueforbindelser den fordel, at materialets styrkeegenskaber ikke forringes på grund af varmetilførelsen ved svejsning.

5.4.2 SKRUEMATERIALE

Hvis aluminiumkonstruktionen udsættes for store temperaturvariationer, og der er fastsat krav til tilspændingen af skrueforbindelsen, kan det være en fordel at anvende aluminiumskrue og bolte, som har samme termiske udvidelseskoefficient som samlingselementet.

Styrken af skruematerialet bør svare til styrken af samlingselementerne, som vist i Tabel 5.7.

Tabel 5.7 Anbefalet bolte- og skruemateriale.

Komponent materiale		Anbefalet bolte- og skruemateriale	
EN-AW-	EN-AW-	EN-AW-	Brudstyrke (MPa)
AlMg3	5754	AlMg5	255
AlMg2Mn0,8	5154	AlMg5	255
AlMg5	5019	AlMg5 eller AlSiMgMn	255, resp. 315
AlSi1MgMn	6082	AlSi1MgMn	315
AlMgSiPb	6012	AlSi1MgMn	315
AlCu4MgSi(A)	2017(A)	AlCu4Mg1	395, resp. 440

Aluminiumskrue med rullegevind er altid at foretrække.

Korrosionsmodstanden og slidbestandigheden af skruerne kan øges ved en anodisering. Ofte anodiseres skruerne i samme farve som konstruktionen på grund af arkitektoniske krav.

Aluminium træskruer er udført i legeringerne AlCu4Mg1 (2024), AlSi1MgMn (6082) samt AlMg5 (5019). For ikke at ødelægge skruerne skal de være forsynet med en kær, der er tilstrækkelig dyb eller alternativt med en torxkær samt en glat gevindoverflade.

Følgende generelle punkter bør tages i betragtning ved sammenføjning med skruer:

For at undgå meget høje spændinger på aluminiumoverfladen, bør man anvende aluminium skiver under skruehoved og møtrik. Den ydre diameter på skiven bør være 3 gange større end gevindhullets diameter.

Skiver med takker eller riflet overflade (bulldogskiver) samt låse- og fjederskiver af stål, må ikke anvendes som middel til fastlåsning af skruer til aluminiumkonstruktionen. Hvis man vil undgå at skruen løsner sig, kan dette gøres ved at pålægge lim på skrue og skive før tilspænding.

Ved en gentagen af- og påmontering af skruer og bolte, kan gevindet i aluminium-materialet blive forringet i en sådan grad, at det ikke kan anvendes. I sådanne tilfælde anbefales det at bruge gevindindsatse (helicoils), eller anodiserede skruer, der er dyppet i en flydende blanding af voks og paraffin ved 130°C

Hvis skrueforbindelsen anvendes i en fugtig atmosfære, skal forbindelsen beskyttes med et godkendt sealingsmateriale.

5.4.3 GEVINDHULER OG GEVINDINDSATSE

Hvis gevindhuller i komponenter udført i plastisk deformerbare aluminiumlegeringer er lavet korrekt, kan bolte løsnes og spændes mange gange uden at ødelægge gevindet. Normalt anbefales en minimum skrue dybde, som angivet i Tabel 5.8.

Tabel 5.8 Anbefalede minimum skrue dybder.

Legering EN-AW-	Legering EN-AW-	Tilstand	Min. skrue dybde
AlMg3	5754	H 14	2,5 x d
AlMg4,5Mn	5083	H 24	2,0 x d
AlSiMgMn	6082	T6	1,5 x d
AlCu4Mg1	2024	T4, T3	1,5 x d
AlZn5,5MgCu	7075	T7, T6	1,0 x d

(*d = nominal gevind diameter*)

Gevindindsatse er medvirkende til at øge udtrækningskraften i gevindhuller med lav forskydningspænding. Den maksimale spænding i en sammenføjning bestående af en bolt og et drejet gevind er ikke kun bestemt af materialeegenskaberne men ligeledes af gevindudformningen og tilpasningen. Gevindindsatse anvendes specielt som samlinger i de bløde legeringstyper.

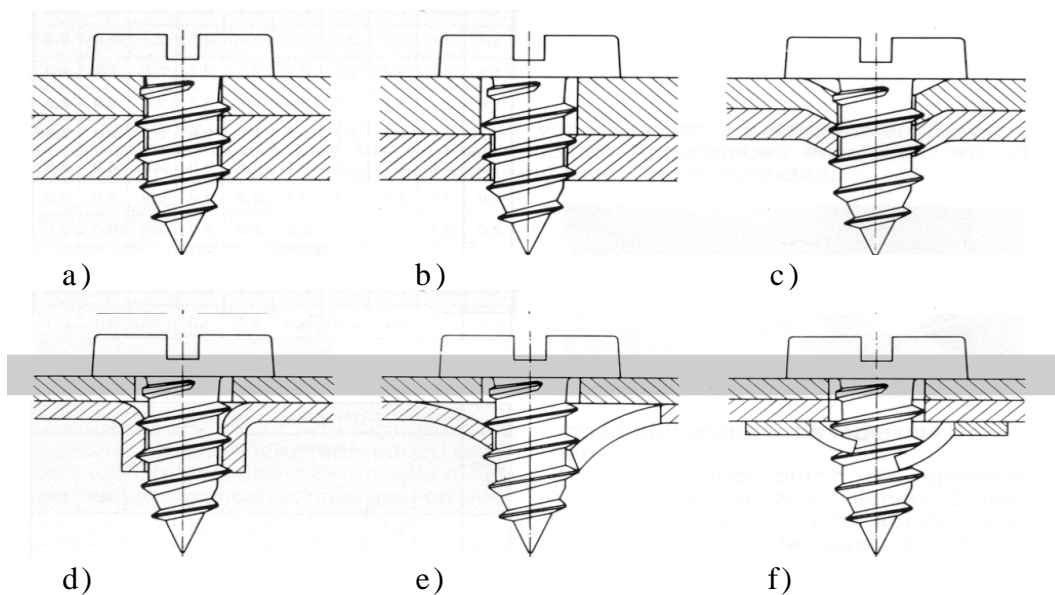
5.4.4 PLADESKRUER

Tyndplader kan sammenføjes med mange forskellige former for gevindudformninger. De mest anvendte er de selvslående eller selvskærende skrue typer.

Gevindformende eller gevindskærende skruer placeres enten i et forboret eller udstanset hul i den tynde plade. Man kan også udnytte muligheden i ekstruderings teknologien, hvor det er muligt at integrere skruekanaler i pladerne.

Selvborende skruer er udført med en skarp æg, der er istand til at bore et hul igennem pladematerialet.

I Figur 5.8 er vist eksempler på anvendelse af selvskærende skruer. Den totale godstykkelse af de sammenskruede pladeemner skal være større end skrueens gevindstigningen, da det ellers ikke vil være muligt at opnå et tilstrækkeligt tilspændingsmoment på skruen. Hvis denne betingelse ikke kan opfyldes, kan konstruktøren anvende forslag c) – f) i Figur 5.8.

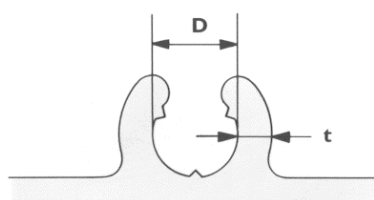
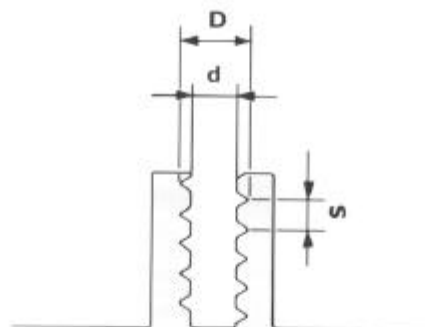
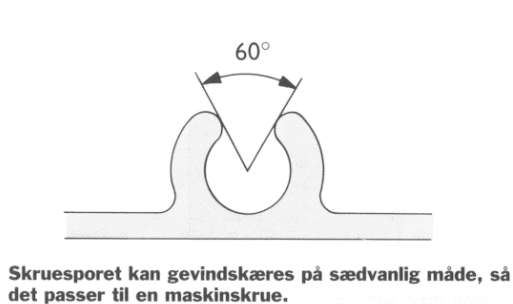


Figur 5.8 Eksempler på anvendelse af selvskærende skruer, [3].

5.4.5 ANVENDELSE AF EKSTRUDEREDE ALUMINIUMPROFILER

Ved at udnytte de mulighederne, der ligger i ekstruderingssteknikken, får konstruktøren stor grad af frihed til at designe sine sammenføjninger på en optimal måde.

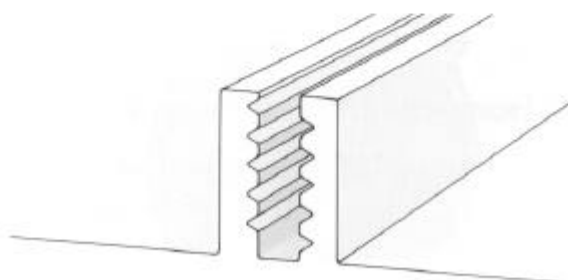
Figur 5.9 angiver nogle eksempler på anvendelse af profiler med langsgående skruespor.



Det mest almindelige er at anvende skruesporet direkte for pladeskruer eller selvskærende skruer. Skruesporet forsynes da med knaster, der centrerer skruen.

MÅL FOR LANGSGÅENDE SKRUESPOR			
Skrue nr.	Gevind-diameter, D	Kerne-diameter, d	Gevind-stigning, S
ST 3,5 (B6)	3,5	2,6	1,27
ST 4,2 (B8)	4,2	3,1	1,41
ST 4,8 (B10)	4,8	3,6	1,59
ST 5,5 (B12)	5,5	4,2	1,81
ST 6,3 (B14)	6,3	4,9	1,81

HULDIAMETER FOR SELVSKÆRENDE SKRUER			
Skrue nr.	Huldiameter D	Tolerance (±)	Fritgående hul
ST 3,5 (B6)	3,1	0,15	4,2
ST 4,2 (B8)	3,8	0,15	5,0
ST 4,8 (B10)	4,3	0,15	5,8
ST 5,5 (B12)	5,0	0,15	6,6
ST 6,3 (B14)	5,7	0,15	7,4



Et langsgående skruespor tillader trinløs montering af skruen i profilets længderetning. Egnede mål ifølge tabellen.

Figur 5.9 Eksempler på anvendelse af langsgående skruespor, [4].

5.4.6 NITNING

I modsætning til de førnævnte løsbare sammenføjningsmidler findes der også faste sammenføjningsmidler der omfatter lodning, svejsning og nitning.

Nitning er en relativt nem metode og der er mulighed for sammenføjning af forskellige materialer f.eks. aluminium og stål.

Nitteforbindelser udføres altid som overlap samlinger. Metoden egner sig til anvendelser, hvor belastningen forekommer retvinklet på nitteaksen. Nitteforbindelser må ikke udsættes for trækkræfter.

En adskillelse af emner, der er sammenføjet med nitter, vil ofte ødelægge sammenføjningsmidlet og i nogle tilfælde også emnerne.

Der skelnes imellem to former for nitter: Hammernitter og maskinnitter.

Hammernitter

Hammernitter bruges efterhånden ikke mere. Processen kræver specialuddannet arbejdskraft, og er desuden problematisk ved gennemførelse af en kvalitetskontrol. Efterhånden har maskinnitterne udkonkurreret hammernitterne.

Maskinnitter

Anvendelse af maskinnitter var i starten forbeholdt luft- og rumfartsteknikken, men har i de senere år udvidet sig til at omfatte mange andre brancher (elektronik, apparater, bil- og byggeindustri) Maskinnitning byder på mange åbenlyse fordele:

Høj produktionshastighed ved hjælp af specielle pneumatiske eller hydrauliske værktøjer. Sammenlignet med hammernitning kræver maskinnitning ikke nogen specielle kvalifikationer af arbejdskraften.

Simplificeret kvalitetskontrol af sammenføjningen, idet tilspændingskraften i alle tilfælde er mindre end den kraft der skal til for at ødelægge nitteskraftet.

Visuel fremstilling og tæthed. På bestemte typer af nitter er det muligt at påsætte dæksler af kunststof, der øger muligheden for tæthed, og yder beskyttelse imod luft, støv og vejrlig.

Producenterne tilbyder et meget stort antal af forskellige typer systemer til mange forskellige formål, og der opfordres derfor til at tage kontakt til sin leverandør, når man påtænker at anvende denne form for sammenføjning.

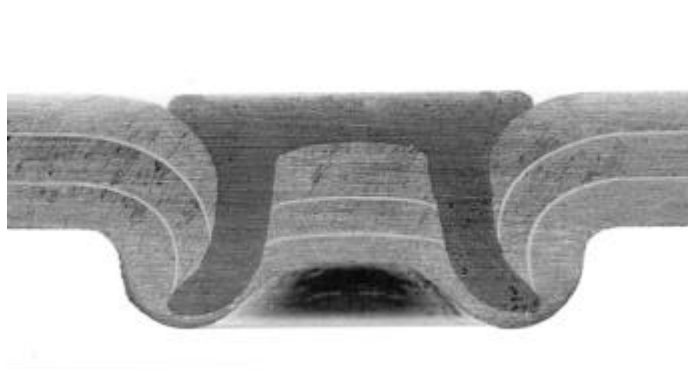
Maskinnitter opdeles i to grupper: Nittemøtrikker, hvor der kræves adgang fra to sider og blindnitter, hvor der kun er adgang fra én side.

Huck Bolts, skruenitter eller rivkle anvendes i konstruktioner, hvor der stilles store krav til optagelse af kræfter. Da de oftest er produceret af højstyrkemateriale, der ikke kan deformeres under samling, er der påsat en selvslående møtrik, der trækkes på nitten.

Blindnitter, inkluderer popnitter, nitemøtrikker og nittebolte anvendes ofte kun til konstruktioner, hvor der kun er adgang fra een side.

Selvpenetrerende nitter (Figur 5.10) er en relativ ny sammenføjningsmetode, hvor nittehullet slås i en og samme proces. Denne type af nitter findes både som halvhule og solide nitter.

Denne sammenføjningsmetode kan anvendes ved samling af plade, rør og ekstruderede emner og stiller ikke krav om forborede huller.



Figur 5.10 Tværsnit af selvpenetrerende sattesamling, [MCI].

Efter at nitten er slået igennem overlapsamlingen bliver det udslåede materiale erstattet af nitten, der fastholdes i den opståede periferiske rille.

Nitten skærer igennem det øverste lag af samlingen, mens det nederste lag presses ind i holdeværktøjet. Design af nitten og holdeværktøjet er udført således, at metallet flyder sideværts og dermed danner et hult nitteskaf, der er medvirkende til at låse sammenføjningen. Det udslåede lag metal fyldes ind i det hule nitteskaf.

Denne proces kræver adgang fra begge sider. Værktøjet er udført som en kraftig nittepistol, der både fastholder emnet og overfører de store kræfter, der skal bruges i processen..

5.4.7 NITTEMATERIALER

Hvis der anvendes nitter af aluminium, skal legeringen normalt svare til det grundmaterialet, der skal nittes på, som angivet i tabel 5.9.

Kobbernitter må ikke anvendes på grund af risiko for korrosion.

De nitter der anvendes i dag til sammenføjning af aluminium, er produceret i coatede stål, for at modvirke kontaktkorrosion.

En ødelæggelse af coatingen eller åbning imellem nittehulkant og nittehoved kan medføre et korrosions angreb. En tæt proceskontrol er derfor nødvendig for at opnå et tilfredsstillende resultat.

Aluminiumnitter betegnes lige som stål nitter efter formen på nittehovedet.

- Halvrunde nitter
- Fladhoved nitter
- Linsehovedformede nitter
- Panhoved nitter
- Rømitter
- Oval hoved nitter

Nitter med undersænket hoved

Tabel 5.9 De mest anvendte aluminiumlegeringer til nitter Error! Bookmark not defined..

Ikke varmhærdbare legeringer	Varmhærdbare legeringer
Al 99,8 (1080A)	AlSi1 MgMn (6082)
Al 99,5 (1050A)	AlCu2,5Mg (2117)
AlMg3 (5754)	AlCuMgSi (A) (2017A)
AlMg5 (5019)	AlCu4Mg1 (2024)

5.5 EKSEMPEL PÅ SAMMENFØJNING AF SIDEPANEL

5.5.1 INDLEDNING

Mærsk Container Industri A/S (MCI) overtog i 1998 en kølecontainerfabrik i Kina og fik derved mulighed for at producere flere forskellige alle typer af kølecontainere.

En type containere har et specielt indvendig sidepanel, som består af følgende komponenter:

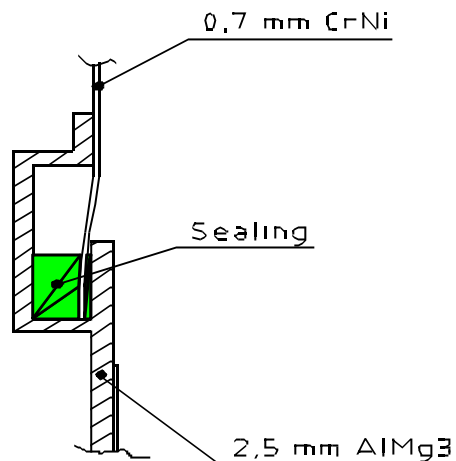
- 0,7 mm CrNi plader
- 2,5 mm AlMg3 dørkplade med 0,5 mm "Five bar" mønster.

Det indvendig sidepanel er den ene side i en sandwich konstruktion.

5.5.2 NUVÆRENDE SAMLING

I Kina samles panelerne ved først at svejse dørkpladen til gulvet. Derefter fyldes slidsen op med lim/fugemasse. Umiddelbart herefter føres CrNi panelet ned i slidsen og panelet fikseres

indtil limen omkring panelet er hærdet op.



Figur 5.11 Nuværende samling af sidepanel.

MCI ville gerne finde en alternativ måde at samle panelerne på, da MCI ikke mener, at den nuværende fremgangsmåde er optimal.

Krav til samlingen

Samlingen skal være tæt.

Samlingens skal have samme styrke som grundmaterialerne.

Ved en punktvis sammenføjning skal der tætnes mellem samlingerne med f.eks. lim.

Samlingen må ikke nå ud over 0,5 mm mønster i dørkpladen.

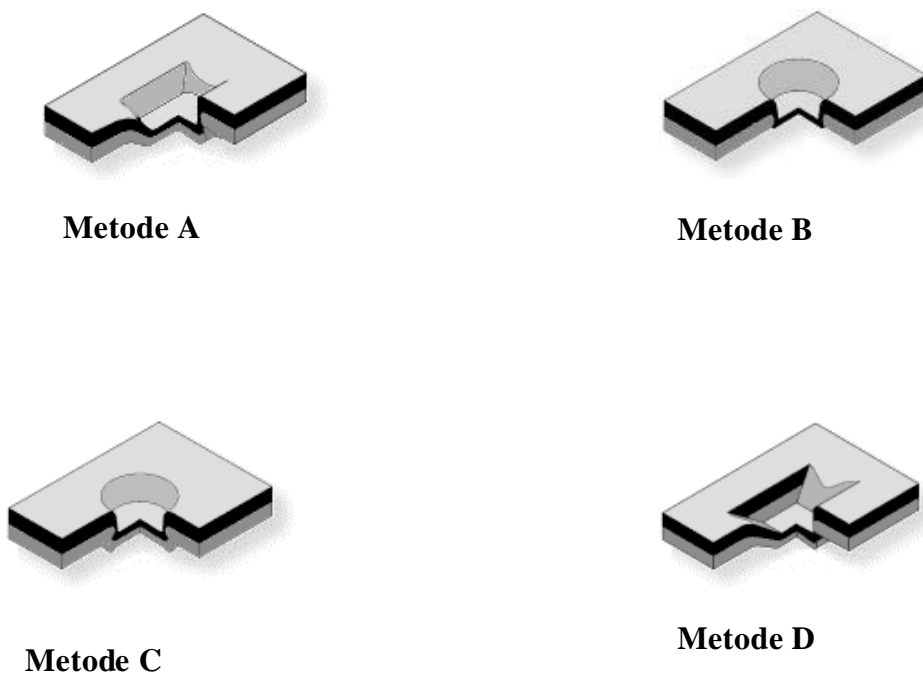
Alternative samlingsmetoder:

- Svejsning: Ikke muligt på grund af to forskellige materialer.
- Nitning: Måske en mulighed. Den er besværlig og kræver meget ekstra arbejde og er derfor er den ikke attraktiv.
- Mekanisk Interlocking: Måske en mulighed

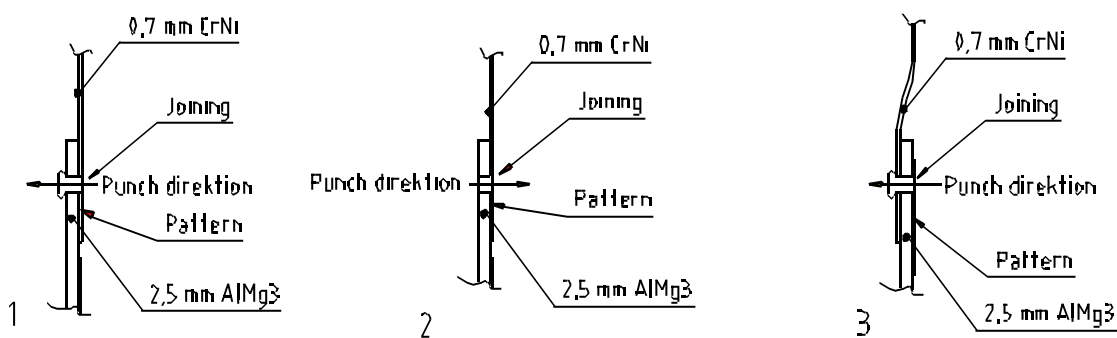
5.5.3 MEKANISK INTERLOCKING

Markedet blev undersøgt for hvilke muligheder der eksisterer. Figur 5.12 viser viser fire forskellige "Interlocking" metoder, hvor metode C blev valgt til projektet.

Sammenføjningen af sidepanelet kan foregå på tre forskellige måder, som skitseret i Figur 5.13.



Figur 5.12 Samling ved Interlocking.



Figur 5.13 Forskellige samlingsmetoder af sidepaneler.

1. *Standard sammenføjning.* Mest optimale samling. Overlap med CrNi plade yderst.

Fordele: Vulsten på bagsiden (skumsiden), samlingen vender nedad.

Ulemper: Dørkplade skal planfræses i overlapsområde. CrNi materiale kan sandsynligvis ikke klare stor koldflydning.

2. Fladpunktssamling. Sammenføjning foregår som normalt og efterfølgende presses vulsten flad så den ligger plant med overfladen. Overlap med CrNi plade yderst. Mindre optimal men brugbar løsning.

Fordele: Samling vender nedad. Resultat er et plant panel uden huller.

Ulemper: Dørkplade skal planfræses i overlapsområde. Trækstyrken i samlingen falder kraftigt når der laves "fladpunkt".

3. *Standard sammenføjning.* Mindre optimal fordi samling vender opad. Overlap med AlMg3 plade yderst.

Fordele: Vulsten på bagsiden (skumsiden).

Ulemper: Samlingen vender opad. Forsætning af CrNi pladen. Der findes ikke nogen egentlige teoretiske beregningsmetoder for hvor store kræfter, der kan overføres eller hvor tæt samlingerne skal ligge. Der bliver foretaget test hver gang en kunde ønsker processen indført og ud fra resultaterne bestemmes de nærmere produktionsdata.

Ingen virksomheder kunne på forhånd sige hvor god en samlingen der kunne opnås.

Der blev taget kontakt til 3 firmaer, som fik til opgave, at undersøge hvilken type af de tre viste samlinger, der var mulige.

Firma	Land	Samling
TOX-pressotechnik	Tyskland	TOX
BTM Skandinavia AB	Sverige	Tog-L-Log
Eckold	Tyskland	R-DF (Eckold)

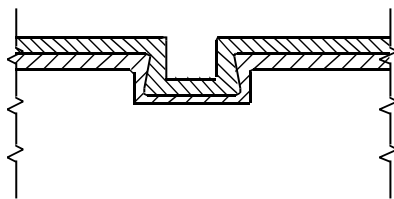
Samlingen sker ved, at de to plader samles under et stempel og en matrice. Begge plader presses gennem den nederste plade og ned i matrisen. Ved en koldflydepresning presses materialet ud, så der danner en vulst på bagsiden og derved opnås en mekanisk låsning.

Valget skyldes dels at det er en meget simpel løsning og dels at der er flere firmaer der producerer maskiner til samme type Interlocking.

MCI fulgte TOX-pressotechnik, mens forsøgene blev udført.

En samling udført som Interlocking "C" har i princippet et udseende som vist i Figur 5.14.

Den mest optimale samling opnås mellem ens materialer med samme materialetykkelse, men andre kombinationer er også mulige. En 2,5 mm AlMg plade og 0,7 mm CrNi plade er derfor ikke optimale plader at samle, men forsøget blev udført alligevel.



Figur 5.14 Interlocking metode C.

Forsøg udført hos TOX-pressotechnik

Samlingernes trækstyrke og forskydningsstyrke blev testet. Som standard udførtes 3 forsøg for hver samling. De dårligste resultater sendtes til kunden, således at der altid er størst mulig sikkerhed for at samlingen har den styrke, som leverandøren lover.

Forsøg 1

Samling nr. 1: Overlapsamling hvor CrNi-pladen ligger yderst og vulsten laves på bagsiden.

Resultat: Negativt. Der opstod brud i CrNi pladen lang tid før den nåede bunden af matrisen.

Forsøg 2

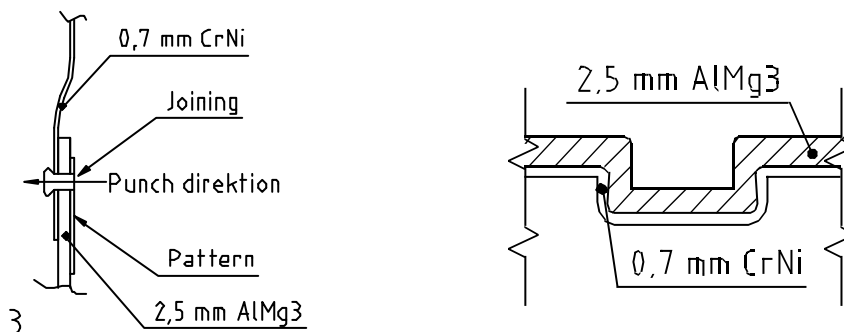
Samling nr. 3: Overlapsamling hvor 2,5 mm. AlMg3 pladen ligger yderst.

Resultat: Trækstyrken = 700 N Forskydningsstyrke = 3450 N.

Det lykkedes at lave samlingen, som vist i Figur 5.15, men resultatet var ikke særligt godt.

I dette tilfælde skal det øverste AlMg materiale presses ud i det nederste CrNi materiale, for at opnå den mekaniske låsning. CrNi er et hårdt materiale i forhold til AlMg, og samtidig er CrNi-pladen meget tynd i forhold til AlMg-pladen.

Derfor lykkes det ikke at opnå særligt gode samlinger. Trækstyrken skal forøges før samlingen kan bruges.



Figur 5.15 Resultat af forsøg 2 på samling nr. 3.

Forsøg 3

Samling nr. 3: Overlapsamling hvor 2,0 mm AlMg3 pladen ligger yderst. For at forbedre resultaterne blev 2,5 mm pladen fra forsøg 2 udskiftet med en 2,0 mm AlMg3 plade.

Resultat: Trækstyrken = 1400 N Forskydningsstyrke = 2500 N

Trækstyrken er fordoblet i forhold til forsøg 2, hvilket er tilfredsstillende, men forskydningsstyrken er reduceret..

Samling nr. 3 er et ikke den mest optimale samling, og derfor blev den sidste samlingsmetode nr. 2 Fladpunktssamlingen afprøvet. På grund af de bedre testresultater for 2,0 mm AlMg valgte vi at fortsætte med dette.

Forsøg 4

Samling nr. 2: Fladpunktssamling, hvor 2,0 mm. AlMg3 pladen ligger yderst. Efter at samlingen er udført som normalt, presses vulsten flad så den stort set ligger plan med pladen.

Resultat: Trækstyrken = 800 N Forskydningsstyrke = 2700 N

denne løsning ikke brugbar, da der ikke er opnået en tilstrækkelig trækstyrken.

Fladpunktssamling med 2,5 mm AlMg blev afprøvet, men mislykkedes.

Forsøgsresultater

Forsøgsresultaterne fra TOX-pressoteknik og BTM Skandinavia AB er angivet i Tabel 5.10. Eckold har fremsendt fysiske prøveresultater, der viser, at det kun har været muligt at presse 2,5 mm. AlMg plade ned i 0,7 mm CrNi pladen og ikke omvendt. Altså det samme resultat som de andre er kommet frem til. Der er ikke sendt styrkeresultater

Konklusion

Samling nr. 3 med en 2,0 mm AlMg3 plade har en trækstyrke, der opfylder det krav, som MCI stiller til samlingen.

Med en 1,5 mm AlMg3plade er det muligt at forøge trækstyrken yderligere.

En fladpunktssamling giver ikke de ønskede resultater.

Samling nr. 3 er dog ikke den mest optimale, da samlingen vender opad, og en 2,0 mm AlMg3 plade vil ikke være stærk nok til at opfylde de krav MCI ellers stiller til dørkpladen.

En efterfølgende analyse af produktionsflowet på fabrikken i Kina, viste at det ikke var muligt at benytte denne samlingsmetode uden store ændringer på produktionslinien.

Der blev derfor ikke foretaget yderligere undersøgelser af denne samlingsmetode.

Tabel 5.10 Mekanisk Interlocking forsøgsresultater, [MCI].

Mekanisk Interlocking af sidepanel				
Materialer: AlMg3: 2,5 - 2,0 - 1,5 mm CrNi: 0,7 mm				
Kombination	TOX-pressoteknik		BTM-skandinavia	
	Trækstyrke [N]	Forskydning N]	Trækstyrke [N]	Forskydning N]
0,7 mm / 2,5 mm	Negativ	Negativ	Negativ	Negativ
2,5 mm / 0,7 mm	700	3450	600	2540
2,5 mm / 0,7 mm			890	2050
2,5 mm / 0,7 mm			556	2830
2,5 mm / 0,7 mm F*	Negativ	Negativ		
2,0 mm / 0,7 mm	1400	2500		
2,0 mm / 0,7 mm F*	800	2700		
1,5 mm / 0,7 mm	1800	2100		
1,5 mm / 0,7 mm F*	110	2600		

(F* = fladpunktssamling)

5.6 KVALITETSSIKRING

5.6.1 KVALITETSSTYRING OG KONTROL

Kvalitetsstyring generelt

For mekanisk samling bør virksomhedens kvalitetsstyringssystem indeholde en række procedurer og instruktioner, der nødvendige for at sikre produktets kvalitet.

- Udførelse og kontrol af beregninger.
- Produktionsforberedelse inklusiv vurdering af adkomstforhold.
- Udførelse af boltning / nitning.
- Identifikation og sporbarhed af bolte-/nittematerialer.
- Vedligehold af boremaskiner, hulstansemaskiner, nitteudstyr.
- Kalibrering af momentnøgler og instrumenter til måling dimensioner, f.eks. skydelære, huldorne, målelære.
- Dimensionskontrol af huller - diameter og placering.

Acceptkriterier og reparation

Som eksempel på relevante acceptkriterier er der i Eurocode 9, ENV 1999-1-1:1998 [1] for aluminiumskonstruktioner på side 149 anført følgende:

Nitten må ikke være løs og skal fylde hullet helt ud. Dette gælder også for undersænket hoved.

Hoveder på nitten skal være centreret over skaffet og være i tæt kontakt med det sammen-nittede materiale. I praksis medfører det at luftgab mellem de sammennittede materialer omkring nitten ikke er tilladt.

Almindelige nitter og specielle nitter skal fremstilles ved smedning i kold tilstand, og der skal bruges procedurer og værktøjer ved nitningen, som anbefalet af leverandøren.

Løse eller ødelagte nitter fjernes ved udboring eller maskinel bearbejdning, og nye nitter isættes.

Acceptkriterierne i DS 419 : 1999 [2] side 66 kræver, at der skal anvendes metoder og udstyr, således at den færdige nitning svarer til forudsætningerne i beregningerne. Desuden anføres det, at der bør udføres prøvenitninger med de samme materialetykkelse, huldiametre og udstyr, som den endelige nitning.

Acceptkriterier ved boltning kan omfatte følgende:

Boltesamling udføres som specificeret med boltetype, skiver og tilspænding. Afhængig af kategori som beskrevet i DS 419 [2] kan der være krav til mindst 5% kontrol af boltetilspændingen.

Tolerancer for boltehuller iflg. de gældende krav. For strukturel anvendelse kan kravene findes i DS 419 [2] tabel 7.4.2 og i ENV 1999-1-1 [1] tabel 7.1. Desuden er der krav til dimensionskontrol af mindst 5% af boltehuller.

Luftspalte mellem de sammenboltede materialer er ikke tilladt, idet beregningerne forudsætter tæt kontakt.

Når en aluminiumskonstruktion er udmattelsespåvirket, kan der som eksempelvis i DS 419 [2] afsnit 8.8 stilles krav om en kvalitetsspecifikation indeholdende kontrolomfang, kontrolintervaller, kontrolmetoder, kontrolprocedurer, kvalitetskrav og dokumentation.

Konsekvenserne ved reparation eller udskiftning af bolte og nitter er forskellige for de 2 samleprocesser. En boltesamling vælges ofte, fordi den nemt kan adskilles igen. Hvis nittesamlinger skal adskilles medfører det ødelæggelse af den monterede nitte, og der er risiko for skader på selve produktet. Desuden kan det være nødvendigt at isætte en større nitte, hvis følgeskaderne er for store.

Kontrol

Under udførelsen af boltesamling og nitning kan der anvendes forskellige kontrolmetoder.

Nitning

- Kontrol af huldiametre og placering af huller.
- At der er anvendes de specificerede nitter.

- Visuel inspektion af eventuelle skader på nitten.
- Opmåling af nittehoved.
- Opmåling af spalteåbning mellem de sammennittede materialer.
- Kontrol af korrosionsbeskyttelse som specificeret for nitte og omkringliggende områder.
- Kontrol af rækkefølge for udførelsen af nitningen.

Boltesamling

- Kontrol af boltetilspænding f. eks. med momentnøgle.
- Kontrol af huldiametre og placering af huller.
- Kontrol af udvendigt og indvendigt gevind med gevindlærer.
- Der er anvendt de specificerede bolte.
- At eventuel galvanisk isolering er udført som specificeret.
- Kontrol af korrosionsbeskyttelse som specificeret for nitte og omkringliggende områder.
- Kontrol af overfladeruhed med ruhedsmåler for friktionssamlinger.
- Kontrol af rækkefølge for udførelsen af nitningen.

Produktionsmæssige konsekvenser

Boring af huller skal foretages inden adgang eventuelt begrænses. Der kan ikke som ved stål anvendes magnetboremaskiner på et senere tidspunkt i produktionsforløbet.

Boring af huller skal udføres med passende nøjagtighed, således at samling med enten bolte eller nitter kan foregå uden yderligere tilpasning. Ved strenge krav bores komponenterne samtidig.

Som en yderligere sikkerhed kan man lave en prøvesamling inden slutmontage.

Krav til produktionsfaciliteter

Udstyr

Udstyr til boltning og nitning af aluminium bør behandles som øvrigt udstyr i et kvalitetsstyringssystem. Der bør være procedurer og instruktioner for vedligehold af udstyr og for kalibrering af måleværktøjer.

Adkomstforhold, arbejdsforhold

Generelt stilles der ikke store krav til plads under bolte- og nitteprocessen. Udstyr til både boltning og nitning kan være pneumatisk, og kræver derfor ikke meget plads. Til gengæld skal der være tilstrækkelig plads til at bruge momentnøglen.

Ved boltesamlinger med bolt og møtrik skal der være adgang fra begge sider. Dette gælder også for hammernitning, mens det er tilstrækkeligt med en side ved blindnitning og boltesamlinger med hulgevind.

Mekanisk samling stiller ikke de samme specifikke krav til miljø, som ved svejsning, hvor der skal tages højde for temperaturer, fugtighed og vind. Til gengæld må det forudses, at der vil være krav under udførelsen af korrosionsbeskyttelse.

5.6.2 ØKONOMISKE KONSEKVENSER

De økonomiske konsekvenser kan vurderes ud fra en sammenligning mellem stål og aluminium og mellem mekanisk samling og svejsning i aluminium.

Ser man på materialesiden vil mekanisk samling i aluminium være dyrere end i stål i de samme dimensioner, idet der her stilles større krav til korrosionsegenskaberne, og der skal anvendes dyrere materialer til den mekanisk samling, f.eks. rustfrit stål. Desuden vil der i en række situationer være krav til isolering for at undgå galvanisk korrosion. Der kan ikke umiddelbart opstilles nøgletal for en sammenligning mellem stål og aluminium ved mekanisk samling, men der må generelt regnes med større omkostninger.

I de tilfælde hvor både mekanisk samling og svejsning er egnet, viser erfaringerne, at svejseprocessen bliver foretrukket. Ligesom ved stål anses svejsning for at være både billigere og hurtigere. Samtidig elimineres på en nem måde mulighederne for korrosion i de spalter, der uvægerligt vil opstå ved bolte- og nittesamlinger, hvor det ville være nødvendigt, at foretage en fordyrende beskyttelse af spalteåbninger og bolt eller nitte

5.6.3 UDDANNELSE

En faglig teknisk uddannelse indenfor jern- og maskinindustrien vil generelt være tilstrækkelig til at arbejde med mekaniske samlinger af aluminiumkonstruktioner.

Vedrørende træning og uddannelse ifølge virksomhedens procedurer og instruktioner bør der som minimum indgå følgende:

- Kendskab til aluminium og dets egenskaber.
- Kendskab til fejl og fejlretning.
- Kendskab til firmaspecifikke mekaniske samleprocesser.

Det sidste punkt refererer til alle de mekaniske samleprocesser, hvor der er udviklet specielle samlingssystemer. Her bør virksomheden sørge for at metoderne er godt indarbejdede gennem passende træning, og i nogle tilfælde vil det være muligt, at leverandørerne af samlingssystemerne gennemfører kurser for deres kunder.

5.7 REFERENCER

Litteratur

- [1] ENV 1999-1-1:1998 Eurocode 9: *Design of aluminium structures*
Part 1-1: General rules and rules for buildings.

- [2] DS 419:2000 *Aluminiumkonstruktioner*, Forslag til Dansk Standard

- [3] Bossard AG Schrauben, *Fachtechnische Information 4: Verbindungstechnik*
in blech.

- [4] SAPA, *Håndbogen om aluminium profiler*.

Tekniske rapporter

SASAK-RAP-ME-AKS-FI-0003-01, *Eksperimentel bestemmelse af friktionskoefficienter for boltede aluminiumsamlinger*

SASAK-RAP-ME-AKS-MCI-0005-01, *Mekanisk interlocking – TOX-joining*

SASAK-RAP-ME-AKS-MCI-0006-00, *Anvendelse af skruer og nitter*

SASAK-RAP-ME-AKS-FI-0007-00, *Procedure for korrosionsbeskyttelse af mekaniske sammenføjninger*

SASAK-RAP-ME-AKS-MCI-0008-00, *Eksempel på sammenføjning af sidepanel – svejsning, limning og mekanisk sammenføjning*

SASAK-RAP-ME-AKS-FI-0009-00, *Bestemmelse af friktionskoefficienter for aluminiumsamlinger med ANSYS*

SASAK-RAP-ME-AKS-FI-0010-00, *Korrosionstest af nittesamlinger på aluminium*

6 Levetid

6.1 UDMATTELSE AF SVEJSTE ALUMINIUMSKONSTRUKTIONER

6.1.1 INDLEDNING

Udmattelse kan defineres, som den skade der opstår i en konstruktionsdetalje ved revnedannelse og efterfølgende revnevækst forårsaget af gentagne belastninger.

Generelt opstår udmattelsesrevner i svejste konstruktioner ved belastninger, der er væsentligt lavere end den maksimale statiske belastning, som den svejste konstruktion tillades udsat for.

Af ovennævnte kan man fornemme, at udmattelsesproblemer ofte opstår efter, at opstillings- indkørings- og idriftsættelsesproblemer er løst tilfredsstillende.

Det er set ikke så få gange, at en udmattelsessituation medfører ”panikagtige løsninger” der her og nu tilfredsstiller kravet om fortsat drift. Men hvis der ikke tages hånd om problemet vil problemet vende tilbage.

Hurtige reparationer kan have en lav kvalitet, hvilket medfører at udmattelsen hurtigt opstår igen.

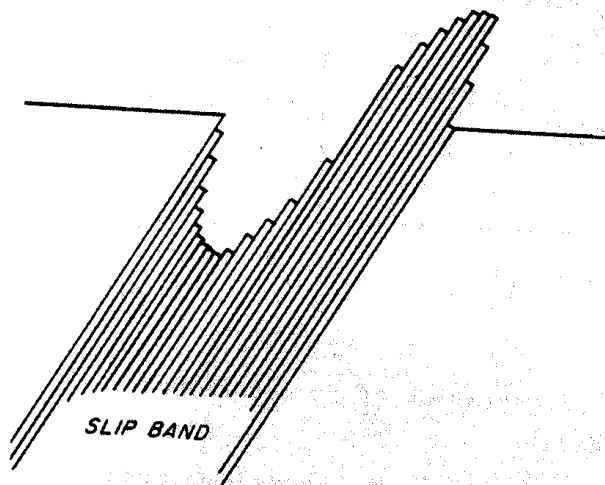
I det følgende er det forsøgt at give en generel viden om udmattelse i svejste konstruktioner med tilhørende principper for dimensionering.

6.1.2 UDMATTELSESKARAKTERISTIKA

Der er 3 betingelser, der skal være opfyldt for at få udmattelsesrevner i en konstruktion.

Konstruktionen skal udsættes for varierende belastninger. Disse varierende belastninger skal et eller andet sted i konstruktionen give anledning til varierende trækspændinger. Størrelsen af disse spændinger skal i det mindste lokalt give anledning til plastisk tøjning.

Den plastiske tøjning sker ved en slipmekanisme, og fordi slip sker på mange slipplaner inden for et slipbånd, kan den reverserende plastiske tøjning med tiden udvikle en egentlig revne som illustreret på nedenstående Figur 6.1



Figur 6.1 Slip bånd.

I en konstruktionsdetalje, hvor der er dannet en udmattelsesrevne, er der ikke synlige plastiske deformationer i materialet omkring revneoverfladen. Endvidere er selve revnen meget skarp og ofte fremkommet i forbindelse med en kærvanvisning i materialet.

Ovennævnte forhold gør det vanskeligt, at konstatere udmattelsesrevner alene ved visuel inspektion af en svejst konstruktion, så længe revnerne er små.

Findes en sådan revnedannelse, er det ikke muligt med sikkerhed at verificere, at der er tale om udmattelsesrevnedannelse alene på baggrund af ovennævnte visuelle karakteristika.

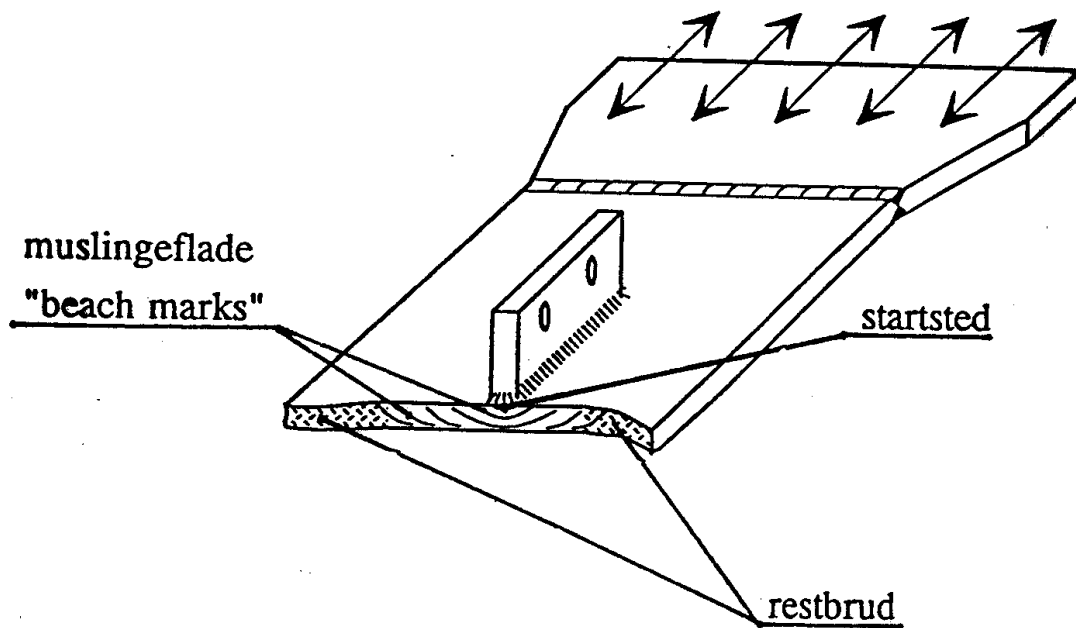
I mange tilfælde opdages udmattelsesrevner ikke før end der sker et havari af den pågældende konstruktionsdetalje som følge af, at det bærende areal er reduceret så meget, så der til slut opstår et restbrud.

Er restbruddet opstået, kan man ved at inspicere de friske brudflader, ofte med stor sikkerhed fastslå, at der er tale om udmattelse.

Brudfladen i forbindelse med udmattelse har normalt et karakteristisk udseende med 2 eller 3 typiske områder. I langt de fleste tilfælde starter udmattelsesrevner i konstruktionsdetaljens overflade på eller ved en eller anden kærvanvisning; i sjældne tilfælde kan udmattelsesbrud dog starte fra fejl inde i materialet, her skal man specielt være opmærksom på indvendige fejl i forbindelse med de svejste konstruktioner.

Uanset om revnedannelsen starter på overfladen eller inde i materialet, vil området omkring startstedet have et glat muslingeagtigt udseende. Der vil ofte være en tendens til, at det glatte område bliver mindre glat, jo mere man fjerner sig fra startstedet. Foruden de koncentriske ringe (beach markings), som giver overfladen det muslingeagtige udseende, findes der ofte radiale linier, som stråler ud fra startstedet.

Figur 6.2 viser et skematisk billede af et udmatteshavari med startsted, "beach markings" og restbrud.



Figur 6.2 Skematisk billede af visuelle karakteristika på en udmattelsesbrudflade.

En vigtig information ved udmattelse er, at revnen generelt udvikler sig i et plan vinkelret på belastningsvariationsretningen. Efterhånden som revnen udbreder sig, øges spændingen i resttværsnittet, og som følge heraf udbreder revnen sig med stadig større hastighed. Til slut når man en situation, hvor resttværsnittet ikke længere kan bære belastningen, og resultatet bliver, at der sker et hurtigt restbrud.

Hvis der er tale om udmattelse ved små belastningsvariationer, vil udmattelsesrevnefladen være relativ stor i forhold til restbruddet; medens det omvendte vil være tilfældet, hvis der er tale om udmattelse ved store belastningsvariationer.

Restbruddet vil i de almindelige svejsbare aluminiumslegeringer være sejt med plastiske deformationer i grundmaterialet op mod restbrudområdet og "shear lips" (45°-hældning) på brudfladen.

Ved en makroskopisk undersøgelse af brudfladen kan man som regel uddrage en række væsentlige informationer angående brudårsagen.

En sådan undersøgelse af brudfladen vil normalt, dels vise hvor revnen er startet, dels give en ide om belastningens størrelse. Thi som nævnt tidligere, vil belastningsstørrelsen have indflydelse på størrelsesforholdet mellem udmattelsesrevneudbredelsen og restbruddet, og endvidere vil der ofte kun være et startsted for udmattelse ved et lavt belastningsniveau, hvorimod der vil være flere startsteder i tilfælde af højt belastningsniveau.

De "beach markings" (undertiden kaldet rastelinier), som ofte findes på udmattelsesbrudflader, og derved giver deres karakteristiske muslingeagtige udseende, er som regel et udtryk for en ændring i belastningsniveauet på det tidspunkt, hvor udmattelsesrevnen var nået dertil, hvor rastelinien findes.

Det skal understreges på dette sted, at man almindeligvis ikke bør undlade en mikroskopisk undersøgelse af brudflader, idet det kan være vanskeligt alene ud fra en makroskopisk undersøgelse at afgøre om f.eks. korrosion har haft nogen indflydelse, eller om revnen er startet ved en fejl i materialet eller blot ved en konstruktiv kærv.

Da der ofte går lang tid fra en udmattelsesrevne initieres, og til revnen opdages, kan den undertiden være korroderet. Herved vanskeliggøres både de makroskopiske og de mikroskopiske undersøgelser.

Men uanset om brudfladen er korroderet eller ej, er det meget vigtigt, at man så hurtigt som muligt efter havariet beskytter hele brudfladen mod yderligere korrosion og andre ydre påvirkninger (lad være med at sætte brudfladerne sammen), så man kan få et så realistisk billede som muligt af brudfladerne umiddelbart efter havariet.

Til slut skal det kraftigt understreges, at man altid bør undersøge revner og brud, før de repareres; idet praktisk taget alle informationer vil ødelægges ved en reparation.

6.2 GRUNDLÆGGENDE FORHOLD VEDRØRENDE SVEJSTE SAMLINGERS UDMATTELSESTYRKE

Dimensionering af svejste samlinger i aluminium overfor udmattelsepåvirkning foretages generelt ud fra udmattelseskurver (S-N kurver), hvor 3 grundlæggende forhold indgår:

- Spændingsviddens størrelse i grundmaterialet. Det vil sige forskellen mellem den største og den mindste spænding i en lastcyklus.
- Den konstruktive udformning. Nærmere betegnet, placeringen af den svejste detalje i en given svejse kvalitet i forhold til spændingsretningen.
- Antal påvirkninger (lastcykler) inden for hvilket konstruktionen med en given sandsynlighed forventes at "overleve".

Det er i den sammenhæng vigtigt at være opmærksom på, at grundmaterialets statiske styrke (brudstyrken) ikke på nogen måde indgår i ovennævnte udmattelsesvurdering af den svejste detalje.

Et udmattelsesproblem i en svejst detalje kan altså ikke reddes ved at vælge en stærkere aluminiumlegering.

Omvendt kan en hensigtsmæssig konstruktiv udformning medføre, at højstyrke aluminiumlegeringer med fordel kan anvendes i udmattelsepåvirkede konstruktioner. Dette kræver nøje overvejelse af, hvordan de svejste detaljer kan placeres i områder med lave spændingsvidder, og hvorledes de ikke-svejste konstruktionselementer med god overfladefinish kan virke, hvor spændingsvidden er stor.

Er en svejst konstruktionsdetalje revnet på grund af udmattelsesbelastning, vil en reparation til samme kvalitet som oprindeligt, principielt give samme udmattelsestyrke som oprindeligt. Det er i den

sammenhæng vigtigt ikke at forglemme, at de øvrige detaljer i konstruktionen kan få udmattelsesrevner umiddelbart efter idriftsættelse af den reparerede konstruktion.

Alle forhold omkring den svejste detalje, der medfører forøget spænding (tøjning) f. eks. Konstruktive kærve, lav svejsekvalitet, fremadskridende korrosion, forhøjet drifttemperatur etc. Resulterer i en forringet "levetid".

En forøgelse af spændingsvidden til det dobbelte i en svejst detalje medfører en forringelse af levetiden med ca. en faktor 9.

Det er en "myte", at aluminium ikke har nogen nedre grænse for udmattelsestyrken som kendes fra stål. I normer som f. eks. Eurocode 9 og BS 8118 er der angivet nedre grænser for udmattelsestyrken. Endvidere er det interessant, at hældningen på udmattelseskurverne for aluminium i Eurocode 9 er fladere end udmattelseskurverne for stål i Eurocode 3 for den samme svejste detalje. Godt nok er udmattelsesstyrken af aluminium væsentlig lavere end for stål; men i konstruktioner, hvor egenvægten giver udmattelsepåvirkningen vil denne også være væsentlig lavere når den er udført i aluminium. Med en fladere hældning af udmattelseskurven vil fordelene, ved at udføre konstruktionen i aluminium, altså blive relativt bedre jo større et antal belastninger konstruktionen skal udsættes for!!!

Man kan også tænke på design, hvor fordelene ved aluminiums relative gode overfladefinish tages i betragtning; men det kræver som tidligere nævnt at svejsesamlinger kan henlægges til lavt belastede områder.

6.3 BEREGNINGSMETODER FOR SVEJSTE KONSTRUKTIONER

6.3.1 BAGGRUND

Dimensionering af svejsesamlinger i aluminiumssamlinger vil ofte være baseret på krav til udmattelsestyrken. Dette gælder for strukturelle elementer udsat for tidsvarierende belastninger hidrørende eksempelvis fra roterende maskiner/motorer eller bølge/vindpåvirkninger fra omgivelserne.

Mulige valg af beregningsmetoder til bestemmelse af forventet levetid af aluminiumssamlinger vil blive belyst i dette afsnit.

6.3.2 BEREGNINGSMETODER

Den mest nøjagtige metode er udmattelsestest af konstruktionsdetaljen; men det er en dyr og tidskrævende metode, som desuden kan være svær at gennemføre under samme betingelser som for den virkelige detalje. Metoden er destruktiv og man må derfor teste en kopi af detaljen, ofte i en mindre skala. Randbetingelser er normalt også anderledes, da testen foregår på et afgrænset prøvestykke og dermed ikke medtager stivhedsegenskaberne af den omliggende struktur. Endeligt er belastningen også kun en approksimation til den virkelige belastning og desuden må belastningsvariationen ofte gøres hurtigere for at få udmattelsesdata inden for en overskuelig prøvetid.

Disse forhold gør, at egentlige udmattelsestest af konstruktionsdetaljer sjældent udføres; men derimod benyttes udmattelsestest til bestemmelse af SN-kurver for karakteristiske konstruktionsdetaljer eller til bestemmelse af materialedata til brug i brudmekaniske beregninger.

Alternativet til udmattelsestest er beregninger. Her findes to metoder. Den ene baseret på kendskab til en sammenhæng mellem spændingsamplitude og antal belastninger før brud. Denne sammenhæng angives som en SN-kurve og antager normalt, at logaritmen til antal belastninger før brud afhænger lineært af logaritmen til spændingsamplituden. Metoden er den hyppigst benyttede til design, men kræver, at der findes en SN-kurve for den aktuelle konstruktionsdetalje. For stålkonstruktioner findes en lang række SN-kurver gældende for typiske konstruktionsdetaljer. Spændingsamplituden er i disse formler oftest en nominel spænding som kan bestemmes ved simple elementartilfælde eller ved standard bjælkeanalyser. Såfremt spændingsamplituden derimod refererer til spændingen tæt på området, hvor udmattelsesbruddet starter, kan man ofte klare sig med én SN-kurve, baseret på den lokale geometri omkring svejsningen. Spændingsbestemmelsen skal så til gengæld være mere nøjagtig og kræver normalt anvendelse af endelige elementers metode (Finite Element Method, FEM).

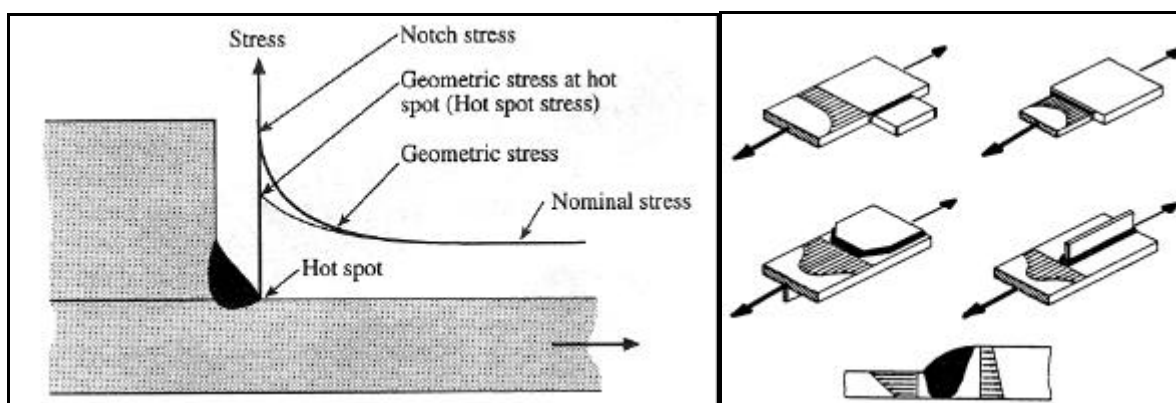
SN-kurverne siger intet om revnegeometri eller revnelængde ved brud og kan således ikke benyttes til at vurdere om en målt revne er kritisk og derfor bør repareres snarest eller om man kan vente til et senere eftersyn til reparationen. Hertil kan i stedet benyttes egentlige brudmekaniske beregninger baseret på en kendt sammenhæng mellem revnevækst per belastningsperiode og den såkaldte spændingsintensitetsfaktor. Sidstnævnte faktor afhænger af såvel spændingsniveauet og den aktuelle revnegeometri. Den strukturelle analyse må udføres ved brug af FEM, da spændingen afhænger af revnegeometrien.

Ovenstående problematik har været behandlet i flere SASAK rapporter: [1]-[7]. Nærværende indlæg er i hovedtrækkene baseret på disse rapporter. Udmattelsestest er beskrevet i rapporterne [5]-[7] og skal ikke nærmere kommenteres her. Beregningsmetoderne kan opdeles i den strukturelle spændingsanalyse og i den efterfølgende bestemmelse af tid til udmattelsesbrud.

6.3.3 STRUKTUREL ANALYSE

I den strukturelle analyse skelner man mellem tre spændingsdefinitioner, se Figur 6.3.

- Den nominelle spænding (Nominal stress)
- Den geometriske spænding (Hot spot stress)
- Kærvspændingen (Notch Stress)



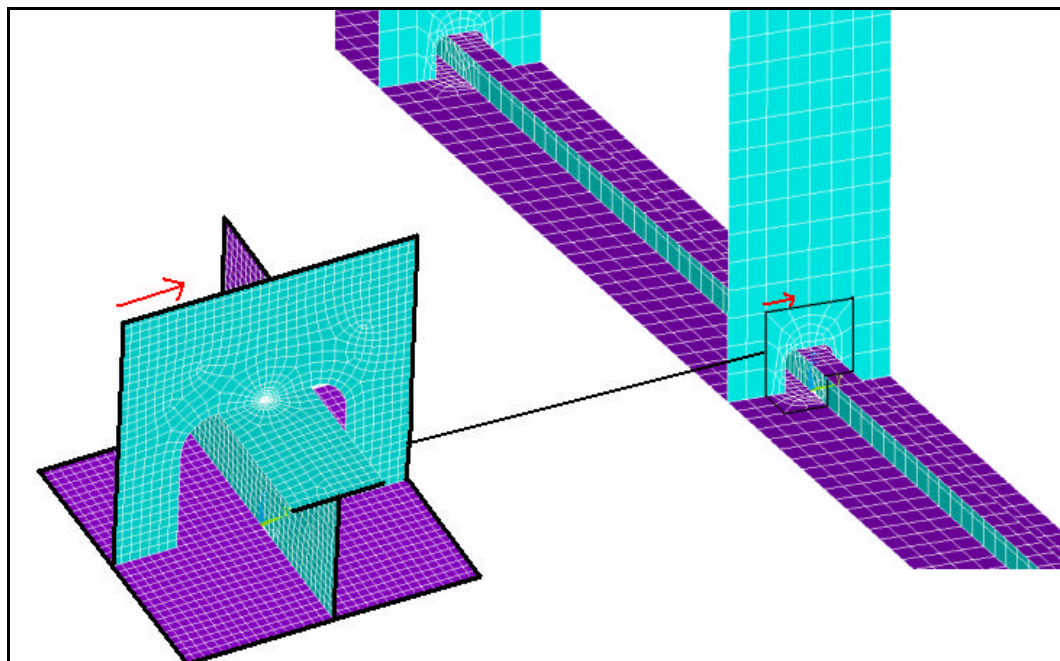
Figur 6.3 Definition af spændinger til brug ved udmattelsesberegninger. Til højre er vist eksempler på geometriske spændinger.

Nominelle spændinger kan ofte beregnes ved standard bjælkeanalyser eller ved opslag i tabeller over standard elementartilfælde for simple bjælker med veddefinerede randbetingelser og belastning. Som et eksempel kan nævnes en fast indspændt bjælke med en konstant linielast p . Her bliver den nominelle spænding ved indspændingen lig med $pL^2/12W$, hvor L er bjælkens længde og W dens modstandsmoment. For mere komplicerede konstruktioner, hvori der indgår pladefelter og/eller tykvæggede strukturelle elementer, kan de nominelle spændinger i de kritiske områder beregnes ved en relativ grov FEM analyse. Sådanne analyser kunne dreje sig om motorfundamenter til dieselmotorer eller vandjets. Beregningerne er karakteriseret ved at der i modelleringen ikke tages hensyn til svejsningens geometri eller lokale geometriske forhold.

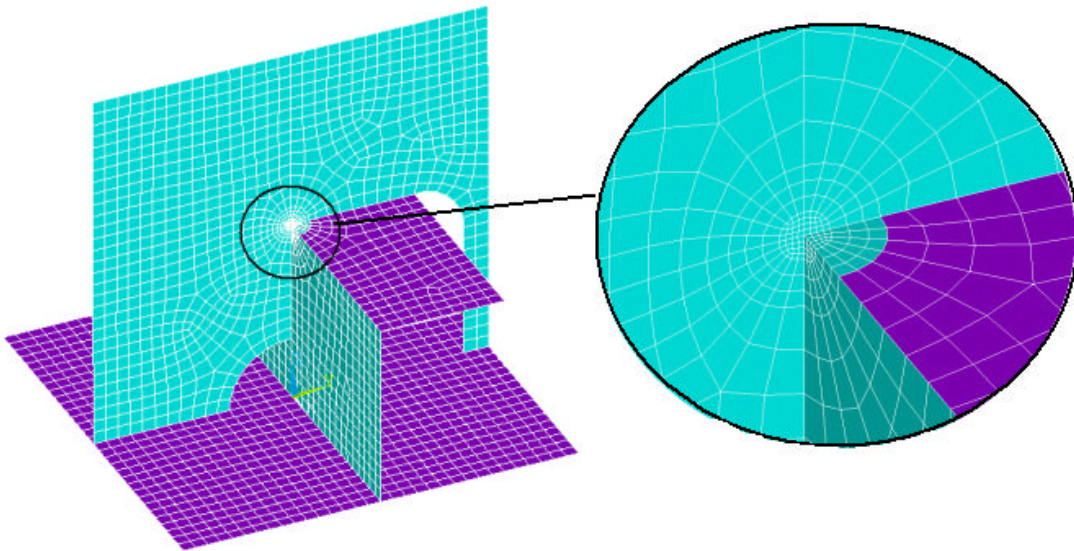
For at benytte nominelle spændinger i beregningen af udmattelsesstyrken må man korrigerer for, at den aktuelle kærvspænding kan være væsentligt større end den nominelle spænding. Dette gøres ved en spændingskoncentrationsfaktor K , defineret som forholdet mellem kær vspændingen og den nominelle spænding. Generelt kan denne faktor skrives som produktet af to faktorer: $K = K_w \cdot K_t$, hvor den første faktor udtrykker forholdet mellem kær vspændingen og den geometriske spænding og den sidste faktor forholdet mellem den geometriske spænding og den nominelle spænding. Specielt skal nævnes, at K_t indeholder effekten på spændingsniveauet af excentriciteter i samlingen, som illustreret i Figur

6.3. Undertiden opdeles K_t yderligere i faktorer, der henholdsvis tager hensyn til den ideale lokale geometri og unøjagtigheder i såvel excentricitet og vinkeldrejning i samlingen. Der findes i litteraturen tabeller over K_t værdier for standard samlinger. For aluminiumskonstruktioner findes generelle retningslinier for bestemmelse af udmattelsesstyrken af aluminiumskonstruktioner i EUROCODE No.9, Part 2 (ENV 1999-2:1998). I [3] er givet en kort introduktion til anvendelse af dette regelsæt. For skibsområdet har blandt andet Det Norske Veritas udarbejdet sådanne tabeller for typiske aluminiumssamlinger i højhastighedsfartøjer (HSC).

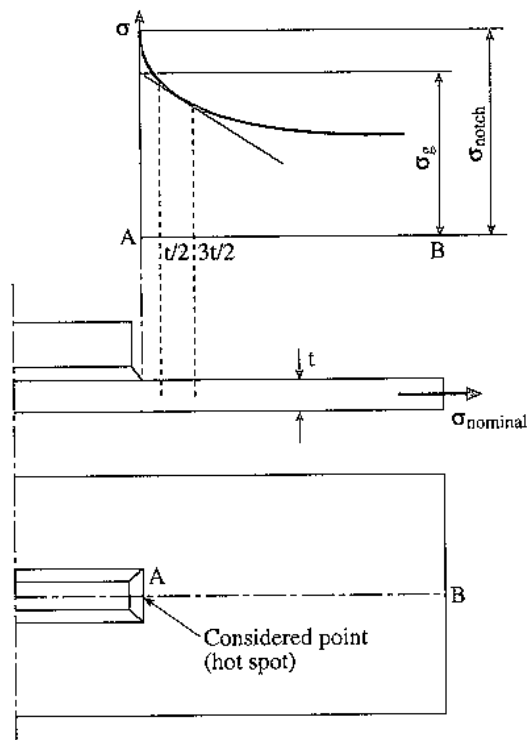
Såfremt der ikke findes en K_t faktor for den aktuelle konstruktionsdetalje må faktoren beregnes ved hjælp af en detaljeret FEM analyse, hvori såvel den lokale geometri som excentriciteter og andre geometriske unøjagtigheder er modelleret. Derimod skal selve svejsningen ikke modelleres, idet den medtages gennem faktoren K_w . I referencerne [1], [2] og [4] er givet en grundig beskrivelse af hvorledes sådanne FEM analyser bør udføres for at få en tilstrækkelig nøjagtighed i beregningen af den geometriske spænding. Specielt skal fremhæves, at brug af substrukturering og et forfinet net omkring de kritiske punkter gør forberedelse af inddata og selve beregningerne lettere, specielt hvis man har adgang til en skabelon for netgenerering som f.eks. den, der er udviklet i [1]. Det skal dog bemærkes, at det kræver nogen erfaring med FEM samt en forståelse for randbetingelser og kraftoptaget i en konstruktion at kunne forberede inddata, som giver en tilstrækkeligt nøjagtig beregning af den geometriske spænding. Endeligt skal fremhæves, at den geometriske spænding ved svejseroden må bestemmes ved ekstrapolation som vist i Figur 6.6, idet dette punkt spændingsmæssigt er singulært.



Figur 6.4 Eksempel på FEM analyse ved brug af substrukturering, [1].



Figur 6.5 Forfinet net omkring den kritiske detalje, [1].



Figur 6.6 Bestemmelse af den geometriske spænding ved hjælp af ekstrapolation, [1].

Kærvspændingen og dermed også spændingskoncentrationsfaktoren K_w kan i princippet bestemmes ved en yderligere forfining af beregningsnettet omkring det kritiske punkt. Imidlertid er

usikkerhederne i selve svejsegeometrien og de indbyggede svejse-spændinger så store, at disse beregninger normalt ikke udføres. I stedet benyttes erfaringsværdier givet f.eks. af klassifikationsselskaberne. Typiske værdier af K_w er 1,5-1,7.

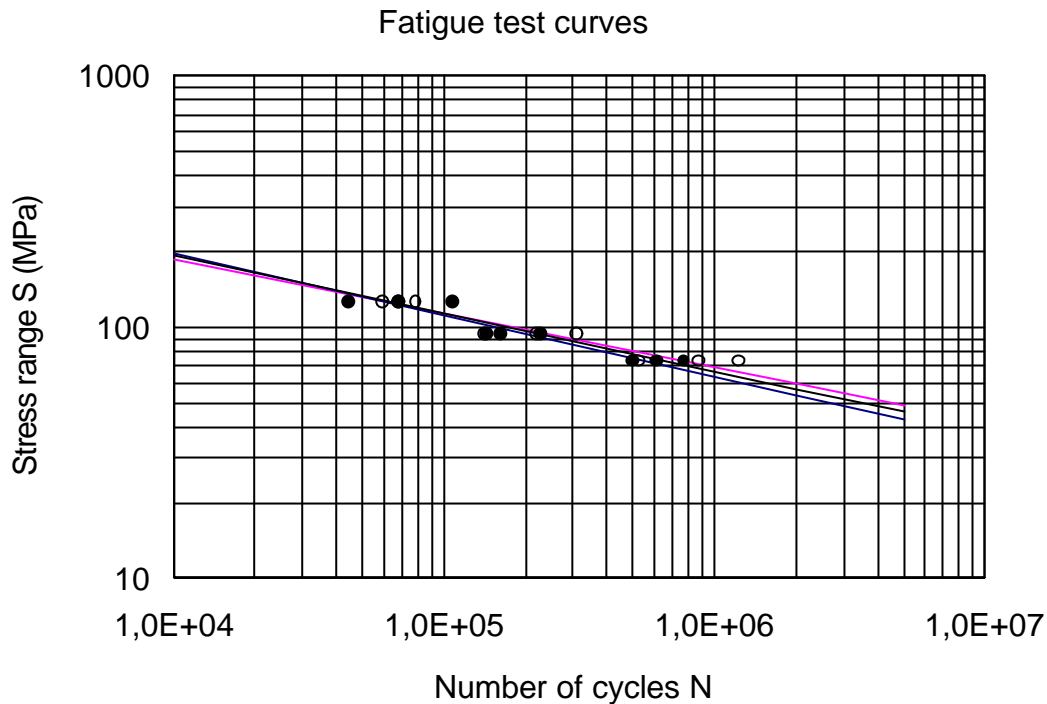
6.3.4 LEVETIDSBESTEMMELSE

Med kendskab til kærvspændingen kan levetiden estimeres ud fra SN-kurver, bestemt for svejsninger i aluminium. Disse kurver vil alene afhænge af materialet i basematerialet og i svejsetråden. Typiske SN-kurver er givet bl.a. af Det Norske Veritas; men der kan være store spredninger på disse kurver. Man vælger typisk kurver, defineret som middelværdien minus to gange standardafvigelsen af de eksperimentelle værdier for at være på den konservative side. Inden man bruger en opgivet SN-kurve er det vigtigt, at man er klar over forudsætninger for denne kurve med hensyn til materiale (base og svejsemateriale), spændingsmål (kærvspænding eller geometrisk spænding, spændingsamplitude eller spændingsvidde $S = 2 \times$ spændingsamplitude) og eventuelt korrosivt miljø, samt ikke mindst kvaliteten af svejsningen.

For en given konstant spændingsvidde S giver SN-kurven direkte den forventede levetid målt i belastningsperioder N før brud:

$$N = a S^{-m}$$

hvor a og m er de konstanter, der karakteriserer SN-kurven. Typiske værdier for m er 3-5 og undertiden kan disse værdier variere med N . Et eksempel på typiske værdier for en svejst aluminiumssamling i et korrosivt miljø er (Det Norske Veritas) $a = 11,44$ og $m = 3,37$ med S målt i MPa. Andre kurver er givet i [7]. Hvis der ikke findes SN-kurver for den aktuelle svejssamling må man udføre nye udmattelsesforsøg til bestemmelse af SN-kurven. Et eksempel er vist i Figur 6.7, udført af FORCE i SASAK projektet.



Figur 6.7 Eksempel på bestemmelse af SN-kurve for svejst aluminiumssamling, FORCE.

Levetiden beregnes til slut som $N T$, hvor T er belastningsperioden, d.v.s. tiden fra et spændingsmaksima til det næste spændingsmaksima.

Såfremt belastningen og dermed spændingen ikke er rent periodisk; men har varierende maksima over tiden, kan Miner's summationsregel eventuelt suppleret med brug af rain-flow counting metoden benyttes [3]. Dermed opnås et indeks D , hvor $D > 1$ indikerer, at brud kan forventes. Metoden giver resultater i god overensstemmelse med målinger; men den kan ikke medtage indflydelsen af den rækkefølge, hvormed de store og de små spændingsmaksima forekommer. For kritiske detaljer, som desuden er svære at inspicere, benytter man derfor ofte $D = 0,1$ som kriterium for brud for at være på den konservative side. Stokastiske spændingsvariationer kan behandles på tilsvarende måde ved brug af Miner's summationsregel.

6.3.5 BEREGNING AF REVNEUDBREDELSE

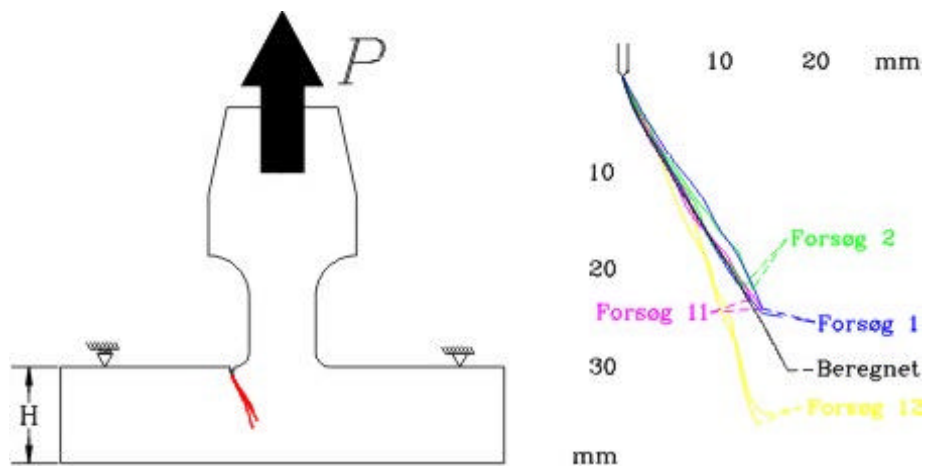
Alternativet til direkte udmattelsestest eller brug af SN-kurver er brudmekaniske beregninger. Denne metoder baserer sig på en antagen variation, Paris-Erdogans lov, mellem revnevæksten da/dN per belastningsperiode og spændingsintensitetsfaktoren ΔK :

$$da/dN = C(\Delta K)^m$$

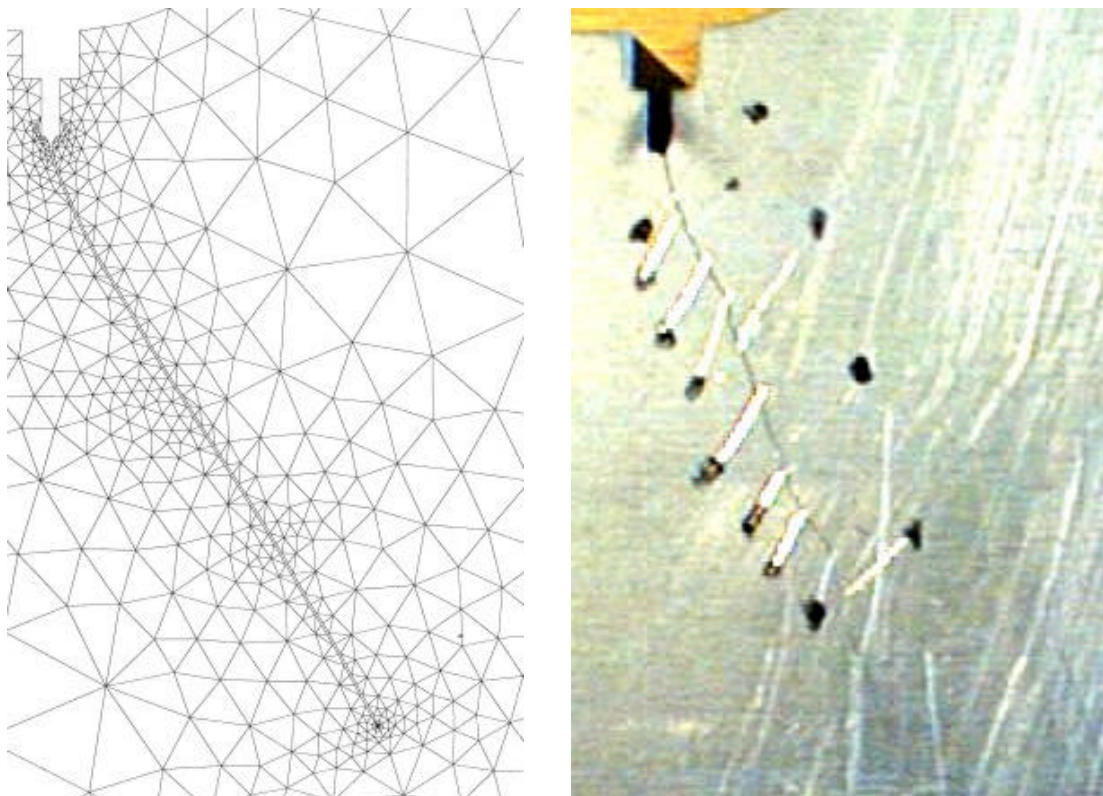
hvor a er den halve revnelængde, N antal af belastningsperioder, C og m materialekonstanter (m er den samme som i SN-kurven) og ΔK givet ved

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = S (\partial a)^{1/2} Y(a)$$

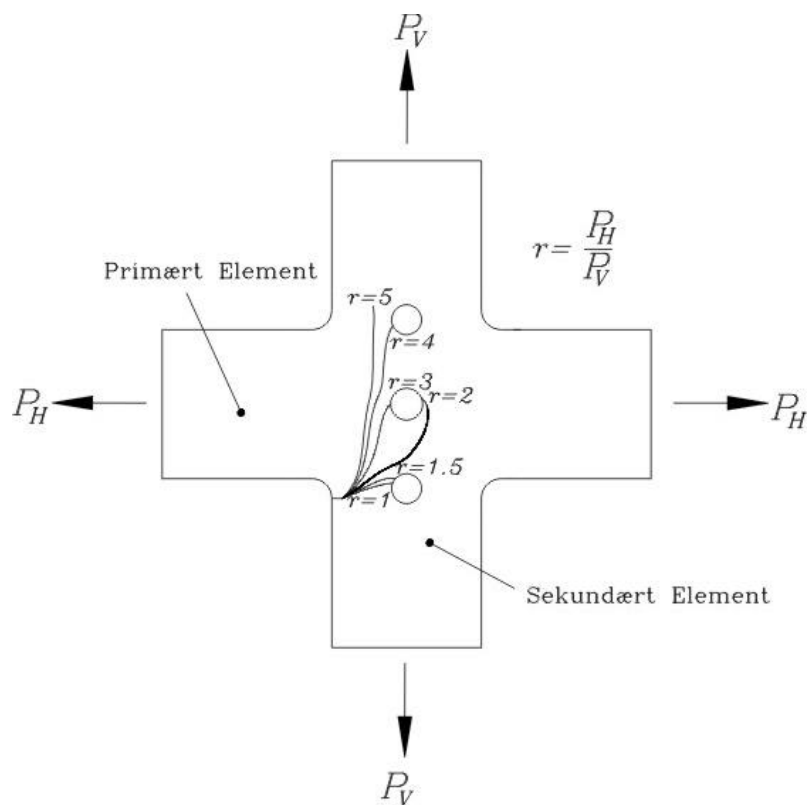
hvor S er spændingsvidden ved revnespidsen og Y en korrektionsfaktor, der tager hensyn til den aktuelle geometri af revnen. I [5] er beregningsmetoden grundigt beskrevet og illustreret med flere eksempler. Da både S og $Y(a)$ ændrer sig under revnevæksten må beregninger udføres inkrementelt, d.v.s. med en trinvis forøgelse af revnelængden. Dette betyder, at man må benytte en numerisk metode som FEM til spændingsanalysen. En lineær elastisk formulering er normalt tilstrækkeligt, idet den plastiske zone er koncentreret omkring revnespidsen og dermed ikke influerer på den overordnede spændingstilstand. For at få en effektiv beregningsmetode er det nødvendigt med en form for netgenerering, som automatisk opdaterer beregningsnettet, så det passer med den aktuelle revnegeometri. En effektiv metode er givet i [5], hvorfra også Figur 6.8 og Figur 6.9 er taget. For plane detaljer med en veldefineret kærvtal til revneinitieringen er brudmekaniske beregninger normalt meget nøjagtige og kan give oplysninger om såvel revnehastighed og revnegeometri. Metoden kan dermed også benyttes til at bestemme om en revne lukker sig eller vil vokse til brud. Et eksempel er vist i Figur 6.10.



Figur 6.8 Eksempel på målt og beregnet revnevækst i plant prøveemne med startkærv, [5].



Figur 6.9 Målt revne i prøveemnet fra Figur 6.8 (højre) og tilhørende numerisk beregning (venstre), [5]



Figur 6.10 Numerisk bestemmelse af revnevækst i et plant kryds med letningshuller udsat på træk i to retninger, [5].

Brudmekaniske beregninger er derimod meget mere komplicerede at udføre i svejste samlinger dels på grund af et betydeligt mere inhomogent materiale i den varmepåvirkede zone og dels fordi en veldefineret revneinitiering mangler. Derfor er brudmekaniske beregninger næppe i dag et brugbart alternativ til SN-kurver for svejste samlinger.

6.4 SÆRLIGE FORHOLDSREGLER VED UDMATTELSE

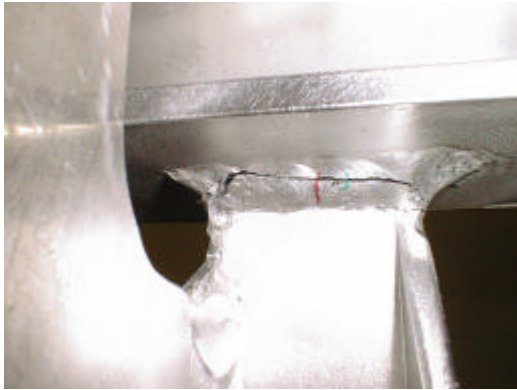
Der er i SASAK arbejdet med udmattelsesproblematikken i aluminium i forbindelse med svejsninger. Dette er gjort ved udmattelsestest på industrielt fremstillede modeller repræsenterende virkelige forekomne detaljer i en skibsbund. Endvidere er der for verifikation fremstillet nogle mere simple "laboratorie modeller".

6.4.1 SVÆKKELSE

Reparation af en svejsning reducerer ikke i sig selv levetiden. Når der alligevel kan ses forskellige levetider for reparerede svejsninger skyldes dette, at revnerne optræder forskellige steder i/omkring svejsningen afhængigt af om det er en førstegangssvejsning eller en repareret svejsning.

Den første udmattelsesrevne vil normalt udbrede sig i svejsemetallet, mens en revne efter reparation oftest udbreder sig i HAZ ca. 1.5 benlængde fra centerlinien fra svejsningen.

Grunden hertil er, at HAZ området også er udmattelsespåvirket, men ikke nok til at initiere en revne i denne region. Når så svejsningen repareres, nulstilles selve svejsefugen levetidsmæssigt, da den er blevet slebet op og nyt tilsatsmateriale ilagt. Derimod er en stor del af ”levetiden” brugt i det omkringliggende materiale, hvorfor restlevetiden er lav, så det nødvendige antal påvirkninger for revne initiering vil her hurtigt nås. Et eksempel på de to placeringer af revnerne kan ses i Figurene herunder.



Figur 6.11 Revne i svejsesømmen på emnet svejst en gang.



Figur 6.12 Revne i HAZ for den reparerede svejsning.

Det er således ikke nødvendigvis den nye svejsning med nye mulige revneinitiatorer som indeslutninger, porer etc., der er ansvarlig for et fald i udmattelseslevetid, men oftere det varme påvirkede område (HAZ) fra den tidligere svejsning.

Dette betyder at hvis en svejserevne skal udbedres skal den omkring liggende struktur udskiftes og/eller skal det strukturelle design ændres.

Ovenstående problematik er behandlet i rapporten SASAK-RAP-LE-AKS-KEH-0006-03.

Nedsættelse af levetiden for en svejst detalje er således et spørgsmål om restlevetid og ikke om svejsning generelt nedsætter styrken og dermed levetiden for HAZ.

Gentagende varmepåvirkninger påvirker ikke styrken og dermed heller ikke udmattelseslevetiden af HAZ. Verificerende forsøg er beskrevet i SASAK-RAP-E5-AKS-FI-0001-00.

Opmærksomheden henledes dog på, at udmattelsesproblematikken er meget afhængig af den lokale geometri, og eventuelle slibefejl, størknings revner etc.

Hvis ikke en reparation udføres til det valgte kvalitetsniveau, vil levetiden nedsættes fordi der indføres geometriske fejl. Samtidig er det vigtigt at konstruktionens stivhed er den samme efter reparations svejsning som før, da dette ellers vil medføre et andet spændingsniveau og dermed en anden udmattelsesstyrke.

Emnet er behandlet i SASAK-RAP-LE-AKS-KEH-0011-01.

6.4.2 FORBEDRENDE TILTAG.

I svejsesamlinger som involverer risiko for potentiel udmattelse på grund af en svejsetå, kan levetiden forbedres med mindst en faktor 2 ved kontrolleret lokal slibning, f.eks. med en roterende slibesten eller stålborste. Behandlingen skal ende med en jævn konkav profil af svejse tåen (kant sømmen) ned i pladeoverfladen, mindst 0.5 mm under den synlige sidekærv. Den maksimale slibe dybde bør ikke overstige 2 mm eller 5% af plade tykkelsen. Hvis en roterende slibesten bruges skal stenen have en diameter på mindst 6 mm for at få en rimelig rundingsradius.

Sørg også altid for at adkomstforholdene er så optimale som muligt, da dette har en stor indflydelse på svejsningens kvalitet. Se endvidere afsnittet om kvalitet i Kapitel 3. Se evt. også SASAK-RAP-MO-AKS-KEH-001-02.

6.5 DIMENSIONERING AF UDMATTELSESBELASTEDE SVEJSTE SAMLINGER I ALUMINIUM EFTER EUROCODE NO. 9 PART 2.

6.5.1 INDLEDNING

Dette materiale er udarbejdet med det formål at give indsigt i anvendelsen af ENV 1999-2:1998 (Eurocode 9 part 2):

Udmattelsespåvirkede konstruktioner i aluminium.

Nærværende materiale er ikke en total gengivelse af alle forhold omkring udmattelse anført i Eurocode 9 part 2, men er udfærdiget med henblik på at kunne anvende normens dimensioneringsprincip på enkle svejsesamlinger.

6.5.2 GRUNDLAG

Eurocode 9 part 2 angiver designregler efter 3 forskellige metoder (angivet på Engelsk):

- Safe life
- Damage tolerance
- Design by testing

Endvidere indeholder part 2 specifikke krav til fremstillingskvaliteten af svejste aluminiumskonstruktioner, for at sikre at designforudsætningerne er overholdt.

Part 2 dækker de legeringer, der er anført på side 8 i normen (tabel 1.1.1 og tabel 1.1.2)

Designreglerne er begrænset med hensyn til drifttemperatur (maks. 65° - 100°C afhængig af legering). Endvidere forudsættes det, at der ikke forekommer fremadskridende korrosion.

6.5.3 DEFINITIONER

I forbindelse med Eurocode 9 part 2 er følgende betegnelser defineret:

- **Udmattelse:** Svækkelse af en konstruktionsdel ved gradvis revneudvikling forårsaget af gentagne spændingsvariationer.
- **Udmattelseslast:** Et sæt typiske lastbegivenheder beskrevet ved lasternes placering eller bevægelser, deres intensitet og deres relative hyppighed.
- **Lastbegivenhed:** En defineret lastsekvens, der påvirker konstruktionen og gentages med en given frekvens.
- **Nominal spænding:** En spænding i grundmaterialet, der grænser op til et potentielt revneområde, beregnet i overensstemmelse med simpel elasticitetsteori uden hensyn til spændingskoncentrationer.

- **Modificeret nominal spænding:** En nominal spænding forøget med en passende spændingskoncentrationsfaktor K_{gt} , for at tage hensyn til en geometrisk diskontinuitet, der ikke indgår i klassifikationen af en bestemt konstruktionsdetalje.
- **Geometrisk spænding:** I princippet svarer det til ovennævnte modificerede nominelle spænding. Ved beregningen tages der ikke hensyn til små diskontinuiteter som f.eks. sidekærve, revner, bearbejdningsspor etc.
- **Geometrisk spændingskoncentrationsfaktor K_{gt} :** Forholdet mellem den geometriske - og nominelle spænding.
- **Hot spot spænding:** Den geometriske spænding ved et specifikt revneinitieringssted i en bestemt geometri, som f. eks. sidekærv i en rørknudesamling.
- **Lokal spændingskoncentrationsfaktor af en klassificeret detalje K_{cd} :** Forholdet mellem største spænding i et hot spot beregnet ved hjælp af finite element method (FEM) og den nominelle spænding.
- **Spændingshistorie:** En registrering af spændingsvariationen i et punkt på konstruktionen (som regel angivet for en lastbegivenhed).
- **Spændingsændringspunkt:** Værdien af spændingen i en spændingshistorie for hvilken størrelsen af spændingsændringsforhold skifter fortegn (vendetangent).
- **Spændingstop:** Et punkt i en spændingshistorie for hvilken størrelsen af spændingsændringsforhold skifter fortegn fra positiv til negativ.
- **Spændingsdal:** Et punkt i en spændingshistorie for hvilken størrelsen af spændingsændringsforhold skifter fortegn fra negativ til positiv.
- **Konstant amplitude:** Relateret til en spændingshistorie, hvor spændingerne skifter mellem spændingstoppe og spændingsdale med en konstant værdi.
- **Variabel amplitude:** Relateret til enhver spændingshistorie, der indeholder mere end en spændingstop eller spændingsdal.
- **Spændingscyclus:** Del af en spændingshistorie, hvor spændingen starter og slutter i f.eks. en spændingstop og passerer igennem en spændingsdal.
- **Cyklustalling:** Processen at omforme en variabel spændingshistorie til et spændingsspektrum (reservoir og rainflow counting metoderne).
- **Spændingsvidde:** Den algebraiske forskel mellem spændingstop og spændingsdal i en spændingscyklus.
- **Spændingsspektrum:** Histogram af frekvensen for hvilken de forskellige spændingsvidder forekommer i en lastbegivenhed.
- **Designspektrum:** Totalen af spændingsspektra for hvilke en udmattelsesvurdering er relevant.
- **Detaljekategori:** Betegnelsen for en bestemt konstruktionsdetaljes tilhørende udmattelseskurve.

- **Udmattelsestal:** Antallet af påvirkninger indtil grænseværdien under påvirkning af en konstant amplitude spændingshistorie.
- **Udmattelseskurve:** Forholdet mellem spændingsvidde og udmattelsestal, typisk afbildet i dobbeltlogaritmisk skema.
- **Referenceudmattelsesstyrke:** Spændingsvidden for en detaljekategori ved udmattelsestallet 2.000.000.
- **Konstant amplitude udmattelsesgrænse:** Grænseværdi for konstant spændingsvidde, over hvilken en udmattelsesvurdering er nødvendig.
- **Afskæringsgrænse:** Grænseværdi under hvilken spændingsvidderne ikke bidrager til den beregnede kumulative skade.
- **Levetid:** Den referenceperiode, i hvilken konstruktionen kræves at udvise sikker opførsel med en acceptabel sandsynlighed for, at brud på grund af udmattelsesrevner ikke vil optræde.
- **”Safe life”:** Den referenceperiode, i hvilken konstruktionen er estimeret at udvise sikker opførsel med en acceptabel sandsynlighed for, at udmattelsesrevner ikke vil optræde, når safe life designgrundlaget er anvendt.
- **Udmattesseskade:** Forholdet mellem antallet af påvirkninger ved en given spændingsvidde og det totale antal påvirkninger ved samme spændingsvidde, der medfører udmattelse.
- **Miner’s summation:** Summationen af delskader for alle spændingscykler i et spændingsspektrum (eller design spektrum) baseret på Palmgren Miner’s delskadehypotese.
- **Ækvivalent udmattelsesbelastning:** En enkel udmattelsesbelastning, der med acceptabel nøjagtighed repræsenterer udmattelsespåvirkningerne fra de faktiske lastbegivenheder.
- **Ækvivalent spændingsvidde:** Spændingsvidde beregnet ud fra ækvivalent udmattelsesbelastning.

Symboler

D	Udmattesseskade beregnet for en given driftperiode
D_L	Udmattesseskade beregnet for totale levetid
N	Udmattelsestallet
N_i	Udmattelsestallet for en spændingsvidde
N_C	Antal cykler (2.000.000) for hvilke referenceværdien af udmattelsesstyrken er defineret
N_D	Antal cykler (5.000.000) for hvilke konstant amplitude udmattelsesgrænsen er defineret. Udmattelseskurves hældning aftager.
N_L	Antal cykler (100.000.000) for hvilke afskæringsgrænsen er defineret. Udmattelskurven er i princippet herefter vandret.
R	Forholdet mellem minimumspænding og maksimumspænding

T_f	Tiden fra, at en revne vokser fra detekterbar størrelse til kritisk revnelængde
T_i	Inspektionsinterval
T_L	Levetid
T_S	”Safe life”
l_d	Minimum detekterbar revnelængde
l_f	Kritisk revnelængde
m	Hældningskonstant for udmattelseskurver
m_1	Værdien af m for $N \leq 5.000.000$ cykler
m_2	Værdien af m for $5.000.000 < N \leq 100.000.000$ cykler
n_i	Antal cykler med spændingsvidden $\Delta\sigma_i$
γ_{Ff}	Partialkoefficient for udmattelseslast
γ_{Mf}	Partialkoefficient for udmattelsesstyrke
$\sigma_{maks}, \sigma_{min}$	Maksimum- og minimumværdier for de varierende spændinger i en spændingscyklus
$\Delta\sigma$	Nominal spændingsvidde
$\Delta\sigma_C$	Referenceværdi for udmattelsestyrken ved 2.000.000 cykler
$\Delta\sigma_D$	Referenceværdi for udmattelsestyrken ved konstant amplitudegrænsen
$\Delta\sigma_L$	Referenceværdi for udmattelsestyrken ved afskæringsgrænsen
$\Delta\sigma_R$	Udmattelsestyrke
\log	10-tals logaritme

Design dokumenter

Eurocode 9 part 2 forudsætter at der foreligger tegninger, fremstillingsspecifikationer, driftmanual og vedligeholdsmmanual i forbindelse med design af en udmattelsespåvirket aluminiumskonstruktion.

6.5.4 BELASTNINGER

Alle belastningstyper der kan medføre udmattelse såsom bevægelige laster, vibrationer, vind, bølger, accelerationslaster, temperaturlaster skal opstilles med en passende pålidelighed.

Lastpartialkoefficienten γ_{Ff} fastsættes normalt til 1,0 når ovennævnte passende pålidelighed på udmattelseslasten er verificeret.

Eurocode 9 part 2 tabel 3.4.1 angiver lastpartialkoefficientværdien fra 1,0 til 1,5 afhængig af pålidelighedsgrænserne ved en statistisk vurdering af lasterne.

6.5.5 BEREGNING AF SPÆNDINGER

Ved beregning af nominelle spændinger anvendes generelt den lineær elastiske styrkelære.

Hvor der optræder geometrier, der ikke er indeholdt i de anførte detaljekategorier må der ved beregningen anvendes den modificerede nominelle spænding.

Den beregnes ligeledes ved anvendelse af den lineær elastiske styrkelære, hvorefter den beregnede spænding multipliceres med den geometriske spændingskoncentrationsfaktor K_{gt} .

Hot spot spændingsberegning anvendes hvor geometrien er så kompleks, at den nominelle spænding ikke kan beregnes med rimelighed.

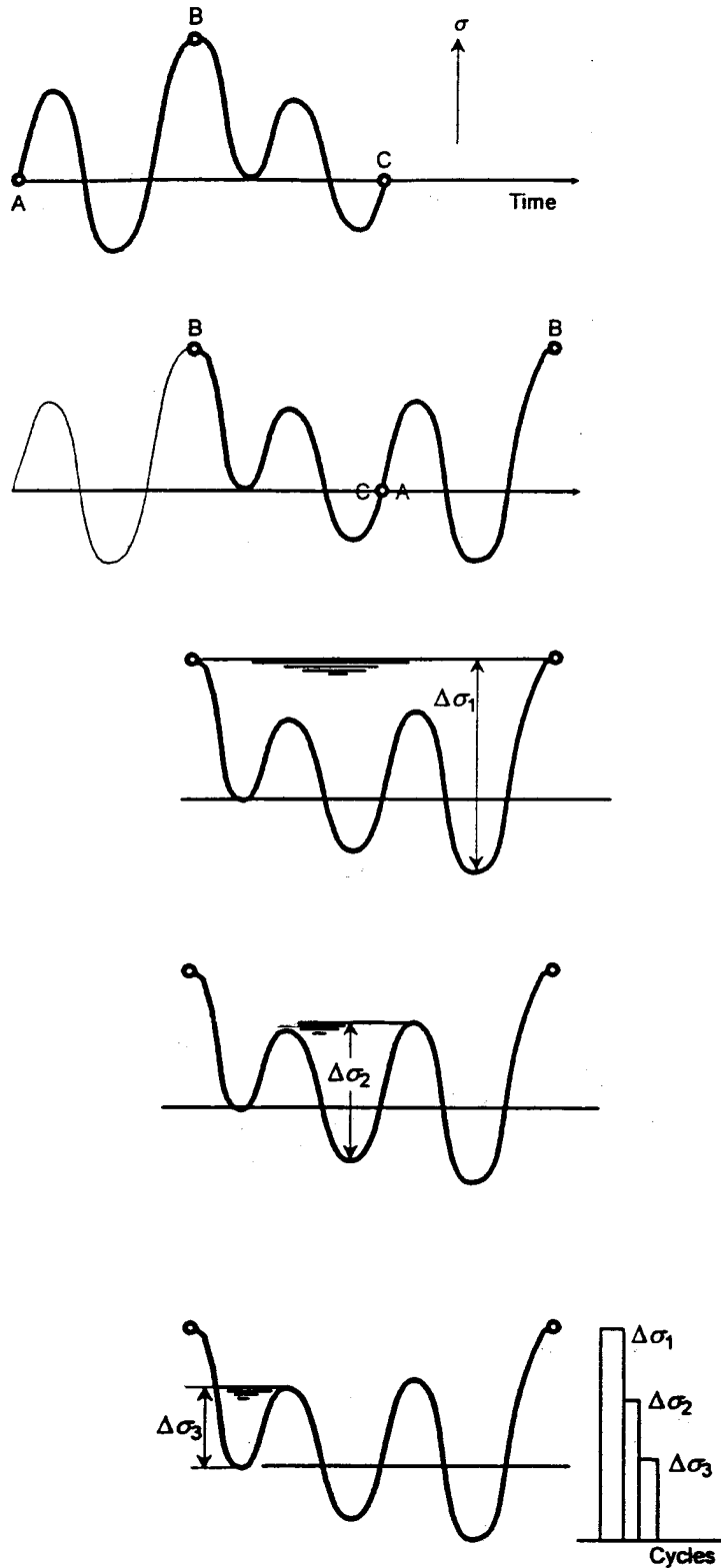
For beregning og vurdering af hot spot spændinger henvises der til anneks A og C i Eurocode 9 Part 2.

Efter beregning af de nominelle eller modificerede nominelle spændinger efter den lineære elastiske styrkelære opstilles spændingsvidderne i et spændingsspektrum.

For varierende spændingsvidder foretages dette eventuelt ved anvendelse af reservoir-metoden eller rainflow-counting metoden.

Et eksempel på anvendelse af reservoir-metoden er vist på næste side.

6.5.6 "RESERVOIR"-METODEN



Opstil spændingshistorien for en lastbegivenhed og find største spænding

Flyt spændingshistoriedelen til venstre for største spænding over til højre

Fyld "reservoiret" med vand.

Største dybde er største spændingsvidde.

Tap "vandet af største dybde.

Find næststørste dybde. Dette er

metoden

Fortsæt indtil alt "vand" er aftappet og opstil spændingsviddene i et spændingsspektrum

Figur 6.13 Reservoir-metoden.

6.5.7 DETALJEKATEGORIER, UDMATTELSESKURVER

For de almindeligt brugte detaljer i konstruktioner er der i Eurocode 9 anført detaljekategorier, der angiver, hvilken udmattelseskurve der skal anvendes for at vurdere sammenhængen mellem spændingsvidden og udmattelsestallet.

Detaljekategorierne er for de svejste samlinger inddelt i 3 basisgrupper:

- Ikke svejste detaljer i grundmateriale (valsede, trukne, ekstruderede eller støbte legeringer).
- Svejste detaljer placeret på overfladen af belastede dele.
- Direkte kraftoverførende svejste samlinger mellem elementer.

På de efterfølgende sider er detaljekategorierne anført på venstre side ved et billede af de pågældende svejstesamlinger inden for et hovedområde og de dertil hørende dimensions-, fremstillings-, kvalitets- og spændingsberegningskrav anført i en underliggende tabel.

På de efterfølgende sider er udmattelseskurverne anført på højre side for de samme detaljekategorier.

Udmattelseskurverne er angivet som forholdet mellem størrelsen af spændingsvidden og det dertil hørende udmattelsestal for middelværdien minus 2 gange standardafvigelsen af prøvningsresultater.

Dette svarer til 2,3% brudsandsynlighed.

For udmattelsestal mindre end 5×10^6 er udmattelseskurverne bestemt ved ligningen:

$$N_i = 2 \cdot 10^6 \cdot \left(\Delta\sigma_c / (\Delta\sigma_i \cdot \gamma_{Ff} \cdot \gamma_{Mf}) \right)^{m_1}$$

N_i er udmattelsestallet svarende til spændingsvidden $\Delta\sigma_i$

$\Delta\sigma_c$ er referenceværdien for udmattelsesstyrke ved $2 \cdot 10^6$ belastningsvariationer for en bestemt detaljekategori (angivet ved forreste tal over udmattelseskurven)

$\Delta\sigma_i$ er den aktuelle konstante spændingsvidde der virker på detaljen

m_1 er kurvehældningen for udmattelseskurven indtil $5 \cdot 10^6$ påvirkninger (angivet ved bagerste tal over udmattelseskurven)

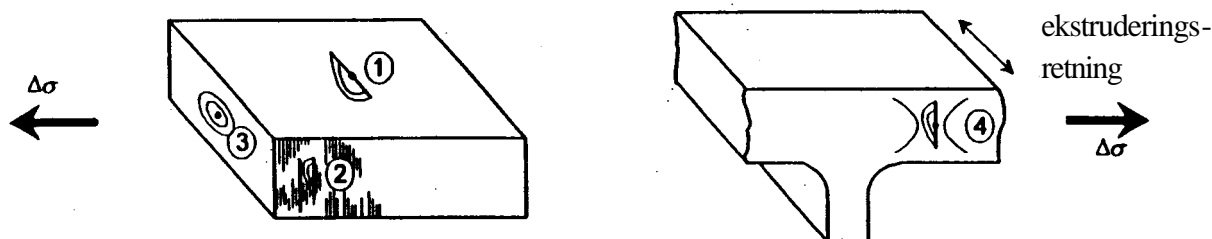
γ_{Ff} og γ_{Mf} er henholdsvis lastpartialkoefficienten og materialepartialkoefficienten

For konstant spændingsvidde gøres udmattelseskurverne vandrette ved $5 \cdot 10^6$ påvirkninger.

Er der tale om udmattelsesbelastning ved varierende spændingsvidde ændres udmattelseskurvernes hældning i området fra $5 \cdot 10^6$ til $1 \cdot 10^8$ påvirkninger ($m_2 = m_1 + 2$)

Spændingsvidder under værdien for $1 \cdot 10^8$ påvirkninger medtages ikke i udmattelsesvurderingen.

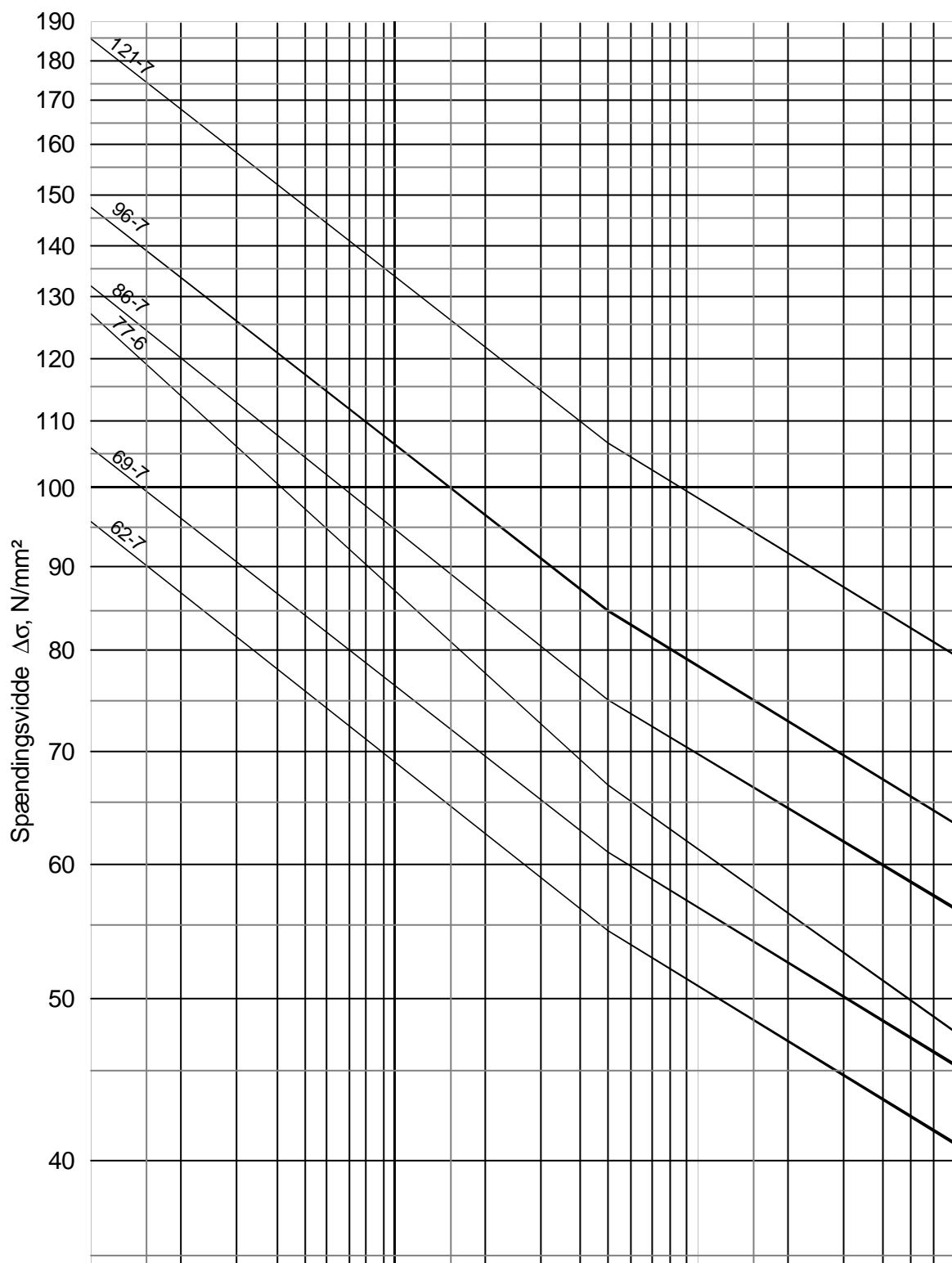
6.5.8 DETALJEKATEGORIER FOR GRUNDMATERIALE



Produkt form		Plader, stænger		Rør, smedet, ekstruderet		Pl., smedet ekstruderet		Hule ekstruderede		Støbte emner	
Startsted	Ref. Nr.	1,2		1,2		1,2		2		1	3
	Placering	I forbindelse med små overfladefejl						Ekstruderings søm		Overfl fejl	Indre Fejl
Spændingsretn.		Parallel med valse- eller Ekstruderingsretning				På tværs af fremst-retn.		På tværs af Ekstrud.-retn.			
Legeringer		7020	Tabel 1.1.1	7020	Tabel 1.1.1	7020	Tabel 1.1.1	7020	6*** serie	Tabel 1.1.2	
Særlige krav	Dimension	Overflade fri for skarpe hjørner med mindre det er parallel med sp.-retning									
	Udførelse	Kun high speed bearbejdning		Håndslibning ikke tilladt med mindre det er parallel med spændingsretning				Ekst.-teknik Port hole ell. Bridge die		Kun high speed bearbejdn.	
	Inspektion	Visuel	-	-	-	-	-	Drift test ved afslutning af ekstrudering		Penet	x-ray
	Kvalitetskrav	Overflade Finish R<0,5mm		Ingen mærker på tværs af spændingsretning				Ingen revner langs ekstr. søm		Anneks D tabel D.4	
Sp.-analyse	Sp.-p-m	Nominel spænding ved initieringssted									
	Sp.-konc till. for	Overflade ujævnheder									Porø sitet.
Type nr.		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10
Detaljekategori		121-7	86-7	96-7	69-7	96-7	69-7	86-7	62-7	77-6	77-6

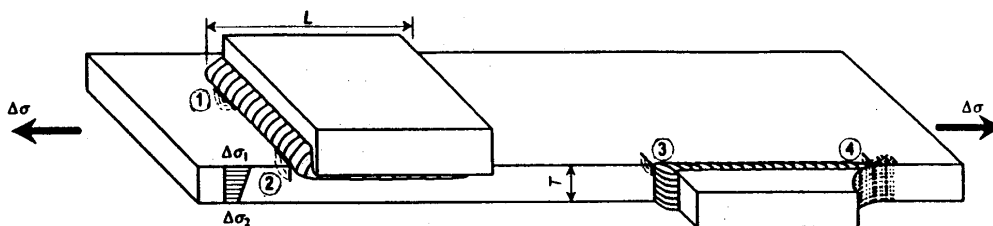
Figur 6.14 Detaljekategorier for grundmateriale.

Udmattelseskurver for grundmateriale



Figur 6.15 Udmattelseskurver for grundmateriale.

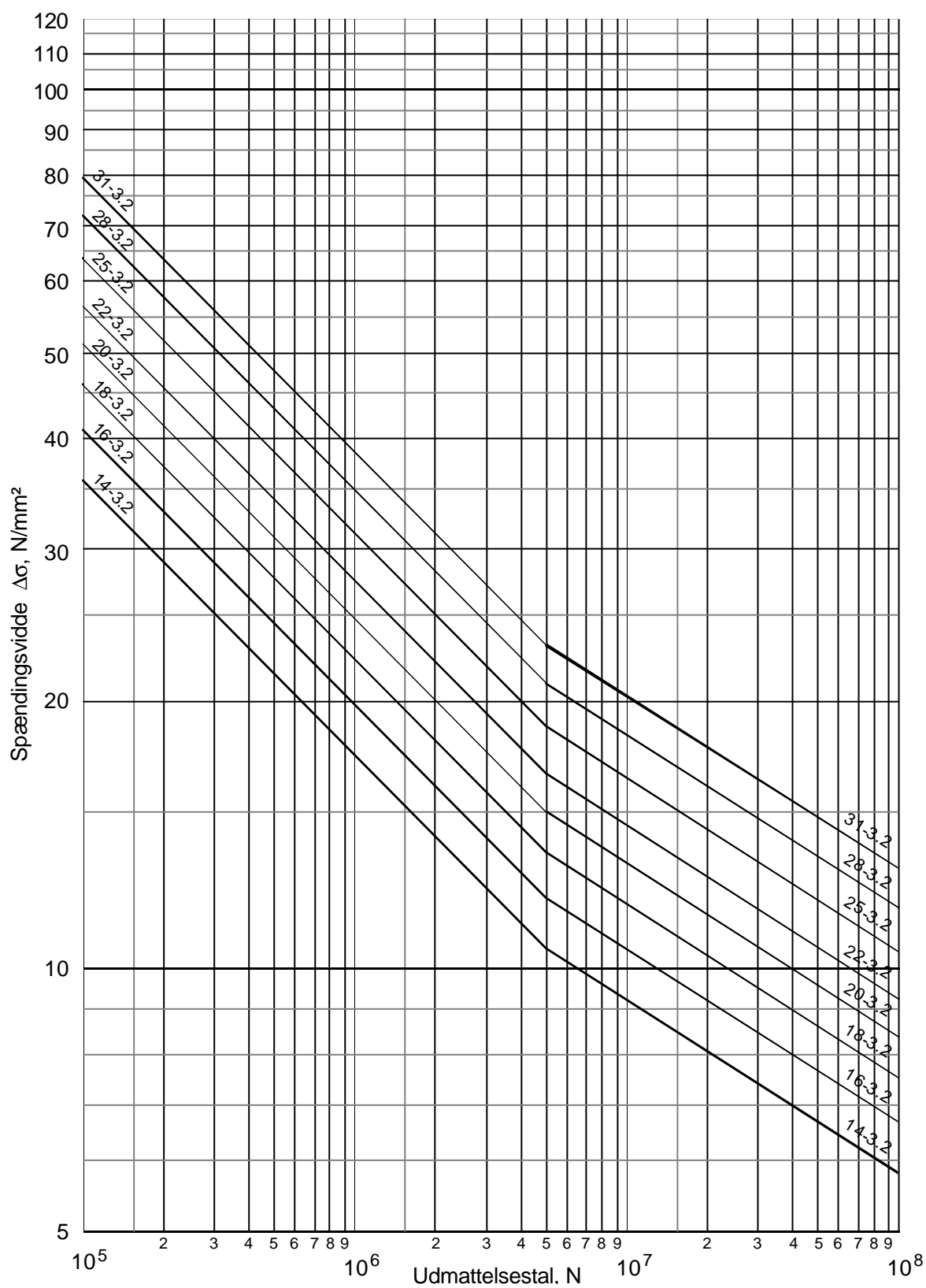
6.5.9 DETALJEKATEGORIER FOR PÅSVEJSTE DELE VED TVÆRGÅENDE SIDEKÆRV



Produktformer		Valsede, ekstruderede og smedede emner													
Startsted	Ref. nr.	1			2			3			4				
	Placering	Ved tværgående sidekærv i det belastede emne									Ved afslutning af langsgående svejsning				
Spændingsretning		Vinkelret på tværgående sidekærv									Parallel med svejsningens akse				
Legeringer		Tabel 1.1.1													
Særlige krav	D i m e n s i o n	saml geo metri	Beslag på konstruktionens overflade									Beslag på konstruktionens kant			
			Svejsning på overflade væk fra hjørne									Svejsn. rundt om hjørne	Svejsning på kanten		
		L >	0	10	20	30	50	80	120	200	L og T som for type 2.2 til 2.8	Ingen radius	Rundingsradius R mm		
	L <	10	20	30	50	80	120	200	10- 20	20- 40			> 40		
	T mm	Se nedenstående tabel													
	Udførelse											Sidekærv slebet glat			Slib R i sp. retn.
Inspektion		Efter annekts D tabel D1													
Kval.-krav		Efter annekts D tabel D2													
Spændingsanalyse	Sp.-param.	Nominel spænding ved initieringssted													
	Sp.-konc. tilladt for	Svejsprofil tilladt efter annekts D tabel D2													
		Stivhedseffekten af beslag													
Type nr.	2.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Detaljekategori	T<4	31	28	25	25	25	25	25	25	Som type 2.1 til 2.8 men reduceret med en detaljekategori	18	25	28	31	
	4<T<10	31	28	25	22	22	22	22	22						
	10<T<15	31	28	25	22	20	20	20	20						
	15<T<25	31	28	25	22	20	18	18	18						
	25<T<40	31	28	25	22	20	18	16	16						
T>40	31	28	25	22	20	18	16	14							
Tilpas for Sp.-grad.		Ved neg. Sp.-grad. : Gå 2 det.-kat. op for T<15mm og en det.kat. op for 15<T<40													

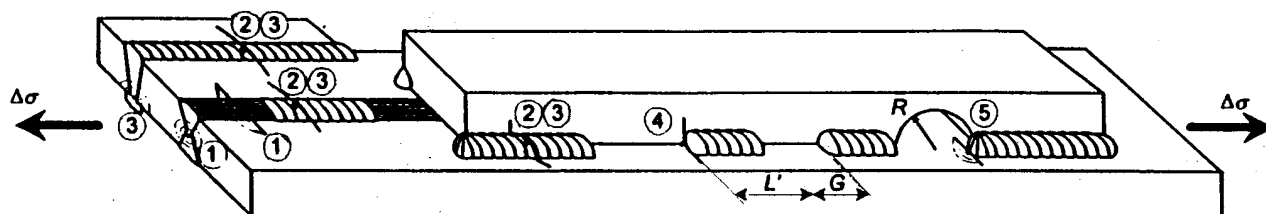
Figur 6.16 Detaljekategorier for påsvejste dele ved tværgående sidekærv.

Udmattelseskurver for påvejste dele (tværgående sidekærv)



Figur 6.17 Udmattelseskurver for påvejste dele (tværgående sidekærv).

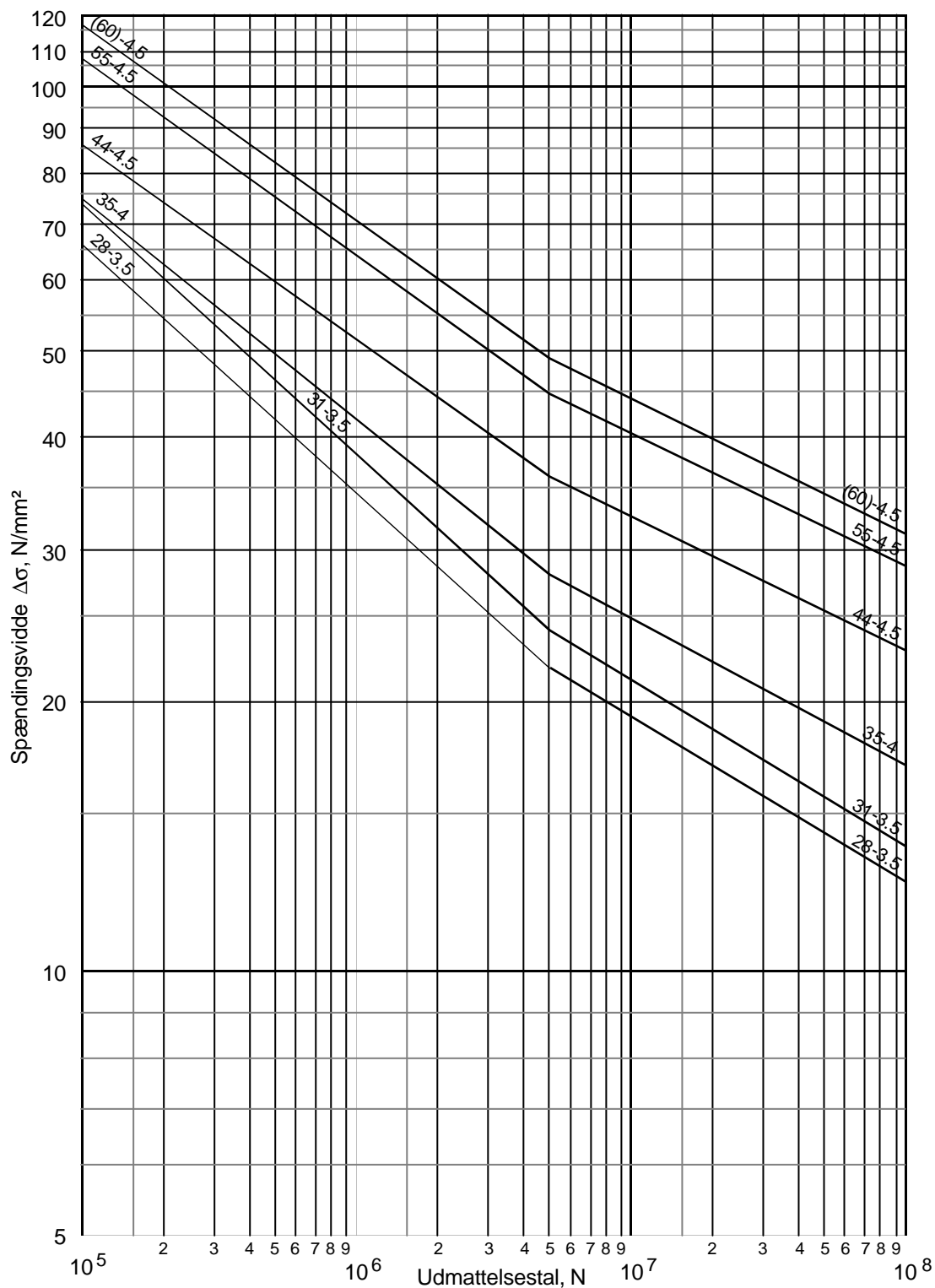
6.5.10 DETALJEKATEGORIER FOR LANGSGÅENDE SVEJSESØMME



Produktform		Valsede, ekstruderede og smedede produkter				
Startsted	Reference nr.	1	2	3	4	5
	Placering	Ved svejse diskontinuitet	svejsébølge	stop-start	Svejsetå eller -krater	Svejsetå eller -krater
Spændingsretning		Parallel med svejsningens længderetning				
Legeringer		Tabel 1.1.1				
Særlige krav	Dimension	Fuld gennem svejsning			Afbrudte kant-sømme	Afl.-hul center på overflade
		Dobbelt-siddet svejst			$G \leq 2,5L$	$R \leq 25\text{mm}$
	Fremstilling	Kontinuert automatsvejst				
		Svejsn. overflade slebet plan				
		Backing og svejsning skal være Kontinuerte				
	Inspektion	Efter annek D tabel D1				
Kvalitetskrav	Efter annek D tabel D2					
Spændings-Analyse	Spændings-parameter	Nominel spænding ved initieringssted				
		Det påvejste materiale skal indgå i modstandsegenskaberne				
	Sp.-koncentration tilladt for	Svejsediskontinuiteter tilladt efter annek D tabel D1				Aflastningshul
Type nr.		2.14	2.15	2.16	2.17	2.18
Detaljekategori		55-4,5 (60-4,5)	44-4,5	35-4	31-3,5	28-3,5

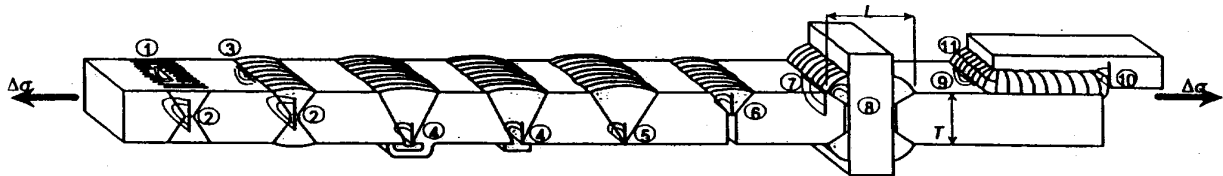
Figur 6.18 Detaljekategorier for langsgående svejsesømme.

Udmattelseskurver for langsgående svejsesømme



Figur 6.19 udmattelseskurver for langsgående svejsesømme.

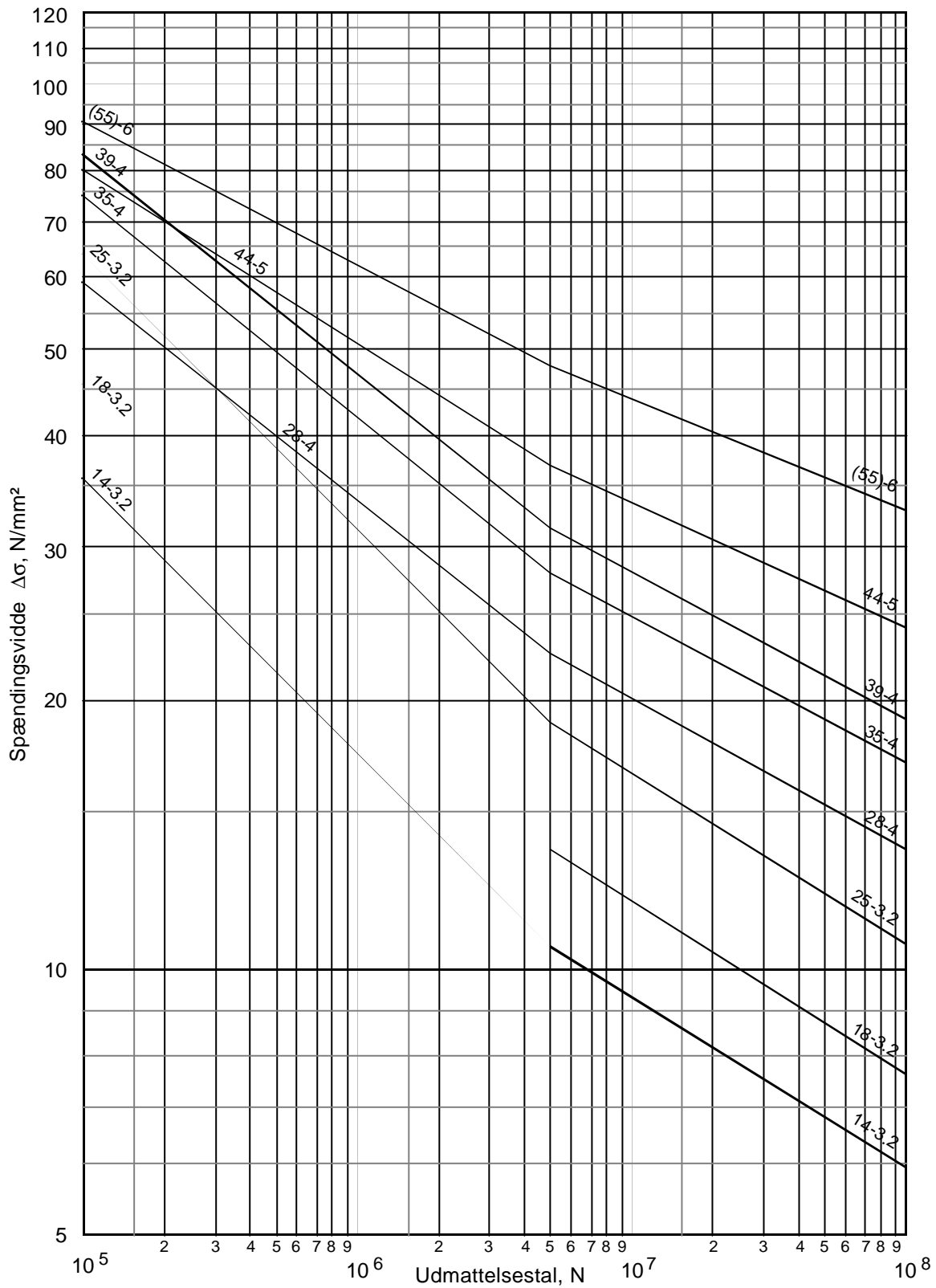
6.5.11 DETALJEKATEGORIER FOR KRAFTOVERFØRENDE SVEJSTE SAMLINGER MELLEMLER ELEMENTER



Produkt form		Valsede, ekstruderede og smedede emner										
Startsted	Ref. Nr.	1,2	3,2	4	5	6	7	8	9, 10	11		
	Placering	Overfl. Ind. fejl	S-kærv Ind. fejl	rodside	rodfejl	Mgl indt	sidek ær	sidek ær	rodside	rodside	rodside	
Spændingsretning		På tværs af svejseretningen										
Legeringer		Tabel 1.1.1										
Særlige krav	Dimension	Samlet Type	Stumpsøm mellem elementer på linie				kryds			overlap		
		Sv.	stumpsøm							kantsøm		
	Prep	dobbeltsidig sv.		ensidigt svejst								
	Indtr	fuld gennemsvajsning				part.	fuld	partiel				
	Overgang	overgang i tykkelse eller bredde < 1 : 4										
	Fremstilling	rod	slebet		backing	-back.	slib					
		cap	slebet plan									
		ende	anvend ind- og udløbsplader der skæres væk og sømafslutning slibes efterfølgende									
	Inspektion		Anneks D tabel D1									
	Kvalitetskr.		Anneks D tabel D2									
Sp. analyse	Sp.-param.	Netto sømtykkelse+spec. forsætn.-spænd.				Netto T		Net. a-mål	Netto T		Net. a	
	Sp.-konc. inkluderet i Det.-kat.	Svejsprofil, uspecificeret kantforsætning og diskontinuiteter till. efter anneks D tab. D.2				Stivhedseffekt af tværgående element			Spændingsspid ved svejseafslutning			
Type nr.		3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10	
Detaljekategori	Plade	(55-6) 44-5	(39-4) 35-4	(35-4) 25-3,2	(29-3,2) 18-3,2	14-3,2	Som tabel 5.1.2(a) type 2.1 til 2.9		18-3,2	Som type 3.6 og 3.7		14-3,2
	Åbne profiler	(44-5) 28-4	(35-4) 28-4									
	Rør	ikke till.										
Nøgle: () Før værdier i parentes anvendes skal 5.2.1(10) vurderes												

Figur 6.20 Detaljekategorier for kraftoverførende svejste samlinger mellem elementer.

Udmattelseskurver for kraftoverførende svejsesømme



Figur 6.21 Udmattelseskurver for kraftoverførende svejsesamlinger.

6.5.12 UDMATTELSESVURDERING

Konstruktionselementer udsat for vekslende belastninger skal vurderes overfor udmattelse på en sådan måde, at der med acceptabel sandsynlighed ikke sker havari i konstruktionselementets levetid.

Konstruktionselementer kan vurderes ud fra 3 forskellige metoder:

1. Safe life design
2. Damage tolerant design.
3. Design by testing

I det følgende er der alene beskrevet forholdene for safe life design.

Safe life design

Det forudsættes, at der tilvejebringes pålidelige oplysninger med hensyn til udmattelseslast, således at der kan opstilles et spændingsspektrum.

Kvalitetskravene til konstruktionsdelens udførelse skal være defineret.

Der foretages vurdering af, hvilke detaljekategorier konstruktionsdelens svejsesamlinger kan henføres til.

For hver spændingsvidde $\Delta\sigma_i \cdot \gamma_{FF} \cdot \gamma_{MF}$ i det opstillede spændingsspektrum findes det tilhørende udmattelsestal N_i ud fra detaljekategoriens udmattelseskurve.

Udmattelseskaden D_L for den totale levetid beregnes ved anvendelse af Palmgren-miners summation:

$$D_L = \sum n_i/N_i$$

er værdien mindre end eller lig med 1 er "safe life" opfyldt.

Hvis værdien er større end 1 må detaljen omformes så spændingsvariationerne bliver mindre eller alternativt at geometrien forbedres, så der kan anvendes en højere detaljekategori.

Er dette ikke muligt må det overvejes om damage tolerant design kan anvendes. Dette kræver fastsættelse af inspektionsintervaller jævnfør Eurocode 9 part 2 punkt 2.3.

6.5.13 PÅVIRKNING FRA MILJØ (KORROSIONSPÅVIRKNING)

Udmattelsesstyrken reduceres med stigende miljøpåvirkning af aluminiumlegeringer.

I Eurocode 9 Part 2 er der i afsnit 5.4 angivet en tabel for reduktion af udmattelsesstyrken for visse legeringstyper afhængig af beskyttelsesgrad og miljøpåvirkning.

Tabellen er gældende for temperaturer indtil 65°C i ikke maritime miljøer og for maritime miljøer er temperaturgrænsen sat til maksimum 30°C.

Tallene i tabellen henfører til reduktion i detaljekategori i forhold til den oprindeligt valgte.

Tablet 6.1 Reduktion af udmattelsesstyrken (detaljekategori) for visse legeringstyper.

Legering			Miljø							
Leg. serie	Leg. komponenter	Beskyttelsesgrad	land	Industri		Maritimt			Neddypet	
				Moderat	kraftig	ikke industri	Moderat	Kraftig	Ferskvand	Havvand
3000	AlMnCu	A	-	-	(P)	-	-	-	-	-
5000	AlMg	A	0	0	(P)	0	0	0	0	0
5000	AlMgMn	A	0	0	(P)	0	0	0	0	1
6000	AlMgSi	B	0	0	(P)	0	0	1	0	2
7000	AlZnMg	C	0	0	(P)	0	0	2	1	3

For maritime miljøer med kraftig korrosionspåvirkning eller for legeringer neddyppet i havvand er det anført, at grænsen for udmattelsesstyrke ved konstant spændingsvidde flyttes ud til $N_D = 1 \cdot 10^7$ påvirkninger og afskæringsgrænsen flyttes ud til $N_L = 2 \cdot 10^8$ påvirkninger.

Hvor der er anført (P) i listen skal man være opmærksom på, at udmattelsesstyrken er meget afhængig af "kemien" i miljøpåvirkningen og hvor der er anført en – i tabellen er der ikke opgivet udmattelsesdata.

6.5.14 KVALITETSKRAV

Detaljekategorierne er gældende såfremt kvalitetskravene i Eurocode 9 part 2 annek D er opfyldt.

1. Fremstilleren skal tilpasse sig kravene i EN 729-2.
2. Svejsekoordinatorerne skal have passende teknisk kendskab in overensstemmelse med EN 719.
3. Svejseprocedurespecifikationerne skal være godkendt i overensstemmelse med EN 288-4.
4. Svejserne skal være godkendt i henhold til EN 287-2.
5. Kontrol i forbindelse med svejsning skal være i overensstemmelse med EN 1011-1 og 1011-4.

6. Kontrolomfanget og –metoderne skal være i overensstemmelse med tabel D.1

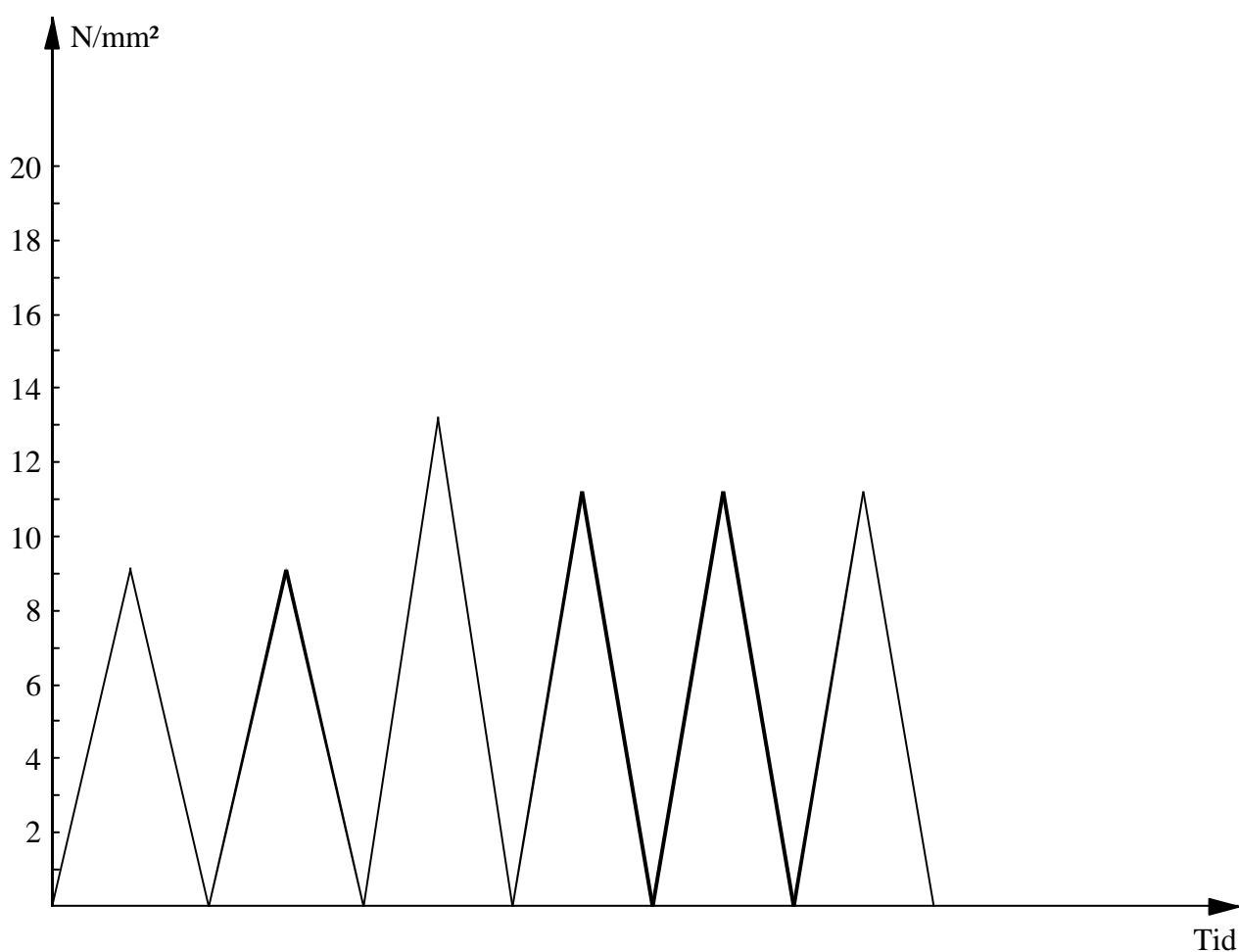
7. Svejsningernes kvalitet skal opfylde kravene i tabel D.2

Generelt kan detaljekategoriene til og med kat. 20 anvendes direkte når svejskvaliteten opfylder kravene til level B efter EN 30042.

Højere detaljekategorier skærper kravene yderligere end level B-svejsning for nogle fejltyper.

6.5.15 BEREGNINGSEKSEMPEL

Et langsgående beslag med længde $L = 60$ mm svejses på en 6 mm tyk aluminiumplade, der er udsat for nedenfor viste spændingshistorie 1 million gange:



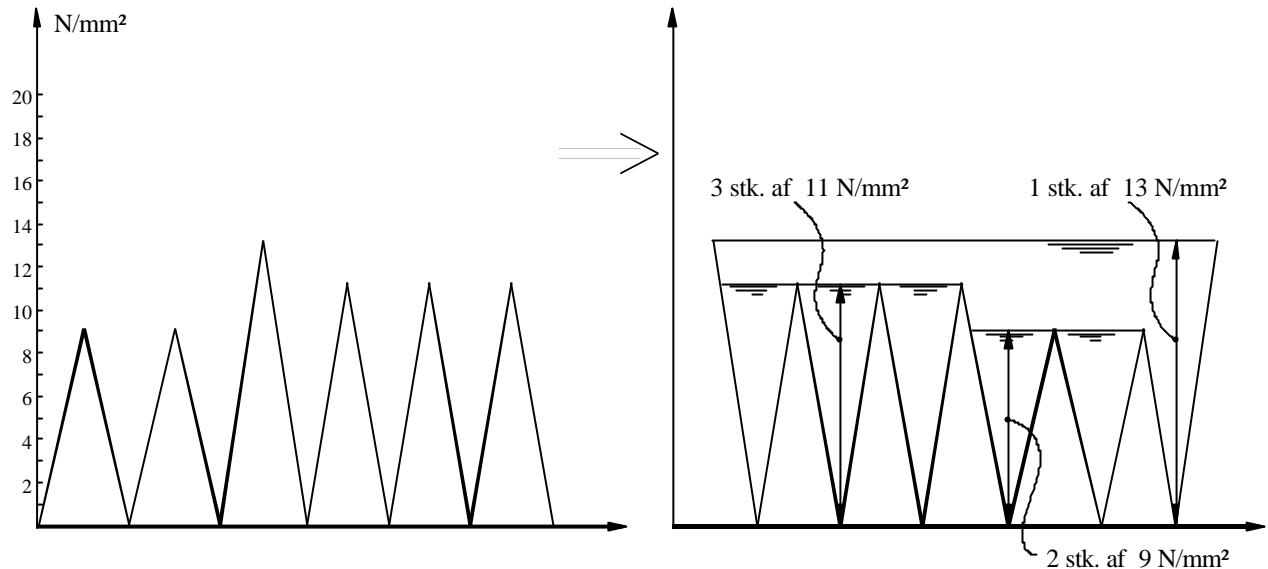
Figur 6.22 Illustration af spændingshistorie.

Vurder, om ovennævnte situation opfylder kravet til Miners summation når der forudsættes en lastpartialkoefficient på 1,0 og en materialepartialkoefficient på 1,43.

Det forudsættes endvidere at udmattelseskurven skal vælges ud fra skema side 12, hvor beslaget ikke er ført ud til kant af aluminiumspladen.

Løsning

Spændingshistorien opdeles i antal for hver spændingsvidde efter reservoir-metoden som angivet på side 8:



Figur 6.23 Spændingshistorien opdelt i antal for hver spændingsvidde efter reservoir-metoden.

Ialt:

- 1 · 10⁶ påvirkninger af 13 N/mm²
- 3 · 10⁶ påvirkninger af 11 N/mm²
- 2 · 10⁶ påvirkninger af 9 N/mm²

Vurderingen foretages ud fra udmattelseskurve 22 jvf. tabellen på side 12 og der aflæses udmattelsestal ud fra kurven på side 13

$$\gamma_{Ff} \cdot \gamma_{Mf} \cdot \Delta\sigma = 1,0 \cdot 1,43 \cdot 13 \text{ N/mm}^2 = 19 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow N_1 = 3 \cdot 10^6$$

$$\gamma_{Ff} \cdot \gamma_{Mf} \cdot \Delta\sigma = 1,0 \cdot 1,43 \cdot 11 \text{ N/mm}^2 = 16 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow N_1 = 6 \cdot 10^6$$

$$\gamma_{Ff} \cdot \gamma_{Mf} \cdot \Delta\sigma = 1,0 \cdot 1,43 \cdot 9 \text{ N/mm}^2 = 13 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow N_1 = 15 \cdot 10^6$$

Herefter udregnes Miners summation (jvf. side 18), hvor hældningerne 3,2 og 5,2 for udmattelseskurven indgår:

$$\Sigma (n_i / N_i) = 1 \cdot 10^6 / 3 \cdot 10^6 + 3 \cdot 10^6 / 6 \cdot 10^6 + 2 \cdot 10^6 / 15 \cdot 10^6 \leq 1$$

0,97 ≤ 1 Betingelsen er opfyldt

6.6 KORROSION

6.6.1 ALUMINIUMS KORROSIONSFORHOLD

Aluminium reagerer let med ilt og/eller vand under dannelsen af en tynd, meget kompakt beskyttende oxidfilm, der er uopløselig i vand og resistent over for mange kemikalier.

Ved pH-værdier uden for intervallet 4-8,5 nedbrydes oxidfilmen. Den beskyttende oxidfilm på aluminium vil endvidere være meget følsom for tilstedeværelsen af chlorider. Chlorider kan, afhængigt af koncentrationen, resultere i defekter i oxidfilmen og medføre korrosion på aluminium.

Korrosionen på aluminium vil under normale forhold forekomme lokalt på overfladen (grubetæring), medens jævn korrosion (fladetæring) i det væsentlige kun vil forekomme i stærkt sure og stærkt basiske miljøer.

Da aluminium og dets legeringer med undtagelse af zink og magnesium er uædle i forhold til de øvrige metaller, opstår der let galvanisk korrosion ved elektrisk kontakt til disse. Der skal dog være tale om eksponering eller dannelse af fugtfilm på samlingen før der er risiko for denne korrosionsform. I vand eller i jord afhænger den galvaniske korrosion tillige af arealforholdet mellem de indgående metaller.

Aluminium vil især være udsat for korrosion i spalter, under tildækninger, og hvor der forekommer ansamlinger af snavs og salte.

6.6.2 FORHOLDSREGLER MOD KORROSION

Aluminiumkonstruktioner, der skal anvendes i et korrosivt miljø, bør udformes hensigtsmæssigt for at opnå lang levetid.

Det er næppe generelt erkendt, at korrosionens omfang på aluminium i høj grad er bestemt af konstruktionsdetaljerne. Hovedpunkter der bør tages i betragtning ved konstruktionens udformning er:

- Konstruktionen skal udformes, så korrosion modvirkes.
- Konstruktionen udformes, så korrosionsbeskyttelsen kan udføres effektivt på alle flader, og så overfladerne senere er let tilgængelige for eventuelt vedligehold.
- Konstruktionen udføres med et tillæg i godstykkelse, hvor korrosionstab med den givne beskyttelse og det muligt vedligehold ikke kan undgås.

Konstruktioner, der er placeret udendørs i luft, bør udformes, så fugtpåvirkningen bliver mindst mulig. Vand skal frit kunne løbe af alle flader. Områder, hvor støv og snavs samles, forøger vådtiden og bør undgås. Det samme gælder for snævre spalter, der via kapillarvirkning kan holde på vand. Regnvand, der trænger ind i spalter vil i en vis udstrækning indeholde snavs og salte, der efterhånden akkumuleres i spalterne, og som resulterer i et meget korrosivt miljø. Galvanisk korrosion pga. kontakt til ædlere metaller skal modvirkes ved brug af isolerende mellemlæg eller ved fraisolering.

Det har stor betydning, at konstruktionen tillader, at forurening på aluminiumoverflader ved atmosfærisk eksponering fjernes ved jævnlig afvaskning eller regelmæssig regnpåvirkning, samt at vandet kan ledes bort. Omfanget af korrosion på aluminium som følge af regnpåvirkning vil på længere sigt være mindre, end korrosionsangreb opstået pga. akkumulering af forurening på regnbeskyttede overflader.

For indendørs konstruktioner er det også hensigtsmæssigt med en udformning, der ikke giver større ansamlinger af støv og snavs.

Der er ingen væsentlige muligheder for at lempe korrosionen på aluminiumkonstruktioner i vand bortset fra, at korrosionsbeskyttelsen skal kunne udføres effektivt på alle flader.

6.6.3 GENEREL KORROSIONSBESKYTTELSE

- (1) Nødvendigheden af korrosionsbeskyttelse af aluminiumkonstruktioner, sammensat af flere metaller eller legeringskombinationer i forskellige miljøer, er angivet i Tabel 6.2.
- (2) Ved valg af den passende kolonne til et atmosfærisk miljø i Tabel 6.2, skal opmærksomheden henledes på, at indenfor et område, kan der være flere radikalt forskellige miljøer, som der skal tages hensyn til. Et område, der er beskrevet som landligt, kan have lokale miljøer, som ligger tættere på en industriel atmosfære tæt på fabrikker. Det samme gælder for lokaliteter tæt ved havet, men som også er tæt på kyst installationer, der ved visse vindretninger har karakter af en industriel fremfor en marin atmosfære. Miljøet inde i en bygning er ikke nødvendigvis det samme for en konstruktion, som uden for.
- (3) Udviklingen af korrosion afhænger af materialets korrosionsbestandighed, de omkringliggende betingelser samt den tid, i hvilken fugt optræder sammen med salte og andre korrosive komponenter. Områder med konstruktionselementer eller bygningsmæssige detaljer, som tiltrækker og fastholder snavs og skidt er mere kritiske end områder, hvor regn og vindforhold rens overfladerne og hvor disse tørrer hurtigt.
- (4) Når man skal vurdere beskyttelsesomfang og udstrækning skal konstruktionens forventede levetid tages i betragtning. For konstruktioner med kort levetid er mindre beskyttelse, eller slet ingen, måske acceptabelt. I tilfælde hvor planlagt systematisk inspektion og vedligehold hurtigt vil afsløre begyndende korrosionsproblemer, og hvor det er nemt at afhjælpe disse, kan designeren vælge en mindre skærpet korrosionsbeskyttelse. Derimod hvis det er svært at foretage inspektion af en konstruktion, og korrosionsangreb ikke er nemme at afsløre, er det nødvendigt med et højere beskyttelsesniveau fra starten. Derfor bør behovet for beskyttelse ved konstruktioner, som mærket (P) i Tabel 6.2, aftales i overensstemmelse med designeren/ingeniøren, forhandleren, eller om nødvendigt, en korrosionsspecialist.
- (5) Henset til det i pkt (4) nævnte, kan der være lokale betingelser, som skærper kravene til korrosionsbeskyttelse. Det er formålstjenligt at undersøge de præcise forhold, som gælder i et givent driftsmiljø, før man lægger sig fast på en passende kolonne i tabel 1.

- (6) I tilfælde med hulprofiler/hultværsnit bør det overvejes, hvorvidt indvendige hulrum skal beskyttes for at forhindre korrosion ved indtrængning af korrosive komponenter. Da disse konstruktioner er svære at beskytte mod korrosion ved indvendig overfladebehandling, skal anvendelsen af disse konstruktioner i korrosive miljøer nøje overvejes. I de tilfælde, hvor indvendige hulrum er grundigt forsejlet, er beskyttelse unødvendig.

Tabel 6.2 Generel korrosionsbeskyttelse af aluminiumstrukturer.

Legeringernes korrosionsbestandighed	Gods-tykkelse mm	Korrosionsbeskyttelse i relation til miljøet							
		Atmosfærisk						Neddypet	
		Landligt	Industri / by		Marint			Ferskvand	Havvand
			Moderat	Meget korrosiv	Ikke-industrielt	Moderat	Meget korrosiv		
EN AW									
Høj korrosionsbestandighed. f.eks.:3103, 5083, 5052, 5454, 5754	Alle	0	0	P	0	0	P	0	(P)
Middelkorrosionsbestandighed. f.eks. 6060, 6061, 6063, 6005, 6082,	< 3	0	(P)	P	(P)	(P)	P	P	P
	≥	0	0	P	0	(P)	P	(P)	P
Lav korrosionsbestandighed. F.eks.: 7020	All	0	(P) ²⁾	P	(P) ²⁾	(P) ²⁾	P	(P) ¹⁾	NR

0 Beskyttelse er normalt ikke nødvendigt
P Beskyttelse normalt nødvendigt undtagen i særlige tilfælde, som vil blive besluttet af designeren
() Behovet for beskyttelse afhænger af strukturen og besluttet af designeren
NR Kontakt med havvand er ikke anbefalelsesværdigt
¹⁾ For 7020 er beskyttelse kun nødvendigt i den varme påvirkede zone (HAZ), hvis varmebehandling ikke foretages efter svejsning.
²⁾ Hvis varmebehandling af 7020 ikke sker efter svejsning, skal behovet for beskyttelse af HAZ undersøges i forhold til den aktuelle driftsituation.
NOTE: For beskyttelse af plader der bruges i loft og sider se EN 508-2:1996

6.6.4 SÆRLIGE FORHOLDSREGLER

Svejsning

Forholdsreglerne ved svejsning er:

- Tilsatsmaterialernes sammensætning må ikke medføre galvanisk korrosion på grundmaterialet.
- Sensibilisering af aluminiumlegeringen overfor korrosion skal undgås efter den afsluttende varmepåvirkning.
- Efter svejsning skal geometriske fejl undgås, fordi dette vil skærpe kravene til efterbearbejdning og medføre risiko for at f.eks. overfladebehandlingen ikke opnår et tåleligt resultat.

Limning

Ved limning sikres, at de vedhæftningsforbedrende tiltag optimeres og at spalter imellem limfugen og aluminiumoverfladen undgås, fordi der her vil kunne udvikles spaltekorrosion.

Bolte- og nittesammenføjning

I tabel 6.3 og 6.4 ses samlet vurderinger af en række testede nittesamlinger.

Nitterne er testet i følgende miljøer:

1. Salttågetest. 1000 timer i salttåge kammer, hvor vand med 3,5 % NaCl er sprøjtet ud over emnerne ved 40°C.
2. Marin test. 6 måneder på det marine forsøgslaboratorium ved Kyndby ved cyklisk på sprøjtning af naturligt havvand 5 minutter i timen anbragt i en vinkel på 45° mod syd.

Marin testen ligner mest de miljøer der optræder i Danmark ved kysten og på havet i de områder, som jævnligt oversprøjtes med havvand og derpå udtørres. Derimod svarer miljøet i salttågekammeret til tropisk klima med konstante salttåger, hvilket ikke er repræsentativt for Danmark. Derimod udgør salttågetesten et accelereret testmiljø, som giver en indikation af, hvorledes nitterne vil klare sig på længere sigt uden, at det vides nøjagtig hvor stor accelerationsfaktoren er.

Tabel 6.3 Testede nitter, sammensætning, overfladebehandling for nitte og stift.

Nr.	Nitte	Standard	Stift	Standard
1	Rustfrit stål (RS)	AISI 305	RS	AISI 305
2	Monel	BS 3073 NA 13, elforzinket	RS	TLP D SS
3	RS	AISI 305	RS	AISI 410
4	Aluminium (Alu)	BS 1473 Al Mg 3,5	Stål	BS 970 En 49
5	Alu	BS 1473 Al Mg 3,5	Stål	BS 970 En 49
6	Stål	BS 1449 CS 3, elforzinket, gulpassiveret	Stål	BS 970 En 49
7	Monel	BS 3073 NA 13, elforzinket	Stål	BS 970 En 49
8	Monel	BS 3073 NA 13, elforzinket	Stål	BS 970 En 49
9	Monel	BS 3073 NA 13, elforzinket	Stål	BS 970 En 49
10	Kobber	BS 2873 C 101	Stål	BS 970 En 49
11	Alu	Al 99,5%	Alu	Al 99,5%
12	Alu	SAE 5052 (2,5% Mg)	Alu	SAE 5052 (2,5% Mg)
13	Alu	3,5% Mg	Alu	3,5% Mg
14	Alu	SAE 5052 (2,5% Mg)	Alu	SAE 7178
15	Alu	BS 1473 Al Mg 3,5	Stål	BS 970 En 49

Tabel 6.4 Testede nitter, sammensætning, overfladebehandling for nitte og stift.

Samling.	Nitte/Stift	Test	Korrosion nitte/stift	Korrosion EN AW 5754	Korrosion EN AW 5082	Skøn af anvendelse i marint atmosfærisk miljø
1.	RS/RS Figur 4.1-2	Salttåge	IAB	GK	GK	Samlingen ikke egnet.
		Marin	IAB	IAB	IAB	
2.	Monel/RS Figur 4.3-4	Salttåge	Zn væk	GK	Bet. GK	Samlingen ikke egnet.
		Marin	Zn delvis væk	IAB	IAB	
3.	RS/RS Figur 4.5-6	Salttåge	IAB	Bet. GK	Bet. GK	Samlingen ikke egnet.
		Marin	IAB	IAB	SK	
4.	Alu/Stål Figur 4.7-8	Salttåge	IAB / RR	IAB	IAB	Samlingen egnet. Risiko for rødbrust afsmitning.
		Marin	IAB / RR	IAB	IAB	
5.	Alu/Stål Figur 4.9-10	Salttåge	IAB / RR	IAB	IAB	Samlingen egnet. Risiko for rødbrust afsmitning.
		Marin	IAB / RR	IAB	IAB	
6.	Stål/Stål Figur 4.11-12	Salttåge	Zn væk / RR	SK	GK	Samlingen ikke egnet.
		Marin	RR / RR	IAB	IAB	
7.	Monel/Stål Figur 4.13-14	Salttåge	Zn væk / RR	SK+GK	SK+GK	Samlingen ikke egnet ved længere tids marin eksponering.
		Marin	IAB	IAB	IAB	
8.	Monel/Stål Figur 4.15-16	Salttåge	Zn væk / RR	GK	GK	Samlingen ikke egnet.
		Marin	IAB	IAB	SK	
9.	Monel/Stål Figur 4.17-18	Salttåge	Zn væk / RR	SP+GK	SP+GK	Samlingen ikke egnet.
		Marin	IAB	IAB	SK	
10.	Kobber/Stål Figur 4.19-20	Salttåge	Patineret	Bet. GK	Bet. GK	Samlingen ikke egnet.
		Marin	Patineret	SK	SK	
11.	Alu/Alu Figur 4.21-22	Salttåge	IAB	SP	SP	Samlingen betinget egnet. Risiko for spaltekorrosion.
		Marin	IAB	IAB	IAB	
12.	Alu/Alu Figur 4.23-24	Salttåge	IAB	Ubet. SK	Ubet. SK	Samlingen egnet. Risiko for mindre spaltekorrosion.
		Marin	IAB	IAB	IAB	
13.	Alu/Alu Figur 4.25-26	Salttåge	IAB	Ubet. SK	Ubet. SK	Samlingen egnet. Risiko for mindre spaltekorrosion.
		Marin	IAB	IAB	IAB	
14.	Alu/Alu Figur 4.27-28	Salttåge	IAB	Ubet. SK	IAB	Samlingen egnet. Risiko for mindre spaltekorrosion.
		Marin	IAB	IAB	IAB	
15.	Alu/Stål Figur 4.29-30	Salttåge	IAB / RR	IAB	Ubet. SK	Samlingen egnet. Risiko for mindre spaltekorrosion.
		Marin	IAB / RR	IAB	Ubet. SK	

RR = Rød Rust, GK = Galvanisk Korrosion, SK = Spalte Korrosion, (U)Bet. = (U)Betydelig.

Bolte- og nittesamlingers levetid begrænses af spaltekorrosion og galvanisk korrosion. Den galvaniske korrosion på aluminium skyldes ledende og elektrolytisk kontakt til elektrokemisk set mere ædle metaller som f.eks. monel, kobber, rustfrit stål eller stål.

Den galvaniske korrosion på aluminium skyldes ledende og elektrolytisk kontakt til elektrokemisk set mere ædle metaller som f.eks. monel, kobber, rustfrit stål eller stål. Den galvaniske korrosion vil skjule begyndende spaltekorrosion, fordi denne korrosionsform oftest giver den mest udtalte nedbrydning af samlingen og området omkring samlingen.

Spaltekorrosionen opstår i spalten imellem nittens udkravede del og grundmaterialet grundet vandindtrængning og efterfølgende lokal dannelse af et saltsurt miljø, som bevirker korrosion under den udkravede del og på anlægsfladen mod grundmaterialet.

Ved brug af nittede aluminiumsamlinger i marint atmosfæriske miljøer bør risikoen for galvanisk korrosion og spaltekorrosion derfor ikke være tilstede, da disse vil begrænse aluminiumsamlingens levetid.

En eller flere af følgende forebyggende foranstaltninger bør derfor anvendes:

- Den galvaniske korrosion i forbindelse med de nittede samlinger forebygges mest effektivt ved at vælge nitter af aluminium. Stiften bør ligeledes være af aluminium.
- Grundmaterialet overfladebehandles med maling inden samling. Dette kan hindre galvanisk kontakt imellem metallerne samt spaltekorrosion på grundmaterialet. Monteringskader af belægningen kan ødelægge effekten. Spaltekorrosion vil stadig kunne optræde på den ubehandlede nitte.
- Smøring af grundmaterialets overflade med en zinkoxidholdig og syrefri vaselinefedt inden montering. Effekten begrænses af, at vaselinen kan vaskes ud med tiden.
- Anvendelse af elforzinkede nitter. Virkningen begrænses af at elforzinkningen opløses/korroderer grundet galvanisk belastning fra de øvrige metaller.

For bolte gælder det ved galvaniske kontakter, at der bør anvendes isolerende skiver eller hylser. Opmærksomheden skal henledes på, at det vil være risiko for at skiverne flyder ved tilspænding af bolten, hvorfor det vil være nødvendigt med løbende efterspænding.

I den tekniske rapport, SASAK-RAP-ME-AKS-FI-0010-00 er korrosionstestede nittesamlinger på aluminium vist.

6.1.1 OVERFLADEBESKYTTELSE AF METAL-PÅ-METAL SAMLINGER SAMT BOLTEDE OG NITTEDE SAMMENFØJNINGER

Generelt

(1)P Ved metal-til-metal kontaktflader skal der ydes yderligere beskyttelse, som angivet i Tabel 6.5 og af designeren/konstruktøren, i forhold til det i rubrikken vedr. maling angivne. De beskyttelsesprocedurer som er angivet i Tabel 6.5 skal opnås ved at følge anvisningerne som angivet i rubrikkerne Maling og Ekstra behandlinger og

tegnsystemet i Tabel 6.5. Hvor metal-til-metal kontakt forekommer, og ikke kan dækkes ind under Tabel 6.5, skal der søges ekspert rådgivning.

(2)P Procedurene, som er fastlagt i Tabel 6.5, gælder for kontaktområder i de konstruktions-mæssige dele vedr. maling generelt. For behandlingen gældende af bolte og nitter se rubrikken Behandling af bolte og nitter. Agående andre behandlinger se rubrik vedr. Ekstra behandlinger.

(3)P Sammensætningen af sprøjtet metal, som er påført som belægning på stål i kontakt med aluminium for at beskytte samlingen, skal svare til EN AW 1050A.

(4)P Tag- og sidebeklædninger af aluminium skal beskyttes i overensstemmelse med prEN 508-2:1996.

Maling

Generelt

Hvis maling er anbefalet af designeren, skal følgende procedure følges:

Maling skal udføres efter passende forbehandling, som angivet under Rengøring og Forbehandling herunder, i et forløb uden pauser. Overfladen skal være fuldstændig tør. Malingen påføres, når den omkringliggende temperatur er over 4°C, medmindre andet er aftalt med designeren. Kontaktoverflader skal males som angivet af designeren.

Rengøring

Overfladen skal renses, tørres og grundig affedtes med et passende organisk opløsningsmiddel. Flammerensning må ikke udføres.

Forbehandling

(1)P De rensede, affedtede overflader skal forbehandles for at sikre malings-vedhæftning

NOTE 1: Behandlingen kan udføres ved at forøge overfladens ruhed med sandpapir, rustfri stålborster, slibesvampe eller bedst ved hjælp af sandblæsning, under forudsætning af, at slibemidlet enten er alumina eller anden ikke metallisk kobberfrit, skarpkantet blæsemiddel. Mekanisk afrensning kan også gennemføres med korrosionsbestandige stålborster.

(2)P Forkobret ståluld eller forkobrede ståltrådsborster kan ikke bruges til børstning af aluminium.

NOTE 2: Alternativt kan malingsvedhæftning opnåes ved brug af en passende konverteringsbelægning, eller en ætse-primer eller wash primer, forudsat at metaloverfladen er ren og fri for tykke irregulære oxid-belægnings.

Ikke-bitumenbaseret system

(1)P De forbehandlede eller metal-sprøjtede overflader skal have en primer med et passende inhiberende pigment, som er kompatibelt med aluminiumoverfladen og alle efterfølgende påførte belægnings.

(2)P Primeren må ikke indeholde kobber-, kviksølv-, tin- eller blyammen-sætninger, grafit eller andre karbonholdige materialer.

(3)P Den forbehandlede overflade skal males med et eller flere lag maling efter anbefaling fra leverandøren af malingen, som er kompatibelt med primeren og enhver anden derpå følgende maling, og som også er i overensstemmelse med miljøet og som giver den ønskede levetid. En sådan efterfølgende maling må ikke indeholde kobber, kviksølv eller tin, grafit eller kulholdige komponenter og skal især være uden blyammensætninger af nogen art. En aluminiumsmaling skal indeholde en ikke-flageformet undermaling og en flageformet topcoat.

Bitumenbaserede malesystemer

(1)P Bitumenmaling eller dyppepålågt varm bitumen skal bruges.

NOTE: Bitumenmaling anbefales

(2)P Materialet påføres direkte på overfladen, som er rensset i overensstemmelse med det under Rengøring nævnte og med en ruhed, som om nødvendigt er frembragt ved mekanisk afrensning (se Forbehandling herover).

Det må ikke påføres malede eller ætseprimede overflader.

Forbelagt materiale og fabrikspålågt finish.

Fabrikanten må sikre, i overensstemmelse med designerens ønske, at brugen af forbelagt materiale eller fabriksbelagt finish yder passende beskyttelse til alle dele og i det givne miljø.

NOTE 1: Aluminiummaterialer kan leveres færdigmalede med en opløsningsmiddelbaseret maling eller ved en tørproces (pulverbelægning). Slutmalingen kan påføres før fremstilling, på delvist fabrikeret materiale eller efter fabrikationen. Flydende belægnings ovenhærdes normalt ved forhøjet temperatur. Pulverbelægnings ovenhærdes altid. I begge tilfælde vil de ovenhærdede belægnings, sammenlignet med lufttørrede belægnings, have for-bedrede egenskaber hvad angår hårdhed og styrke. Sådanne overfladebehandlings er passende for strips, coils eller

extruderede komponenter. Belægningen kan være tilstrækkelig sej til at tillade mindre deformation, uden at det giver skade f.eks. ved visse former for presning eller profilvalsning. Brugen af fabriks-påførte belægninger og pre-coatede materialer giver generelt en acceptabel beskyttelsesgrad.

NOTE 2: Yderligere beskyttelse ved sammenføjninger er muligvis nødvendigt. Fabrikanten skal sikre, at aluminiumslegeringen ikke er betydeligt svækket under ovnhærdning.

NOTE 3: De fleste fabrikspåførte belægninger hærdner ved opvarmning til ca. 200°C i et kort tidsrum, hvilket normalt kun har meget lille effekt på de mekaniske egenskaber. Det er dog muligt, at der optræder betydelig skade, afhængig af legeringen, dens tilstand samt temperaturprofilen under ovnhærdningen. Rutinemæssig termisk overvågning er normalt og er specielt vigtigt med tykke dele, hvor der er større risiko for over eller under hærdning. En rapport om metallens termiske historie fra et passende hærdningsovervågningssystem anbefales udført.

Behandling af kontaktflader for bærende elementer

1. Procedure O. Ingen behandling nødvendig.
2. Procedure O/X. Behandling afhænger af de bygnings/konstruktionsmæssige betingelser. Små kontaktområder og områder, som tørrer hurtigt, kan samles uden forsegling. (se X).
3. Procedure X. Begge kontaktoverflader skal samles uden spalter, så intet vand kan trænge ind. Begge kontaktflader, inklusiv bolt- og nittehuller skal, før de samles, renses, forbehandles og gives et lag grundmaling (ikke-bitumenbaseret system) eller et lag fugemasse, som strækker sig ud over kontaktfladeområdet. Overfladerne bør samles imens grundmalingen stadig er våd. Når man samler præmalede eller beskyttede komponenter, er det, afhængig af malings sammensætningen, det anvendte beskyttelsessystem, den forventede levetid og miljøet, ikke altid nødvendigt at forsegle kontaktfladerne. Behovet for forsegling skal aftales med designeren/konstruktøren.
4. Procedure Y. Fuld elektrisk isolering imellem de to metaller og alle forankringer sikres ved indlæg af ikkeabsorberende, ikke-ledende tape, pakninger og mellemlæg for at forhindre metallisk og elektrisk kontakt mellem de forskellige metaller i sammenføjningen. Det må sikres at der ikke er spalter mellem isoleringsmaterialet og metallet. Brug af ekstra coating eller forsegling kan blive nødvendigt.
5. Procedure Z. Når procedure Y kræves og kraftoverførslen gennem sammenføjningen udelukker brug af isolerende materialer, bør sammenføjningen udføres uden brug af isolerende elementer, men dog således at hele den samlede sammenføjning er udvendigt forseglet for at forhindre fugt-indtrængning i dele af samlingen. Procedurer bør fastlægges i samarbejde med designeren.

Behandling af bolte og nitter

1. Procedure 0. Ingen ekstra behandling påkrævet.
2. Procedure 1. Aluminiumsbolte i 7075 eller 2017A bør kun bruges ubeskyttede i tørre eller milde miljøer, andre steder bør de grundigt beskyttes.
3. Procedure 2. Aluminiumsbolte i 7075 eller 2017A bør ikke bruges, selvom de er beskyttet.
4. Procedure 3. Inerte skiver eller fugefyldmasse skal anvendes mellem bolthoveder, møtrikker, mellemlæg og forbundne materialer til at forsegle samlingen og forhindre at fugt trænger ind i skillefladen mellem komponenter og fastgørelsenpunkter. Det skal sikres, at kraftoverførsel gennem samlinger ikke påvirkes skadeligt af mellemlæg eller fyldmasse.
5. Procedure 4. Hvor sammenføjning ikke er malet eller på anden måde belagt, skal bolthoveder, møtrikker og nitter, og omkring-liggende områder, som beskrevet nedenfor, beskyttes med minimum et lag grundmaling, således at alle spalter forsegles omhyggeligt. Hvor der bruges forzinkede bolte, er der ikke brug for beskyttelse på samlingens aluminiumsside. Hvor der bruges aluminiumbolte eller -nitter, er beskyttelse ikke nødvendig på aluminiumssiden. Hvor der bruges rustfri stålbolte i forbindelse med aluminium og forzinkede dele, skal det omkringliggende zinkbelagte område af sammenføjningen beskyttes tilsvarende.

Ekstra behandlinger

1. Procedure **a**. Hvis de ikke er malet, er det muligvis nødvendigt at beskytte de tilstødende metaldele i kontaktområdet med en passende dækkende maling i de tilfælde, hvor snavs og fugt kan opsamles.
2. Procedure **z**. Ekstra beskyttelse af zinkbelagte bygningsdele bliver muligvis nødvendigt som helhed.
3. Procedure **g**. Beskyttelse af alle aluminiumdele er generelt vigtigt.

Tabel 6.5 Korrosionsbeskyttelse af metal-på-metal samlinger, Forebyggelse af spaltekorrosion og galvanisk korrosion.

Metal som skal samles med aluminium (M)	Fastgørelseselement Bolt eller nitte (B/N)	Beskyttelse i overensstemmelse med miljøet																	
		Atmosfærisk								Marint						Immersed			
		Landlig				Industriel bymiljø				Ikke-Industriel		Industriel				Fersk Vand		Havvand	
		Tør, uforurenet		Mild		Moderat		Meget korrosiv		M	B/N	M	B/N	Moderat		Meget korrosiv		M	B/N
M	B/N	M	B/N	M	B/N	M	B/N	M	B/N					M	B/N				
Aluminium	Aluminium		0		0	0/X	1	X	1 3	0/X	1 (3)	0/X	1 (3)	X	1 3	X	2 3	X	2-3
	Rustfrit stål	0	0	0	0		0		3		(3)		3		3		3		3 4
	Zinkbelagt stål		0		(4)		(3) (4)	a/g	3 (4)	a	(3) (4)	a	(3) (4)	a/z/g	3 (4)		3 4	(g)	3 4
Zink belagt stål Malet stål	Aluminium		0		0	0/X	1	X	1 3	0/X	1 (3)	0/X	1 (3)	X	1 3	X	2 3		2 3 4
	Rustfrit stål		0		0		0		3		0	0/X	(3)	X	3		3 (4)	Y	3 4
	Zinkbelagt stål	0	0	0	(4)	a	(4)	a/z/g	3 (4)	a	(3) (4)	a	3 (4)	a/z/g	3 (4)	z	3 4	(Z)	3 4
Rustfrit stål	Aluminium		0		0	0/X	1	X	1 3	0/X	1 (3)	0/X	1 (3)	X	1 3	Y	2 3 4		2 3 4
	Rustfrit stål	0	0	0	0		0		3		0	0/X	(3)	X	3	(X)	3	Y	3 4
	Zinkbelagt stål		0		(4)	a	(4)	a/z/g	3 (4)	a	(3) (4)	a	(3) (4)	a/g	3 (4)	(Z)	3 4	(g)	3 4

Note 1: Detaljer for korrosionsbeskyttelsesprocedurer, som angivet af 0, X, Y, Z (pkt. 3.2); 0, 1, 2, 3, 4 (pkt. 3.3); a, z, g (pkt. 3.4)

Note 2: Hvor mere end en procedure er givet, gælder alle i overensstemmelse hermed

Note 3: Til beskyttelse af plader brugt ved tag- eller sidebeklædning, se prEN 508-2:1996

Note 4: Værdier i parentes bestemmes af designeren

Note 5: For rustfrit stål se også Eurocode 3, part 1.4.

6.6.6 HØJSTYRKE SLIPBESTANDIGE SAMLINGER

Hvor ekstra beskyttelse er specificeret af designeren, skal det være i overensstemmelse med pkt.6.6.3, så vidt som tilladt af de mekaniske krav til kontaktoverfladerne i sammenføjninger. Hvor epoxybelægning er brugt, er yderligere beskyttelse unødvendig, men hvor en tør sammenføjning har været brugt, skal sammenføjningsenderne forsegles for at hindre vandindtrængning.

6.6.7 FASTGJORTE SAMMENFØJNINGER

Hvor ekstra beskyttelse er specificeret af designeren, skal det følge pkt. 6.6.5, så vidt det er tilladt ifølge krav til og udformning af samlinger.

Note: Yderligere beskyttelse kan ydes ved at dække kontaktflader og huller til pionde med en højt-smeltende reversibel fedt.

6.6.8 SVEJSTE SAMMENFØJNINGER

Designeren anbefalede beskyttelsessystem skal følges i overensstemmelse med procedurerne i pkt. 6.6.5.

6.6.9 KLÆBE/LIMSAMLINGER

Designeren anbefalede beskyttelsessystem skal anvendes. Limleverandørens ekspertise skal søges for at sikre, at der ikke sker reaktion mellem klæbe- og beskyttelsessystemet, f.eks. opløsnings- eller varmeeffekter.

6.6.10 KONTAKT MELLEM ALUMINIUM OG IKKE-METALLISKE MATERIALER

Designeren beskyttelsesmetode for at undgå kontakt mellem aluminium og ikke-metalliske materialer, således som brugt i byggebranchen, skal følges i overensstemmelse med kravene til den relevante maling eller beskyttelsesmetode.

6.6.11 INSPEKTION OG SIKKERHED

Designeren, eller en repræsentant, som evt. er udpeget fra et uafhængigt inspektions eller prøve/test-firma, skal have adgang til alle steder, hvor arbejdet pågår både on-site og på entreprenørens adresse. Faciliteter til inspektion og prøvning af arbejdet skal stilles til rådighed i overensstemmelse med en procedure, som aftalt mellem producent og designer.

Note: Opmærksomhed henledes på de henhørende lovmæssige krav, som har indflydelse på drift, forarbejdning, fabrikation, opførelse og service.

6.7 KORROSIONSFORHOLD FOR STORE ALUMINIUMSKONSTRUKTIONER I MARINE MILJØER

6.7.1 LEGERINGSVALG

I tabel 6.6 ses de anbefalede aluminiumlegeringer til skibsbygning jf. DNV (Metallic Materials Part 2 Chapter 2), Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1, General rules and rules for building samt NORSOK Standard M-121 (Aluminium Structural Material):

Tabel 6.6 Anbefalede valg af Al-legering til skibsbygning jf. DNV (Metallic Materials Part 2 Chapter 2, Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1 General rules and rules for building samt NORSOK Standard M-121 (Aluminium Structural Material). De markerede legeringer er de valgte i dette projekt.

EN W-nr.	Indhold	Tilstande	$R_m/R_{0,2}, N/mm^2$	Kommentar
5052	AlMg2,5	O/H111/H32/H34	O 170/65	
5154A	AlMg3,5	O/H111	O 215/85	
5754	AlMg3	O/H111/H24	O 190/80	Kan erstatte 5083 ved driftstemperatur > 65°C
5454	AlMg3Mn	O/H11/H12/ H22/H24/H26/H32/H34	O 215/85	
5086	AlMg4	O/H111/H116/ H32/H34	O 240/95	
5083	AlMg4,5Mn0,7	O/H111/H116/ H321	O 276/125	Driftstemperatur < 65°C
5383	AlMg4,5Mn0,9	O/H111/H116/ H321	O 290/145	Driftstemperaturer < 65°C, Se fodnote.
6060	AlMgSi	T5/T6	T6 190/150	
6061	AlMg1SiCu	T4/T5/T6	T6 260/240	
6063	AlMg0,7Si	T5/T6	T6 205/170	
6005	AlSiMg	T5/T6	T6 260/215	Ubalanceret Mg/Si-indh.
6082	AlSiMgMn	T4/T5/T6	T6 310/260	Ubalanceret Mg/Si-indh.

*) 5383 : Risiko for lagdelings-og spændingskorrosion ved H32 og H34. H116 mest bestandig.

Alle de listede legeringer er svejsbare. 6000 serien er modningshærdende, hvor 5000-serien ikke kan varmebehandles bortset fra rekrystallisation/blødgødnings.

5000-serien repræsenterer den mest korrosionsbestandige aluminiumlegeringsserie i marine miljøer. 6000-serien har en moderat god korrosionsbestandighed, som er mindre end for 5000-serien.

Højstyrke aluminiumlegering

EN AW 7108.50 er f.eks. anvendt i Mols Liniens katamaraner grundet legeringens gode styrkeegenskaber og svejsbarhed. Legeringen har været på DNV's liste over godkendte legeringer til skibsbrug, men er taget ud igen, imedens legeringen evalueres. Legeringen er anvendt i katamaranernes bundsektioner primært til langskibs afstivning. Erfaringerne viser indtil dato, at der er visse korrosionsmæssige ulemper ved legeringen. Det er i givet fald en udfordring at gennemføre en passende korrosionsbeskyttelse af de komponenter, som er fremstillet af denne legering.

Tabel 6.7 EN AW 7108.50 er anvendt i Mols Liniens katamaraner grundet legeringens gode styrkeegenskaber og svejsbarhed. Legeringen har været på DNV's liste over godkendte legeringer til skibsbrug, men er taget ud igen.

EN AW-nr.	Indhold	Tilstande	$R_m/R_{0,2}(N/mm^2)$	Kommentar
7108.50	AlZn5,7Mg1Zr0,25	T79	350/420	

6.7.2 NEDDYPNING I HAVVAND

I vand vil galvanisk korrosion optræde ved kobling af aluminium med de fleste andre og mere ædle metaller. Det er oftest denne korrosionsmekanisme, der reducerer aluminiums levetid væsentligt ved eksponering i vand. Fraisolering eller katodisk beskyttelse er nødvendig.

Havvand er meget korrosivt overfor aluminium, hvilket især skyldes det relative høje chlorid-indhold. Anvendelse af aluminium i havvand - herunder også de såkaldte "søvandsbestandige" legeringer - bør således overvejes nøje, og det vil generelt være nødvendigt at foretage korrosionsbeskyttelse, hvis længere levetider ønskes opnået.

I havvand korroderer sensibiliserede aluminiumlegeringer (EN AW7108.50 og 5083), hvorimod stabiliserede aluminiumlegeringer indenfor serierne EN AW 5754, 5083, 6063, 6082 og 7108.50 kun udsættes for mindre korrosion.

Det ses, at de testede TIG-svejste emners frie korrosionspotentialer varierer en del. Dette tyder på, at potentialkravene for at opnå korrosionsbeskyttelse af de enkelte svejste emner varierer indbyrdes.

6.7.3 NEDDYPNING I HAVVAND MED KATODISK BESKYTTELSE

Katodisk beskyttelse

Katodisk beskyttelse er en metode til at beskytte aluminium mod korrosion. Princippet i katodisk beskyttelse er, at der ved en eller flere indbyggede anoder skabes et strømkredsløb, hvor aluminiumkonstruktionen udgør katoden. Strømkredsløbet kræver en vis ledningsevne i vandet. I saltvand er ledningsevnen rigelig, og selv i ferskvand er ledningsevnen i reglen tilstrækkelig.

Strømkredsløbet kræver også en passende geometri. Strømmen vil tage den letteste vej mellem anode og katode, og anoden skal derfor befinde sig nogenlunde lige langt fra de overflader, den skal beskytte. En anode ud for en rørende vil kun beskytte røret i en afstand fra rør enden svarende til 2-3 gange rørdiameteren.

Katodisk beskyttelse kan udføres med anoder af uædle metal, der selv går i opløsning og derfor kaldes offeranoder. Der kan også anvendes uopløselige anoder (magnetit, platineret titan) med påtrykt strøm.

Et eksempel på anvendelse af katodisk beskyttelse af aluminium er beskyttelse i saltvand af f.eks. skibsskrog og endekamre i varmevekslere. Der anvendes normalt offeranoder af zink eller aluminium.

Ved en række anvendelser er det nødvendigt at lave katodisk beskyttelse på aluminium. Dette opnås enten ved at koble aluminium til mere anodiske materialer som f.eks. en magnesiumanode i ferskvand, zinkanode i havvand, en belægning af zink på aluminiumemnet, eller ved at koble aluminium til materialer, der er gjort mere anodiske ved at være påtrykt lave potentialer. Eftersom der ved den katodiske reaktion på aluminium produceres hydroxyl, må strømtætheden ved den katodiske beskyttelse ikke være så høj, at den gør det omgivende miljø alkalisk og dermed mere korrosivt.

Erfaringer med katodisk beskyttelse af aluminium

Følgende faktorer er afgørende for den katodiske beskyttelse af aluminiumkonstruktioner i havvand:

- Jo større forskel der er imellem ønsket beskyttelsespotential og konstruktionens aktuelle korrosionspotential, desto større er anode/strømbehovet. I havvand vil strømbehovet ofte være 60-80 mA/m² svarende til 3-4 mA på de testede emner.
- Tildækning af overfladen med maling, hvilket vil reducere strømbehovet til kun at dække de enkelte gennemgående defekter i overfladebehandlingen.
- For mange anoder og deraf følgende lille belastning på anoderne vil medføre risiko for passivering af anoderne, hvorved de ikke vil kunne levere strøm efter behov.
- Tag hensyn til vægten, da vægten af anoderne kan være af betydning for aluminiumkonstruktionens totalvægt.
- Montering af anoder på et skibsskrog kan medføre ekstra friktion imellem vand og skrog, og evt. medføre erosionsproblemer på anoden eller skroget.
- Konstruktionens strømbehov kan være større end beregnet. Uforudset kobling til en anden konstruktion, som trækker strøm fra anoderne. Dette kunne være et aluminiumskib, der lægger til ved en havn med en stålsponsvæg.
- Ved en båds fart/stilstand eller tungt eller let lastet vil det areal, som skal katodisk beskyttes, variere. Strømbehovet vil tilsvarende variere.
- Vandets strømningshastighed, hvor strømbehovet stiger med vandhastigheden omkring de beskyttede overflader.
- Ved stilstand er aksel og propel i galvanisk kontakt til aluminiumskroget. Den katodiske beskyttelse skal levere strøm til at forebygge den galvaniske korrosion på aluminiumskroget. Under fart vil smørende oliefilm etc. medføre, at den galvaniske kontakt ophører og strømbehovet falder igen.
- Der er altså flere forskellige faktorer, der skal tages hensyn til ved design og vedligehold af katodiske beskyttelsessystemer på aluminiumkonstruktioner.

Offeranoder

Ved anvendelsen af offeranoder skal opmærksomheden henledes på, at dårlig effekt kan skyldes:

- Dårlig kontakt imellem anoderne og aluminiumkonstruktionen afledt af dårlig forankring eller korrosion og belægningsdannelse i befæstigelsen.
- Anoderne er tildækket med maling eller belægninger.
- Anoderne er repassiverede og kan ikke afgive strøm.
- Ledningsevnen i vandet er for lav, hvorved den nødvendige potentialforskel imellem anode og den overflade, som skal beskyttes, stiger meget.
- Anoderne er slidt op.

Potentialstyret katodisk beskyttelse

Ved potentialstyring med en strømkilde, skal denne ikke være overdimensioneret. Omvendt skal den kunne klare de udsving, der er i beskyttelsesbehovet. Hvis anlægget overbeskytter aluminiumoverfladen, er der risiko for, at levetiden for malede aluminiumoverflader kan reduceres, fordi aluminium ved overbeskyttelse vil danne alkaliske miljøer på metaloverfladen, som nedbryder malingen i de uundgåelige gennemgående defekter i malinglaget.

Ved potentialstyring er EN AW 5754 og 6063 er først katodisk beskyttet ved -1200 mV vs. Ag/AgCl. En lidt mere usikker beskyttelse kan allerede ses fra -900 mV vs. Ag/AgCl. Ved -1200 mV vil der være risiko for malingskader.

EN AW 5083 er katodisk beskyttet ved -900 mV til -1200 mV vs. Ag/AgCl. Meget lavt strømforbrug ses efter længere tids test, hvilket kan skyldes kraftig belægningsdannelse og begroning med afledt potentialfald. Dette kan gøre det nødvendigt at afrense katodisk beskyttede aluminiumoverflader af 5083 med jævne mellemrum.

For EN AW 6082 er korrosionspotentialt tæt på -1200 mV vs. Ag/AgCl. Dette kan skyldes kraftig belægningsdannelse og begroning, hvor det er erfaringen, at korrosionspotentialt kan falde. Denne legering kræver ligeledes jævnlig afrensning.

Ved anodisk belastning vil aluminiumoverflader korrodere. Den anodiske belastning er i forsøgene fremkaldt ved at anvende dem som anoder ved potentialstyringen. Men i virkeligheden kunne et utilstrækkeligt styret potentialstyringsanlæg medføre, at dele af aluminiumoverfladerne på den store aluminiumkonstruktion udsættes for en anodisk belastning. Dette kunne f.eks. være på aluminiumkatamaranernes skrog nær waterjettens RS-armaturer.

6.7.4 KORROSIONSAKTORENS BETYDNING FOR LEVETIDEN

Korrosion på aluminium kan antage forskellige former afhængig af legering, driftsmiljø og den konstruktive sammenhæng, hvori aluminiummetnet indgår. Derved vil korrosionens indflydelse på levetiden også have vidt forskellige effekter. Figur 6.24 viser de hyppigste korrosionsformer i aluminium og aluminiumlegeringer.

Generel korrosion

Når oxidfilmen bliver opløst på meget store flader, vil aluminium på grund af dets reaktive egenskaber blive opløst. Ved pH-værdier uden for intervallet 4-8,5 og ved bestemte potential-niveauer opløses oxidfilmen.

Galvanisk korrosion

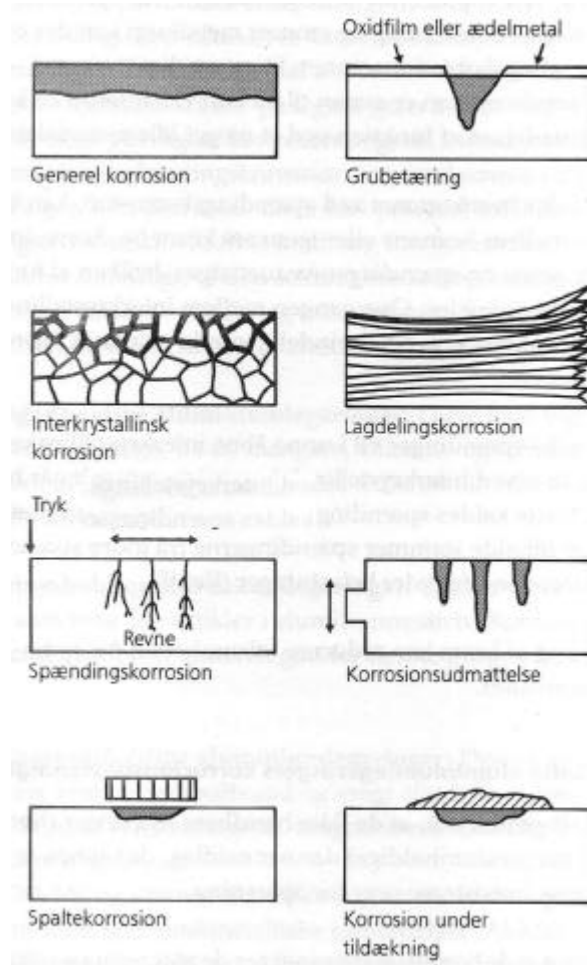
Da aluminium og dets legeringer er uædle, opstår der let galvanisk korrosion ved kontakt til de fleste andre metaller, som er mere ædle. Der skal dog være tale om neddykning eller fugtfilm på samlingen før der er risiko for denne korrosionsform.

Lokalkorrosion

Figur 6.24 viser de mest almindelige former for lokalkorrosion på aluminium.

Pitting (grubetæring)

Dette er et lokalt angreb på det oxidbelagte metal, som hovedsagligt finder sted i kloridholdige miljøer i det neutrale pH-område (f.eks. i havvand), hvor aluminiumlegeringerne ellers må betegnes som passive. Effekten består i, at kloridionerne skaber defekter i det beskyttende oxidlag og dermed medfører grubetæring.



Figur 6.24 Korrosionsformer på aluminium.

Spaltekorrosion

Dette er et angreb som opstår i konstruktionsmæssige spalter forårsaget af forskelle i iltkoncentrationen mellem overfladen af et emne og miljøet i dets spalte. Angrebet udvikles i spalten, heraf navnet.

Interkrystallinsk korrosion

Udskillelse af faser i korngænserne, der er mere uædle end matrix, vil ved tilstedeværelsen af kloridholdigt vand eller fugt føre til korrosion i korngænserne. Denne korrosionsform undgås med korrekte varmebehandlinger, hvor fasen med legeringskomponenterne opløses og dermed fordeles jævnt i aluminiummatrixen, således at en opkoncentrering i korngænserne begrænses.

Lagdelingskorrosion

Denne korrosionsform er en variation af den interkrystallinske korrosionsmekanisme. Her er der tale om mindre ædle udskillelser i tynde lag i valsede legeringer. Selektiv opløsning medfører en lagdeling af emnet.

Spændingskorrosion

Spændingskorrosion er en revnemekanisme. Ved et passende samspil mellem trækspændinger, miljøets sammensætning og emnets metallurgi kan der opstå spændingskorrosions- revner. Et væsentligt træk ved spændingskorrosion er evnen til på kort tid at sætte en konstruktionsdel ud af funktion ved et meget lille materialetab.

Revner, der fremkommer ved spændingskorrosion kan både forløbe mellem kornene eller igennem kornene. Korrosionsbetingelserne og spændingsniveauet afgør, hvilken af formerne, der udvikles. Overgangen mellem interkrystallinsk spændingskorrosion og almindelig interkrystallinsk korrosion er jævn.

Mekaniske spændinger vil kunne åbne interkrystallinske revner, hvorved interkrystallinsk korrosion normalt går hurtigere. Dette kaldes spændingsaccelereret korrosion.

I mange tilfælde stammer spændingerne fra indre spændinger snarere end fra ydre belastninger.

Tillegering af krom kan reducere følsomheden for spændingskorrosion.

De enkelte aluminiumlegeringers korrosionsbestandighed

Generelt gælder det, at de ikke-hærdbare legeringer (herunder de magnesiumholdige) danner oxidlag, der synes at være meget resistente over for opløsning.

I gruppen af de hærdbare legeringer er de magnesium-siliciumholdige legeringer moderat resistente. De kobber- eller zinkholdige legeringer danner derimod meget lidt resistente oxidlag.

For de enkelte grupper kan følgende forhold anføres [3], [7], [10]:

Ren aluminium

Ren aluminium indeholder trods navnet urenheder eller mikrolegeringselementer som i vid udstrækning bestemmer materialets fysiske og mekaniske egenskaber.

I korrosionsmæssig sammenhæng vil f.eks. Al_3Fe være katodisk i forhold til ren aluminium. Disse partikler vil i legeringens overflade danne tyndere og mindre korrosionsbestandige oxidlag end metallet generelt. Den generelle korrosion styres af arealforholdet mellem partikel og matrix i overfladen. Jo større arealerne af de ædle områder er i forhold til de mindre ædle, desto hurtigere vil korrosionen forløbe i de uædle områder.

Kobberholdige aluminiumlegeringer

Kobberindholdet gør dannelsen af galvaniske celler mulig, hvor den sekundære kobberholdige fase (CuAl_2) er katodisk i forhold til aluminiummatrixen. Ved opløsning af kobberioner kan disse udfældes som metallisk kobber på legeringens øvrige overflader og forårsage yderligere korrosionsangreb. Interkrystallinsk korrosion og spændingskorrosion kan forekomme i disse legeringer, hvis den sekundære fase primært udskilles i korngrænserne. En korrekt modning forøger styrken, og medfører samtidigt, at den sekundære kobberholdige fase fordeles i mindre enheder og mere jævnt i aluminiummatrixen, hvorved korrosionsbestandigheden bedres.

Manganholdige aluminiumlegeringer

Disse legeringer er meget bestandige, da de mangan-, silicium- og jernholdige partikler ($\text{Al}_2(\text{Mn,Fe})_3\text{Si}$) er ligeså ædle/uædle som aluminiummatrixen.

Siliciumholdige aluminiumlegeringer

Silicium forekommer som rene Si-partikler i aluminiummatrix. Korrosionsbestandigheden er generelt god for denne gruppe legeringer.

Magnesiumholdige aluminiumlegeringer

Disse legeringer er mere bestandige i saltvand og svagt alkaliske miljøer end kommercielt ren aluminium. Magnesiumindholdet forårsager denne resistens.

Ved 3% Mg og derover udskilles dog en del af det opløste magnesium som intermetalliske forbindelser (Al_8Mg_5). Disse gør legeringerne følsomme for lagdelings- og spændingskorrosion.

Magnesium-siliciumholdige aluminiumlegeringer

Indholdet af Mg_2Si -faser, der betinger denne gruppes modningshærdning, har ingen nævneværdig betydning for legeringernes korrosionsbestandighed trods den omstændighed, at denne fase både er anodisk i forhold til aluminiummatrix og aktiv under sure forhold. Tilsætning af kobber er styrende for korrosionsbestandigheden.

Zinkholdige højstyrke aluminiumlegeringer

Zinkindholdet gør legeringerne anodiske i forhold til de øvrige aluminium legeringer. Følsomheden for spændingskorrosion kan nedsættes ved korrekt varmebehandling men ofte er man nødsaget til f.eks. at anodisere emnerne for at reducere risikoen for spændingskorrosion. Tillegering med kobber forbedrer styrkeegenskaberne, men formindsker korrosionsbestandigheden, (visse legeringer i denne gruppe er af samme grund kobberfri).

Alclad materialer: Alclad materialer består af en kerne af højstyrke aluminiumlegering, belagt med en mere korrosionsbestandig lavstyrke aluminiumlegering (clad-materialet). Dette er et udbredt kompromis mellem styrke og bestandighed som anvendes i flyindustrien.

6.7.5 KARAKTERISTISKE INDIKATORER PÅ KORROSION OFF-SHORE OG ON-SHORE

Visuel inspektion

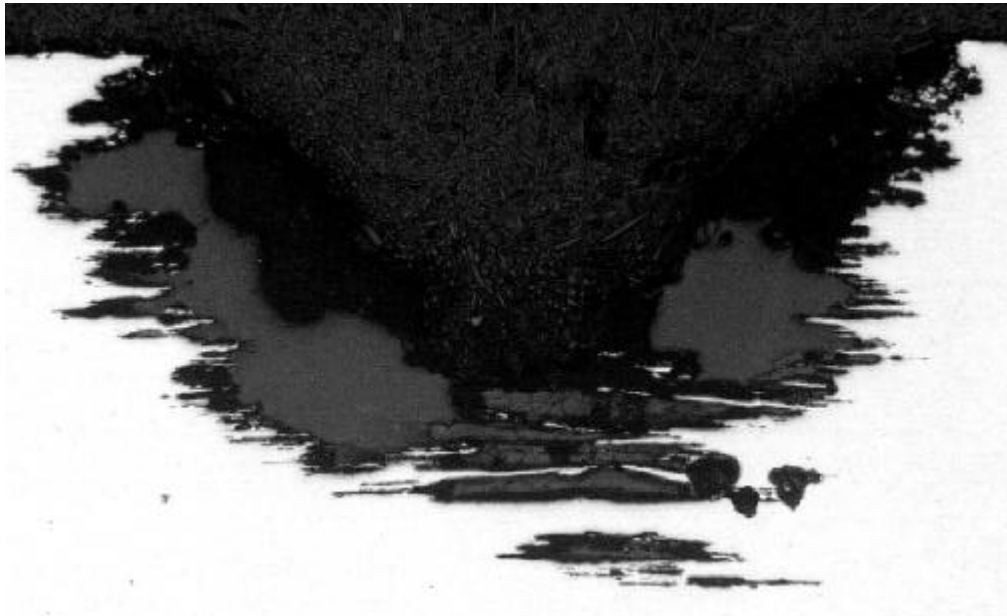
Ved visuel inspektion vil en lang række indikationer på korrosion kunne registreres med henblik på at undgå havarier og på længere sigt at forbedre det systematiske vedligehold.

Følgende små cases præsenteret i Figur 6.25 til Figur 6.30 er lærerige eksempler på korrosionsskader, som er konstateret ved visuel inspektion.

Ubehandlede overflader



Figur 6.25 Oversigtsbillede af den lokaliserede og selektive korrosion på en longitudinal med et påsvejst knæ Korrosionens dybde er fra ca. 3 mm og til gennemtæring.



Figur 6.26 550 x. Tværsnit af selektivkorrosionsangreb i de varmepåvirkede zoner (HAZ) på longitudinalerne vist på Figur 6.25. I de varmepåvirkede zoner er grundmaterialet sensibiliseret lokalt og medført stor følsomhed for interkrystallinsk korrosion med udbredelse i form af exfoliationskorrosion.

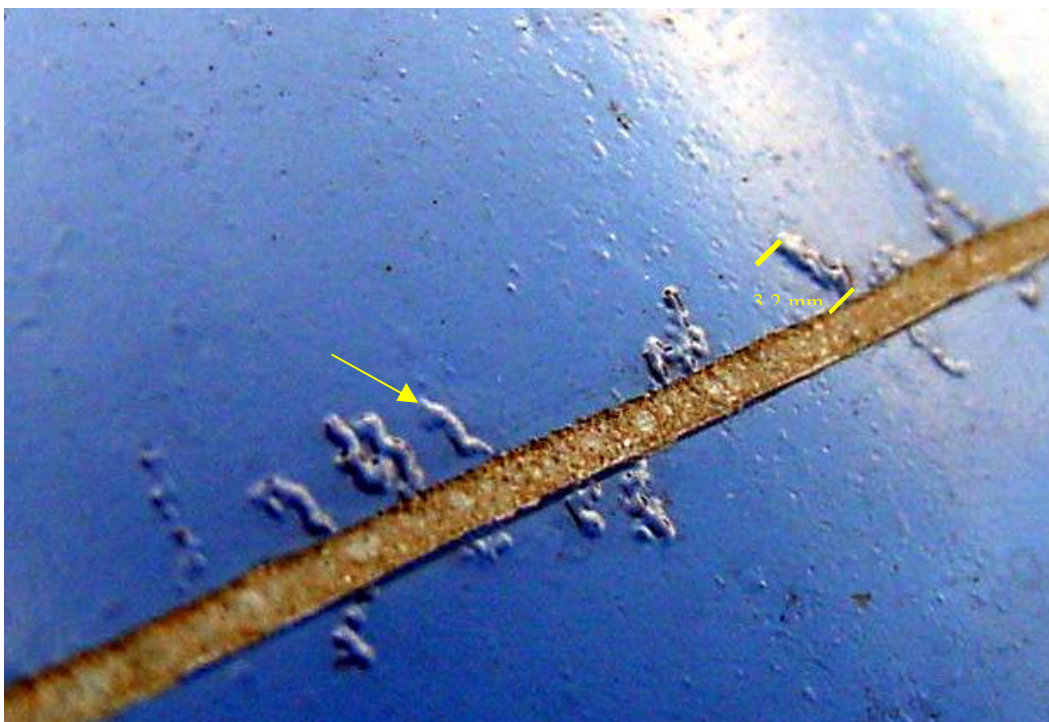


Figur 6.27. Korrosionsangreb på aluminiumplader af EN AW 5083 på broen imellem pontonerne som følge af sensibilisering af legeringen. Sensibiliseringen af de ubeskyttede overflader på indersiden af hulrummets bund kombineret med adgang af havvand, som ikke effektivt er bortledt.

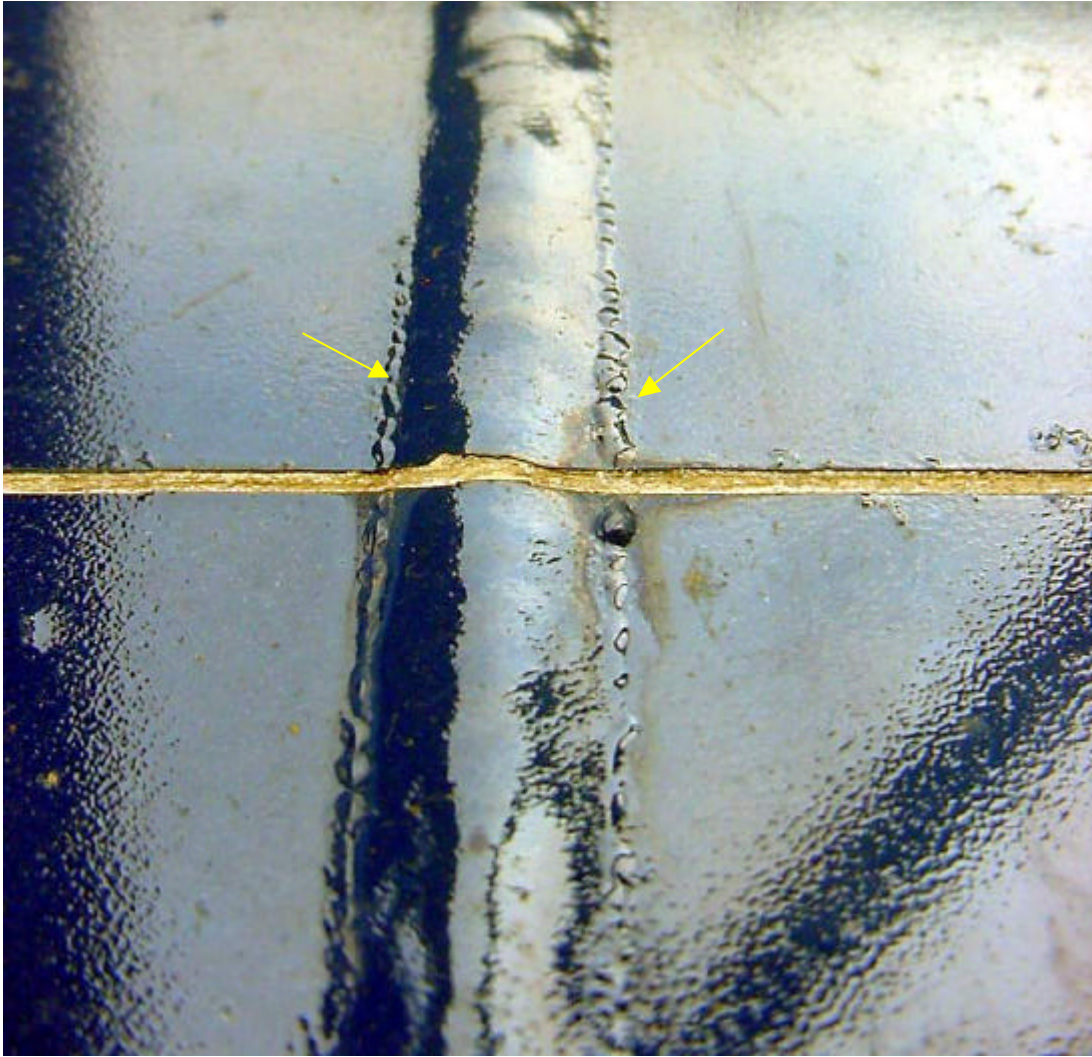
Malede overflader



Figur 6.28. Filiform-lignende underkorrosion omkring skruehul, hvor skrue af rustfrit stål har været monteret. Det er vist hvorledes underkorrosionens udstrækning er bestemt som retlinede afstand fra hullets kant til korrosionens fjerneste punkt. i dette tilfælde er udstrækningen lig 8 mm.



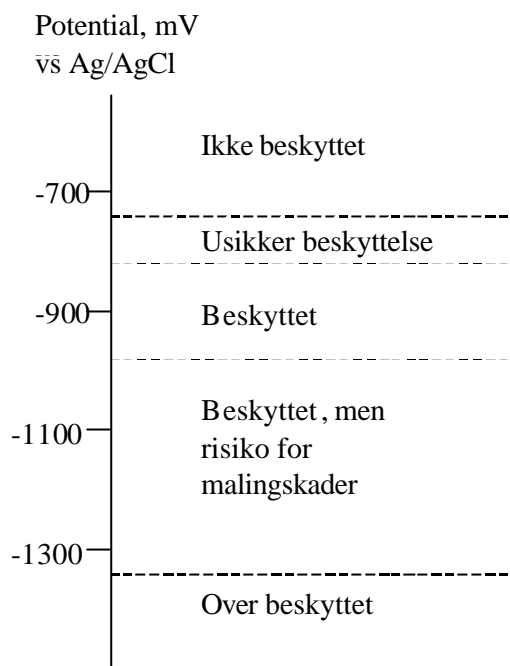
Figur 6.29 Filiform korrosion omkring introduceret ridse. Filamentets "rette" længde fra ridsen er målt til 3,2 mm, hvilket svarer til filiform korrosionens længde fra ridsen.



Figur 6.30 Filiform korrosion initieret ved gennemgående ridse på tværs af svejsning. Filamentet bevæger sig langs med svejsningen.

Potentialmåling

Figur 6.31 viser en oversigt over de i praksis erfarede potentialniveauer for katodisk beskyttelse af aluminium i havvand og effekten af uhensigtsmæssigt valgte potentialniveauer.



Figur 6.31 Oversigt over niveauer for katodiske beskyttelse af aluminium ved potentialstyring. Tillige er effekten af uhensigtsmæssigt valgte potentialniveauer vist.

6.8 RETNINGSLINIER FOR KONCEPTER FOR KORROSIONSOVERVÅGNING

I forbindelse med store aluminiumkonstruktioner vil en eller flere af følgende forebyggende foranstaltninger forebygge de observerede korrosionsskader:

En eller flere af følgende korrosionsbeskyttelseskoncepter bør anvendes i forbindelse med korrosionsbeskyttelse af store aluminiumkonstruktioner i marine miljøer:

- Fugt styring udføres i lukkede rum, og der anvendes ikke fugtsugende materialer som f.eks. isolering.
- Det katodiske beskyttelsessystem opbygges med en kombineret offeranode og potentialstyring. Potentialstyringen med en strømkilde skal kun træde i funktion, når der skal korrigeres for de dynamiske påvirkninger af den neddyppede aluminiumkonstruktions overflader. Dette vil være skiftende væskeflow, vandstand, ydre galvaniske belastninger eller f.eks. skiftende påvirkning fra propeller i stilstand/drift. Fordelen vil være, at anodernes sikre drift klarer det meste af belastningerne, men at de marginale påvirkninger klares af potentialstyringen uden at antallet af offeranoder af levetidsmæssige hensyn sættes højt op med deraf følgende vægtstigning, vandmodstand eller risiko for repassivering af anoderne.
- Installation af alarm-funktion, som giver alarm, når aluminiumkonstruktionen kommer i kontakt med eksterne elementer som kraftværksjord, spunsvægge eller f.eks.

rørledningssystemer, som kan medføre betydelig galvanisk korrosion. Denne kunne være baseret på

- en løbende kontinuitetsmåling af, om der er elektrisk/metallisk kontakt til eksterne elementer, såfremt aluminium konstruktionen er mobil.
- regelmæssig måling af om den fastmonterede aluminiumkonstruktion ved et uheld er blevet forbundet til eksterne elementer ved f.eks. ombygninger.
- Overfladebehandling med maling anvendes for at reducere arealet af det område af aluminiumkonstruktionen, som skal katodisk beskyttes. Alternativt skal malingen forebygge korrosion i fugtige områder, som ikke kan fugtkontrolleres. Der vil i så fald være krav om, at en forsvarlig overfladebehandling og vedligeholdelsesbehandling kan gennemføres i praksis.

6.9 ATMOSFÆRISK BELASTEDE KONSTRUKTIONER

Atmosfærisk korrosion af aluminium medfører normalt kun dannelsen af små gruber med ringe dybde, hvorved overfladen bliver ujævn. Efter en høj korrosionshastighed i begyndelsen vil korrosionshastigheden, målt som dybden af de udviklede angreb, aftage. Aluminiumoverfladen bliver mat pga. de grålige korrosionsprodukter og ansamlinger af overfladeforurening.

For de fleste aluminiumlegeringer bortset fra de kobber- og zinklegerede kan der i de første 6 måneder til 2 år efter opsætning observeres korrosionshastigheder op til 0,1 mm/år, derefter 0,003 mm/år ved havområdet og 0,0008 mm/år i landlige distrikter. Dette gør aluminium anvendeligt til f.eks. tag- og facadebeklædning. For de kobber- og zinklegerede aluminium legeringer kan ses væsentlig højere korrosionshastigheder.

For atmosfærisk eksponerede aluminiumemner kan man tale om en æstetisk og funktionsmæssig levetid. Den æstetiske levetid er den periode, indenfor hvilken emnets udseende er acceptabelt og endnu ikke præget af talrige tæringsgruber med grålige korrosionsprodukter. Med den funktionsmæssige levetid menes perioden, hvori emnets styrke, varmeledning, elektrisk ledningsevne eller afskærmende effekt er intakt. Den funktionsmæssige levetid vil gennemgående være længere end den æstetiske levetid.

For at opnå lang æstetisk levetid vil det være nødvendigt at overfladebehandle aluminium.

6.9.1 FILIFORM KORROSION

Indledning

I praksis blev de første forekomster af filiform korrosion erkendt indenfor flyindustrien, medens det ikke blev detekteret i bygningskomponenter før end i 1980'erne. De første observationer indenfor dette område dukkede op i områder nær havet, navnlig i situationer, hvor et blandet marint og industrielt miljø forekom.

Det stigende antal rapporter om filiform korrosion gennem de senere år kan tilskrives det stigende forbrug af aluminium til konstruktionsformål. Hvor filiform korrosion optræder, udvikler den sig uafhængig af den anvendte belægningstype og behandlingsmetode. Den minimale korrosionsdybde

taget i betragtning ($<40 \mu\text{m}$), tabes der ikke mekanisk stabilitet, men der er stor interesse i at minimere forekomsten af filiform korrosion fra et levetidsmæssigt synspunkt for hele overfladebehandlingen.

Efterhånden som skaldannende korrosion udvikler sig, forbindes rækker af blærer ofte på kædelignende måde, hvilket leder tanken hen på nedbrydning som følge af filiform korrosion. Det er derfor vigtigt klart at skelne tilfælde af filiform korrosion fra tilfælde af sædvanlig blæredannelse. I 80% af de tilfælde, hvor filiform korrosion forekommer, er det erkendeligt indenfor 2 år efter en bygnings ibrugtagning. Det er derfor ikke sandsynligt, at der er en indbygget fare i overfladebehandlede aluminiumkonstruktioner, hvor der ikke konstateres skader indenfor 2-3 år.

Karakterisering af filiform korrosion

Filiform korrosion starter ved brud eller anden defekt i belægningen. Den trådformede bevægelse er lineært fremadskridende, selvom retningen er tilfældig.

De trådede spor, der opstår som følge af korrosion, er generelt mellem 0,1 og 0,5 cm brede og skrider typisk frem med en hastighed på ca. 0,15-0,4 mm/dag.

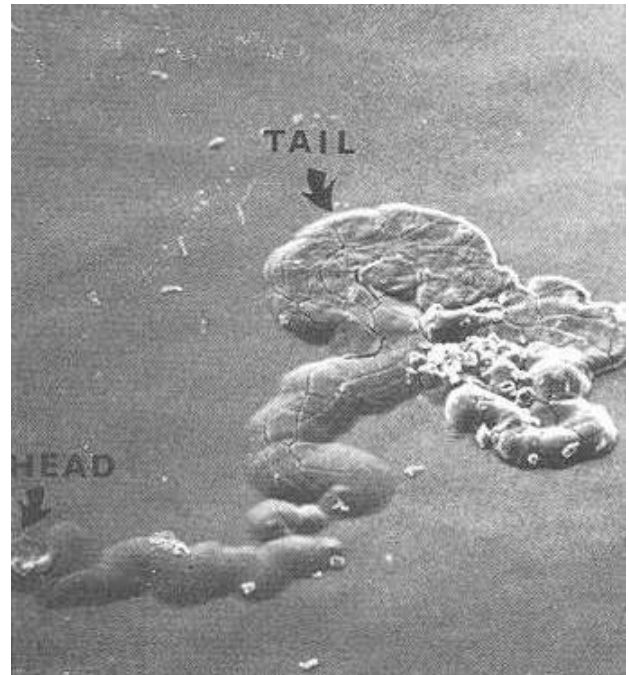
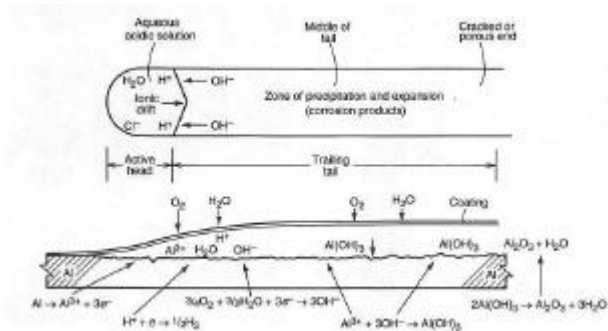
Sporene krydser hverken hinanden eller afbrydelser i belægningen. Når 2 "hoveder" mødes, smelter de sammen og fortsætter som et enkelt trådformet spor. Når "hovedet" af et spor møder kroppen i et andet, standser det, eller sporet afbøjes og fortsætter i en anden retning.

Den forreste kant af hovedet indeholder en vandig opløsning med lav pH-værdi, og den viser sig at være det anodisk mest aktive område. Salte er nødvendige for initieringen af filiform korrosion. Vand er nødvendigt, men trådformen udvikles indenfor et begrænset, relativt fugtighedsinterval (ingen tråddannelse $>95\%$ RH). Filiform korrosion skrider kun fremad ved tilførsel af ilt. Der sker ingen korrosion i helium- eller kvælstofatmosfære. Tråddannelsens størrelse og hastighed er uafhængig af belægningens fysiske egenskaber.

Mekanisme ved filiform korrosion

De reaktioner, der sker i forbindelse med filiform korrosion, er velkendte, men de involverede kinetikker og transportmekanismer er endnu ikke fuldt forståede.

Mekanismen ved filiform korrosion er et eksempel på et iltkoncentrationselement. Et typisk trådelement kan inddeles i to principielt forskellige områder – hovedet og halen. Hovedet indeholder en opløsning af korrosive salte, medens halen består af tørre korrosionsprodukter og kan betragtes som et inaktivt område. Der sker elektrokemiske reaktioner i hovedet, som omfatter et veldefineret anodisk område i fronten og et katodisk område i bagenden. De reaktioner, der sker ved anode (active head – aktive hoved) og katode (tail-hale) er opsummeret i Figur 6.32 og Figur 6.33.



Figur 6.32 Øverst ses skitse af mekanismen bag filiform korrosion. Nederst øst område i filamentets hoved efter afrensning af malingfilm og korrosionsprodukter.

Figur 6.33 Karakteristisk filament i forbindelse med filiform korrosion, hoved (head) og hale (tail) er markeret.

Initiering af filiform korrosion

På overfladebehandlet aluminium starter det første angreb, hvor behandlingen ikke er intakt, og hvor aluminiumets evne til at gendanne sin ilthinde forhindres af tilstedeværelsen af natriumklorid. Ved høj relativ fugtighed begynder saltet at opløses, en koncentreret, elektrolytisk opløsning dannes og i forbindelse hermed en korrosionscelle. Ved elektrolyt/luft-skillefladen dannes katode, og ved elektrolyt/aluminiumskillefladen anode. Ilt diffunderer ind i elektrolytten og reduceres ved katoden, medens aluminium går i opløsning ved anoden. Ved opløsningsprocessen bliver den elektrolytiske opløsning mere koncentreret, dens osmotiske tryk stiger, og resulterer i en forøget optagelse af vand. Elektrolyttens og korrosionsprodukternes stigende rumfang resulterer i, at der dannes områder med forskellig iltkoncentration. Disse forskelle i iltkoncentration er den drivende kraft i fremvæksten af

filiform korrosion. Opløsningen af metal er kraftigst, hvor iltkoncentrationen er lavest, hvorfor tråd hovedet vandre væk fra iltkilden.

Faktorer med praktisk betydning for filiform korrosion

Stedet

Filiform korrosion er oftest rapporteret fra marine miljøer (især hvor dette er kombineret med en industriel atmosfære), men et mindre antal er også forekommet på indlandslokaliteter. De fleste tilfælde har udviklet sig indenfor to år fra ibrugtagning af en overfladebehandlet aluminiumkonstruktion, - efter denne periode er filiform korrosion meget sjælden.

Filiform korrosion findes aldrig ved fugtighedsniveauer under 65% relativ fugtighed. Det gunstigste fugtighedsinterval for tråddannelse er 75-85%. Filiform korrosions udvikling forøges kraftigt med temperaturen indenfor dette fugtighedsinterval især ved temperaturer over 40°C.

Natriumklorid influerer på initieringen af filiform korrosion i marine omgivelser.

Konstruktionen

Filiform korrosion starter altid i områder, der ikke er beskyttet af overfladebehandlingen, så som skæreeender, borede huller, skarpe kanter, ridser og mekanisk betingede afskrabninger.

Save-, fræse- og boreoperationer udført under fabrikation kan påvirke initieringen af filiform korrosion på flere forskellige måder. Virkningen af forhøjet temperatur, forurening med jern og plastificering af overfladebehandlingen ved indvirkning af smøremidler er blevet fremført.

Tilbøjeligheden til korrosion kan blive forøget i væsentligt højere grad ved dannelsen af en spalte mellem overfladebehandling og underlag efter mekanisk beskadigelse.

Blottelse af et område af blankt metal under disse operationer er måske den vigtigste faktor af alle. Metoder, der kunne tænkes anvendt til at forhindre filiform korrosion, som opstår i områderne omkring sårene er:

1. Forsegling ved svejsning inden overfladebehandling.
2. Brug af et forseglingsmateriale under eller efter samling, men efter påføring af overfladebehandlingen.
3. Dypning af ubeskyttede profiler i et beskyttende stof før samling af vinduesrammen.
 - Det første tiltag er dyrt. Mekaniske spændinger opbygget ved svejsning må fjernes, supplerende slibning må udføres for at opnå en glat overflade.
 - Anvendelse af et forseglingsmiddel har vist sig skuffende i praksis. På grund af små bevægelser i rammerne under samlingen forskubbes forseglingen ofte, og spalter fyldes ikke helt. Når forsegling udføres efter samling, er det meget svært at fylde en spalte på grund af dens ringe bredde.

- Dypning af ubeskyttede ender før sammenføjning resulterer i en meget tynd malingsfilm på skarpe profilkanter, og malingen giver ringe beskyttelse mod filiform korrosion.
- Hvis beskyttelsessystemet er ufølsomt for tråddannelse spreder korrosionen sig ikke mere end 1 mm i de aktuelle områder, og indførelse af dyre forseglingsmetoder skulle ikke være nødvendigt.

Aluminiumlegeringen og overfladens tilstand

Sammensætningen af aluminiumlegeringen har indflydelse på filiform korrosion. Super rent aluminium (99,98%) udviser mindre korrosion end magnesiumholdige legeringer (AlMg1, AlMg3) i naturlige vejnings-prøvninger. Andre forskningsgrupper har påvist ens opførsel af legeringerne AlMg1 og AlMgSi0,5. En tiltagende anvendelse af genbrugsmaterialer har højnet opmærksomheden omkring niveauet af urenheder i aluminium til ekstrudering. Virkningen af kobber- og jernurenheder har været undersøgt, og især unormalt høje jernindhold er blevet sammenkædet med forøget omfang af filiform korrosion. Der er opstillet maksimale grænser for indholdet af jern og kobber i den mest anvendte aluminiumlegering til ekstrudering, AA6063. I dag er det bevist, at magnesium - selv i meget små koncentrationer i aluminiumlegeringen - medfører udskillelse af nanolag af magnesium på grund af fordampning og lokal udskillelse af magnesium i overfladen i forbindelse med opvarmning af aluminiumemnet. Dette medfører en sensibilisering af aluminiumoverfladen overfor filiform korrosion. Det betyder, at den mest effektive afrensning af stykgods er en ætsning af overfladen f.eks. ved anodisering, hvor nano-magnesiumlagene fjernes effektivt.

Forbehandling

Filiform korrosion opstår direkte på aluminiumoverfladen, d.v.s. mellem forbehandlingslaget og metallet. Chromlaget opløses under indvirkning af korrosionsprocessen og forbliver i korrosionsprodukterne.

Det er blevet antydnet, at en af de faktorer som kan medvirke til at udelukke eller forsinke filiform korrosions opståen ville være at forbedre vedhæftningen mellem underlag og overfladebehandlingen. På denne måde ville initieringen af korrosion i nærheden af en defekt blive gjort vanskeligere.

Trods chromatsystemernes gode egenskaber i forbindelse med forbehandling af aluminium, skal de af miljømæssige hensyn fases helt ud indenfor de næste 5-8 år. For store aluminiumkonstruktioner har chromatsystemerne ikke nogen afgørende betydning, da det ikke er muligt at overfladebehandle så store elementer ved de påkrævede dyppeprocesser. Derimod overvejes silanbehandlinger, som har vist gode resultater ved forebyggelse af vedhæftningstab og filiform korrosion.

Overfladebehandlingssystemet

Filiform korrosion kan opstå på aluminium og dets legeringer uafhængigt af den påførte overfladebehandling. –fænomenet er blevet iagttaget under ”våd” maling, pulvermaling, anodisering og selv på overflader dækket med tin, sølv og guld

- Høje belægningstykkelser viste sig ikke at forhindre forekomsten af filiform korrosion.

- Udviklingen af filiform korrosion har vist sig at øges over belægningens glasomdannelsesstemperatur (T_g)

Accelereret prøvning

En række accelererede prøvningsmetoder er blevet bedømt, og nogle er blevet specielt udviklede til at forudsige systemers følsomhed overfor filiform korrosion. Tråddannelse er blevet reproduceret i forskellige laboratorier under anvendelse af Machu-testen, eddikesur salttågeprøvning, Lockhead-testen (DIN 65472) og filiform korrosions-testen (ISO 4623). Tråddannelser er især blevet frembragt konsekvent efter DIN 65472-metoden, i hvilken plader ridses, eksponeres i saltsyredamp for at fremkalde et korrosivt angreb, og derefter eksponeres i et prøvechamber ved 40°C og 82% relativ fugtighed.

Ridsen har vist sig at være en potentiel fejlkilde under både naturlige og accelererede afprøvninger. Dybden af dette snit vil afhænge af en række faktorer, bl.a.:

- Belægningstykkelse og –hårdhed.
- Forbehandlingstykkelse og –kvalitet.
- Overfladeruhed og –geometri.
- Bladskarphed/operatørens styrke.

Der vil ikke opstå nogen korrosion, hvis ridsen ikke gennembryder forbehandlingslaget, så der eksponeres bart metal. En kant som resultat af en egentlig udskæring forventes at frembringe mere ensartede resultater i fremtidige afprøvninger end traditionelle ridsemetoder.

6.10 KORROSIONSBESKYTTELSE VED OVERFLADEBEHANDLING

6.10.1 FORBEHANDLING AF MINDRE STYKGODS

Udgangspunktet for en holdbar maling eller plastbelægning er altid et passende forbehandlet underlag. Forbehandlingen skal ikke alene sikre en god vedhæftning fra starten, men også at vedhæftningen forbliver god under de klimapåvirkninger, konstruktionen udsættes for herunder fugtpåvirkninger. Det er således en kendsgerning, at polymerer ikke hæfter bedre på aluminiums naturlige oxidlag og ubehandlede overflade, end at en relativ kortvarig vandpåvirkning fører til at vand fortrænger polymeren i grænselaget. Forbehandlingen skal således betragtes som et meget vigtigt led i belægningsopbygningen.

Oxydlagets tykkelse på aluminium er en vigtig parameter for vedhæftningen af den overfladebehandling, som skal opbygges, således at jo tyndere oxidbelægningen er, desto bedre vil vedhæftningen blive. Efter en tør sandblæsning eller slibning i tørre omgivelser vil oxidlaget være ekstremt tyndt, hvorimod en enkelt kondensvandspåvirkning øger tykkelsen drastisk. Det er derfor vigtigt, at en sandblæst aluminiumsoverflade ikke udsættes for fugt inden den primes. Primer påføres derfor hurtigst muligt efter sandblæsning og altid samme dag.

Ofte karakteriseres den nødvendige behandling som "let sandblæsning", "sandsvirpning" eller "mattering ved sandblæsning" og som kriterium for en tilfredsstillende overflade gælder, at der intet steds må kunne ses blanke pletter i 8-10 ganges forstørrelse. Matteringen skal helst ske med et skarpkantet blæsemiddel af mineralsk materiale. Bedst egnet er korund, men fint blæsemiddel af hvidt støbejern kan også give tilfredsstillende resultater.

I stedet for en mekanisk forbehandling kan der påføres enten en konverteringsbelægning, et uforseglet anodiseringslag eller en ætse primer.

Ved opbygning af konverteringsbelægninger anvendes oftest chromat- og fluoridholdige sure opløsninger, som medfører dannelsen af belægninger af blandede oxider af aluminium og krom, eller, når syren er fosforsyre, i blandinger af aluminiumfosfat, aluminiumoxid og kromoxider.

Ved anodisering undlades forsegling af det opbyggede oxidlag. Kemisk oxidation foretages ofte med hexavalent krom i varme, alkaliske opløsninger, og belægningen udvandes for opløselige kromforbindelser inden den overmales. I forhold til den rene anodisering betyder de tilbageblevne uopløselige kromforbindelser, at belægningen tilføres en korrosionsbeskyttende effekt udover at forøge vedhæftningen for den følgende overfladebehandling.

Belægninger, som indeholder hexavalent krom, er aktivt korrosionsbeskyttende, men umiddelbart kun anvendelige under maling til udendørs anvendelser, hvis de inden malingspåføringen undergår en varmebehandling ved 80-90°C. Ganske vist nedsætter varmebehandlingen den korrosionshindrende virkning ved at gøre kromforbindelserne langt mere tungtopløselige, men samtidig opnås, at der under fugtpåvirkning undgås mærkbare osmotiske effekter.

6.10.2 FORBEHANDLING AF STØRRE MARINE INSTALLATIONER

Ved forbehandling af større aluminiumkonstruktioner anvendes i dag primært sandblæsning, hvor overfladerne inddeles i områder, som kan afrensnes, sandblæses og males indenfor 24 timer. Kemisk forbehandling anvendes ikke i dag. Men jvf. tidligere rapporteret undersøgelser af silaner (SASAK-RAP-LE-AKS-FI-0002-00) er der muligheder for anvendelsen af en række silaner. Dette er stadig på udviklingsstadiet og forventes ikke integreret de første 5 år.

6.10.3 OPSTILLING AF SIMPLE KVALITETSKRITERIER OG UDFALDSKRAV FOR FORBEHANDLEDE ALUMINIUMOVERFLADER FØR VIDERE OVEFLADEBEHANDLING

Det er væsentligt, at kunne fravælge aluminiumplader/profiler til konstruktionsformål, som har fået en så betydende korrosionsbelastning under oplagring, at de ikke kan afrensnes på tilfredsstillende vis før overfladebehandling. Følgende klassifikation af rustgrader på aluminiumoverfladen kan bruges ved vurdering af afrensingskvaliteten på aluminiumoverflader før videre overfladebehandling.

Tabel 6.8 Rustgrader for aluminium.

Rustgrad	Beskrivelse
0	Gennemsigtige oxidbelægninger
1	Generelkorrosion – betydelig misfarvning
2	Pitting – overfladisk lokalkorrosion
3	Pitting dyb korrosion evt. som interkrystallinsk korrosion

Erfaringen viser, at lettere indledende korrosionsbelastning af aluminiumoverfladerne ved opbevaring eller transport ikke er afgørende for den overfladebehandlede overflades egenskaber på kort sigt. Egentlig materialetab, som efterlader porer eller revner i overfladen medfører betydelig levetidsforringelse.

Dvs. de foreslåede rustgrader ikke bortset fra rustgrad 3 vil være afgørende for systemets levetid på kort sigt, så længe den indledende forbehandling udføres optimalt.

Effektiv fjernelse af nannolag af udskilt magnesium på de magnesiumholdige legeringer (EN AW 5754 og 5083) optimerer levetiden. Dette nanolag af magnesium vil typisk forsvinde ved en kortere varende korrosionsbelastning gerne med en udvaskende karakter og en sandblæsning, hvor korrosionsprodukterne fjernes eller ved ætsning af overfladen.

På EN AW 6063 og 6082 er den indledende korrosionsbelastning mere kritisk og vil i reglen medføre levetidsreduktion af den sluttelige overfladebehandling.

6.10.4 MALING OG PLASTSYSTEMER

Selvom der er lighedspunkter mellem malingbehandlinger og plastbelægninger og grænsen mellem dem ikke kan trækkes skarpt, vil de blive behandlet hver for sig i det følgende.

"Våde" malingsystemer

Et malingsystem er oftest sammensat af:

Grundmaling, som skal skabe vedhæftning mellem underlag og efterfølgende malinger, samt virke korrosionsbeskyttende, når fugt når ned til underlaget.

Mellemmaling, som primært er barriere mod fugt.

Slutmaling (dækmaling eller finish), som danner barriere samt udviser kemisk bestandighed og lysbestandighed.

Hver malingstype er sammensat af flere komponenter:

Bindemiddel

Pigmenter (korrosionsbeskyttende, kulør, forstærkende)

Fyldstoffer

Opløsningsmidler og fortynder

Additiver.

Det vil føre for vidt at gennemgå malingernes sammensætning i alle detaljer, men nogen hovedpunkter skal gennemgås.

Bindemidler

Alle egentlige malinger kan deles op i to hovedgrupper efter den måde, de danner fast film på, og adskillige pulvermalinger kan indpasses i det samme grundmønster.

Den ene gruppe omfatter bindemiddeltyper, hvor mindre molekyler udgør en flydende masse, hvori der ved en kemisk reaktion sker en sammenkædning til meget store molekyler, som er faste stoffer. Den flydende masse kan bestå af en komponent, som polymeriserer til kæmpemolekyler ved reaktion med luftens ilt eller vandamp, eller den kan bestå af en blanding af to komponenter, der reagerer med hinanden. Malingerne er kemisk hærdende eller reaktionshærdende.

Den anden gruppe malinger danner alene faste film ved, at opløsningsmidler og fortyndere fordamper. Der foregår ikke en egentlig hærkning. Man bruger derfor betegnelsen "fordampningstørrende", som godt kan være lidt misvisende, fordi også de kemisk hærdende malinger ofte skal tørre samtidig med, at hærkningsreaktionen foregår.

Det er karakteristisk for de kemisk hærdende malinger, at de i fuldt ophærdet tilstand stort set ikke mere er opløselige. Det medfører gener i påføringsfasen, fordi det indebærer, at der normalt er maksimale overmalingsintervaller, som ikke må overskrides, fordi der så ikke opnås god vedhæftning mellem de enkelte lag. I forbindelse med vedligehold er overmalingsintervallet langt overskredet, og der skal oftest foretages slibning eller anden oprivning af overfladen for at opnå vedhæftning. Man åbner til pigmenterne ved oprivningen, og maler på de blottede pigmentkorn.

Der er i de senere år dukket kemisk hærdende malinger op, som ikke har noget maksimalt overmalingsinterval. De er enten iblandet et fysisk tørrende bindemiddel, eller den ene komponent indeholder et overskud af reaktive grupper, så den samme malingstype kan reagere med den gamle maling. De overmalbare, kemisk hærdende malinger kan ikke forventes at have lige så gode filmegenskaber som de inaktive typer. De skal normalt påføres i større tykkelser for at give samme holdbarhed.

De mest bestandige malinger skal findes mellem de kemisk hærdende og primært de tokomponente som epoxy-, polyurethan- og akryl-typerne. De to sidstnævnte typer leveres i særligt lysægte kvaliteter.

Blandt de "lufthærdende" skal nævnes et par vigtige typer. Alkydmalinger, som er en slags polyester, hærder ved at reagere med luftens ilt. Hærdeprocessen fortsætter meget længe, og alkydsystemer bliver med tiden meget sprøde. Der findes mange alkydtyper, hvoraf nogle er kemisk forstærkede med forbedrede egenskaber på forskellige områder til følge. Styrenalkyder er meget hurtigtørrende,

og urethanalkyd og epoxyester har forbedret fugt- og kemikalieresistens. I grundmalinger anvendes alkyd i blanding med tørrende olie, som giver en forbedret befugtningsevne, så malingen hæfter bedre til underlaget, specielt hvis underlaget ikke er helt rent.

De fordampningstørrende malinger er for de flestes vedkommende reversible, dvs. de kan i et vist omfang genopløses af samme eller lignende malingstype, dvs. de har ikke noget maksimalt overmalingsinterval og er dermed lette at reparere og vedligeholde.

De er almindeligvis temmelig længe om at tørre og er bløde i lang tid. Ved længere tids anlæg emne mod emne eller underlag mod emne sker en sammenklæbning, så malingen rives i stykker ved adskillelse. Der kan gå halve år inden rimeligt gode mekaniske egenskaber er opnået.

Malingerne kan være vanskelige at påføre med pensel, rulle og handske, fordi værktøjet hæfter i underliggende malinglag og river dem op, men risikoen mindskes med lange intervaller mellem påføringerne. Ved påføring af et enkelt lag vedligeholdsmaling på et gennemtørt system er klæberisikoen næppe til stede.

De vigtigste malinger blandt de fysisk tørrende er vinyl, klorkautsjuk og akryl eller blandingsprodukter af vinyl eller klorkautsjuk med akryl.

Pigmenter

Her skal primært omtales korrosionsbeskyttende pigmenter. Fra gammel tid har giftige pigmenter, for aluminium først og fremmest chromforbindelser, været anvendt som de mest effektive, men af miljøhensyn forsvinder de. I stedet anvendes af uorganiske typer næsten udelukkende zinkfosfat, eller man undlader helt brugen af korrosionsbeskyttende pigmenter.

Om pigmenter (og fyldstoffer) iøvrigt bemærkes, at de skal være kemisk nærmest uopløselige i vand, og i slutmaling desuden kemisk modstandsdygtige samt kulørbestandige under påvirkning af ultraviolet lys.

Opløsningmidler

I dag stræber man mod at begrænse mængden af organiske opløsningsmidler. Malingerne skabes om fra opløsninger til emulsioner, som helst skal være vandbaserede, eller man anvender opløsningsmiddelfattige, tokomponentprodukter og beskytter sig mod disses ubehagelige egenskaber ved hud- og slimhindekontakt.

Det er normalt meget vigtigt, at der anvendes de rigtige fortyndere til maling. Når opløsningsmiddel og fortynder blandes forkert, kan malingen blive totalt ødelagt, idet den skiller, klumper eller bliver til gelé.

Der er ved at dukke lovende emulsionsmalinger med vand som bæremiddel op på markedet. Nogle få har overordentlig gode egenskaber, men de kan være vanskelige at påføre i en homogen film, og filmdannelsen er ofte stærkt afhængig af klimaet, dvs. optøringsbetingelserne. De har derfor ikke endnu tilstrækkeligt sikre påføringstekniske egenskaber.

Plastbelægning - pulvermaling

Man skelner mellem to hovedtyper af pulvere til overfladebehandling. Mest anvendt til udendørs brug i atmosfæren er termohærdende pulvere på epoxy- og polyesterbasis. Polyester foretrækkes ofte, fordi det er mere bestandigt mod ultraviolet lys. Epoxy "kridter". Der er i princippet tale om tokomponent, kemisk hærdende produkter.

Der forhandles pulvere med forskellige smeltepunkter og varierende gel-tid, dvs. de er flydende i kortere eller længere tid inden de bliver til gelé, og dermed egnede til forskellige godstykkelser i det behandlede emne.

De termohærdende pulvere påføres direkte på sandblæst eller kemisk forbehandlet metal ved elektrostatiske sprøjtning uden brug af grundmaling, idet de hæfter udmærket. Bedste vedhæftning og største lagtykkelse i en påføring opnås på emner, som er forvarmet til en temperatur over pulverets smeltepunkt. De termohærdende plaster skal efterhærdes i ovn i 5-20 min. ved 165-220°C.

Den anden type af pulvere er de termoplastiske. De består af en smeltelig plast, som efter størkning på emnet, -vandkøling kan eventuelt anvendes-, er færdige. De kan for visse produkters vedkommende påføres elektrostatiske på koldt eller forvarmet emne, men påføres hyppigst ved hvirvelsintring, dvs. det forvarmede emne dyppes i pulver, som holdes svævende i et kar ved gennemblæsning med luft. Ved rigtigt valg af forvarmetemperatur og dyppetid kan der opnås store lagtykkelser.

Termoplastiske pulvere kræver som regel anvendelse af en primer, som påføres før forvarmning. Det er kritisk, at forvarmningen ikke fører til under- eller overbrænding af primeren.

Til atmosfærisk brug anvendes termoplasterne EVA ("Levasint") og polyamid 11 og 12 (nylon, "Rilsan") mest. Til tykke barriere-belægninger i f.eks. jord, anvendes polyolefiner som PEH og PEM. Særlige polyolefiner, som har fået indbygget andre delmolekyler i strukturen (sampolymer), kan anvendes uden primer (klæber).

Afhængig af aluminiumemnets form og bearbejdning kan høje temperaturer ved termohærdningen dog være kritiske for formstabiliteten, kastninger kan opstå. Varmebehandling af deformations- eller modningshærdede aluminiumemner kan bevirke rekrystallisation henholdsvis overmodning og som følge deraf en styrkereduktion. Selv ved 100 °C kan der udløses bukke- og svejse-spændinger, som medfører, at aluminiumemnet slår sig. Da det normalt ikke er muligt at forandre aluminiumemnets form efter overfladebehandling uden at inducere defekter i overfladebehandlingen, skal valget af termohærdende plaster være nøje afstemt med det aktuelle aluminiumemnes forarbejdning. Endelig vil det overmodnede aluminiumemne være mere følsomt for lokaliseret korrosion.

Plastbelægning - flydende plaster

Som flydende plaster karakteriseres opløsningsmiddelfrie, reaktionshærdende produkter, der kan være forstærket med makropigmenter, fx små glasflader, eller med relativt lange fibre af glas, kunststof eller kulstof. Det er et karakteristisk træk, at de oftest anvendes under krævende forhold mht vand-, kemikalie- og slidbelastning og i tykkelser på 1-4 mm. De kræver normalt en meget ru aluminiumoverflade.

Den helt dominerende plasttype er polyester med bis-phenolbaseret polyester, herunder vinylester, som mest resistente type.

Produkterne anvendes kun undtagelsesvis på aluminium.

6.10.5 VALG AF BELÆGNINGSSYSTEM

Belægningssystemet vælges ud fra en funktionsanalyse, som er udviklet for den uindviede og foretages ubevidst og på få sekunder af den erfarne. Funktionskravene kan inddeles i typerne,

Bevaringsfunktioner, såsom vejrbestandighed, lysbestandighed, fugt- og kemikaliebestandighed, temperaturbestandighed og slidbestandighed.

Brugsbetingede funktioner, såsom varmetransmission, friktionsegenskaber, reparerbarhed, rengørighed, ledningsevne, kulørmarkering og lysforhold.

Æstetisk funktion, glans- og kulørbestandighed samt smudsafviselighed.

Endvidere skal der tages overordnede hensyn til de mulige behandlingstyper og de dertil knyttede rensnings- og påføringsmetoders anvendelighed på den aktuelle emnetype.

Mulighederne i ovenstående belyses bedst med et eksempel:

Aluminiumdele på en flyvinge skal beskyttes mod korrosion fremkaldt af kondensvand. Relevante bevaringsfunktioner er vejrbestandighed, lysbestandighed, fugt- og glycolbestandighed, temperaturbestandighed og slidbestandighed opstået ved partikel påvirkning ved høj hastighed. De brugsbetingede funktioner er rengørighed og reparerbarhed. Der er endvidere krav om dekorative effekter. Det bliver besluttet at aluminiumemnet fosfateres og derpå påsprøjtes en zinkchromat primer og derpå en tokomponent polyurethan topcoat. Det er her afgørende, at polyurethanlakken er kendetegnet ved høj uv- og kemikaliebestandighed samt bestandighed ved varierende temperatur- og slidpåvirkninger. Ved pletreparationer forudsættes, at der matslibes på det område, hvor et fornyet lag polyurethanlak skal påføres. Der kan være et arbejdsmiljømæssigt problem med polyurethan pga. indholdet af flygtige opløsningsmidler, hvilket kræver god luftudsugning ved påføring og tørring og med indholdet af isocyanater, som er skadeligt ved vævskontakt.

Påføring

Anvendeligheden af plaster og malinger er i en vis grad betinget af deres påføringsegenskaber.

"Våde" malingsystemer

"Våde" malinger kan principielt påføres på mange måder, eksempelvis med pensel, rulle, handske, pneumatisk sprøjtning, hydraulisk sprøjtning ("airless") og dypning.

Penselpåføring anvendes til små arealer, herunder typisk til reparation, samt til forstrykning af kanter, hjørner og svejseømme.

Rullepåføring er ikke egnet til korrosionsbeskyttende malinger.

Pneumatisk sprøjtning har relativt ringe kapacitet og giver spild, hvis metoden ikke kombineres med elektrostatisk opladning af malinger. Malinger skal være tyndflydende, og tykkelsen pr. lag bliver ringe. Metoden giver normalt en fin finish.

Hydraulisk sprøjtning har stor kapacitet og giver begrænset spild. Der arbejdes med tryk på helt op til 450 bar, og selv meget tyktflydende, opløsningsmiddelfri malinger kan sprøjtes på denne måde. Til særligt tyktflydende, tokomponentmalinger anvendes anlæg, hvor de to komponenter fremføres opvarmede og blandes lige bag pistolen.

Påføring ved dypning anvendes kun i storproduktion, da spildet ellers bliver uoverskueligt.

Pulverbelægninger

Pulverbelægninger påføres ved elektrostatisk påføring på kolde emner og på forvarmede emner samt ved hvirvelsintring eller kaskadepåføring. Spildet er normalt lille, fordi pulveret kan opsamles og genbruges.

Elektrostatisk påføring på kolde emner giver begrænsede lagtykkelser. Efter påføring skal pulveret smeltes og hærdes i en ovn, hvis det er termohærdende. Oftest anvendes tunnelovne.

Ved elektrostatisk påføring på emner, der er opvarmet til en temperatur over pulverets smeltepunkt, kan der opnås store lagtykkelser. Termopulver påemner med lille varmekapacitet skal efterhærdes i ovn, medens dette somme steder kan undgås med hurtigt hærdende pulver på emner med stor varmekapacitet.

Hvirvelsintring anvendes næsten kun til termoplastiske pulvere. Metoderne giver betydelige lagtykkelser. Ved hvirvelsintring dyppes de forvarmede emner i pulver, som holdes svævende med luft i en kasse. Ved kaskadepåføring indvendigt i rør og beholdere eller udvendigt på rør hældes pulver på det roterende emne.

Kontrol

Kontrol koster penge eller arbejde, men er desværre nødvendigt. Det er desværre helt almindeligt, at overfladebehandling, som ikke kontrolleres, er af dårlig kvalitet.

Indenfor overfladebehandling arbejdes med proceskontrol, som, i hvert fald stikprøvevis, dækker alle behandlingsstrin fra indledende rensning til færdig behandling. Kort resumeret kontrolleres forbehandling, klima, rensningsgrad, grundmalingstykkelse, overmalingsintervaller og færdig belægning.

Endvidere arbejdes med slutkontrol, som for mange mindre arbejder er eneste kontrol. Her checkes normalt lagtykkelse, poretæthed og vedhæftning, men også kulør og glans samt visuelle skavanker som dråber, løbere, rynkning, appelsinhud m.v. kan være kontrolpunkter.

Afgørende er det, at der i kontrakten om et overfladebehandlingsarbejde indgår en kontrolspecifikation, hvoraf det fremgår, hvilke kontroller, der er relevante og hvordan og af hvem de skal udføres, og hvilke resultater, der er acceptable og/eller uacceptable.

Nedenfor er listet en række eksempler på hyppigt anvendte metoder til kontrol af den applicerede overfladebelægninger på aluminium.

- Lagtykkelsesmåling ved hvirvelstrømsmetoden, jvf. DS/ISO 2360 (1983), hvor acceptkriteriet er et lagtykkelsesinterval eller ofte en minimumtykkelse.
- Porettest med 9 volt vådsvamp-poresøger. Her afsløres tæt heden af porer i belægningen. Denne må ikke overstige et nærmere specificeret niveau.
- Gittersnit, jvf. DS/ISO 2409, med knivafstand 1, 2 eller 3 mm afhængig af lagtykkelsen. Her vurderes overfladebelægningens vedhæftning til aluminiumoverfladen kvalitativt.
- Saltågetest, jvf. DS/ISO 3768. Hermed udsættes aluminiumemnet for en accelereret korrosionsafprøvning af overfladebehandlingen. Udfaldskriteriet kan for eksempel være, at vedhæftningssvigt ikke må forekomme, og underkorrosion ikke må brede sig mere end 2 mm ud fra en ridse efter 1000 timers eksponering.

Optimering af maling systemets lagtykkelse på en forbehandlet aluminiumsoverflade

Test af følgende malingsprocedure på EN AW 5754, 5083, 6063 og 6082:

Sandblæsning med skarpkantet korund til en ruhed svarende til BN9 (RA 6½ eller 6,25) jvf. Rugo-testen

Ætsepriming med syrehærdende zinkchromatholdig på polyvinylbutyralbasis.

Maling med en to komponent acryllak påført med 60, 80, 110, 140 eller 180 µm, som repræsenterer de mulige lagtykkelser, som malingsystemet i praksis vil kunne blive påført aluminiumoverfladen.

Test af denne belægning viste, at en lagtykkelse på 80 µm med det afprøvede malingsystem giver den optimale bestandighed mod underkorrosion og filiform korrosion.

6.11 KORROSION OG UDMATTELSE

6.11.1 UDMATTELSE UNDER KORROSIVE FORHOLD

Når en udmattelsespåvirket konstruktion samtidig udsættes for en korrosiv påvirkning vil levetiden, målt som antallet af påvirkninger til brud, normalt reduceres. Det korrosive angreb behøver ikke nødvendigvis at være samtidig med de mekaniske påvirkninger, selv om det normalt er den værste situation. Også konstruktioner, der kun har været udsat for et korrosivt angreb, inden de blev taget i brug, vil ofte udvise en reduceret levetid.

At designe en konstruktion mod korrosionsudmattelse kan ofte være en kompliceret sag, da så mange parametre spiller ind. Aktuell legering, varmebehandlingstilstand, konstruktionsdetaljer (f.eks. spalter), specifikt miljø, temperatur, frekvens og eventuelle beskyttelsesmetoder er nogle af de parametre, der har betydning for levetiden.

Det er derfor ikke underligt, at det ofte er umuligt at finde data, der er gældende for en given aktuell kombination af de betydende parametre. Ofte må man forlade sig på generaliseringer eller erfaringer fra lignende forhold.

I Eurocode 9, part 2's behandling af korrosionsudmattelse benyttes i høj grad generaliseringer. Miljøet karakteriseres af 8 forskellige grupper eller klasser og de mange forskellige aluminium legeringer er generisk inddelt i 5 forskellige familier. Der tages således ikke hensyn til den aktuelle legerings varmebehandlingstilstand.

Der er ikke anført data for AlMnCu-legeringerne (3000-familien) og for alle legeringer, der benyttes i "kraftigt industrimiljø" henvises til, at der må tages særligt hensyn til kemien i det aktuelle miljø.

I dette afsnit vil nogle af de specielle forhold, vedrørende korrosionsudmattelse blive omtalt og der vil blive givet anvisninger på, hvor let tilgængelig supplerende information kan findes.

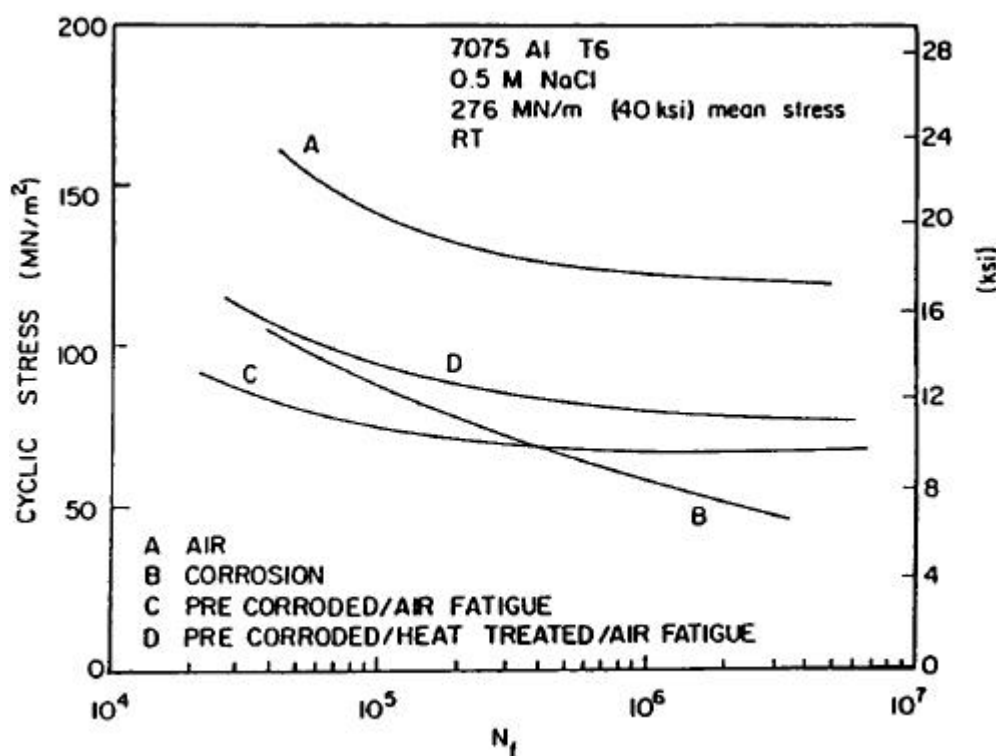
Som tidligere nævnt vil et overlejret korrosivt angreb normalt reducere levetiden på en udmattelsespåvirket konstruktion. Det skal dog nævnes, at der i litteraturen er rapporteret tilfælde, hvor korrosion hævdes at have øget levetiden, fordi korrosionsprodukter har blokeret revnen, så denne ikke kunne lukke sammen under aflastning, med en reduktion af den effektive spændingsvidde til følge. Disse tilfælde betragtes imidlertid som en kuriositet og generelt vil korrosion medføre en kortere levetid.

Et korrosivt angreb vil påvirke både initieringen og væksten af udmattelsesrevner.

6.11.2 REVNEINITIERING

Initieringen af en udmattelsesrevne sker normalt altid fra områder, hvor kærvanvisere lokalt giver anledning til høje spændinger. På en oprindelig glat overflade er det således ikke overraskende, at korrosionsgruber og pits kan virke som kærvanvisere og dermed fremskynde initieringen. I disse tilfælde er det ligegyldigt, om gruberne i overfladen er dannet før eller under udmattelsespåvirkningerne.

Figur 6.34 viser Wöhler kurver (SN-kurver) for en modningshærdet aluminiumlegering i luft og i saltvand. Kurve C viser resultaterne af en prøve, der er blevet forkorroderet og efterfølgende udmattelsestestet. Figur 6.34 er fundet i [1], der præsenterer udmattelsesdata for mange forskellige materialer og legeringer i mange forskellige miljøer.



Figur 6.34 SN-kurve for AA 7075-T6. Effekt af korrosion før og under udmattelsestesten.

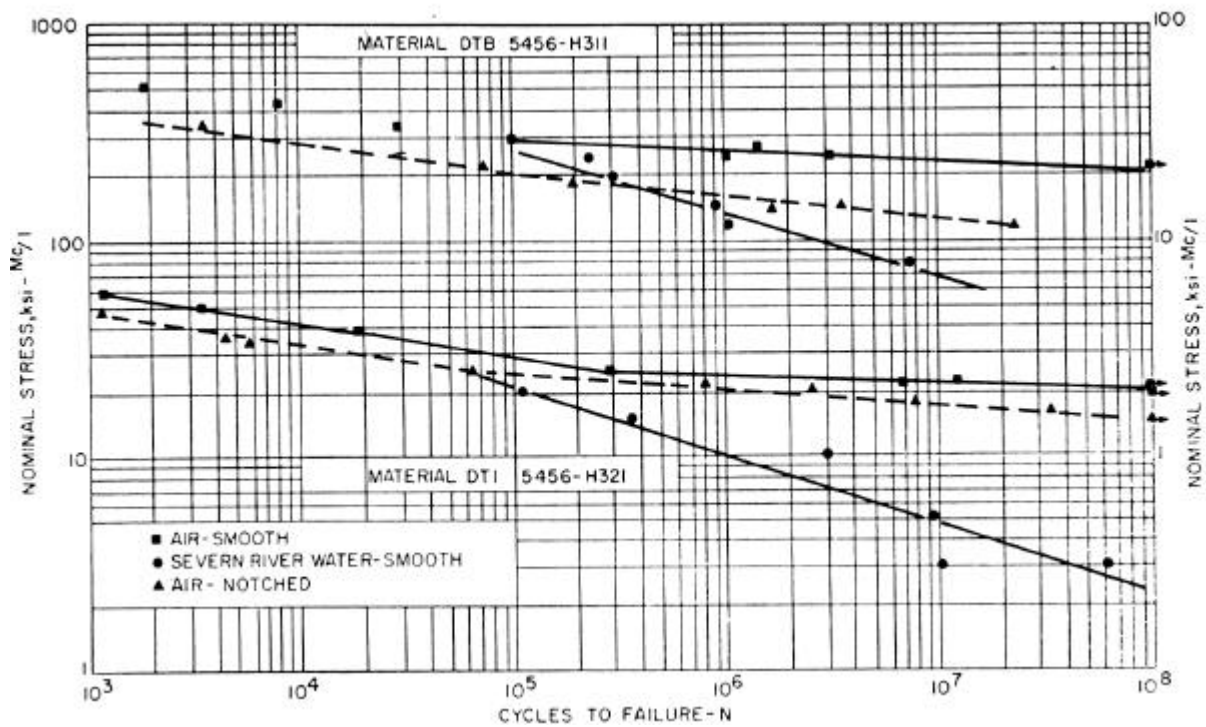
I mange tilfælde med korrosionsudmattelse kan der efterfølgende ikke findes spor efter korrosion (misfarvninger, gruber, pits), men alligevel konstateres en kraftig reduktion af levetiden.

Årsagen skal findes i de submikroskopiske strukturer, der dannes under de slipmekanismer (deformationsmekanismer i atomar skala), der normalt er medvirkende til initiering af udmattelsesrevner. Selv et moderat korrosionsangreb kan lokalt påvirke de deformationshærdemekanismer, der modvirker selve revneinitieringsprocessen, således at slipmekanismen kan fortsætte uhindret.

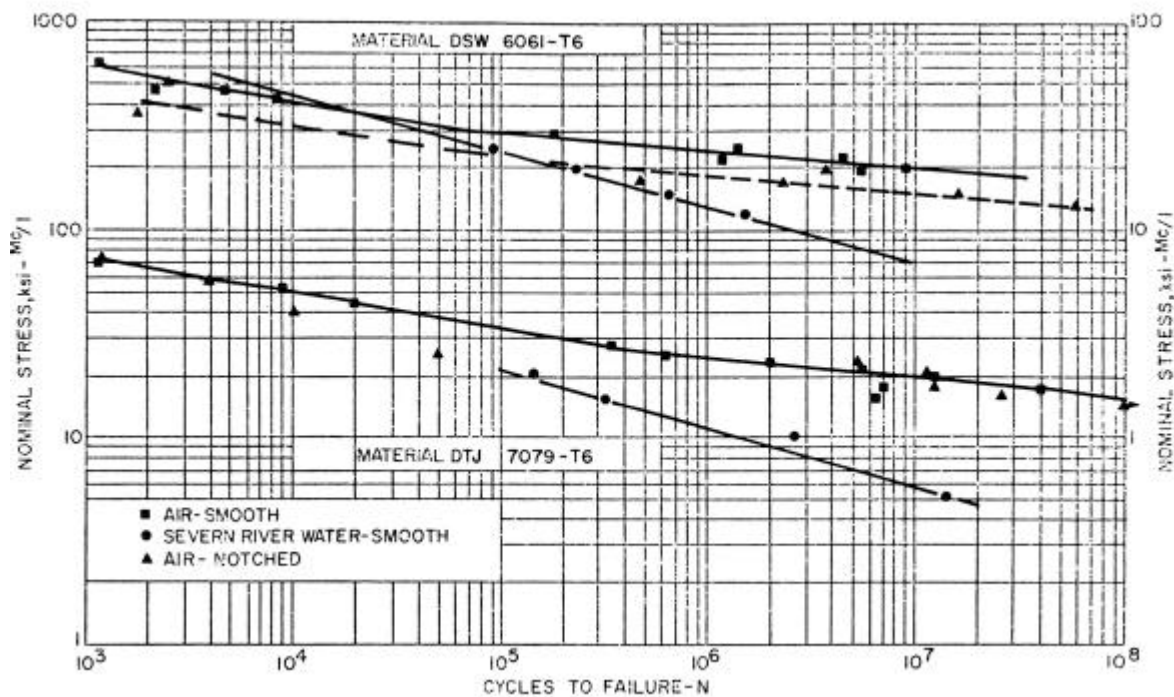
Selv luftens fugtindhold antages at have en korrosiv effekt på aluminium og dette forhold kan forklare den relativt store spredning, der er i eksisterende high-cycle fatigue data (udmattelsesdata ved påvirkninger ud over 10^6).

Det er stadig diskutabelt om aluminium og aluminiumlegeringer har en egentlig udmattelsesgrænse, som det kendes fra stål, men under alle omstændigheder findes en sådan grænse ikke, når udmattelsen foregår under korrosive forhold.

Nedenstående Figur 6.35 og Figur 6.36 viser Wöhler-kurver for 2 forskellige aluminiumlegeringer (en hærdbar og en ikke-hærdbar) i luft og i flodvand. Som det ses af kurverne gældende for flodvand, er der intet, der tyder på, at kurverne flader ud. En egentlig udmattelsesgrænse eksisterer ikke. Se også kurve B i Figur 6.34.



Figur 6.35 SN kurver for AA 5456 i luft og i vand.



Figur 6.36 SN kurver for AA 6061-T6 og AA7079-T6 i luft og i vand.

Kurverne er fundet i [2], der har samlet mange udmattelsesdata gældende for luft, men også nogle gældende for andre miljøer. Bogen er nem at bruge, da alle legeringerne er ordnet i de samme generiske familier, som Eurocode 9, part 2 opererer med.

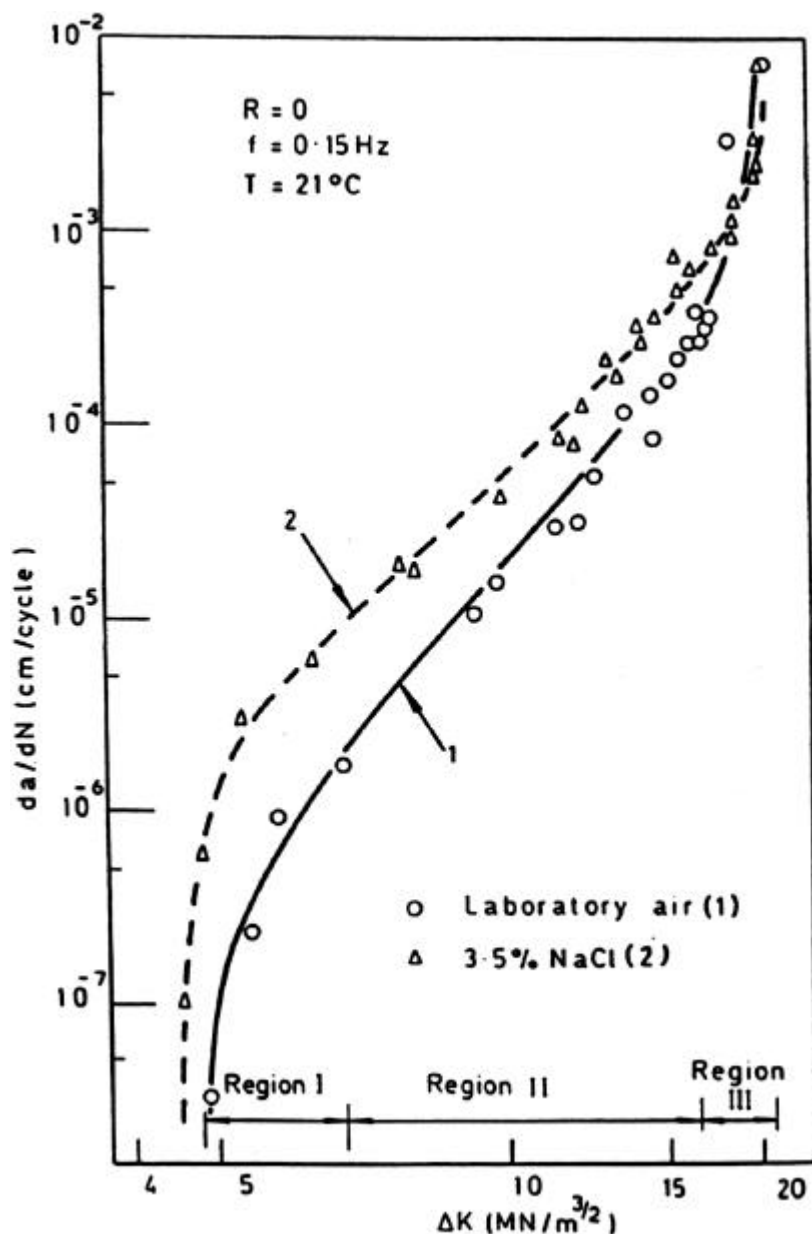
Den hurtigere revneinitiering i aluminium, i et korrosivt miljø, kan også forklares med et mekanisk nedbrud af passivfilmen. Aluminiums generelt gode korrosionsegenskaber skyldes netop, at der dannes en passivfilm (oxid) på overfladen, således at fortsat korrosion hindres. Under udmattelsepåvirkningerne kan passivfilmen mekanisk nedbrydes, på de steder, hvor slipprocesserne finder sted, med fortsat korrosion og revneinitiering til følge.

Det skal slutteligt nævnes, at korrosionens skadelige virkning på revneinitieringen er mest udtalt på glatte prøver og konstruktioner. Konstruktioner, f.eks. svejste konstruktioner, der i forvejen indeholder kærvanvisere, hvorfra en udmattelsesrevne vil udvikle sig, er ikke så følsom over for korrosion, som en tilsvarende konstruktion uden kærve.

6.11.3 REVNEVÆKST

Ikke blot initieringen men også revnevæksthastigheden (da/dN) påvirkes af miljøet. Et overlejret korrosivt miljø vil næsten altid, jvf. bemærkningen i indledningen til dette kapitel, medføre en stigning i revnevæksthastigheden.

Figur 6.37 [1], viser revnevæksthastigheden målt i luft og i en 3,5% NaCl opløsning for en legering fra 2000-serien.



Figur 6.37 Sammenligning mellem revnevæksthastigheder i 3,5% NaCl opløsning og i luft for AA2618 (RR58).

Kurvernes form og indbyrdes placering er generelle og kunne gælde for mange kombinationer af materialer og miljøer. Ved de høje ΔK -værdier (høje lokale spændinger ved revnefronten) er der ikke den store indvirkning fra miljøet. Spændingerne er så store, at materialet rent mekanisk "rives op", så hurtigt, at indflydelsen fra miljøet ikke når at gøre sig gældende. I takt med at ΔK sænkes, bliver påvirkningen fra miljøet større og større, således at forskellen mellem (da/dN) miljø og (da/dN) luft bliver større. Også tærskelværdien for ΔK , det vil sige den ΔK -værdi, der skal overskrides, for at få en revne til at vokse, påvirkes af miljøet. Miljøet medfører, at tærskelværdien bliver mindre eller sagt på en anden måde, korrosion fremmer initieringen.

Af Figur 6.37 kan det aflæses, at NaCl-opløsningen får revnevæksthastigheden til at stige med op til 5 gange hastigheden målt i luft.

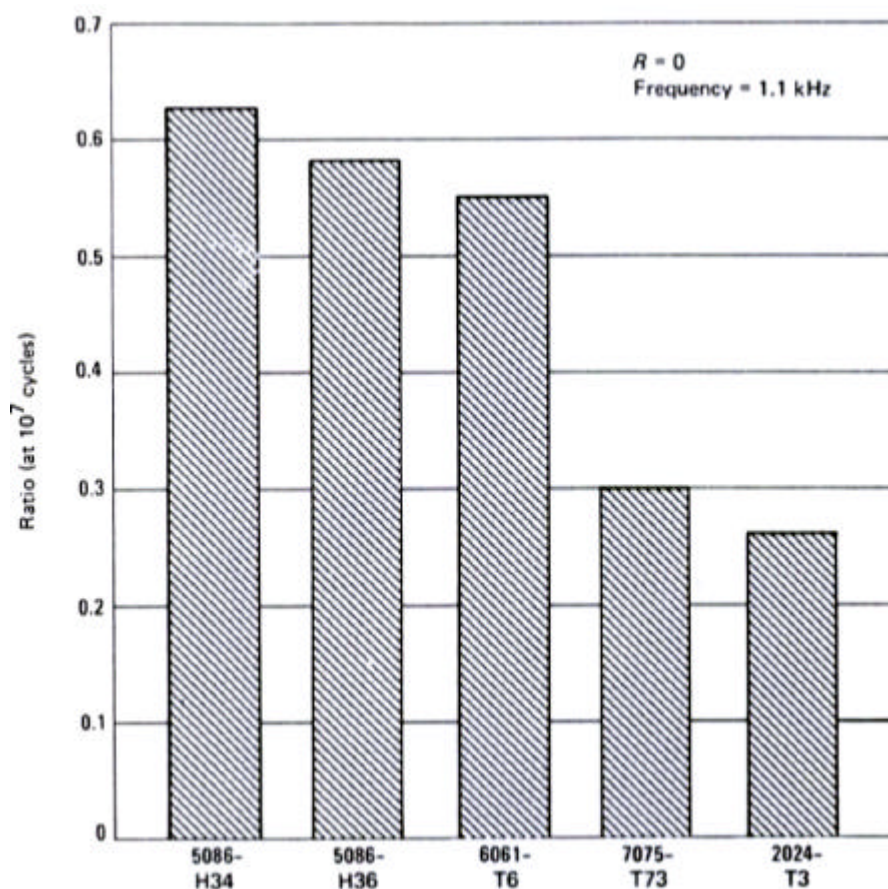
Endnu større stigninger i revnevæksthastigheder i forhold til luft kan forekomme. Stigninger på mere end en faktor 10 er rapporteret.

6.11.4 LEGERINGER

De forskellige aluminiumlegeringer responderer forskelligt på et specifikt korrosivt miljø. Man kan desværre ikke for et givet miljø opgive en eller anden faktor, som man kan multiplicere værdier gældende for luft med.

Uden at gå i detaljer med de mange forskellige miljøer og de mange forskellige legeringer, kan det dog generelt siges, at højstyrkelegeringerne er mere følsomme over for et korrosivt miljø end legeringer af lavere styrke.

Figur 6.38 [3] viser forholdet mellem udmattelsesstyrken (10^7 cycles) målt i en 3% NaCl-opløsning og i luft for en række legeringer. Som det tydeligt fremgår, reduceres udmattelsesstyrken mest for legeringerne med høj styrke.



Figur 6.38 Forholdet mellem udmattelsesstyrken målt i 3% NaCl-opløsning og i luft.

Af Figur 6.38 fremgår det også, at en styrkeøgning, opnået ved deformationshærdning vil have samme effekt på korrosionsudmattelsesegenskaberne, som en styrkeøgning, foranlediget af legerings sammensætningen (H34 vs. H36). De samme forhold vil gøre sig gældende ved styrkeændringer som følge af varmebehandlinger.

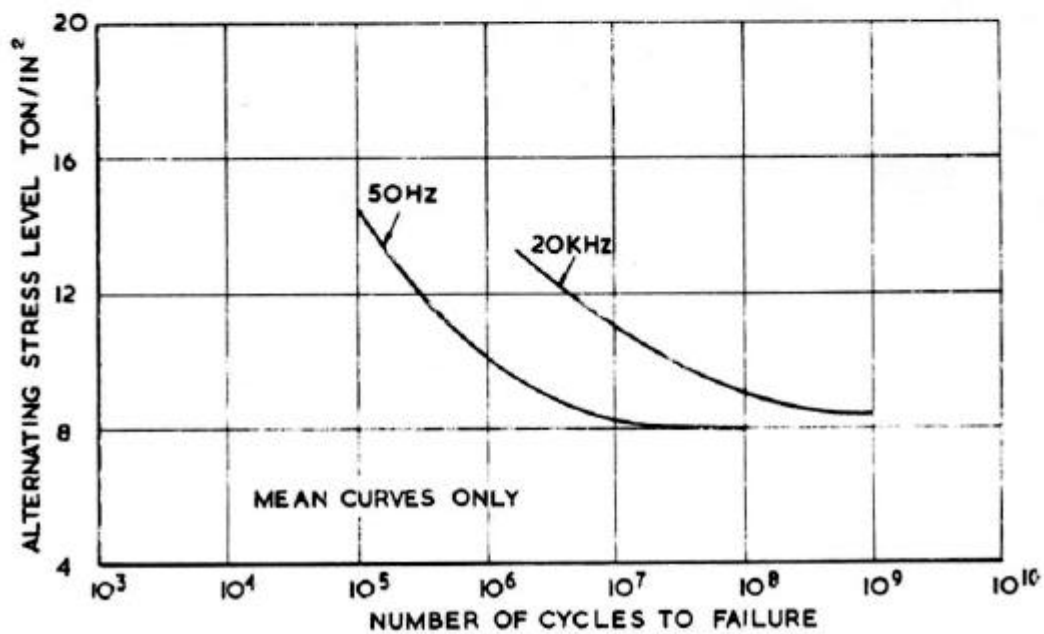
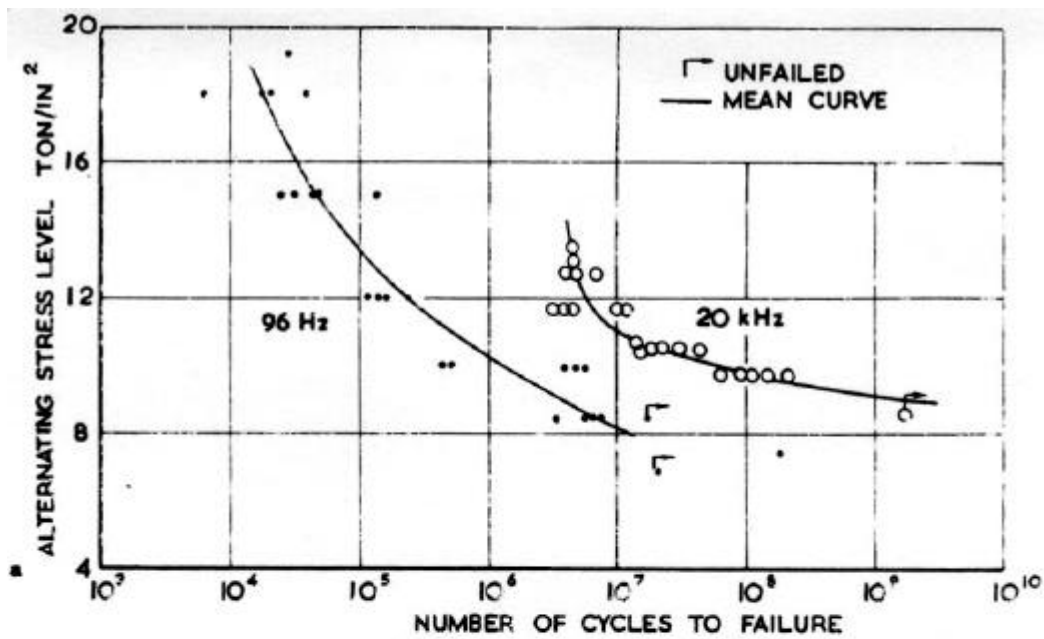
6.11.5 FREKVENNS BETYDNING

Modsat forholdene i luft, har frekvensen stor betydning ved udmattelse i et korrosivt miljø. Korrosion er en med tiden fremadskridende proces, der bl.a. kræver transport af ioner. Populært kan det siges, at nedbrydningen, som følge af korrosionen, sker proportionalt med tiden, hvorimod nedbrydningen, som følge af den rene mekaniske udmattelsepåvirkning sker proportionalt med antallet af påvirkninger. Det er derfor ikke overraskende, at frekvensen er af betydning for korrosionsudmattelse. Jo lavere frekvensen er under udmattelsen, des længere tid får korrosionen til at udøve sin skadelige virkning for hver cyklus. Eller omvendt, hvis frekvensen er meget høj, negligeres effekten af korrosionen.

Det er vigtigt at være bevidst om disse forhold, når man står over for et korrosionsudmattelsesproblem. Desværre er langt de fleste korrosionsudmattelsesdata, der er tilgængelige i litteraturen, genereret ved relativt høje frekvenser (for at spare laboratorietid). Hvis den aktuelle frekvens er væsentligt lavere, skal der udvises forsigtighed, hvis der benyttes data, der er genereret ved højere frekvenser.

Undersøgelser, udført på FORCE Institutet, med legeringen 6082-T6 i syntetisk havvand, viste en reduktion i levetiden på 46%, når frekvensen blev nedsat fra 2 Hz til 0,2 Hz. 0,2 Hz er for mange formål en realistisk frekvens, da den ligger tæt på den gennemsnitlige bølgefrequens på Nordsøen (0,167 Hz).

Undersøgelser udført i luft med 2 legeringer fra 2000-serien ved en høj (20 kHz) og en lav (50 og 96 Hz) frekvens viser samme tendens, som vist i Figur 6.39, [4].



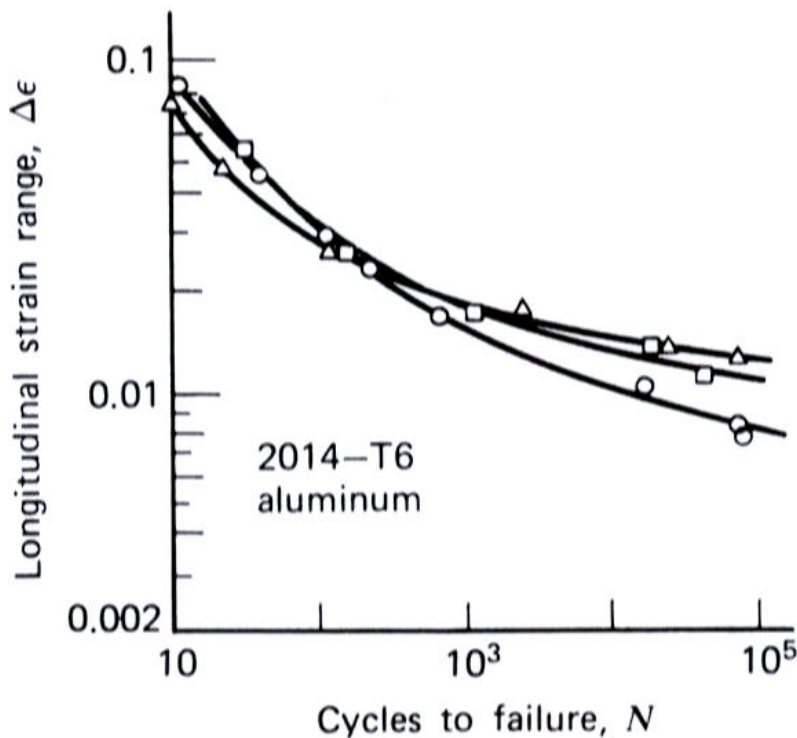
Figur 6.39 A) SN-kurver for AA 2618-T6 målt i luft ved 96Hz og 20.000 Hz.
 B) SN-kurver for AA 2014-T6 målt i luft ved 50Hz og 20.000 Hz.

Forsøgene viser også, at udmattelse i luft med et ikke specificeret (ukendt) fugtindhold, bør betragtes som korrosionsudmattelse.

6.11.6 LAVTEMPERATUR UDMATTELSE

For alle metaller og legeringer gælder det generelt, at udmattelsesstyrken stiger med faldende temperatur. Stigningen i udmattelsesstyrken er størst for ukærvede emner. Stigningen i udmattelsesstyrken kan forklares med, at metallernes E-modul, trækstyrke, og specielt flydespænding, stiger med faldende temperatur.

Også de varierende spændingers størrelse har betydning, når effekter af lave temperaturer skal vurderes. I "High-cycle-fatigue"-området (mange belastninger til brud lave spændinger/tøjninger) ses generelt en stigning i udmattelsesstyrken med en sænkning af temperaturen. Omvendt viser de fleste legeringer et fald i udmattelsesstyrken ved de høje belastninger/tøjninger, når temperaturen sænkes. Figur 6.40 [5] viser et eksempel på en modningshærdet legering.



Figur 6.40 SN-kurve for AA 2014-T6 ved 20° (o), -196° () og -269°C ().

6.11.7 HØJTEMPERATUR UDMATTELSE

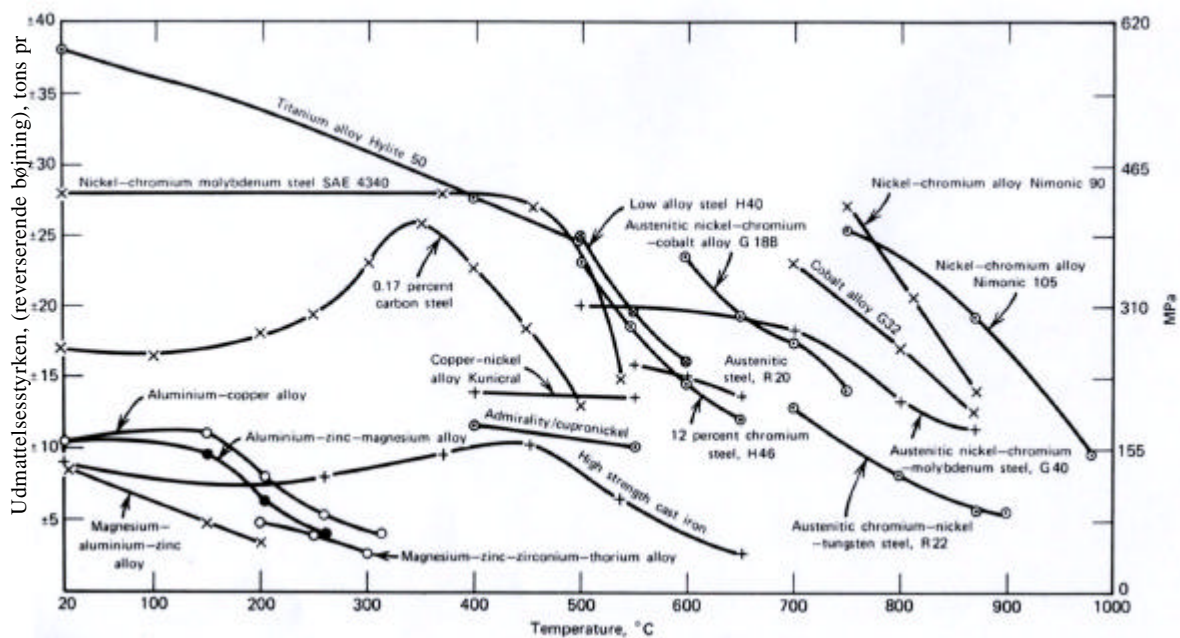
Varmpåvirkning af et emne eller en komponent kan give anledning til uensartede temperaturer, som resulterer i spændinger, som følge af de termiske udvidelser. Disse spændinger kan give anledning til udmattelsesrevner. Revner opstået som følge af termiske spændinger kaldes termisk udmattelse og skal ikke omtales her.

Mekanisk udmattelse ved høje driftstemperaturer er betydelig mere kompliceret end udmattelse ved stuetemperaturer, idet termisk aktiverede, tidsafhængige processer er involveret. Oxidation, krybning, spændingsrelaxation og metallurgisk instabilitet er eksempler herpå.

Ved opvarmning falder metalliske materials statiske styrke, og følgelig er det ikke overraskende, at også udmattelsesstyrken reduceres.

Endvidere udviser metallerne ingen udmattelsesgrænse ved høje temperaturer, det vil sige at udmattelsesstyrken flader kontinuert, efterhånden som antallet af påvirkninger øges.

Figur 6.41 [5] viser udmattelsesstyrken ved 10^8 påvirkninger for en lang række legeringer. De enkelte legeringers udmattelsesstyrke kan ikke direkte sammenlignes, da de kun er opført i de temperaturintervaller, hvor legeringerne er interessante at benytte. Som det ses, falder alle legeringers udmattelsesstyrke med stigende temperatur.



Figur 6.41 Udmattelsesstyrken ($N=10^8$) af forskellige materialer som funktion af temperaturen ($R = - 1$).

For aluminiumlegeringer falder udmattelsesstyrken når temperaturen overstiger ca. 150°C .

Ved høj temperatur er oxidation medvirkende til at reducere levetiden. Oxidationen angriber ofte korngrænserne selektivt, og man ser ofte, at udmattelsesrevner, dannet ved høj temperatur forløber interkrySTALLINSK, hvor de samme revner ved lavere temperaturer udbreder sig transkrySTALLINSK. Forsøg, udført i vacuum viser en højere udmattelsesstyrke, sammenlignet med tilsvarende forsøg udført i luft. Vacuumforsøgene viser samtidig et overvejende transkrySTALLINSK forløb.

Varmebehandlings- og deformationstilstand, samt tilstedeværelsen af eventuelle kærve, har også betydning når udmattelsesstyrken ved enten lav eller høj temperatur skal vurderes. Tabel 6.9 og Tabel 6.10, [6] viser forholdet mellem udmattelsesstyrken ved aktuel temperatur, sat i relation til styrken ved stuetemperatur.

Tabel 6.9 Forholdet mellem forskellige mekaniske egenskaber målt ved -196°C og ved stuetemperatur.

Alloy	Temperature, °F (°C)	R†	K‡	Static	Ratio: $\frac{\text{Fatigue strength at elevated temperature}}{\text{Fatigue strength at room temperature}}$			
					Fatigue strength at room temperature, cycles			
					10^5	10^6	10^7	10^8
2024- T851§	300 (149)	0.5	1.0	0.84	0.93	0.92	0.89	0.84
			4.4	0.97	0.87	0.91	0.93	0.93
			>12	0.99	0.90	0.88	0.84	0.83
		0	1.0	0.84	0.85	0.83	0.77	0.72
			4.4	0.97	0.82	0.83	0.85	0.84
			>12	0.99	0.82	0.82	0.85	0.83
		-1	1.0	0.84	0.82	0.87	0.79	0.76
			4.4	0.97	0.78	0.81	0.85	0.83
			>12	0.99	0.90	0.91	0.89	0.88
5454- H34¶	300 (149)	-1	1.0		0.86	0.76	0.64	0.62
	400 (204)	-1	1.0		0.79	0.67	0.55	0.50

Tabel 6.10 Udmattelsesstyrken af aluminiumlegeringer ved forhøjet temperatur.

		Ratio: $\frac{\text{Property at } -320^{\circ}\text{F } (-196^{\circ}\text{C})}{\text{Property at room temperature}}$				
Base metal	Filler metal	Tensile strength	Yield	Elongation	Fatigue strength, cycles	
					10^5	10^6
5083-H113		1.33	1.17	1.49	1.15	1.18
5086-H32		1.38	1.18	1.62	1.18	1.15
5454-H32		1.42	1.17	1.72	1.15	1.25
5456-H321		1.31	1.15	1.42	1.12	1.14
5083-H113	5556	1.46	1.17	1.60	1.14	1.30
5086-H32	5356	1.37	1.06	1.06	1.21	1.32
5454-H32	5554	1.61	1.32	1.61	1.24	1.50
5456-H321	5556	1.32	1.16	1.12	1.17	1.30
5454-H32*	5554	1.34			1.80	
5456-H321*	5556	1.16			1.55	

6.11.8 BESKYTTELSE

En beskyttelse af aluminiumoverfladerne, således at korrosionsangreb undgås vil også gøre konstruktionen mere modstandsdygtig over for korrosionsudmattelse. Den gavnlige effekt er primært virksom i revneinitieringsfasen. Beskyttelsessystemer, baseret på malinger eller coatings har kun en effekt, så længe de kan holde det korrosive miljø væk, fra konstruktionens overflade. Hvis først der kommer brud på coatingen, er det underliggende metal ikke længere beskyttet.

Anodisering og hårdanodisering er effektive metoder til at beskytte konstruktioner mod korrosion. Uheldigvis viser det sig, at blot det at anodisere overfladen, kan reducere udmattelsesstyrken (i luft) med 50%, da der altid vil være revner i anodiseringslaget.

Forsøg udført på FORCE Instituttet viser, at en shot peening inden anodiseringen kan mere end genskabe de oprindelige udmattelsesegenskaber.

Shot peening kan i mange tilfælde forbedre udmattelsesegenskaberne og dermed også udmattelsesegenskaberne under korrosive forhold. Trykspændingerne fra shot peeningen strækker sig ned til en dybde på ca. 0,3 – 0,5 mm under overfladen, så indtil korrosionsangreb når denne dybde er der en gavnlig effekt af shot peening.

Shot peening forbedrer også udmattelsesegenskaberne af svejste konstruktioner, såfremt der ikke er revner eller indre defekter, der kan initiere udmattelsesrevner. Ifølge [7] opnås de længste levetider for svejste aluminiumskonstruktioner, udsat for korrosionsudmattelse, ved shot peening, efterfulgt af maling.

Også katodisk beskyttelse kan have en gavnlig effekt. Stoltz og Pelloux [8] undersøgte korrosionsudmattelsesforholdene af 7075 i en 3,5% NaCl opløsning under katodisk beskyttelse. De fandt at en polarisering til -1400mV SCE kunne reducere revnevæksthastigheden til samme niveau, som målt i tør argon. Reduktionen sås kun ved de lave spændingsintensitetsvariationer. Katodisk beskyttelse vil også have en gavnlig effekt under initieringen, idet pits og gruber ikke vil dannes ved fuld beskyttelse.

6.12 RETNINGSLINIER FOR DESIGN MOD KORROSIONSDMATTELSE

6.12.1 INDLEDNING

Baseret på de opnåede resultater i Projekt: Levetid, Korrosionsudmattelse samt FORCE Institutets erfaringer fra mange års skades- og havariundersøgelser af aluminiums-konstruktioner, kan følgende retningslinier fremhæves.

6.12.2 GENERELLE BETRAGTNINGER

1. Udmattelsesstyrken af aluminium bliver reduceret med op til 40% i havvand.
2. Der er i praksis ingen udmattelsesgrænse for aluminiumlegeringer i havvand.
3. Katodisk beskyttelse i havvand kan ikke re-etablere udmattelsesstyrken i luft.
4. Materialetype, svejsemetode og -teknik har ingen reel indflydelse på udmattelsesstyrken, sammenlignet med geometrien ved kanten af svejsningerne.

6.12.3 SPECIFIKKE DESIGNREGLER FOR KORROSIONSDMATTELSE

Udmattelsesstyrken bestemmes ud fra Eurocode 9.

Den valgte konstruktionsgeometri bestemmer design kategori, det vil sige den S-N kurve, der skal benyttes til at bestemme levetiden, sammen med den spændingsamplitude, der er pålagt konstruktionsdetaljen, som illustreret i Figur 6.42. Eurocode 9 giver også vejledning og regler for bestemmelse af spændingsamplituden (som omtalt i design afsnittet).

Product Forms		Rolled, extruded and forged products								
Initiation sites	Reference No.	1, 2	3, 2	4	5	6	7	8		
	Locations	surface or embedded discontinuity	weld toe or embedded discontinuity	weld root	root discontinuity	unfused root	weld toe	weld toe	weld root	
Stress orientation (see 4...)		Normal to weld axis			→	→	→	→	→	
Alloys		As tab 1.1.1			→	→	→	→	→	
Particular Requirements	Dimensional	Joint type	In-line butt			→	→	Cruciform or Tee		→
		Weld type	Butt			→	→	Butt		
		Preparation	Double sided			→	Single sided		→	
		Penetration	Full			→	→	partial	full	partial
		Transition	Taper slope 1:1 in 4 at width or thickness change			→			→	
	Manufacturing	Root	Ground			→	Backed	Unbacked		Ground
		Cap	Ground flush							
Ends		Extension plates used on ends, cut off and ground flush in direction of Δσ								
Inspection/Testing		As Annex D Table D.1			→	→	→	→	→	
Quality Standard		As Annex D Table D.2			→	→	→	→	→	
Stress Analysis	Stress parameter	Net throat + specified misalignment stress (no overfill)					→	net section		net throat
	Stress concentration effects included in Detail Category	Profile, unspecified misalignment and discontinuities permitted by Annex D Table D.2								
Type Number		3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	
Detail Category Δσ, - m ₁	Flats, solid	(55-6)	44-5 (39-4)	35-4 (35-4)	25-3,2 (10-3,2)	18,2	14-3,2		as Table 5.1.2(a) Types 2.1 to 2.9	18-3,2
	Open shapes	(44-5)	28-4 (35-4)	28-4						
	Hollow	NA	NA							

Key: NA = not applicable, → requirement continuous from left to right () Before using values in brackets see 5.2.1(10)

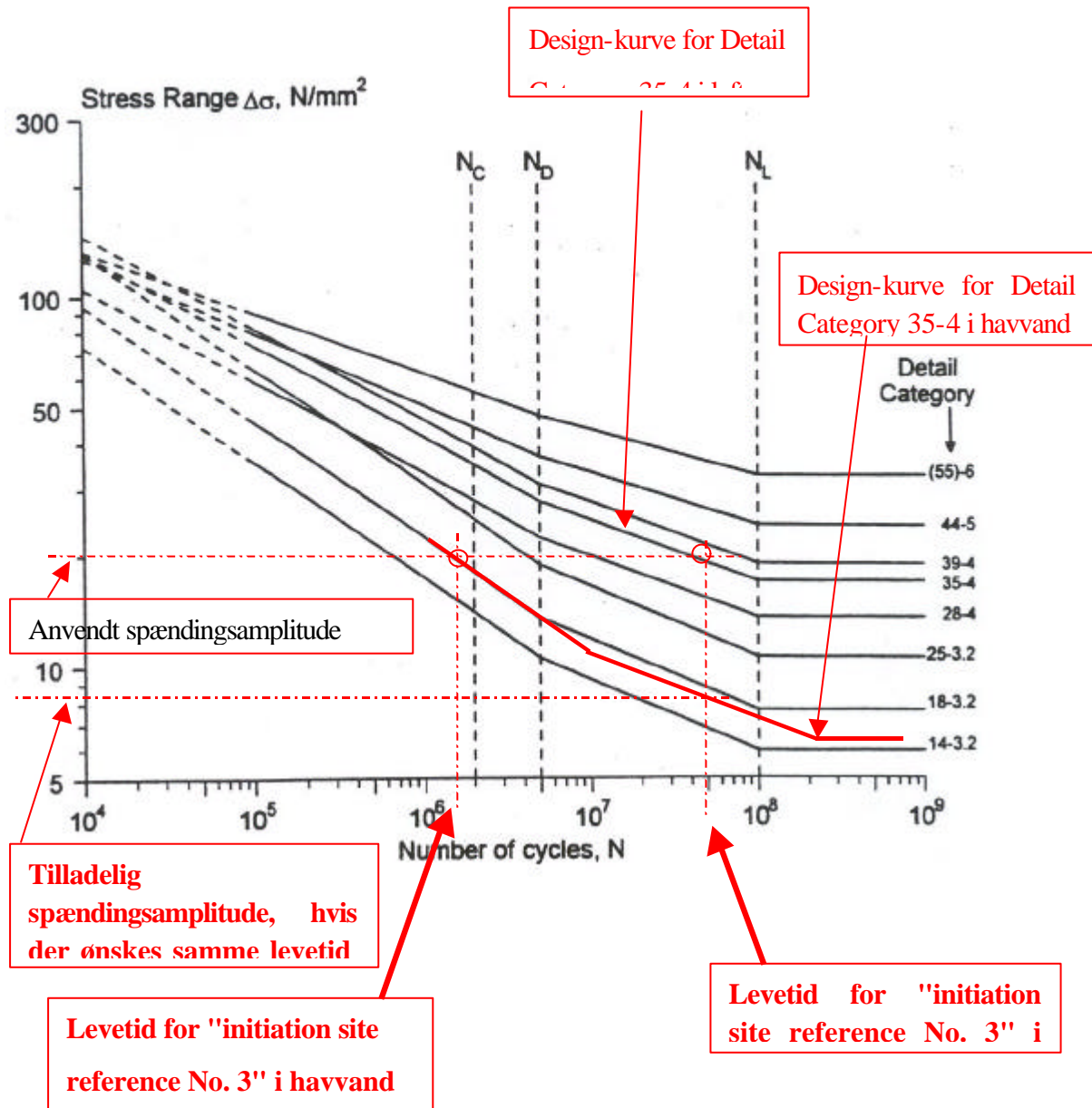
Figur 6.42 Eksempel på tabel til bestemmelse af designkategori for et givet initieringssted.

(Tabel 5.1.3 fra Eurocode 9)

Ud fra tabel 5.4.1. i Eurocode 9 bestemmes, hvor mange design kategorier man skal "gå ned" i afhængighed af materialetype. Hvis konstruktionen neddyppes i havvand, uden nogen form for korrosionsbeskyttelse, skal der vælges en design kategori (S-N kurve), der ligger mellem 1 og 3 klasser lavere, hvilket svarer til en reduktion på mellem 15 og 45% af udmattelsesstyrken.

For en legering som EN AW 6082 skal design kategorien reduceres 2 trin, svarende til ca. 30% på udmattelsesgrænsen. De forsøg, som FORCE Institutet har udført, i forbindelse med SASAK-projektet, viste endnu større tab af udmattelsesstyrke, op til 40 %. Det viser, at Eurocode 9's fremgangsmåde til bestemmelse af korrosionsudmattelsesstyrken i havvand næppe kan anses for at være for konservativ. For at indbygge yderligere sikkerhed, anbefales det derfor generelt at reducere design-kategorien med 3 trin, uanset materiale typen. Hvis den aktuelle design-kategori er så lav, at der ikke kan reduceres med 3 trin, anbefales det at reducere den lavest rangerende design-kategori med 15 %, for hvert ekstra trin, der er behov for.

Samtidigt skal knæpunkterne på den resulterende S-N kurve ændres i retning af at nedsætte udmattelsesgrænsen yderligere, som vist i Figur 6.43 Eksempel på "konstruktion" af designkurve for havvand ud fra luftkurverne.



Figur 6.43 Eksempel på "konstruktion" af designkurve for havvand ud fra luftkurverne.

Hvis den resulterende levetid ikke er tilfredsstillende må man enten

- nedsætte spændingsamplituden ved designændringer
- forbedre konstruktionsdetaljen (gennem design, slibning af svejsninger), så der startes med en tilsvarende højere design kategori
- forsyne konstruktionsdetaljen med en effektiv barriere (maling, coating, lining etc.), der eliminerer havvandets korrosive indvirkning.

Det kan ikke anbefales at benytte shotpeening eller andre metoder til at frembringe lokale trykspændinger i overfladen, idet effekten af disse kan omgås ved f.eks. grubetæring, der kan opstå efter kortere, eller længere, tid i havvand.

Vedrørende beskyttelse ved hjælp af maling og coating skal opmærksomheden henledes på at levetiden af disse foranstaltninger kan være begrænset og derfor vil kræve periodisk eftersyn og vedligeholdelse.

Katodisk beskyttelse kan ikke anses som en brugbar metode til at forøge udmattelsesstyrken direkte. Det er dog klart, at i den udstrækning katodisk beskyttelse kan hindre korrosionsangreb, vil langtidseffekten af korrosion kunne elimineres. Katodisk beskyttelse kan muligvis genetablere en nedre udmattelsesgrænse, men det bør undersøges nøjere, før man udnytter det i design-øjemed.

I henhold til Eurocode 9 er det også muligt at bestemme udmattelsesstyrken for en konstruktionsdetalje ved specifikke "fuldskala" afprøvninger. I princippet skal afprøvningen foretages i havvand, men som en første tilnærmelse, kan man reducere allerede opnåede udmattelsesværdier med 45%.

6.13 REFERENCE LISTE

Litteratur

- [1] **McEvily, A.J.** *Atlas of Stress-Corrosion and Corrosion Fatigue Curves*, ASM, Materials Park, Ohio 1990.

- [2] **Dragolich, Kathleen S and DiMatteo Nikki D.** *Fatigue Data Book: Light Structural Alloys*, ASM Materials Park, Ohio 1995.

- [3] **Boyer, Howard E.** *Atlas of Fatigue Curves*, ASM Metals Park, Ohio 1986.

- [4] **Hockenull, B. S., Monks H.A. and Sala, H.** *Frequency and Environmental Interactions in the Fatigue of Aluminium Alloys, Corrosion Fatigue, Chemistry, Mechanics and Microstructures, NACE – 2*, The University of Connecticut 1971.

- [5] **Fuchs, H.O. and Stephens R.I.** *Metals Fatigue in Engineering*, John Wiley & Sons, Inc. 1980.

- [6] **Sharp, Maurice L.** *Behavior and Design of Aluminium Structures*, McGraw-Hill 1992.

- [7] **Davis, J. R.** *Corrosion of Aluminium and Aluminium Alloys*, ASM International, Materials Park, Ohio, 1999.

- [8] **Stoltz, R. E. and Pelloux R.M.** *Mechanisms of Corrosion Fatigue Crack Propagation in Al-Zn-Mg Alloys*, Metallurgical Transactions A Vol 3, sept. 1972, P. 2433.

- [9] **Buch, A.** *Fatigue Strength Calculation*, Trans Tech Publications, Switzerland 1988.

- [10] **Davis, J. R.** *Aluminium and Aluminium Alloys*, ASM International, Materials Park, Ohio 1996.

- [11] *ASM Handbook, Vol 19, Fatigue and Fracture*, ASM International Materials Park, Ohio 1996.

Supplerende litteratur

Foruden de allerede omtalte referencer, skal der her gøres opmærksom på en række håndbøger, hvor der kan søges nyttig information. Der er kun givet henvisninger til håndbøger, det vil sige bøger med et vist generelt indhold.

Disse håndbøger indeholder til gengæld mange referencer til special-litteraturen, hvor mere detaljeret information eller information af mere videnskabelig karakter kan findes.

[9] indeholder 124 sider med datablade med relation til udmattelse. Omhandler mange materialer, herunder aluminiumlegeringer.

[10] har mange faktuelle oplysninger om de forskellige aluminiumlegeringer, men kun få om korrosionsudmattelse. Spændingskorrosion dækkes langt bredere.

[11] Stort opslagsværk på mere end 1000 sider. Omtaler mange forskellige materialer.

Tekniske rapporter

[1] SASAK-RAP-DE-AKS-DTU-0001-03, *Procedure for Calculating Hot Spot Stresses in Aluminium Constructions*

[2] SASAK-RAP-DE-DTU-KEH-0007-01, *Quick Calculation of Hot-spot Stresses.*

[3] SASAK-RAP-DE-AKS-KEH-0009-01, *Dimensionering af udmattelsesbelastede svejste samlinger i aluminium efter EUROCODE No. 9 Part 2*

[4] SASAK-RAP-DE-AKS-KEH-0010-02, *Comparison of different types of welded joints in aluminium structures using finite element calculations*

[5] SASAK-RAP-ME-AKS-FI-0010-00, *Korrosionstest af nittesamlinger på aluminium*

[6] SASAK-RAP-LE-AKS-FI-0002-01, *Effect of Surface Preparation with Silanes on Corrosion Resistance and Paint Adhesion on Aluminium Surfaces*

[7] SASAK-RAP-LE-AKS-DTU-0003-00, *Simulering af revneudbredelse i dynamisk påvirket aluminiumskonstruktion*

- [8] SASAK-RAP-LE-AKS-DTU-0005-01, *Journals over the fatigue experiments.*
- [9] SASAK-RAP-LE-AKS-KEH-0006-03, *Aluminium fatigue tests*
- [10] SASAK-RAP-LE-AKS-KEH-0011-01, *Udmattelsestest - Reparations svejsnings indflydelse på udmattelsesstyrken*
- [11] SASAK-RAP-MO-AKS-KEH-001-02, *Model arbejde.*
- [12] SASAK-RAP-E5-AKS-FI-0001-00, *Udmattelsestest af reparations svejsninger i aluminiumkonstruktioner*

7 Arbejdsmiljø og eksternt miljø ved sammenføjning af aluminium

7.1 ARBEJDSMILJØ

Dette afsnit beskriver arbejdsmiljøforhold, regler og krav i forbindelse med *svejsning og limning* af aluminium.

Afsnittet er målrettet mod sammenføjning af aluminium og indeholder derfor primært arbejdsmiljøregler m.v., som har direkte relevans for dette område. Af hensyn til den praktiske anvendelighed er der dog i et begrænset omfang medtaget mere generelle oplysninger om miljøforhold i forbindelse med de beskrevne processer. Mere almene regler og sikkerhedsbestemmelser, der kan have betydning for området er vist i en oversigt over AT-bekendtgørelser (AT Arbejdstilsynet), meddelelser m.v.

7.2 SVEJSNING

7.2.1 ARBEJDSMILJØRISICI

De væsentligste arbejdsmiljørisici ved *svejsning* i aluminium er *luftforureningen* og den *optiske stråling* (svejselys). På begge disse områder kan svejsning i aluminium stille særlige krav til beskyttelseforanstaltninger i forhold til arbejde i andre materialer.

Procesudstyret kan desuden være omfattet af regler for *el-sikkerhed* og *sikkerhed ved gasflasker/anlæg*.

Arten og graden af arbejdsmiljørisici ved svejsning i aluminium afhængig af den anvendte svejseproces er vist i Tabel 7.1.

Støjniveauet foreligger ikke oplyst

Risikoen ved magnetfelter fra modstandssvejsmaskiner er ikke dokumenteret

Ved manuel svejsning: overhyppighed af ergonomiske skader (ryg, ben) i erhvervsgruppen ”svejsere”

Tabel 7.1 Generel oversigt over arbejdsmiljørisici ved svejsning i aluminium.

Proces	Arbejdsmiljørisici							
	Luft- forurening	Optisk stråling	Støj	El- sikkerhed	Gas læg	Magnetfelt	Brand	Ergonomi
MIG-svejsning	xxxx	xxxx	xx (a)	x (a)	x (a)		x (a)	xx (d)
TIG-svejsning	xx(x)	xxx	xx	x (a)	x (a)		x (a)	xx (d)
Plasmasvejsning	xxx	xxx		x (a)	x (a)		x (a)	xx (d)
CO ₂ -lasersvejsning	xx	xxx		x (a)			x (a)	
Nd-YAG- lasersvejsning	xx	xxxx		x (a)			x (a)	
Modstandssvejsning			xx (a)	x (a)		x (c)		
Friction Stir			x (b)					

x : Lille påvirkning/risiko ved normale sikkerhedsforanstaltninger

xx : Kan være et arbejdsmiljøproblem

xxx : Væsentligt arbejdsmiljøproblem

xxxx : Stor risiko for uacceptabel påvirkning; særlige foranstaltninger påkrævet

(a)(b)(c) *Materialet har ingen betydning for risikoen, dvs. forholdene ved svejsning i aluminium er de samme som ved tilsvarende svejsning i andre materialer.*

7.2.2 LUFTFORURENING

Svejsning i aluminium kan udvikle og samt forskellige gasarter, herunder specielt ozon.

Mængden og sammensætningen af forureningen er bestemt af den aktuelle proces, procesparametrene, tilsatsmaterialet, grundmaterialelegering og den eventuelle beskyttelsesgas. Det store antal procesvariable betyder, at der inden for samme hovedproces kan forekomme endog meget store variationer i både mængde og sammensætning af forureningen. Tabel 7.2 viser en almen oversigt over arten af forureninger ved forskellige processer til svejsning i aluminium samt forureningsmængderne vægtet relativt.

Tabel 7.2 Generel oversigt over luftforureningens art og mængde ved svejsning i aluminium.

Proces	Luftforurening		
	Svejserøg	Ozon (O ₃)	Nitrøse gasser (NO+NO ₂)
MIG-svejsning	xxx	xxxxx	x(x)
TIG-svejsning		xx(x)	x
Plasmasvejsning		xxx	x
CO ₂ -lasersvejsning	xx	x	(x)
Nd-YAG-lasersvejsning	xx	x	(x)
Modstandssvejsning			
Friction Stir	*		

- x : Lav forureningsdannelse – normalt ikke kritisk.
 xx : Forureningsdannelse med arbejdsmiljømæssig betydning
 xxx : Kraftig forureningsdannelse; risiko for uacceptabel påvirkning
 xxxxx : Meget kraftig forureningsdannelse; stort risiko for uacceptabel påvirkning; særlige foranstaltninger påkrævet
 () : Variationsområde
 * : Ingen data

Det fremgår af tabellen , at ozondannelsen ved MIG-svejsning i aluminium kan være ekstrem kraftig. Ozondannelsen ved MIG-svejsning i aluminium er normalt langt større end ved svejsning i andre materialer som f.eks. rustfrit stål. Ved MIG-svejsning i aluminium må operatøren derfor ofte beskyttes med åndedrætsværn udover procesventilation. MIG-svejsning i aluminium medfører samtidig røg.

7.2.3 SVEJSERØG

Svejserøg er små faste partikler, der dannes ved kondensering og størkning af fordampet materiale fra svejseprocessen. Svejserøgpaticlerne består overvejende af metaloxider.

Undersøgelser har vist, at langt den største del af røgen dannes ved fordampning fra tilsatsmaterialedråber, mens fordampning fra smeltebadet kun bidrager meget lidt til røgdannelsen.

Den typiske røgemission ved MIG-svejsning af aluminiumlegeringer med Ar gasbeskyttelse er vist i Tabel 7.3.

Tabel 7.3 Typiske røgemissioner ved MIG-svejsning i aluminium.

Proces	Materiale	Tråd dia. mm	Strømstyrke A	Røg g/min
MIG	AlSi 5	1,6	150-280	0,2- 0,9
Ar	Al 99,5	1,6	150-280	0,2-1,2
	AlMg 5	1,6	150-280	0,4- 1,6
	AlMg4,5Mn	1,6	150-280	0,6- 1,3
	AlZn4,5Mg 1	1,6	150-280	1,2- 1,8

Gasarter

Svejsprocesser i aluminium kan danne ozon (O₃), samt i mindre omfang nitrose gasser (NO_x) og carbonmonoxid (CO) – se Tabel 7.2. **Arbejds miljømæssigt** er ozon langt den vigtigste gasart, og samtidig den forurening, der i praksis udgør det største ventilationstekniske problem ved MIG-, TIG- og plasmavejsning i aluminium. I forhold til det **eksterne miljø** har gasmængderne ingen betydning. Eksempler på den typiske *ozoneksponering* ved aluminiumsvejsning, dvs. ozonkoncentrationen i indåndingszonen ved operatøren, er vist i Tabel 7.5.

Ozon

Ozon er en tre-atomig form af oxygen, der kan dannes i luften omkring svejsestedet på grund af UV-stråling fra lysbuen. Da ozondannelsen skyldes strålingen kan gasarten udvikles i en større zone omkring svejsestedet, i modsætning til dannelsen af svejserøg.

Stoffer som Ar, Si og Al giver en meget intensiv kortbølget UV-stråling, hvilket er en af årsagerne til, at MIG-svejsning i aluminium generelt medfører langt større ozondannelse end f.eks. MAG-svejsning i stål ved samme strømstyrke.

Ozon dekomponerer meget let til oxygen, idet oxygenatomer let frigøres fra ozonmolekyler. Ozonmolekyler har derfor en meget lille stabilitet og er stærkt oxiderende. Dannelses- og dekomponeringsmekanismerne for ozon bevirker, at der er to karakteristiske forhold knyttet til ozoneksponering ved svejsning:

Ozon udvikles i en zone omkring svejsestedet i modsætning til f.eks. røg og NO_x. Målinger har vist, at ca. halvdelen af ozondannelsen ved beskyttelsesgasprocesser dannes i luften 10-20 cm omkring lysbuen (nærzonen). På grund af termikken vil denne ozon hurtig transporteres opad og spredes i en større kegleformet usynlig ozonfane over og omkring svejsestedet.

I området uden for varmluftfanen (dvs. fjernzonen) dannes der også ozon, selv om koncentrationen her er betydeligt lavere.

Den relativt store zone med ozonforurening betyder, at *procesventilation skal have en stor indfangningszone*, dvs. indrettes som *lavtryksventilation med store luftmængder*, hvis den skal have en virkning overfor ozon.

Den dannede ozon nedbrydes meget hurtigt til oxygen. Når svejsningen ophører, stopper ozondannelsen, og den ozon, der er dannet, dekomponerer meget hurtig tilbage til oxygen. Normalt forsvinder ozonen i luften på mindre end et minut efter svejsningens ophør - ofte på få sekunder. **Ozon er derfor kun et problem under svejsning, og kun for selve svejseren** samt eventuelle medhjælpere tæt ved svejsestedet.

Ozon ved MIG- og TIG-svejsning i aluminium.

I Tabel 7.4 er der sammenstillet eksempler på ”typiske” eksponeringsdata for ozon i forbindelse med MIG og TIG-svejsprocesser i aluminium

Tabel 7.4 Typiske ozon-eksponeringer (range) under aluminiumsvejsning.

Proces	Materiale	Ozoneksponering ppm (typisk range)*	Bemærkning
TIG	Al-legeringer	0,01-0,13	**
MIG	Al-legeringer	0,08-0,45	**
	AlSi	0,05-7,8	
	Al99,5	0,2-0,6	
	AlMg	0,04-2,5	

Anm.: Data fra flere forskellige målinger.

* Grænseværdi: 0.1 ppm (L)

** Disse eksponeringsdata refererer generelt til *middelværdier* i svejseperioder, dvs. ikke direkte til eksponeringen *under* svejsning.

Nitrøse gasser

Nitrøse gasser er en fællesbetegnelse for nitrogenoxid (NO) og nitrogendioxid (NO₂). Gasarterne dannes ved opvarmning af luftlaget tæt ved lysbuen, men er *uden væsentlig arbejdsmiljømæssig betydning* i forbindelse med lysbuesvejsning. Ved TIG og MIG-svejsning i aluminium er de nitrøse gasser helt overvejende NO₂, da evt. NO straks omdannes til NO₂ ved kemisk reaktion med ozonen omkring lysbuen.

Carbonmonoxid

Carbonmonoxid (CO, kulilte) dannes i mindre mængder ved elektrodesvejsning, men mængden er normalt uden arbejdsmiljømæssig betydning.

Grænseværdier for luftforurening ved Aluminiumsvejsning

For at sikre mod sundhedsskadelig luftforurening i arbejdsmiljøet har Arbejdstilsynet fastsat vejledende grænser for den tilladelige forurening i luften. Grænseværdierne (GV) er samlet i tabeller i: At-anvisning nr. 3.1.0.2, december 1996: Grænseværdier for stoffer og materialer, [1].

Grænseværdien for et stof er den maksimale forureningskoncentration, der må forekomme i indåndingsluften på arbejdspladsen. Grænseværdierne er generelt fastsat som gennemsnitskoncentrationer for en arbejdsdag. For enkelte stoffer med akut virkning er grænseværdien dog fastsat som en loftværdi (GV-L), dvs. en koncentration der på intet tidspunkt må overskrides.

Grænseværdierne i anvisning 3.1.0.2. er vejledende. Efter reglerne i anvisningen er det ikke tilstrækkeligt kun at overholde grænseværdierne. Det er et overordnet At-krav, at:

- **koncentrationen af luftforureninger skal være så lav som muligt.**
- **unødige påvirkninger af forureninger skal undgås.**

Luftforureningen skal derfor altid nedbringes så meget, som det er rimeligt under hensyntagen til de tekniske muligheder, **herunder ved foranstaltninger i form af ventilation og substitution.**

Grænseværdierne er endvidere fastsat for stoffer enkeltvis. Luftforureningen fra svejsning består imidlertid af en blanding af flere forskellige stoffer. Efter Arbejdstilsynets regler skal der ved vurdering af forureningen fra svejsning derfor mindst regnes med en **sammenlagt (additiv) virkning af stofferne i forureningen**. Beregningsreglerne fremgår af anvisning 3.1.0.2.

7.2.4 OPTISK STRÅLING

Optisk stråling ved svejsning af aluminium kan være et stort Arbejds miljømæssigt problem. Ud over at danne ozon kan den give en lang række skader på øjne og hud, som er særligt udtalt ved svejsning i aluminium.

Optisk stråling omfatter lys, ultraviolet stråling og infrarød stråling.

Ultraviolet stråling

Ultraviolet (UV) stråling har bølgelængder mellem 100 nm og 400 nm. Stråling med bølgelængder under 200 nm absorberes næsten fuldstændigt af almindelig luft, og det ultraviolette spektrum regnes derfor normalt som bølgelængdeområdet 200 nm til 400 nm. I medicinsk sammenhæng inddeles UV området i UV-C (200 nm til 280 nm), UV-B (280 nm – 315 nm) og UV-A (315 nm til 400 nm).

Lys

Den del af optisk stråling som menneskets øje kan opfatte, den synlige stråling, kaldes lys. Lys omfatter stråling med bølgelængder mellem ca. 400 nm og 760 nm. Lysets farve er bestemt af bølgelængden.

Infrarød stråling

Infrarød stråling (IR) har bølgelængder mellem 760 nm og 1 mm. Den kaldes også for varmestråling. Det infrarøde spektralområde inddeles i IR-A (760 nm), IR-B (1400 nm til 3.0 µm) og IR-C (3.0 µm til 1 mm). Det er hovedsageligt IR-A området som er af arbejdshygienisk betydning.

7.2.5 ØJEN- OG HUDSKADER FORÅRSAGET AF OPTISK STRÅLING

Øjenskader

UV stråling absorberes helt eller delvist i øjets forreste dele, mens lys og IR-A strålingen trænger frem til øjets bagside, hvor det absorberes. Vi kan kun opfatte lyset, ikke IR-A strålingen. IR-B og IR-C stråling absorberes i øjets forreste del, ligesom UV stråling. Absorptionen i øjets bestanddele afhænger således af strålingens bølgelængde. Se Figur 7.1. Strålingens skadevirkning, i et bestemt væv, afhænger derfor generelt af :

Absorptionen af den(de) pågældende bølgelængder

Strålingen irradians (effekt)

Eksposeringstiden

UV-C og UV-B stråling kan forårsage bindehinde- og hornhindekatar. Denne skade, som er fotokemisk, kaldes populært svejseøjne eller sneblindhed. Skaden optræder ikke umiddelbart, men først nogle timer efter eksposeringen. Symptomerne er rødmen af øjet, tåreflåd, og en fornemmelse af ”grus” i øjnene, samt at man bliver meget følsom for lys. Skaden er reversibel og heles normalt i løbet af 48 timer. Behandlingen foretages med smertestillende øjendråber eller creme. Den strålingsdosis som er nødvendig for fremkalde svejseøjne, afhænger af strålingens bølgelængde. Øjet er mest følsomt for bølgelængden 270 nm.

UV-B stråling kan give tidlig grå stær i linsen. UV-A strålingen kan give akutte øjenskader hvis strålingsintensiteten er meget stor. Hvis linsen efter en operation er erstattet af en kunstig linse, kan UV-A strålingen skade nethinden, fordi den naturlige linses filtrerende virkning for UV-A stråling ikke længere er til stede.

Lys og IR-A stråling, der trænger frem til øjets nethinde, kan give en varig synsnedsettelse. Skaden på nethinden kan enten være fotokemisk eller termisk afhængig af bølgelængden.

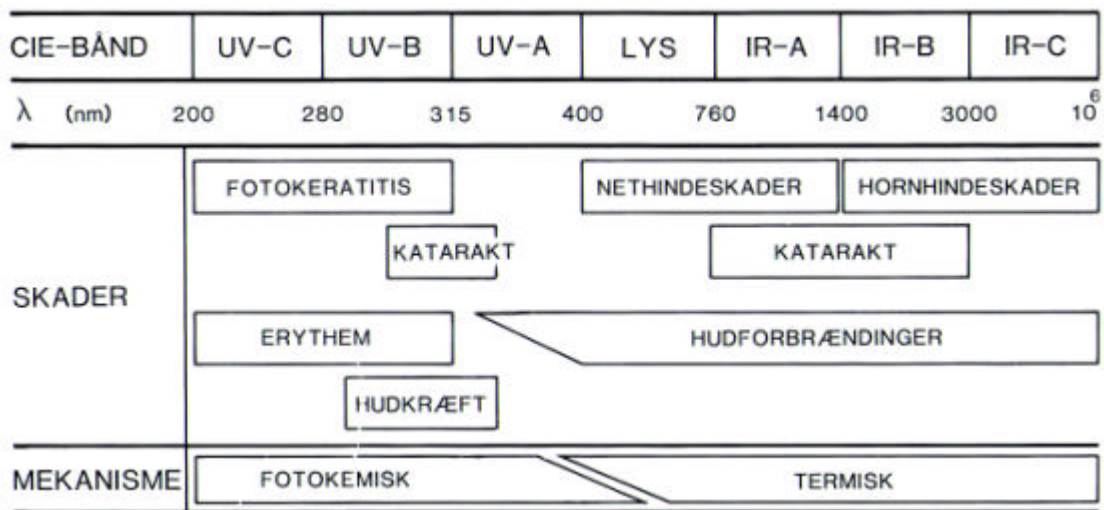
For såvel fotokemiske som termiske skader på nethinden er virkningen størst for blå og violet lys. Den fotokemiske effekt er kendt som ”blålys” effekten. Den er kumulativ over en arbejdsdag, dvs. den skadelige virkning adderes i løbet af en arbejdsdag. Skaden som opstår hvis en tærskeldosis (termisk) på nethinden overskrides, er normalt ikke synlig før efter nogle timer. Ved fotokemiske skader er temperaturstigningen ubetydelig (< 1°C).

Hudskader

Hudskader omfatter erythem (solskoldning), termiske hudforbrændinger og eventuelt udvikling af hudkræft. Se Figur 7.1.

Termiske skader forårsaget af optisk stråling ses sjældent ved svejsning.

UV-C, og særligt UV-B stråling, kan give hudkræft.



Figur 7.1 Skader på øjne og hud som funktion af bølglængde.

Vejledende grænseværdier

I Danmark er der ikke fastsat grænseværdier for optisk stråling. Arbejdstilsynet anvender vejledende grænseværdier, der er fastsat af American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)[2]. De anvendes også i de andre nordiske lande, samt i de fleste EU-lande.

Grænseværdi for synligt lys ved svejsning er dækket under DS/EN 169 ”Valg af øjenværn”[3].

Den modtagne stråling afhænger af afstanden fra strålingskilden. Med god sikkerhed kan man antage at strålingsintensiteten falder med kvadratet på afstanden. Det vil sige dobbelt afstand giver en stråling som er fire gange mindre.

Optisk stråling ved svejsning i aluminium

Stråling fra svejselysbuer har typisk et stort indhold af UV stråling. Strålingens spektrum afspejler de materialer der indgår i lysbuen, især tilsatsmateriale og beskyttelsesgas.

Strålingens styrke afhænger især af strømstyrken, men også af andre svejseparametre. Der er endvidere forskel på spektralfordelingen af strålingen fra forskellige svejseprocesser. F.eks. opstår den mest intense UV-stråling ved MIG/MAG svejsning, specielt i aluminium og med pulssvejsning, især synergisk puls. Risikoen for svejseøjne og hudforbrændinger er ved disse processer meget stor, ofte overskrides grænseværdierne for UV-stråling på mindre end 1 sekund, den såkaldte sikkerhedstid. Se Tabel 7.5 Typiske sikkerhedstider i sekunder på side 756. Dette er meget afhængigt af hvilken aluminiumslegering som svejses, idet 5000 serien giver størst risiko for svejseøjne, hvorimod 4000 serien giver de største ozonmængder.

Optisk stråling ved lasersvejsning

Alle lasere, som anvendes i Danmark, er underlagt bestemmelserne i standarden ”Safety of laser products - EN 60825”(IEC 825) [4]. Denne standard fastslår, at alle laserprodukter på nær klasse 1 skal være mærket med et sikkerhedsklassennummer fra 1 til 4. Nummeret fortæller om laserens ”potentielle mulighed” for at give øjen- og hudskader ud fra gældende grænseværdier.

Da øjenskader opstår ved lavere effekter end skader på huden rettes indsatsen mod at undgå øjenskader. Lasere op til og med klasse 3A vurderes i standarden som sikre mod øjenskader.

Standarden indeholder vejledende grænseværdier for bestråling af øjet med laserstråler. Eksponeringstiden er afgørende, og der er i standard-sammenhæng vedtaget en eksponeringstid for synligt lys på 0,25 sekund (aversions respons for øjet) og 100 sekunder for IR-stråling.

Tabel 7.5 Typiske sikkerhedstider i sekunder.

Proces	Afstand (m)	Strømstyrke (A)		
		100	200	300
MIG 1000 serien	0,5	6,0	1,5	0,7
	2,0	96	24	11
MIG 4000 serien	0,5	6,0	1,5	0,7
	2,0	96	24	11
MIG 5000 serien	0,5	1,2	0,3	0,1
	2,0	19	4,8	2,1
TIG 4000 serien	0,5	5,0	1,3	-
	2,0	80	20	-
TIG5000 serien	0,5	1,8	0,4	-
	2,0	28	7,1	-
Laser 5000 serien	CO ₂ laser svejsning 7,0 kW			
	0,5	100		
	2,0	1600		
Solen	-	3000		

7.2.6 STØJ

Kraftig støj eller lang tids ophold i støjfyldt miljø kan forårsage en nedsættelse af hørelsen. Hørenedsættelsen skyldes en beskadigelse af sanseorganet i det indre øre. En høreskade er permanent.

Det højest tilladte støjniveau på arbejdspladsen er 85 dB(A) tidsvægtet over en 8 timers arbejdsdag.[5] [6]

Ved svejsearbejde er det sjældent selve svejseprocessen, der medfører kraftig støj. Dog kan der ved pulssvejsning og kortbuesvejsning optræde støjniveauer over 85 dB(A).

Støjniveauet på arbejdspladsen er imidlertid normalt forårsaget af andre arbejdsprocesser, ikke mindst slibning, som giver et meget højt støjniveau.

Skadelig støj på arbejdspladsen skal nedbringes ved at anvende arbejdsmetoder og processer med mindst mulig støj. Hvis støjniveauet ikke kan reduceres tilstrækkeligt, skal der benyttes godkendt hørevæv.

7.2.7 RISIKO VED STRØMPÅVIRKNING

En strømgennemgang gennem kroppen kan være farlig. Hvis strømmen passerer hjerteregionen, kan det medføre hjertestop og død. Strømmen kan også påvirke musklerne, så der opstår krampe, eller man får et "elektrisk stød". Det kan føre til, at man kommer til skade, f.eks. ved fald fra stillads eller lignende.

Hvor farlig påvirkningen er, afhænger både af styrken og varigheden af den strøm, der går gennem kroppen. Et "elektrisk stød", som varer 1 sekund eller derover, kan være livsfarligt, selv om strømstyrken er meget lille.

Vekselstrøm er farligere end jævnstrøm. Et menneske kan normalt tåle en strømpåvirkning af jævnstrøm, som er 3 til 5 gange større end vekselstrøm ved 50 Hz.

7.2.8 EKSPLOSIONSFARE

Da aluminium oxider relativt hurtigt, kan der ved en uheldig kombination af partikel-størrelser og oxygen (atmosfære) forekomme en risiko for eksplosion. Partikelstørrelsen skal dog være relativ lille (under 500 nm).

Fyrværkeri er et eksempel på en kontrolleret anvendelse af dette fænomen. Ved svejsning og en eventuelt efterbearbejdning med vinkelsliber, forekommer der partikler som f.eks. svejserøg og slibepartikler. Da svejserøg består af oxideret grundmateriale, vil svejserøg ikke udgøre en eksplosionsfare, da røgen jo er oxideret, og derfor ikke reaktiv.

Slibestøv fra f.eks. vinkelsliber opnår ikke de samme temperaturer som svejserøg, og kunne derfor tænkes at udgøre en potentiel risiko. Denne risiko vil dog i praksis begrænses af, at slibepartiklerne også vil oxidere under afkølingen fra en relativt høj temperatur, på deres vej ud til filteret.

Eksplosionsfaren er primært relateret til aluminiumsforarbejdning såsom aluminiumskabel-fremstilling og metalsliberier. Derfor har mange metalsliberier allerede installeret eksplosionssikre filtre, mens der til dato ikke er rapporteret om eksplosioner på grund af aluminiumstøv i svejseværksteder.

7.3 FORANSTALTNINGER MOD ARBEJDSMILJØPÅVIRKNINGER VED SVEJSNING

7.3.1 LUFTFORURENING

Det er et generelt At-krav, at der **altid** skal træffes effektive foranstaltninger mod luftforureningen ved svejsning. Luftforureningen skal bekæmpes ved:

- **Ventilation** i form af punktudsugning, som fjerner forureningen direkte ved dannelsesstedet, og ved
- **Substitution**, dvs. ved erstatning af processer og materialer med mindre farlige, hvor det er teknisk muligt.

Hvis luftforureningen ikke kan nedbringes tilstrækkeligt gennem disse foranstaltninger skal operatøren anvende åndedrætsværn.

Ventilation

Lufforurening ved svejsning skal fjernes så tæt ved udviklingsstedet som muligt ved brug af procesudsugning i form af **punktudsugning** eller lokaludsugning. Udsugningsluften skal føres til det fri, dvs. **luften må ikke recirkuleres**. Desuden kan det være nødvendigt også at supplere med **almen rumventilation og indblæsning af erstatningsluft** i værkstedet.

At-reglerne om ventilation ved svejsning, herunder kravene om etablering af punktudsugning, samt regler for indretning, kontrol og vedligeholdelse af ventilationen, er angivet i At-meddelelse nr. 2.09.2, november 1999: Svejsning, skæring mv. i metal [7], samt At-meddelelse nr. 1.01.8, september 1999: Ventilation på faste arbejdssteder [8].

Punktudsugningssystemer

Punktudsugning er ventilation, der er beregnet til at indfange forureningen direkte ved dannelsesstedet, før den når indåndingszonen eller spredes i lokaleluften.

Ventilationsteknisk opdeles punktudsugningssystemer til svejsning ofte efter ventilatorens undertryk i to typer, lavtrykssystemer og højtrykssystemer.

Lavtrykssystemer er kendetegnet ved, at ventilatoren kun yder et meget lille undertryk (sugevacuum). Det er derfor nødvendigt at anvende store slange- og kanaldimensioner for at opnå lille luftmodstand. På grund af de store slanger er lavtrykksanlæg især egnet til faste arbejdspladser, hvor indfangningsdelen typisk udformes som en svingarm med sugetragt, et sugekabinet eller et sugebord.

Fordelen ved lavtrykssystemer er, at der kan udsuges **store luftmængder** med en lille motoreffekt. I lavtrykksanlæg til svejsning er udsugningsluftmængden typisk 500-3000 m³/h per svejsested, afhængig af indfangningsdelens udformning. Udsugningen kan derfor indfange forureningen fra et stort arbejdsfelt. Det betyder bl.a. at udsugningen er egnet til processer, hvor der dannes ozon.

Ulempen ved lavtrykssystemer er den begrænsede fleksibilitet, der betyder, at svejsearbejde normalt skal foregå på mindre arbejdsområder, f.eks. i svejsekabiner.

Højtrykssystemer anvender ventilatorer med et meget højt undertryk (sugevacuum).

Fordelen ved højtrykssystemerne er, at der kan suges gennem lange slanger med lille diameter. Det betyder, at udsugningen kan gøres meget fleksibel med små flytbare sugehoveder, som kan anvendes ved svejsning på store arbejdsarealer og emner.

Ulempen ved denne type systemer er imidlertid, at der normalt arbejdes med meget **små udsugningsluftmængder**. For højtrykssystemer til svejsning er luftmængden per sugested typisk 100-350 m³/h. Det betyder, at sugefeltet er meget lille, og sugehovedet skal derfor flyttes hyppigt og placeres meget omhyggeligt i forhold til svejsestedet, hvis forureningen skal indfanges effektivt. Det lille sugefelt betyder samtidig, at *udsugningen normalt ikke kan fjerne ozon effektivt*.

Punktudsugningssystemet kan – afhængig af ventilatortypen - udformes som:

Fleksible udsugningssystemer

Flytbare sugemundstykker tilsluttet flekslange

Fordele: Systemet er meget fleksibelt og kan anvendes på store emner og på skiftende svejsesteder.

Ulemper: Den lille udsugningsluftmængde betyder, at sugefeltet er meget begrænset. HT-udsugning med små sugehoveder kan derfor generelt ikke fjerne ozon effektivt, dvs. **systemet er uegnet til ozonbekæmpelse ved MIG- og TIG-svejsning i aluminium.**

Løsningen kan benyttes til udsugning af røg ved f.eks. elektrodesvejsning. Benyttes systemet til udsugning af røg ved MIG-svejsning i aluminium, må operatøren samtidig beskyttes mod ozon med godkendt åndedrætsværn.

Udsugningsarme

Fordele: Stor udsugningsluftmængde, dvs. relativ stor indfangningszone. Systemet er derfor **velegnet til udsugning af bl.a. ozon ved TIG- og MIG-svejsning i aluminium.**

Ulemper: Svingarmsystemer er kun egnede til faste arbejdspladser.

Udsugning integreret i svejseudrustningen

Fordele: Udsugningen følger svejsestedet, dvs. flytning af sugemundstykket kræver ikke en separat arbejdsoperation af operatøren.

Ulemper: Sugefeltet er meget lille. Systemet kan medvirke til at fjerne røg, men kan generelt **ikke fjerne al ozon**, dvs. systemet er ikke egnede til MIG-svejsning i aluminium uden samtidig brug af åndedrætsværn mod ozon. Svejsepistolen bliver betydeligt tungere og større. Sammen med vægten og stivheden af sugeslangen kan det gøre svejsepistolen vanskelig at håndtere i varierende svejsestillinger ved manuel svejsning. Sugemundstykkets størrelse kan desuden begrænse anvendeligheden og udsynet til svejsefugen, hvis pladsforholdene er snævre. Der er samtidig risiko for, at udsugningen kan påvirke beskyttelsesgasdækningen.

Faste udsug

Udsugningsborde og udsugningskabinetter

Fordele: Meget høj effektivitet overfor såvel røg som ozon ved korrekt dimensionering af udsugningsluftmængden.

Ulemper: Kan kun anvendes på faste arbejdssteder og normalt kun ved svejsning af mindre emner. Kræver stor udsugningsluftmængde.

En **udsugningshætte** over svejsezonen kan være en løsningsmulighed ved maskinelle svejseopstillinger, herunder i forbindelse med robotsvejsning. Sugehættens åbningsflade bør være større end arbejdsarealet. Løsningen må *ikke* anvendes ved manuel svejsning, da operatøren vil have indåndingszonen mellem svejsested og udsugningsåbningen.

Svejseborde med udsugning nedad gennem en rist i bordet må frarådes af flere årsager. Dels kræver den nedadrettede udsugning en stor lufthastighed ved svejsestedet for at indfange forureningen, og dels kan sugevirkningen begrænses af emnet, fordi det ligger mellem sugefloden og svejsestedet. Da den termiske opadrettede lufthastighed i svejsezonen er i størrelsesordenen 0.5-1.0 m/s, og sugehastigheden aftager stærkt med stigende afstand til bordfladen, skal der udsuges uforholdsmæssigt store luftmængder for at indfange forureningen. Den høje sugehastighed betyder samtidig, at der kan være risiko for at påvirke beskyttelsesgasdækningen ved TIG- og MIG-svejsning.

7.3.2 ÅNDEDRÆTSVÆRN

Hvis luftforureningen ved svejsning ikke kan fjernes tilstrækkelig effektivt med ventilation eller andre foranstaltninger skal der bruges godkendt CE-mærket åndedrætsværn. Reglerne for brug og valg af åndedrætsværn er nærmere beskrevet i *At-meddelelse nr. 4.09.1, oktober 1999: Åndedrætsværn*[9], *At-vejledning D5.1, juli 2000 : Trykluft til åndedrætsværn* [10], og BSR 1 vejledning nr. 4.09.101: Vejledning om åndedrætsværn [11].

Generelt gælder, at der kun må anvendes godkendte CE-mærkede åndedrætsværn.

Valget af åndedrætsværn skal ske under hensyntagen til

- forureningens art (partikler/gasarter) og koncentration
- arbejdets varighed
- arbejdets art og arbejdsbetingelserne

Der er to hovedtyper af åndedrætsværn: **Luftforsynede åndedrætsværn** og **filtrerende åndedrætsværn**. Begge typer findes med flere forskellige former for masker, hætter og skærme. De mest anvendte typer åndedrætsværn til svejsning er:

- Filtrerende ansigtsmaske
- Filtrerende åndedrætsværn med turboenhed
- Luftforsynet svejsevisir

I filtrerende ansigtsmasker og turboudstyr renses den omgivende luft ved at passere gennem et eller flere filtre af forskellig type. Filtertyperne opdeles i partikelfiltre, gasfiltre og kombinationsfiltre.

Filtrene skal være mærket med type og klasse efter den forurening, de beskytter imod. Luftforsynede svejseskærme får normalt tilført luft fra en kompressor. Luften skal nødvendigvis være ren, dvs. renses til en luftkvalitet, der er egnet til åndedrætsformål.

Filtrerende ansigtsmasker kan være til engangsbrug eller flergangsbrug. Masken består helt eller delvist af filtermateriale, og flere af masketyperne er forsynet med en udåndingsventil. Funktionsprincippet er, at brugeren selv suger luften gennem filtrene, hvorved luften renses for forureninger. Da filtret er en fast del af masken skal hele masken skiftes, når filterkapaciteten er opbrugt.

Filtrerende ansigtsmasker kan fås til beskyttelse både mod partikler og mod gasarter og dampe. Da denne type maske medfører åndingsmodstand, må den kun *anvendes højst 3 timer om dagen og ikke uafbrudt (3-timers reglen)*.

Turboudstyr er en betegnelse for åndedrætsværn med filter, hvor brugeren ikke selv skal suge luften gennem filtrene. I turboudstyr blæses eller suges luften gennem filtret og føres ind i åndedrætsværnet ved hjælp af en batteridrevet ventilator.

Turboudstyr er altid forsynet med partikelfilter og kan desuden forsynes med filtre mod gasarter. I turboudstyr skal filtrene også udskiftes regelmæssigt, når filterkapaciteten er opbrugt.

I turboudstyr er der ingen åndingsmodstand og 3-timers reglen gælder derfor **ikke**

for disse udstyr. Det skal bemærkes, at turboudstyr ofte forveksles med luftforsynede åndedrætsværn, men da luften tages fra omgivelserne og renses i filtre, er turboudstyr ikke et luftforsynet åndedrætsværn. Turboudstyr beskytter f.eks. ikke mod iltmangel.

Luftforsynede svejsevisir får tilført luft fra en kompressor eller en større trykbeholder gennem en slange. Åndedrætsværnet kan bestå af en svejsehjelm indrettet med lufttilførsel, eller der kan anvendes udstyr med dobbeltvisir, hvor det inderste visir er et gennemsigtigt luftforsynet visir og det yderste en normal svejseskærm. Fordelen ved dobbeltvisir er, at visiret også beskytter mod forurening, når svejseskærmen er slået op. Luftforsynede åndedrætsværn er **ikke** omfattet af 3-timers reglen.

Luftforsynet åndedrætsværn skal altid anvendes, når forureningens sammensætning og koncentration ikke er kendt, eller hvis der ikke findes filtre, der er godkendt til forureningen. Luftforsynet åndedrætsværn skal desuden bruges, når der er risiko for iltmangel.

7.3.3 BESKYTTELSE MOD OPTISK STRÅLING

Det er nødvendigt at beskytte øjne og hud effektivt. Der skal anvendes svejseglasser med passende tæthedegrad. Svejseglasser beskytter effektivt mod UV-stråling. Tæthedsgraden (glassets ”mørkhed”) angiver, hvor meget lys der trænger igennem glasset. Tæthedsgraden skal vælges, så man får komfortable synsbetingelser ved svejsning. Det kan derfor være nødvendigt at anvende svejseglasser med forskellige tæthedsgrader til forskellige svejseopgaver. Reflekser fra blanke metaloverflader kan øge risikoen for skadelig stråling betydeligt, især fra aluminium og rustfrit stål, som kan reflektere op til 70%-80 % af UV-strålingen. Også bagfra kommende stråling, og stråling fra andre svejsere skal tages

i betragtning. Den intense UV-stråling medfører endvidere dannelse af store mængder ozon. I modsætning til den intense UV-stråling og synlig stråling er den infrarøde stråling fra lysbuesvejsprocesser normalt ikke noget arbejdshygienisk problem.

Overordnet kan opstilles følgende tommelfingerregler:

Ultraviolet stråling skyldes først fremmest stråling fra de metalatomer og -ioner i elektrodematerialet. Beskyttelsesgassen og emnet har meget ringe indflydelse.

Synlig stråling skyldes såvel stråling fra elektrodematerialet som beskyttelsesgassen. Yderligere observeres stråling fra luftens bestanddele (ilt, kvælstof).

Nær-infrarød stråling skyldes overvejende stråling fra beskyttelsesgassens bestanddele, i mindre omfang elektrodematerialet.

Laserstråling

Ved lasersvejsning af aluminium anvendes typisk klasse 4 lasere af typen Nd-YAG laser og CO₂-laser. Strålingen fra disse lasere er yderst skadelig for øjet, og egnede beskyttelsesbriller skal anvendes. Der er også risiko for hudforbrændinger, idet strålingen er varmestråling (IR-stråling).

Udover selve laserstrålingen, kan der optræde sekundær stråling fra plasmadannelsen ved svejsning. Denne stråling er afhængig af beskyttelsesgas og grundmateriale, præcis som ved lysbuesvejsning.

Valget af øjenbeskyttelse afhænger af laserstrålingens bølgelængde, se EN 207 "Personal eye protection – Filters and eye protection against laser radiation" [12].

7.3.4 FORANSTALTNINGER MOD EL-ULYKKER

Ved svejsning kan man i mange tilfælde komme i elektrisk forbindelse med den ene leder (elektrode eller emne). Der skal træffes foranstaltninger, som forhindrer, at man kommer til at være en del af det elektriske kredsløb. Udstyret skal samtidig være indrettet, så det forhindrer en farlig strømpåvirkning.

Indretning af svejsemaskiner

Svejsemaskiner og svejseudstyr skal være udført med beskyttelsesforanstaltninger efter forskrifterne i *Stærkstrømsreglementet* [13] og *Stærkstrømsbekendtgørelsen* [14].

På svejsemaskiner må tomgangsspændingen ikke overstige visse grænser, som afhænger af de forhold, der arbejdes under. Man skelner mellem normal og forøget risiko, maskinelt udstyr og særlige processer.

Øvrige foranstaltninger

Returledningen bør fastgøres direkte på emnet, og den skal være kraftig nok til at bære strømmen. Ellers vil strømmen søge andre veje, f.eks. gennem stilladser og kranwirer.

Svejsemaskiner og svejseudstyr skal med jævne mellemrum kontrolleres af en kyndig person. Alle svejsekabler og kabelsamlinger skal være helisolerede. Hvis isoleringen ødelægges, skal den straks

repareres. Kablerne skal beskyttes mod slid og overlast, og svejsemaskinen bør altid afbrydes ved flytning af kablerne.

Flyt aldrig kabler ved at lægge dem over skulderen. Hvis de er spændingsførende, og der er en isolationsfejl, kan det være livsfarligt.

7.4 MILJØFORHOLD VED SVEJSEPROCESSER TIL ALUMINIUM

7.4.1 TIG-SVEJSNING AF ALUMINIUM

Luftforurening

Den vigtigste luftforurening ved TIG-svejsning af aluminium er **ozon**. Røgudviklingen er normalt uden arbejdshygienisk betydning.

Mængden af ozon afhænger primært af Al-legeringen, strømstyrken og beskyttelsesgas. Ozonmænden øges med strømstyrken indtil omkring 150-200 A, noget afhængigt af gasflow, gaskopstørrelse m.v. Eksempler på ozonemissioner er vist i Tabel 7.6 Typisk ozonemission ved TIG-svejsning af aluminium.

Tabel 7.6 Typisk ozonemission ved TIG-svejsning af aluminium.

Materiale	Gas	A	Ozon ml/min (interval)
AlSi	Ar	50-200 (AC)	0,2 – 2
Al 99,5	Ar	50-150 (AC)	0,2 - 0,5
AlMg 2,5	Ar	100-180 (AC)	0,2 - 0,4

Ozoneksponeringen ved TIG-svejsning afhænger – udover af selve ozonemissionen – i høj grad af svejserens placering i forhold til nærzoneozonen. Ved TIG-svejsarbejde har svejseren ofte indåndingszonen meget tæt ved svejsestedet i afstande på 15-30 cm. I denne zone kan der forekomme høje ozonkoncentrationer, og selv om svejseeskærmen yder en vis beskyttelse, er der stor risiko for kortvarige kraftige ozoneksponeringer over grænseværdien. **I de fleste arbejdssituationer med TIG-svejsning i aluminium er det derfor påkrævet at træffe foranstaltninger til beskyttelse mod ozon.**

Forureningsbekæmpelse

Da ozon kan dannes i en større zone omkring lysbuen, skal udsugning ved TIG-svejsning have en tilsvarende stor indfangningszone for at fjerne ozonen effektivt.

Udsugning skal så vidt muligt ske med **udsugningskabinetter** eller **udsugningsarme af lavtrykstypen**. Ved brug af denne type punktudsugning er der efter AT retningslinjerne ikke krav om åndedrætsværn.

Punktudsugning på TIG-brænderen har *ingen* effekt på svejserens ozoneksponering.

Hvis ventilationen er baseret på højtrykssystemer, skal efter AT-retningslinjerne for TIG-svejsning samtidig benyttes godkendt åndedrætsværn mod ozon.

Optisk stråling

Den optiske stråling fra TIG-svejsning er i høj grad afhængig af grundmaterialet og tilsatsmaterialet, samt beskyttelsesgassen.

Magnesiumindholdet i AlMg-legeringer giver en intens UV-stråling meget tæt på 270 nm, hvor øjet er mest følsomt med hensyn til udvikling af svejseøjne. Der udsendes også synlig stråling, som giver lysbuen et kraftigt grønligt skær.

Ved svejsning i AlSi legeringer er der ikke intense spektrallinier ved 270 nm, og risikoen for svejseøjne er derfor meget mindre end ved svejsning i AlMg legeringer.

Øjne og hud beskyttes mod UV-stråling med skærm og arbejdstøj. Det er nødvendigt at bruge handsker og halsbeskyttelse som ekstra beskyttelse. Almindelige svejseglasser giver fuld beskyttelse mod svejseøjne. Bagfra kommende stråling fra andre svejsere eller refleksioner, kan også give svejseøjne. Denne risiko kan elimineres ved at anvende "slibebriller" med sidebeskyttelse af polycarbonat. Sådanne "slibebriller" er også gode til at beskytte eventuelle medhjælpere mod svejseøjne.

Grænseværdien for synligt lys ved svejsning er dækket under DS/EN 169 "Valg af øjenværn", [3]. Standardens anbefalinger med hensyn til tæthed af svejseglasser er meget konservative, og vil resultere i et meget mørkt glas. Det er almindeligt accepteret at vælge et glas som giver komfortable synsbetingelser, samt hensigtsmæssig arbejdsafstand fra lysbuen. Undersøgelser har vist, at man ikke vil vælge et for lyst glas, og dermed risiko for øjenskader, idet man vil få ukomfortable synsbetingelser inden der er risiko for skader.

Den infrarøde stråling fra lysbuesvejsningsprocesser normalt ikke noget arbejdshygienisk problem.

7.4.2 MIG-SVEJSNING AF ALUMINIUM

Luftforurening

MIG-svejsning i aluminium udvikler røg og ozon. Specielt ozondannelsen er særdeles kraftig, og betydelig større end ved svejsning i andre materialer.

Ozonemissionen afhænger primært af grundmateriale og tilsatstrådlegering. Lelegeringer med Si og Mn giver de maksimale ozondannelser og AlMg-legeringer de laveste. De øvrige procesparametre som strømstyrke, lysbuespænding, gasflow mv. har også betydning for mængden af ozon. Den typiske

ozonemission ved MIG-svejsning i aluminium er sammenfattet i Tabel 7.7 Eksempler på ozonemissionen ved MIG-svejsning af aluminium.

Tabel 7.7 Eksempler på ozonemissionen ved MIG-svejsning af aluminium.

Materiale	Tråd mm	Gas	A	Ozon ml/min (interval)
AlSi5	1,2	Ar	150-300	25- 50
	1,6	Ar	150-350	20- 40
Al99,5	1,2	Ar	225	35
AlMg3	1,2	Ar	225	20
AlMg5	1,2	Ar	150-300	2-15

Forureningsbekæmpelse

Udsugning bør ske med punktudsug med stor udsugningsluftmængde, dvs. **udsugningskabinetter** eller **udsugningsarme af lavtrykstypen** med udsugningsluftmængde på 1000 m³/h eller mere. Ved brug af denne type punktudsugning er der efter AT retningslinjerne ikke krav om åndedrætsværn.

Ved brug af punktudsugningsløsninger baseret på højtryksudsugning med små luftmængder, herunder flytbare sugemundstykker med flekslange, skal der samtidig benyttes godkendt åndedrætsværn mod ozon.

Optisk stråling

Svejsning i aluminium med elektrodetypen AlMg5 og argon som beskyttelsesgas, giver for en given strømstyrke en større irradians, både i det ultraviolette, synlige og infrarøde område, sammenlignet med svejsning i ulegeret stål. Samtidig er lysbuen mere stabil end ved svejsning i stål. Den udsender en intens UV-stråling meget tæt på 270 nm, hvor øjet er mest følsomt med hensyn til udvikling af svejseøjne. Der udsendes også synlig stråling, som giver lysbuen et kraftigt grønligt skær.

Det betyder, at hvis der f.eks. svejses med 200 A, og lysbuen betragtes uden beskyttelse i en afstand på 50 cm, overskrides grænseværdien for svejseøjne for en arbejdsdag på blot 0.3 sekund. Her er altså tale om en stor risiko, hvis lysbuen tændes mange gange i løbet af en arbejdsdag (f.eks. ved ophæftning).

Med elektrodetypen AlSi5 og argon som beskyttelsesgas er der ingen markante spektrallinier i 270nm – 280 nm området, men der er en relativt stor spektral irradians i det kortbølgede UV-område (UV-C), hvilket kan give anledning til dannelse af store mængder ozon.

Øjne og hud beskyttes mod UV-stråling med skærm og arbejdstøj. Det er nødvendigt at bruge handsker og halsbeskyttelse som ekstra beskyttelse. Almindelige svejseglas giver fuld beskyttelse

mod svejseøjne. Bagfra kommende stråling fra andre svejsere eller refleksioner, kan også give svejseøjne. Denne risiko kan elimineres ved at anvende "slibebriller" med sidebekyttelse af polycarbonat. Sådanne "slibebriller" er også gode til at beskytte eventuelle medhjælpere mod svejseøjne.

Grænseværdien for synligt lys ved svejsning er dækket under DS/EN 169 "Valg af øjenværn". [3] Standardens anbefalinger med hensyn til tæthed af svejseglas er meget konservative, og vil resultere i et meget mørkt glas. Det er almindeligt accepteret at vælge et glas som giver komfortable synsbetingelser, samt hensigtsmæssig arbejdsafstand fra lysbuen. Undersøgelser har vist, at man ikke vil vælge et for lyst glas, og dermed risiko for øjenskader, idet man vil få ukomfortable synsbetingelser inden der er risiko for skader.

Den infrarøde stråling fra lysbuesvejsprocesser normalt ikke noget arbejdshygienisk problem.

7.4.3 LASERSVEJSNING

CO₂-Lasersvejsning

Den primære stråling fra CO₂-laseren har en bølgelængde på 10.600nm, og denne bølgelængde absorberes i næsten alle materialer. Derfor kan tilstrækkelig øjenbeskyttelse opnås med relativt enkle beskyttelsesglas, idet selv helt klare glas giver fuld beskyttelse, f.eks. slibebriller i polycarbonat.

Den sekundære stråling fra plasmadannelsen ved lasersvejsning af legeringer i 5000 serien (AIMg-typer, som giver den største risiko for svejseøjne) har en spektral fordeling som ligner den for lysbueprocesserne, dog ligger irradiansen lavere, typisk en faktor 100 i forhold til MIG-svejsning. Der er dog stadig tale om høje strålingsniveauer, specielt af UV-stråling, som kan give svejseøjne. Da der altid skal anvendes beskyttelse mod den primære stråling, og denne beskyttelse også beskytter mod svejseøjne, er risikoen for svejseøjne yderst minimal.

Nd-YAG Lasersvejsning

Den primære stråling fra Nd-YAG laseren har en bølgelængde på 1.064 nm. Strålingen kan transmitteres i mange transparente materialer, f.eks. glas og plast, men også øjets glaslegeme, og dermed nå frem til nethinden. Derfor skal der bruges en speciel type øjenbeskyttelse med et filtermedie, som absorberer laserstrålingen. Ved meget høje lasereffekter kan det være nødvendigt med en dæmpningsgrad på 10⁶ eller 10⁷.

Den sekundære stråling fra Nd-YAG lasersvejsning er meget lav, og uden arbejdshygienisk betydning.

7.5 LIMNING

7.5.1 ARBEJDSMILJØRISICI

Limning omfatter en række deloperationer, som kan medføre en risiko for sundhedsskadelige påvirkninger og arbejdsskader, hvis der ikke tages de nødvendige forholdsregler.

De vigtigste arbejdsmiljøpåvirkninger og risici er knyttet til luftforurening med dampe af opløsningsmidler og andre stoffer i lime og hjælpestoffer, og til hudkontakt med lim og hjælpestoffer.

Omfanget af risikoen afhænger af, hvor sundhedsskadelige stoffer, der arbejdes med, hvor massiv kontakten med stofferne er, hvor længe den varer, og hvor hyppigt den gentages.

Undertiden benyttes flygtige og brændbare stoffer, og det medfører principielt en risiko for brand eller eksplosion.

På mange områder har det ingen betydning for risikoen, om man limer aluminium eller andre metaller. Sundhedsrisikoen ved et bestemt limprodukt er ikke afhængig af, hvad der limes med det, men hvordan man limer med det.

I nogle tilfælde, hvor der stilles særlig store krav til styrken og holdbarheden af limsamlinger i aluminium, kan man være nødt til at benytte forbehandlingsprocesser, hvor der indgår forbindelser af chrom (VI). Sådanne forbindelser anses for at være kræftfremkaldende, og det indebærer en forøget risiko for sundhedsskadelig påvirkning.

Også nogle lime kan indeholde eller afgive små mængder af stoffer, som anses for at være kræftfremkaldende.

7.5.2 ARBEJDSMILJØFORANSTALTNINGER GENERELT

Luftforurening skal imødegås ved at fjerne forureningen ved kilden. Lim og hjælpestoffer med indhold af flygtige stoffer bør kunne påføres helt eller delvis indkapslet under ventilation. Hvor det ikke er muligt, må operatøren sikres mod dampe ved at styre luftstrømningen omkring arbejdsområdet, så den rene luft passerer fra operatøren via limeområdet til udsugningsstedet

Hvis forureningen ikke kan fjernes tilstrækkelig effektivt med ventilation, skal der benyttes åndedrætsværn. Oplysninger og regler om åndedrætsværn findes i "åndedrætsværn" [11].

Hudkontakt kan undgås ved brug af egnede engangshandsker, eventuelt suppleret med særligt arbejdstøj. Hvis der er risiko for stænk af tyndtflydende produkter, skal der benyttes egnede øjenværn.

Engangshandsker er fremstillet af plast, men plast kan være gennemtrængelig for opløsningsmidler og andre stoffer i limene.

Forholdet kompliceres af, at en plasthandske kan være tæt for to bestemte stoffer hver for sig, men gennemtrængelig for en blanding af dem.

Også indretningen af værkstedet har betydning for risikoen ved limning. Arbejdsstedet bør være ryddeligt og renholdt for at undgå kontakt med spildt lim. Hensigtsmæssigt udstyr og instruktion i arbejdsmetoder er en god hjælp, men et godt supplement er afdækning med eksempelvis kraftigt papir eller pap på steder, hvor limen håndteres. Ved spild kan afdækningen fornyes, så redskaber og arbejdstøj ikke smøres ind i lim.

Der bør være særlige affaldsbeholdere til lim, handsker, klude og redskaber inden for rækkevidde ved hvert arbejdssted, så affald kan fjernes fra arbejdsområdet, så snart det opstår. Beholderne bør være forsynet med låg, som kan betjenes uden at tilsmudse ydersiden med lim.

I “bekendtgørelse om arbejde med kodenummererede produkter” [15] er der bestemmelser om sikkerhedsforanstaltninger ved arbejde med de produkter, som er MAL-kodemærket. For produkter uden MAL-kodemærkning kan der søges oplysninger i leverandør-brugsanvisningen, og eventuelt må BST konsulteres.

Brand og eksplosion skal forebygges ved at undgå antændelseskilder i området, og afhængigt af de faktiske stoffer og produkter må der eventuelt vælges særlig gulvbelægning og værktøj, så gnistdannelse forebygges. Vær også opmærksom på, at statisk elektricitet kan udgøre en risiko. Brandfarlige opløsningsmidler er omfattet af reglerne i “bekendtgørelse om brandfarlige væsker” [16].

7.5.3 LIMTYPER OG LIMFORMER

På grund af den store forskellighed mellem de forskellige produkter er det vanskeligt at give entydige udsagn om arbejdsmiljøpåvirkninger og risici, men der dog kan gives nogle meget generelle retningslinier.

Limene inddeles hyppigt i typer efter basiskomponentens kemiske sammensætning, for eksempel epoxy, polyurethan og acrylat. Hver af disse betegnelser omfatter imidlertid lime med meget forskellige egenskaber. Man ser også limene klassificeret efter deres indhold af opløsningsmidler, men også her er der en stor spændvidde i miljømæssig henseende.

Limens form har også betydning på miljøpåvirkning og risiko. Enkomponentlim skal ikke blandes og medfører mindre risiko end tokomponentlim, alt andet lige. Lim i filmform giver ikke den samme risiko ved hudkontakt som flydende lim, alt andet lige.

Nedenfor gives en kort, meget generel oversigt over miljøegenskaber ved udvalgte lime og opløsningsmidler, som kan være relevante til limning af aluminium.

Anaerobe lime

Enkomponente lime baseret på methacrylater og acrylater, med indhold af blandt andet acrylsyre og organisk peroxid. Acrylater og methacrylater kan have en karakteristisk lugt. Da fordampeligheden af de indgående stoffer er relativt lav, er luftforurening sjældent noget problem, når limen benyttes i små mængder. Ved hudkontakt er der risiko for udvikling af allergisk kontakteksem, ligesom der kan optages skadelige stoffer gennem huden.

For at kunne lime på aluminium er det som regel nødvendigt at bruge en primer (aktivator). Primerens hovedbestanddel kan være organiske opløsningsmidler, som giver luftforurening. Det aktive stof i primeren kan være aminer, som er sundhedsskadelige og let optages gennem huden.

Primere med organiske opløsningsmidler er omfattet af reglerne i "At-bekendtgørelse om stoffer og materialer med over 0,5% flygtige opløsningsmidler" [17].

Epoxylime

Tokomponentlime, som består af en epoxyharpiks og en hærder. Ved at bruge en hærder, som først aktiveres ved forhøjet temperatur, kan de to komponenter leveres færdigblandet, så limen fremstår som et enkomponentprodukt. Epoxylime findes i et meget stort antal varianter med meget forskellige egenskaber.

Blandt de forskellige stoffer, som kan indgå ved fremstilling af epoxyharpikser, er epichlorhydrin, som anses for at være kræftfremkaldende. I den færdige harpiks findes epichlorhydrin i princippet ikke i fri tilstand, men bundet til andre stoffer.

Der findes epoxyharpikser med molekylvægt fra nogle få hundrede g/mol til flere tusinde g/mol. Harpikser med lav molekylvægt er flydende, mens harpikser, der består af lange, tunge molekyler med høj molekylvægt, er tykflydende eller faste.

Især lavmolekylær epoxyharpiks er kraftigt allergifremkaldende og lokalirriterende ved hudkontakt. Højmolekylær epoxyharpiks er ikke lokalirriterende, og mindre kraftig allergifremkaldende end den lavmolekylære. Der er imidlertid et lille indhold af lavmolekylære epoxyforbindelser også i højmolekylær epoxyharpiks.

I nogle produkter indgår reaktive opløsningsmidler, som indeholder epoxygrupper, fordi man herved kan fortynde produktet uden at få det fordampningssvind, som et ikke reaktivt opløsningsmiddel ville give. Reaktive opløsningsmidler kan være letfordampelige, og medfører da risiko for allergi også ved indånding.

Der findes flere typer af hærder til epoxylime. Især aliphatiske aminer og syreanhydrider er lokalirriterende, og ved hudkontakt udgør det en særlig risiko sammen med en så stærkt allergifremkaldende stofgruppe som epoxyharpiks. Hærderne kan også indeholde sundhedsskadelige stoffer, som kan optages gennem huden.

Arbejde med epoxylime er omfattet af reglerne i "bekendtgørelse om epoxyharpikser og isocyanater" [18], som blandt andet omfatter et krav om brug af handsker.

Polyurethanlime

Findes i en mængde varianter med meget forskellige egenskaber, både som tokomponente, og som enkomponent fugthærdende lime. Harpiksen består af en polyol tilsat aminer og/eller tinsalte som katalysator, som hærdes med en isocyanathærdere. Polyurethanharpikser med aminer indebærer en forøget risiko for allergisk kontakteksem. Isocyanatdampe virker stærkt irriterende på åndedrætsorganerne og kan give kemisk forårsaget bronchitis, allergisk astma, vand i lungerne og kronisk nedsat lungefunktion. Isocyanatdampe kan ikke lugtes, før koncentrationen er langt over det acceptable niveau.

Selv ganske små mængder isocyanat kan give gener, som undertiden først viser sig nogle timer efter eksponeringen. De første symptomer er ofte tør hals og hoste.

Blandt de forskellige isocyanater, som kan indgå i produktionen af hærdere, er MDI, TDI, HDI og IPDI. Hærdere baseret på MDI og IPDI bør foretrækkes, da de er mindre letfordampelige end HDI og TDI. Isocyanaterne er som regel præpolymeriseret i hærderen for at nedsætte antallet af fri isocyanatgrupper, hvorved risikoen reduceres. Ved varmhærdning kan der dog afgives isocyanatholdige dampe, som gør ventilation påkrævet. Opvarmning af hærdet polyurethanlim til over 200 °C medfører risiko for dannelse af isocyanatdampe.

TDI anses for at være kræftfremkaldende og er omfattet af reglerne i “bekendtgørelse om forebyggelse af kræftisiko” [19].

Arbejde med polyurethanlime er omfattet af reglerne i “bekendtgørelse om epoxyharpikser og isocyanater” [18], som blandt andet omfatter et krav om brug af handsker.

SGA-lime (Second Generation Acrylics)

Tokomponente lime baseret på methacrylater, som ved sammenkobling med forskellige forbindelser har fået gode sejhedsegenskaber. SGA-lime kan hærdes ved iblanding af en pastaformet hærder. En anden mulighed er at påføre limen på den ene overflade, og en hærdelak på den anden; hærdeningen sker da ved sammenlægning af de to flader. Limene er tolerante for lettere forurening af overfladerne.

SGA-lime har en stærk lugt af acrylater. Dampene irriterer øjne og åndedrætsorganer, og ved indånding kan de give hovedpine og åndedrætsbesvær. Hudkontakt giver irritation, og ved gentagne påvirkninger kan der udvikles allergisk kontakteksem.

Hærdelakken kan indeholde organiske opløsningsmidler, som giver luftforurening.

SGA-lime er omfattet af reglerne i “bekendtgørelse om stoffer og materialer med over 0,5% flygtige opløsningsmidler” [17].

Siliconelime

Findes som tokomponente og enkomponent fugthærdende typer, hvor de sidste er mest udbredt. Limene består af de organiske siliciumforbindelser siloxaner og silaner, og en organisk tinforbindelse som katalysator. Ved hærdeningen fraspalter de enkomponente lime eddikesyre, amin, alkohol eller oxim, afhængig af limsystemet. Især ved brug af større mængder lim giver fraspaltningen en luftforurening, som kræver ventilation.

Der findes også produkter med indhold af toluen til at nedsætte viskositeten. Luftforureningen herfra kræver ventilation, og produkterne er omfattet af reglerne i "bekendtgørelse om stoffer og materialer med over 0,5% flygtige opløsningsmidler" [17].

Lim i fast form


Lim i folieform betegnes film, mens betegnelsen tape som regel er forbeholdt et bæremateriale i folieform (backing) med en film på den ene eller begge sider. I forhold til flydende eller pastøse lime er det former, som væsentlig mindsker risikoen ved hudkontakt, og som gør det lettere at arbejde med produkterne på en sikker måde.

Hæftelime har karakter af fast lim, men er permanent klæbrige. De kendes eksempelvis som dobbeltklæbende tape. Mens hæftelime hæfter til overfladen alene ved tryk, kræver andre tapeformer aktivering med varme eller med opløsningsmidler, og dermed efter omstændighederne ventilation.

Enkelte lime kan fås i pulverform. Som sådan er de mindre risikable ved hudkontakt, men støvdannelse kan medføre luftforurening. Til massefabrikation af småemner kan man presse pulveret til varmhærdbare preforms, og på den måde opnå miljøvenlighed ved håndteringen.

De omtalte limtypers egenskaber er sammenfattet i den meget generelle Tabel 7.8.

Tabel 7.8 Arbejdsmiljømæssige egenskaber for udvalgte limtyper og –former, generelt.

Limtype	Stigende risiko 	
Anaerobe lime		x
	x	
Aktivatorer herfor		x
		x x
Epoxylim, lavmolekylær, tyndtflydende		x
		(x)
Epoxylim, højmolekylær, pastøs		x
		x
Epoxylim, højmolekylær, film	x	
	x	
Polyurethanlim, 2 komponent		x
	x	x (x)
Polyurethanlim, 1 komponent fugtighedshærdende	x	x
	x	(x)
SGA-lime		x
		x x
Siliconelime	x	
	x	

Forklaring:

1. linie: Hudkontakt	
2. linie: Luftforurening	

Organiske opløsningsmidler

Organiske opløsningsmidler kan medføre alvorlig risiko for påvirkning af arbejdsmiljøet. Ved hudkontakt virker de affedtende og udtørrende på huden, og de kan give anledning til eksemmer. Huden bliver dermed mere gennemtrængelig for kemiske stoffer, og både de organiske opløsningsmidler selv og eventuelle stoffer i limeprodukter optages således lettere gennem huden.

Normalt sker optagelsen dog især ved indånding af de flygtige dampe. Opløsningsmidlerne optages især i fedtholdigt væv, blandt andet i hjernen. Udskillelsen fra det fedtholdige væv er ofte så langsom, at der sker en ophobning i kroppen fra arbejdsdag til arbejdsdag.

Påvirkningerne viser sig som træthed, hovedpine, svimmelhed, nedsat reaktionsevne og eventuelt beruselse. Større belastninger kan give bevidstløshed og skader på nyrer og lever. De organiske opløsningsmidler er desuden alle i større eller mindre grad irriterende for hud, øjne og luftveje.

Ved længere tids udsættelse for organiske opløsningsmidler er der risiko for udvikling af hjerneskade, der viser sig ved hukommelses- og koncentrationsbesvær, unormal træthed og irritabilitet. Desuden er der mistanke om risiko for skader på nyrer, lever, forplantningsevne og/eller fosterskader.

Valg af opløsningsmiddel er et kompromis mellem tekniske og miljømæssige egenskaber. Der kendes ingen opløsningsmidler, som ikke kan give langtidsvirkninger, men ethanol, højt kokende benzin uden

indhold af benzen og ethylacetat er eksempler på opløsningsmidler, som formentlig indebærer relativt mindre risiko for langtidsvirkninger.

Organiske opløsningsmidler er omfattet af reglerne i “bekendtgørelse om stoffer og materialer med over 0,5% flygtige opløsningsmidler” [17].

Flere chlorerede opløsningsmidler, eksempelvis dichlormethan og trichlorethen, anses for at være kræftfremkaldende og er som sådan desuden omfattet af reglerne i “bekendtgørelse om forebyggelse af kræftisiko” [19].

7.6 EKSTERNT MILJØ VED SAMMENFØJNING AF ALUMINIUM

Beskyttelsen af det eksterne miljø sker overordnet gennem “miljøbeskyttelsesloven” [20], som har karakter af en rammelov, under hvilken der gives anordninger eller love med krav til blandt andet etablering og drift af virksomheder, fastsættelse af normer for emissioner, og håndtering og deponering af affald. Anden lovgivning, der har miljøbeskyttelse som formål, men som vedrører et specielt område, for eksempel lov om kemiske stoffer og produkter, går forud for miljøbeskyttelsesloven på grund af dennes generelle karakter.

De omtalte love og anordninger regulerer anvendelsen af stoffer og produkter i almindelighed, både til erhvervsformål og til privat anvendelse.

Når kemiske stoffer og produkter skal anvendes erhvervs-mæssigt, er brugen, udover den generelle regulering, tillige omfattet af “arbejds miljøloven”. Det skyldes, at miljøbeskyttelseslovens beskyttelsesobjekt er miljøet udenfor virksomheden, hvorfor de ansatte i virksomheden må beskyttes gennem anden lovgivning.

De væsentligste påvirkninger af det eksterne miljø ved sammenføjning af aluminium er knyttet til luftforurening, affald og spildevand.

Afhængigt af virksomhedsstørrelse og produktionsmængde og af, om aktiviteten er optaget på listen over særligt forurenende virksomheder [21], eller på listen over anmeldelsespligtige virksomheder [22], skal virksomheden godkendes eller anmeldes til myndighederne. Anmeldelser og ansøgninger om godkendelse skal sendes til kommunalbestyrelsen.

7.7 LUFTFORURENING

Regler om luftforurening findes i "Vejledning nr. 6 af 1990 Begrænsning af luftforurening fra virksomheder", "Luftvejledningen" [23].

Denne vejledning bygger på det hovedprincip, at der skal ske forureningsbekæmpelse ved kilden i det omfang, det er teknisk gennemførligt og økonomisk muligt for den enkelte virksomhed. Det kan ske enten i form af renere teknologi eller gennem rensning. Selve vejledningen omfatter ikke svejserøg, og der er derfor udfærdiget et supplement til vejledningen: Vejledning nr. 13, 1997: "Begrænsning af luftforurening fra virksomheder, der udsender svejserøg".[24]. Denne vejledning omfatter dog kun svejsning i ulegeret og rustfrit stål for en række nærmere angivne svejsemetoder. For andre metaller, f.eks. aluminium, anvendes "luftvejledningen".

Vejledningens angivelser er ikke bindende, men tjener som retningslinier. Myndighederne bør dog altid tage udgangspunkt i vejledningen, når der skal stilles krav til virksomheders udledning af stoffer til luften, men kan, når særlige forhold af teknisk eller økonomisk art kan begrunde det, fravige vejledningen.

Arbejdstilsynets grænseværdier for farlige stoffer sætter øvre grænser for stofkoncentrationer i arbejdsmiljøet, normalt for en 8 timers periode. B-værdierne i luftvejledningen er fastlagt under hensyn til, at også særlig følsomme befolkningsgrupper skal kunne leve med dem som konstant belastning over 24 timer i døgnet, og er i øvrigt defineret på en anden måde. B-værdierne er derfor lavere end Arbejdstilsynets grænseværdier.

7.7.1 BEGREBER, DEFINITIONER OG FORKLARINGER

I vejledningen anvendes tre forskellige typer grænseværdier. Der er to grænseværdier, der refererer til stoffer eller stofklasser, og de benyttes til at afgøre, i hvilket der skal gennemføres rensningsforanstaltninger. Det drejer sig om:

Emissionsgrænser, som er en grænse for koncentrationen af forurening i den luft, som virksomheden udsender gennem et afkast. Vejledningens emissionsgrænser, der gælder for hvert afkast indenfor virksomhedens område, er månedsmiddelværdier. Den enkelte virksomhed bør ikke kunne overholde emissionsgrænserne ved "fortynding", d.v.s. ved brug af uforholdsmæssig stor luftmængde, f.eks. fortynding med rumluft.

Massestrømsgrænser, som er en grænse for, om der skal iværksættes rensningsforanstaltninger, således at emissionsgrænsen overholdes. Massestrømmen midles over et skift (7 timer)

Den sidste grænseværdi knytter sig til hvert stof.

B-værdien vedrører koncentrationen i omgivelserne, og benyttes ved fastlæggelse af skorstenshøjder. Den enkelte virksomheds maksimalt tilladelige bidrag til tilstedeværelsen af forurenende stoffer i luften som imission betegnes B-værdi. B-værdien anvendes ved den beregning, der skal foreligge for ethvert afkast, som udsender forurenende stoffer til luften. I disse beregninger forudsættes B-værdien at være en middelværdi over en time, der ikke må overskrides mere end 1% af tiden, det vil sige højst 7 timer

af en måneds samlede timer. De anførte B-værdier for støv gælder kun partikler < 10 µm. For alle B-værdier gælder, at ny viden om stoffernes toksikologiske virkning kan føre til ændrede B-værdier.

Svejserøg fra svejsning i aluminium

Aluminium hører til hovedgruppe 2, klasse 6 "støv i øvrigt".

Typisk emission fra f.eks. MIG-svejsning af aluminium i 4000 eller 5000 legering er 5 mg/sek., hvilket svarer til en massestrøm på 0,018 kg/h ved 100 % intermittens. Typisk benyttes en intermittens på 35%, hvilket svarer til en massestrøm på 0,0063 kg/h. Der skal derfor være op mod 80 svejsepistoler før massestrømsgrænsen overskrides.

Der skal ved en enkelt svejsepistol således udsuges minimum 21 norm.m³/h for at overholde emissionsgrænsen. En normal lavtryksudsugning til et svejsested har en kapacitet på 1000 m³/h. Der er derfor normalt kun påkrævet filter ved et meget stort antal svejsesteder.

7.8 AFFALD OG SPILDEVAND

Reglerne for behandling af affald i forhold til det eksterne miljø findes i "bekendtgørelse om affald" [25]. Reglerne for spildevand udledt til kloak er lokalt bestemte, idet de forskellige kommuner har regler, som afhænger af det lokale rensningsanlægs kapacitet. For spildevand udledt direkte til recipient er det amterne, som fastsætter kravene.

7.9 REFERENCELISTE

Litteratur

- [1] At-anvisning nr. 3.1.0.2, december 1996:
Grænseværdier for stoffer og materialer

- [2] ACGIH 1995-1996. Threshold Limit Values (TLV's) Biological Exposure Indices.

- [3] DS/EN 169
Øjenværn
Filtre til svejsning og beslægtede processer
Transmissionsegenskaber og anbefalet anvendelse.

- [4] EN 60825. Safety of laser products

- [5] Arbejdstilsynets bekendtgørelse nr. 801 af 01.10.1993
Bekendtgørelse om støjgrænser på arbejdspladsen

- [6] At-meddelelse nr. 4.06.1, september 1995:
Støj på arbejdspladsen

- [7] At-meddelelse nr. 2.09.2, november 1999:
Svejsning, skæring m.v. i metal

- [8] At-meddelelse nr. 1.01.8, september 1999:
Ventilation på faste arbejdssteder

- [9] At-meddelelse nr. 4.09.1, oktober 1999:
Åndedrætsværn

- [10] At-vejledning D5.1, juli 2000:
Trykluft til åndedrætsværn.

- [11] BSR 1 vejledning nr. 4.09.101, marts 1994:
Vejledning om åndedrætsværn
- [12] EN 207. Personel eye-protection – Filters and eye protection against laser radiation
- [13] Strækstrømreglementet
- [14] Stærkstrømbekendtgørelsen
- [15] Arbejdstilsynets bekendtgørelse nr. 302 af 13. maj 1993
Bekendtgørelse om arbejde med kodenummererede produkter
- [16] Justitsministeriets bekendtgørelse nr. 161 af 26. april 1985
Bekendtgørelse om brandfarlige væsker, med ændringer 29-04-1987.
- [17] Arbejdstilsynets bekendtgørelse nr. 52 af 13. januar 1998
Bekendtgørelse om materialer med indhold af flygtige organiske stoffer herunder organiske opløsningsmidler.
- [18] Arbejdsministeriets bekendtgørelse nr. 199 af 26. marts 1985
Bekendtgørelse om epoxyharpikser og isocyanater m.v., samt
Arbejdstilsynets bekendtgørelse nr. 779 af 15. oktober 1999
Bekendtgørelse om ændring af bekendtgørelse om epoxyharpikser og isocyanater
m.v.
- [19] Arbejdstilsynets bekendtgørelse nr. 140 af 17. februar 1997
Bekendtgørelse om foranstaltninger til forebyggelse af kræftisikoen ved arbejde med stoffer og materialer, med ændringer 16-12-1997, 15-12-1999 og 15-06-2000.

- [20] Lovbekendtgørelse nr. 698 af 22. september 1998
Bekendtgørelse af lov om miljøbeskyttelse, med ændringer 16-12-1998, 02-06-1999 og 31-05-2000.
- [21] Lovbekendtgørelse nr. 21 af 16. januar 1996
Bekendtgørelse af lov om kemiske stoffer og produkter.
- [22] Bekendtgørelse nr. 367 af 10. maj 1992
Anmeldeordning for anden virksomhed end listevirksomhed, med ændring 04-06-1993.
- [23] Begrænsning af luftforurening fra virksomheder
Vejledning nr. 6, 1990 Miljøstyrelsen
- [24] Begrænsning af luftforurening fra virksomheder, der udsender svejserøg
Vejledning nr. 13, 1997 Miljøstyrelsen
- [25] Miljøministeriets bekendtgørelse nr. 619 af 27. juni 2000
Bekendtgørelse om affald.

7.10 OVERSIGT OVER ANDRE RELEVANTE AT-BEKENDTGØRELSER, MEDDELELSER, VEJLEDNINGER M.V.

Bekendtgørelser

Arbejdstilsynets bekendtgørelse nr. 746 af 28.08. 1992

Bekendtgørelse om brug af personlige værnemidler

Arbejdsministeriets bekendtgørelse nr. 1163 af 12.12. 1992

Bekendtgørelse om faste arbejdssteders indretning

Arbejdsministeriets bekendtgørelse nr. 290 af 05.05.1993

Bekendtgørelse om skiftende arbejdssteders indretning

Arbejdstilsynets bekendtgørelse nr. 186 af 14.03.1994

Bekendtgørelse om ændring af bekendtgørelse om brug af personlige værnemidler.

Arbejdstilsynets bekendtgørelse nr. 518 af 17.06.1994

Bekendtgørelse om sikkerhedsskiltning og anden form for signalgivning

Arbejdstilsynets bekendtgørelse nr. 1273 af 11.12.1996

Bekendtgørelse om sikkerhedskrav m.v. til personlige værnemidler

Arbejdstilsynets bekendtgørelse nr. 140 af 17.02.1997

Bekendtgørelse om foranstaltninger til forebyggelse af kræfttrisiko ved arbejde med stoffer og materialer (kræftbekendtgørelsen)

Bekendtgørelse nr. 733 af 31. juli 2000

Bekendtgørelse af listen over farlige stoffer.

Bekendtgørelse nr. 734 af 31. juli 2000

Bekendtgørelse om klassificering, emballering, mærkning, salg og opbevaring af kemiske stoffer og produkter.

Bekendtgørelse nr. 516 af 14. juni 1996

Bekendtgørelse om unges arbejde.

At-anvisninger

At-anvisning nr. 6.1.0.4, april 1999:

Virksomhedernes sikkerheds- og sundhedsarbejde

At-meddelelser

At-meddelelse nr. 4.09.1, oktober 1999

Åndedrætsværn

At-meddelelse nr.4.09.3, oktober 1985:

Vejledning om øjenværn

At-meddelelse nr. 1.00.1, juni 1994:

Regler for arbejdsstedets indretning

At-meddelelse nr. 1.01.1, juni 1996:

Faste arbejdssteders indretning

At-meddelelse nr. 2.09.1, november 1999 :

Udstyr til svejsning, skæring m.v. i metal

At-meddelelse nr. 2.09.3, november 1999:

Maskinel plasmaskæring

At-meddelelse nr. 2.09.4, november 1999:

Manuel plasmaskæring

At-meddelelse nr. 3.02.6, oktober 1995:

Kræftrisikable stoffer og materialer

At-meddelelse nr. 4.04.19, oktober 1995:

Førstehjælp

At-meddelelse nr.4.09.3, oktober 1985:

Vejledning om øjenværn

At-meddelelse nr. 4.09.5, oktober 1985:

Vejledning om høreværn

At-meddelelse nr. 4.09.6, april 1998:

Vejledning om vænefodtøj

At-meddelelse nr. 4.30.1, april 1993:

Arbejdshygiejniske målinger

At-meddelelse nr. 6.01.2, juni 1994:

Pligter og ansvar efter arbejdsmiljøloven

At-meddelelse nr. 6.02.1, december 1996:

Anmeldelse af arbejdsulykker og forgiftningstilfælde

At-meddelelse nr. 6.02.2, december 1996:

Anmeldelse af arbejdsbetingede lidelser

At-vejledning D.2.1, marts 2000

Sandblæsning

At-cirkulæreskrivelser

At-cirkulæreskrivelse nr. 10/1995:

Arbejdsbetingede lidelser

BSR-vejledninger

BSR 1 vejledning nr. 2.09.201, januar 1995:

Vejledning om TIG-MIG- og MAG-svejsning

BSR 1 vejledning nr. 2.10.101, februar 1996:

Vejledning om arbejde med vinkelslibere

BSR 1 vejledning nr. 4.09.301, december 1991:

Vejledning om briller, kontaktlinser og øjenværn

Andet

AMI-rapport nr. 31/1990

Lys, Ultraviolet og infrarød stråling

ANSI Z.136.1, American National Standard for Safe Use of Lasers

ASTM STP 989, 1988.

Bekendtgørelse nr. 1042 af 17. december 1997

Bekendtgørelse om begrænsning af salg og anvendelse af visse farlige kemiske stoffer og produkter til specielt angivne formål.

Bekendtgørelse nr. 794 af 9. december 1991

Godkendelse af listevirksomhed

Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft. TA-Luft 1986

3., überarbeitete und erweiterte auflage

Die Deutsche Bibliothek- CIP-Einheitsaufnahme

8 Opslagsdel

8.1 NOMENKLATUR

Materialkonstanter	Aluminium	Stå	Enhed
Elasticitetsmodul	$E_{\text{alu}} = 7,0 * 10^4$	$E_{\text{st}} = 2,1 * 10^5$	N/mm ²
Forskydningsmodul	$G_{\text{alu}} = 2,7 * 10^4$	$G_{\text{st}} = 7,0 * 10^4$	N/mm ²
Poisson's forhold	$\nu_{\text{alu}} (\text{ny}) = 0,3$	$\nu_{\text{st}} = 0,3$	
Trækstyrke (brudstyrke)	$R_{\text{m-alu}}$	$R_{\text{m-st}}$	N/mm ²
Brudforlængelse	A_5	A_5	%
Flydespænding (0,2-spændingen)	$R_{\text{p0,2}}$	R_y	N/mm ²
Flydespænding i HAZ	$R_{\text{p0,2haz}}$		N/mm ²
Tøjning	e	e	-
Massefylde	$\rho_{\text{alu}} (\text{rho}) = 2,7$	$\rho_{\text{st}} = 7,85$	kg/dm ³
Lineær termisk længdeudvidelseskoefficient	$\alpha_{\text{alu}} (\text{alpha})$ $23 * 10^{-6}$	α_{st}	K ⁻¹
Varmeledningsevne	$\lambda_{\text{alu}} (\text{lambda})$	λ_{st}	W/m K
Varmetransmissionstal	k_{alu}	k_{st}	W/m ² K
Specifik varmekapacitet	c_{alu}	c_{st}	J/kg K
Brinelhårdhed	HBS		

Note: N/mm² = MPa

Ydre belastninger – kræfter og momenter		Enhed
Aksialkraft	N	N eller kN
Enkeltkraft / punktbelastning	F	N eller kN
Jævnt fordelt liniebelastning	q	N/m
Jævnt fordelt arealbelastning / tryk	p	N/m ²
Bøjningsmoment	M	Nm eller kNm
Torsionsmoment	M_T	Nm eller kNm

”Højrehånds koordinatsystem” i elementer	
Akse på langs af elementet	x-akse
Akse på tværs af elementet parallel med grundfladen	y-akse
Akse på tværs af elementet vinkelret på grundfladen	z-akse

Tværsnitskonstanter og geometriske mål		Enhed
Tværsnitsareal / areal (fladt areal)	A	m ² eller mm ²
Inertimoment om y-aksen	I _y	m ⁴ eller cm ⁴
Inertimoment om z-aksen	I _z	m ⁴ eller cm ⁴
Modstandsmoment om y-aksen	W _y	m ³ eller cm ³
Modstandsmoment om z-aksen	W _z	m ³ eller cm ³
Gyrationsradius	i	m eller mm
Tyngdepunktsafstand fra grundfladen	e	m eller mm
Længde	l	m
Knæklængde	l _s	m
Bredde	b	mm
Højde	h	mm
Radius	r	mm
Diameter	d	mm
Tykkelse (benævnes også d)	t	mm
Volumen	V	m ³
Overflade (krum overflade)	O	m ²
Slankhedsforhold = $\sqrt{(R_{p0,z}/\sigma_{el})} = l_s/i$	λ_r (lambda)	
A-mål for kantsømme	a	mm

Spændinger og koncentrationsfaktorer		Enhed
Normalspænding	σ (sigma)	N/mm ²
Forskydningsspænding	τ (tau)	N/mm ²
Tilladelig normalspænding	σ_{till}	N/mm ²
Tilladelig forskydningsspænding	τ_{till}	N/mm ²
Beregningsmæssig kritisk bulespænding	σ_{cr}	N/mm ²
Eulerspænding	σ_{el}	N/mm ²
Totale spændingskoncentrationsfaktor	$K (= K_g * K_w)$	
Geometrisk spændingskoncentrationsfaktor	K_g	
Spændingskoncentrationsfaktor for svejsning etc.	K_w	

Deformationer		Enhed
Udbøjning	U	m eller mm
Deformation (nedbøjning)	δ (delta)	m eller mm

Symboler i forbindelse med partialkoefficientsmetoden		Enhed
Permanent belastning (f.eks. egenvægt)	G	
Variabel belastning	Q	
Ulykkeslast	Q_A	
Last partialkoefficienter	γ (gamma)	
Reduktions faktorer	ψ (psi)	

Symboler i forbindelse med udmattelse		Enhed
Spændingsvariation ($\Delta\sigma$)	S	N/mm ²
Cyklus antal	N	
Frekvens	f	Hz
Levetid	T	

Andet		Enhed
Vinkel	α (alpha) β (betha)	° (360)
Vinkelhastighed	ω (omega)	rad/s
Omdrejningshastighed	n_m n_s	omdr./min omdr./s
Temperatur (grader celsius)	t	°C
Temperatur (kelvin)	T	K
Temperatur differens	Δt	°C
Friktionskoefficient	μ (my)	
Masse	m	kg
Tyngdeacceleration	g	m/s ²

Generelt benyttes SI-systemet.

8.2 LEGERINGER

For legeringstabeller henvises til nedenstående håndbøger fra Dansk Standard;

DS Håndbog 123.1:2001

Aluminium - Del 1: Betegnelser, symboler samt tekniske leveringsbetingelser for plader og bånd.

DS håndbog 123.2:2001

Aluminium – Del 2: Tekniske leveringsbetingelser for smedegods, stænger, rør og profiler.

Håndbøgerne kan købes hos Dansk Standard, www.ds.dk

Der ud over henvises til Aluminium-Schlüssel, Dr.-Ing. John Datta, Aluminium Verlag, ISBN 3-87017-254-1

8.3 STYRKEFORHOLD OG MEKANISKE EGENSKAPER

Fysikalske egenskaper
Physical properties

	1370	1050	6063 6060	6101	6005	6082	7108
Spesifikk motstand 20°C Specific resistance ohm mm ² /m	Max. 0.02825	0.029	0.032	Max. 0.03133	0.035	0.036	0.050
Spesifikk ledningsevne 20°C Specific conductivity m/ohm mm ²	Min. 35.4	Min. 35.0	31	Min. 31.95	29	28	20
Lengdeutvidelseskoeffisient Coefficient of linear expansion 1/°C	23.5·10 ⁻⁶	23.6·10 ⁻⁶	23.4·10 ⁻⁶	23.4·10 ⁻⁶	23.4·10 ⁻⁶	23.4·10 ⁻⁶	23·10 ⁻⁶
Varmeledningsevne Thermal conductivity W/m°C	220	215	200	210	170	170	140
Elastisitetsmodul Modulus of elasticity N/mm ²	84000	66600	69000	69000	68800	70000	70500
Spesifikk vekt Specific weight g/cm ³	2.70	2.70	2.71	2.71	2.71	2.71	2.77
Smelteområde (-punkt) Bulk melting range (point) °C	600-640	658	555-660	550-660	550-660	550-660	590-640
Spesifikk varmekapasitet (20-100°C) Specific heat J/kg°C	921	900	898	898	896	896	900

Tabellen angir omtrentlige verdier når det ikke er spesifisert max. eller min. verdi.

The table specifies the approximate values where max. or min. values have not been specified.

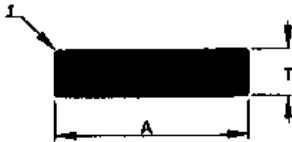
Kilde: Standardprofiler, Hydro Aluminium Profiler, Juni 1994.

8.4 PROFIL TABELLER

På de følgende sider er et ikke fylldigt uddrag af profiltabeller fra Hydro Aluminium gengivet. For oplysninger om et specifikt profil bør en leverandør kontaktes.

FLAT SKINNE
FLAT BARS

XFL

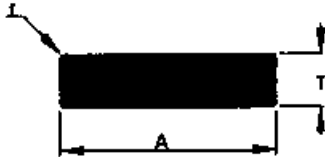


XFL	Millimeter			Kg/m	Anm.	XFL	Millimeter			Kg/m	Anm.
Raufoss	Karmøy	A	T	r		Raufoss	Karmøy	A	T	r	
7000	B	4		0.086		7037		22	15		0.890
5103		10	2	0.054		7039		24	20		1.296
5104		10	3	0.081		7040		25	2		0.130
5122		10	5	0.135		7011		25	3		0.203
7006		11	B	0.240		7042		25	4		0.270
7007		12	3	0.097		7044		25	5		0.338
5102		12	6	0.195		7009		25	6		0.405
5105		12	8	0.259		7046		25	8		0.540
7014		15	2	0.081		7047		25	9		0.608
7016		15	3	0.120		7048		25	10		0.670
5000		15	5	0.203		7049		25	11		0.743
7018		15	10	0.405		7050		25	12		0.808
5123		17.5	3	0.142		7051	0276	25	15		1.013
7024		17.5	6	0.280		0256		25.4	12.7		0.871
7025		18	4	0.194		0265		25.4	15.87		1.088
5124		19	3	0.154		0257		25.4	19.05		1.307
5002		18.1	6.3	0.325		7052		27	5		0.364
7015		20	2	0.110		7053		27	6.5		0.475
7005		20	3	0.162		5115		30	2		0.162
7008		20	4	0.216		7056		30	3		0.240
7030		20	5	0.270		7057		30	4		0.324
7031		20	6	0.324		7058		30	5		0.405
7032		20	8	0.432		7059		30	6		0.486
7033		20	10	1.0	0.540	7060		30	8		0.650
7034		20	11	0.594		7061		30	10		0.810
7035		20	12	0.650		0321		30	12	0.4	0.972
	0214	20	15	0.5	0.809	7063	0311	30	15		1.215
7036		20	16	0.860		7064		30	16		1.296

Juni -94

Profilene lagerføres ikke av oss.

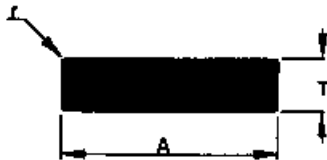
7



XFL	Millimeter			Kg/m	Anm.	XFL	Millimeter			Kg/m	Anm.
	Raufoss	Karmøy	r				Raufoss	Karmøy	A		
7065	0317	30	20	1.620		5001	40	8		0.648	
	0313	31.75	9.35	0.816		7078	0407	40	8	0.864	
	0305	31.75	12.70	1.089			0415	40	10	2.0	1.070
	0307	31.75	15.87	1.355		7079	0402	40	10		1.080
	0306	31.75	19.05	1.633		7080		40	10.5		1.130
	0310	31.75	25.4	2.164			0421	40	11	1.0	1.186
7066		32	9.7	0.838			0423	40	12	0.5	1.230
	0322	32	12	1.034		7081	0408	40	15		1.620
	0319	32	24	2.070		7082	0409	40	20		2.160
7004		35	3	0.288		7083	0411	40	25		2.700
5113		35	5	0.473			0419	40	30	1.0	3.238
7068		35	6	0.576		7086		43	5		0.580
5120		35	7	0.662		7087		43	6		0.696
	0360	35	10	0.945			0453	44.45	25.4	1.6	3.042
7069		35	12	1.130			0416	44.45	31.75		3.810
	0374	35	25	2.360		7089		45	5		0.610
7237		36	6	0.583		7090	0456	45	11		1.337
	0370	36	26	5.0	2.470	7091		48	5		0.648
	0357	38.10	9.52	0.979		7092		50	2.5		0.336
	0364	38.10	15.87	1.6	1.627	7001		50	3		0.400
7546	0355	38.10	19.05	1.960		7094		50	4		0.540
	0363	38.10	25.4	2.600		7095		50	5		0.675
	0368	38.10	31.75	2.4	3.253	7096	0503	50	6		0.810
5107		39	10.5	1.104		7097		50	7		0.940
7017		40	2	0.220		7098	0510	50	8		1.080
7074		40	3	0.320		7099	0511	50	10		1.350
7075		40	4	0.432			0528	50	12	0.8	1.619
7076		40	5	0.540		7100		50	12		1.620

**FLAT SKINNE
FLAT BARS**

XFL



XFL	Millimeter			Kg/m	Anm.	XFL	Millimeter			Kg/m	Anm.
	Raufoss	Karmøy					Raufoss	Karmøy			
	0533	50	14.5	3.5	1.936	7118		60	12		1.940
7102	0513	50	15		2.025	7119	0607	60	15		2.430
7103		50	16		2.160	7120		60	16		2.592
7104	0504	50	20		2.700	7121		60	18		2.916
5108		50	24		3.240	7122	0606	60	20		3.250
	0519	50	25	1.0	3.372		0621	60	25	0.8	4.048
7002		50	25		3.375	7123		60	25		4.050
7106	0531	50	30		4.050	7124		60	30	1.0	4.860
7107	0530	50	40		5.400		0629	60	35	1.0	5.668
7508		50.8	3.18		0.436	7125	0625	60	40		6.480
	0501	50.8	6.35		0.870		0626	60	50	1.0	8.097
	0525	50.8	12.70		1.742		0627	63	31.5	1.0	5.356
	0520	50.8	15.87		2.176		0616	63.5	9.52	0.8	1.626
	0521	50.8	19.05		2.613		0608	63.5	12.7		2.177
	0502	50.8	25.4		3.480		0628	63.5	15.88		2.723
	0526	50.8	31.75		4.355		0619	63.5	25.40		4.350
	0517	50.8	38.10	1.6	5.212		0615	63.5	38.10	1.6	6.526
7109		55	5		0.740		0617	63.5	50.8	3.2	8.690
7110	0551	55	14		2.080	7129		65	3		0.525
7111		55	15		2.230	5109		65	5		0.877
	0552	57.15	19.05		2.940	1130		65	6		1.053
	0554	57.15	38.10		5.880	7132		65	8		1.400
	0550	57.15	50.80		7.840	7133	0656	65	10		1.750
7114	0600	60	5		0.810	7134	0650	65	12		2.100
7115	0605	60	6		0.972	7135		65	15		2.630
5114		60	7.5		1.215		0659	65	40	1.0	7.018
7116	0630	60	8	0.8	1.294		0651	69.85	38.10		7.052
7117	0602	60	10		1.620		0652	69.85	50.8		9.580

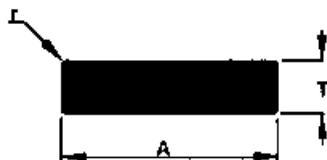
linje 04

Profilene leveres ikke av oss

0



XFL	Millimeter	Kg/m		Anm.	XFL	Millimeter	Kg/m		Anm.		
Raufoss Karmøy	A	T	r		Raufoss Karmøy	A	T	r			
7136	70	6		1.135	0784	76.20	9	0.5	1.850		
5110	70	6.5		1.299	0755	76.20	9.52	0.8	1.953		
7137	70	7		1.325	0753	76.20	12.70		2.613		
7139	0702	70	10	1.890	0758	76.20	15.87	1.6	3.259		
	0700	70	15	1.0	2.833	0760	76.20	19.05	3.919		
	0703	70	20	1.0	3.778	0757	76.20	25.4	5.220		
	0705	70	25	0.8	4.723	0782	76.20	31.75	6.532		
	0707	70	30	0.6	5.669	0762	76.20	38.10	7.832		
7141	70	35		6.615	0763	76.20	50.8	1.5	10.446		
	0704	70	40	1.6	7.550	0781	76.20	50.8	0.4	10.451	
	0708	70	56	1.5	10.579	0766	76.20	63.5		13.064	
7142	73	8		1.570	0812	80	4	0.8	0.863		
	0779	75	4	0.6	0.810	7151	80	5		1.080	
7143	0759	75	5	0.7	1.012	0816	80	6	0.4	1.296	
7144	75	6		1.215	7152	80	7		1.512		
5111	75	7		1.410	0803	80	8	0.8	1.728		
1145	0754	75	8		1.620	7153	80	8		1.730	
7146	0756	75	10		2.030	7154	80	9		1.944	
	0767	75	12	1.0	2.427	7003	0801	80	10	0.8	2.160
7147	75	12		2.430	7156	80	12		2.592		
	0772	75	13.2		2.672	7157	0800	80	15		3.240
7148	0765	75	15	1.0	3.035	7158	0809	80	20		4.320
	0775	75	19.20		3.887	0813	80	25	0.5	5.400	
	0776	75	20.20		4.069	0805	80	30	1.0	6.477	
	0778	75	33.20		6.722	0815	80	35.5	1.0	7.565	
	0750	76.20	4.76	0.8	0.989	0802	80	40		8.635	
7524	0751	76.20	6.35		1.306	0811	80	50	Max 0.4	10.800	
	0761	76.20	7.93	0.8	1.634	0810	80	50	1.0	10.800	



XFL	Millimeter			Kg/m	Anm.	XFL	Millimeter			Kg/m	Anm.
Raufoss	Karmøy	A	T	r		Raufoss	Karmøy	A	T	r	
0806	80	60	1.0	12.960		7181	1008	100	15		4.048
0808	82.55	38.10	0.4	8.492		1034	100	15	0.4		4.050
0807	83	38	1.5	8.511		7008	100	15	5.0		4.050
0850	85	30	1.2	6.880		7182	1005	100	20		5.394
7162	85	30		6.900		7183	1026	100	25		6.750
7163	85	35		7.520		7184	1023	100	30	0.8	8.100
0857	88.9	51.75		7.621		7185	1011	100	40	1.6	10.795
0854	88.9	38.10		9.140		1028	100	50	0.8		13.500
0855	88.9	50.8		12.190		1038	100	54	1.0		14.580
7164	90	5		1.210		1029	101.2	44.45	1.0		12.100
7165	90	7		1.700		1006	101.6	6.35	0.4		1.741
5112	D904	90	8		1.940	1010	101.6	7.93	0.8		2.176
7012		90	10		2.340	1007	101.6	9.52	0.8		2.606
7166		90	12		2.920	1024	101.6	9.52			2.614
0908	90	35	0.5	8.510		1014	101.6	12.7	0.8		3.478
0902	90	50	3.0	12.130		1025	101.6	12.7			3.484
0907	91	31	1.5	7.611		1018	101.6	15.87	1.8		4.347
7168		92	13		3.230	1013	101.6	19.05			5.220
0954	95	5	0.5	1.281		1000	101.6	25.4			6.970
0910	95.25	44.25	0.4	11.431		1019	101.6	31.75	2.4		8.697
7171	98	8		2.110		1040	101.6	31.75			8.710
7173	100	3		0.810		1012	101.6	38.10	1.6		10.450
7175	100	5		1.350		1039	101.6	38.10			10.451
7176	1027	100	6		1.620	1037	101.6	50.8			13.935
7235	100	7		1.890		5117	105	3			0.851
7177	1002	100	8		2.160	7187	110	5			1.480
7013	1003	100	10		2.700	1107	114.3	9.52			2.938
7180	1004	100	12		3.240	1151	115	15	0.8		4.656

Juni -94

Profilene lagerføres ikke av oss.

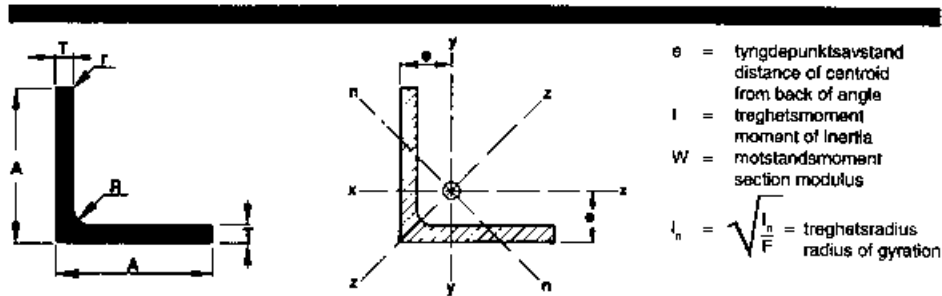
11



XFL	Millimeter			Kg/m	Anm.	XFL	Millimeter			Kg/m	Anm.
Raufoss	Karmøy	A	T	r		Raufoss	Karmøy	A	T	r	
	1208	120	5	0.5	1.619	7205		150	7		2.835
	1211	120	8	0.8	2.590	7206		150	8		3.240
7188	1200	120	10		3.240	7010	1501	150	10	0.8	4.050
7229		120	12		3.888		1515	150	12	0.5	4.859
7189	1207	120	15	0.5	4.858	7209	1508	150	15	1.0	6.069
	1202	120	16	0.8	5.183	1210	1510	150	20		8.100
7190	1204	120	20	0.5	6.480		1514	150	30	0.5	12.149
	1210	120	30		9.720		1513	150	40	1.0	16.200
7194		125	5		1.688		1503	152.4	6.35	0.8	2.611
7195		125	8		2.700		1504	152.4	9.52	0.8	3.911
7196	1256	125	10	1.0	3.352		1500	152.4	12.7	0.8	5.224
	1255	125	12	1.0	4.044		1509	152.4	12.7		5.225
	1265	125	15		6.060		1506	152.4	15.87		6.523
7230	1251	125	20	1.6	6.744		1505	152.4	19.05	1.6	7.830
	1257	125	40	2.5	13.485		1507	152.4	25.4		10.452
	1259	127	6.35		2.180	7213		154	4		1.663
	1260	127	12.7		4.360		1560	159	21	0.8	9.014
	1260	127	19.05		6.530		1551	159	28	1.0	12.018
	1254	127	25.4		8.710		1601	160	10	2.0	4.311
	1261	127	31.75		10.890	7215	1604	160	10	0.8	4.319
7198		130	6		2.106		1605	160	16	1.0	6.909
7199	1301	130	10	0.8	3.510		1600	160	20	1.6	8.635
7200		130	12		4.212		1751	175	5	0.8	2.361
	1302	130	30		10.530	7220	1750	175	10	2.0	4.716
	1351	139.7	12.70		4.790		1753	177.8	12.7		6.100
7203		140	10		3.782		1755	177.8	25.4		12.190
	1400	140	20	1.0	7.560		1801	180	16	1.0	7.774
	1511	150	4	1.0	1.620		1800	180	20	1.0	9.450

LIKEBENT VINKEL
EQUAL ANGLES

XLV



XLV	Millimeter			Kg/m	Anm.	e	I_x	W_x	I_y	W_y	I_n	I_n
Raufoss Karøy	A	T	R			cm	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm
5102	9.5	1.5	0.2	0.07	r=0.2	0.29	0.02	0.03	0.03	0.05	0.009	0.18
2020	12	2	2	0.120		0.370	0.057	0.088	0.091	0.011	0.023	0.226
8187	15	2	0.2	0.151		0.448	0.116	0.148	0.185	0.017	0.047	0.209
6797	15	3	3	0.220		0.431	0.100	0.132	0.159	0.017	0.040	0.238
1509	19.05	1.6	0.8	0.157	r=0.5	0.534	0.204	0.148	3.23	0.024	0.082	0.37
5103	20	1	0.2	0.105	r=0.2	0.54	0.15	0.10	0.25	0.017	0.062	0.40
1514	20	1.5	0.1	0.156		0.556	0.224	0.230	0.356	0.025	0.090	0.395
7511	20	2	0.2	0.200		0.574	0.298	0.286	0.458	0.032	0.116	0.391
1502	20	2	2	0.210		0.570	0.289	0.289	0.460	0.033	0.117	0.389
8426	20	3	0.3	0.300		0.609	0.403	0.377	0.641	0.045	0.163	0.383
2024	20	3	3	0.310		0.606	0.404	0.381	0.643	0.045	0.163	0.380
5101	20	4	2.5	0.391	r=0.5	0.64	0.50	0.36	0.78	0.05	0.22	0.39
5257	25	2	0.2	0.260		0.699	0.579	0.472	0.921	0.052	0.233	0.493
1504	25	2	2	0.263		0.695	0.581	0.476	0.924	0.052	0.234	0.492
5806	25	3	0.3	0.390		0.735	0.820	0.637	1.306	0.074	0.331	0.484
5791	25	3	2.5	0.384	r=0.6	0.73	0.822	0.465	1.309	0.074	0.332	0.48
2025	25	3		0.381		0.74	0.820	0.465	1.306	0.074	0.331	0.48
2422	25	4	4	0.510		0.765	1.038	0.774	1.653	0.093	0.419	0.473
2999	25.4	3.16	0.3	0.408	r=0.3	0.75	0.904	0.50	1.43	0.08	0.37	0.49
9125	30	1.5	1.5	0.238	r=0.2	0.80	0.785	0.35	1.25	0.059	0.31	0.59
8586	30	2	0.2	0.313		0.824	1.020	0.706	1.823	0.077	0.411	0.595
2886	30	2	2	0.320		0.820	1.022	0.711	1.827	0.077	0.412	0.594
1505	30	3	0.3	0.460		0.86	1.458	0.681	2.321	0.109	0.588	0.59
2473	30	3	3	0.470		0.861	1.458	0.666	2.321	0.109	0.588	0.586
2424	30	4	4	0.620		0.890	1.861	1.192	2.963	0.140	0.751	0.574
9808	30	4	0.4	0.605		0.90	1.855	0.882	2.953	0.139	0.748	0.58
5268	30	5	4	0.751		0.93	2.221	1.071	3.534	0.167	0.896	0.57
1512	31.75	3.17	0.3	0.516	r=0.3	0.91	1.83	0.80	2.90	0.13	0.744	1.97

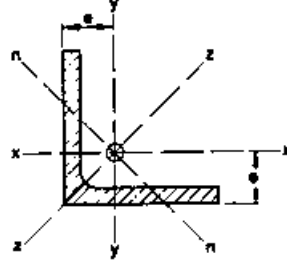
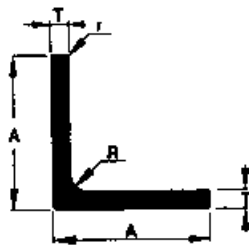
Juni -94

Profilene lagerføres ikke av oss.

15

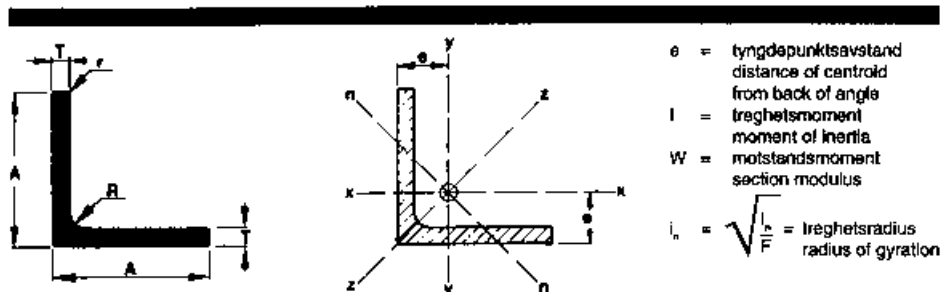
**LIKEBENT VINKEL
EQUAL ANGLES**

XLV



e = tyngdepunktsavstand
distance of centroid
from back of angle
I = treghetsmoment
moment of inertia
W = motstandsmoment
section modulus
 $i_x = \sqrt{\frac{I_x}{F}}$ = treghetsradius
radius of gyration

XLV	Millimeter			Kg/m	Arm.	e	I _x	W _x	I _y	W _y	i _x	i _y	
Rauloss	Karmøy	A	T	R		cm	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm ³	cm	cm	
5037		31.75	4.76	0.5	0.754	r=0.5	0.97	2.55	1.15	4.03	0.18	1.06	0.61
	0302	31.75	6.35		0.880		1.02	3.193	1.484	5.082	0.226	1.288	0.60
9810		35	3		0.543		0.99	2.363	0.940	3.761	0.152	0.953	0.69
9720		35	4		0.713		1.022	3.026	1.689	4.816	0.195	1.220	0.68
5034		38.1	3.2	0.75	0.63	r=0.75	1.07	3.26	1.19	5.16	0.19	1.31	0.75
5002		38.10	4.76		0.918		1.13	4.576	1.705	7.283	0.270	1.845	0.74
	0357	38.10	6.35	5.33	1.220	r=0.4	1.18	5.777	2.195	9.196	0.341	2.330	0.72
5038	0351	38.10	6.35		1.200		1.18	5.717	2.183	9.100	0.339	2.306	0.72
5104		40	2	0.2	0.42	r=0.2	1.07	2.47	0.84	3.95	0.14	0.99	0.79
6227		40	2	2	0.420		1.070	2.482	1.323	3.951	0.140	1.001	0.799
1513		40	3		0.624		1.111	3.582	1.839	5.701	0.202	1.445	0.791
2425		40	3	3	0.630		1.105	3.592	1.854	5.718	0.202	1.449	0.789
8427		40	4		0.820		1.15	4.608	1.615	7.335	0.259	1.858	0.78
	0400	40	4	2.5	0.824	r=0.6	1.14	4.615	1.616	7.345	0.260	1.861	0.78
2426		40	4	4	0.830		1.14	4.623	2.313	7.358	0.260	1.864	0.779
	0406	40	5	4	1.020	r=0.6	1.18	5.574	1.975	8.872	0.314	2.248	0.77
2427		40	5	5	1.030		1.175	5.579	2.708	8.880	0.314	2.250	0.769
	0403	40	5		1.010		1.18	5.561	1.974	8.852	0.313	2.243	0.77
2485		40	8		1.600		1.28	8.060	3.587	12.83	0.454	3.251	0.74
5138		44.5	3.2	0.3	0.74	r=0.3	1.23	5.28	1.64	8.42	0.26	2.13	0.88
2948		45	3	3	0.710		1.23	5.176	2.401	8.239	0.259	2.086	0.89
2970		45	4	4	0.940		1.27	6.687	3.015	10.64	0.334	2.697	0.88
2336		45	5	5	1.171		1.30	8.100	3.553	12.89	0.405	3.267	0.87
9725		50	3		0.786		1.361	7.149	1.965	11.38	0.322	2.883	1.00
	0508	50	4	2.5	1.040	r=0.6	1.40	9.273	2.572	14.76	0.417	3.740	0.99
2428		50	4	4	1.050		1.39	9.289	2.513	14.78	0.418	3.746	0.98
5105	0509	50	5		1.283		1.43	11.25	3.155	17.91	0.506	4.537	0.98
	0503	50	5	4	1.290	r=0.6	1.43	11.28	3.157	17.95	0.508	4.547	0.98

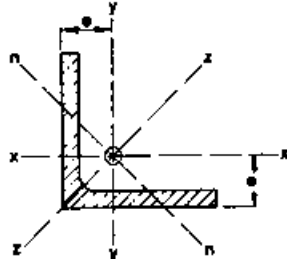
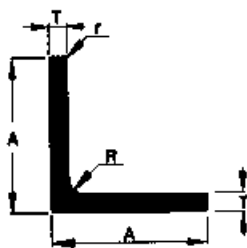


XLV	Millimeter			Kg/m	Anm.	e	I _x	W _x	I _y	W _y	I _n	i _n
Rautloss	Karmøy	A	T	R		cm	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm
2014		50	5	5		1,43	11,29	4,517	17,97	0,508	4,552	0,97
	0513	50	6			1,47	13,13	3,719	20,89	0,591	5,294	0,97
1516		50	6	6		1,46	13,17	5,143	20,96	0,593	5,311	0,97
2550		50	6,5	6,5		1,48	14,07	5,429	22,39	0,633	5,673	0,96
	0506	50	8	6		1,54	16,60	4,789	26,41	0,747	6,693	0,95
2429		50	8	8		1,53	16,61	6,188	26,44	0,748	6,699	0,95
5035		50,8	3,17			0,845	7,895	2,138	12,57	0,350	3,184	1,01
1501	0507	50,8	4,76			1,245	11,33	3,118	18,04	0,502	4,571	1,00
	0501	50,8	6,35			1,633	14,47	4,044	23,03	0,641	5,835	0,98
2549	0505	50,8	6,35	6		1,650	14,51	4,046	23,10	0,643	5,852	0,98
2431		55	6	6		1,710	17,80	6,404	28,33	0,728	7,178	1,07
2064		57	8	8	r=4	1,71	25,29	8,455	40,25	0,999	10,20	1,09
5578		60	5	5		1,570	19,97	6,800	31,79	0,749	8,054	1,18
	0610	60	6			1,847	23,33	5,452	37,13	0,875	9,408	1,17
	0604	60	6	4		1,850	23,37	5,454	37,19	0,877	9,423	1,17
2434		60	6	6		1,875	23,40	7,806	37,25	0,878	9,439	1,17
	0611	60	8			2,419	29,69	7,056	47,25	1,114	11,97	1,16
	0809	63,5	3,17		r=0,6	1,71	15,70	3,381	25,00	0,557	6,333	1,27
	0608	63,5	4,76		r=0,7	1,76	22,74	4,958	36,19	0,806	9,170	1,26
	0603	63,5	6,35			2,121	29,27	6,483	46,58	1,037	11,80	1,24
	0601	63,5	6,35	6,85	r=1,6	1,81	29,38	6,487	46,76	1,041	11,85	1,24
	0602	63,5	7,93	6,85	r=0,8	1,87	35,38	7,895	56,32	1,254	14,27	1,22
	0606	63,5	9,52	6,85		3,048	41,01	9,272	65,27	1,454	16,54	1,21
5269		65	5	5		1,710	25,62	8,12	40,78	0,887	10,33	1,28
	0653	65	6	4	r=0,6	1,84	30,03	8,448	47,80	1,040	12,11	1,27
6000		65	6	6		2,040	30,08	9,350	47,88	1,042	12,13	1,27
2063	0655	65	8	6	r=0,6	1,91	38,36	8,359	61,06	1,328	15,47	1,25
2063		65	8	8	r=0,8	1,90	38,3	8,32	60,7	1,33	15,99	1,27

Juni -94

Profilene lagerføres ikke av oss.

17



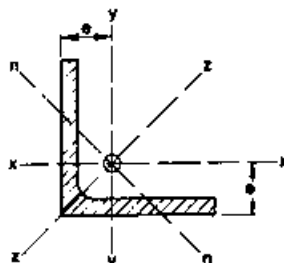
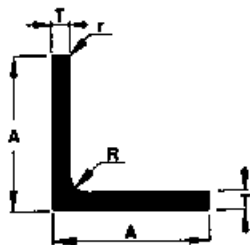
e = tyngdepunktsavstand
distance of centroid
from back of angle

I = treghetsmoment
moment of inertia

W = motstandsmoment
section modulus

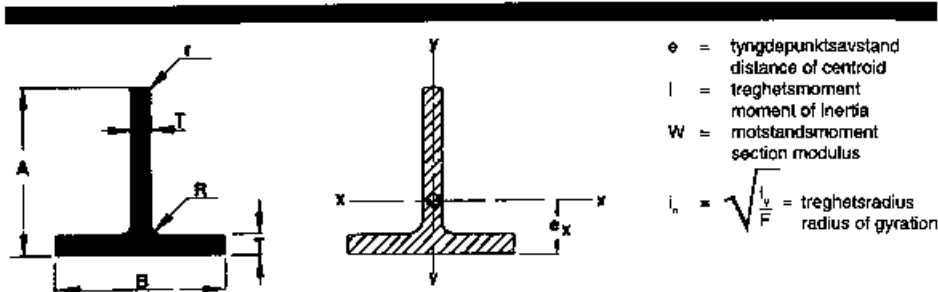
$i_h = \sqrt{\frac{I}{F}}$ = treghetsradius
radius of gyration

XLV	Millimeter			Kg/m	Anm.	e	I _x	W _x	I _y	W _y	I _h	i _h		
Raufoss	Karmøy	A	T	R		cm	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm		
5964		70	5	5		1.93	32.25	9.557	51.34	1.037	13.01	1.38		
5325		70	6	6		2.200	37.93	11.04	60.36	1.22	15.30	1.37		
	0700	70	7		2.514	r=0.8	2.01	43.22	8.657	68.79	1.390	17.43	1.37	
5646		70	7	7		2.550		1.99	43.96	12.40	69.01	1.394	17.49	1.36
2366		75	5	5		1.970		2.05	39.94	11.11	63.57	1.199	16.11	1.49
	0754	75	8		3.067		2.17	60.18	11.29	95.79	1.806	24.27	1.46	
5550		75	8	8		3.110		2.16	60.38	15.98	96.10	1.812	24.35	1.45
6001	0757	75	9	9		3.475		2.19	66.66	12.56	106.1	2.001	26.89	1.45
2959		75	10	10		3.850		2.23	72.70	18.63	115.7	2.182	29.32	1.44
	0751	76.2	6.35		2.504		2.14	51.79	9.45	82.43	1.530	20.89	1.50	
	0750	76.2	6.35	7.62	2.540		2.12	52.01	9.46	82.79	1.536	20.98	1.49	
	0752	76.2	9.52	7.62	3.704	r=0.8	2.24	73.37	13.65	116.8	2.167	29.59	1.47	
	0758	76.2	12.7		4.790		2.37	92.25	17.56	146.8	2.725	37.21	1.45	
9811		80	6		2.462		2.22	57.31	14.71	91.22	1.613	23.11	1.58	
	0801	80	6	6	2.514	r=0.7	2.21	57.48	9.927	91.49	1.617	23.16	1.58	
	0802	80	6.5	0.8	2.692	r=0.8	2.24	61.53	10.68	97.94	1.731	24.82	1.58	
9741		80	8		3.283		2.29	73.73	18.33	117.4	2.075	29.74	1.57	
	0800	80	8	6	3.302	r=0.8	2.29	73.87	12.93	117.6	2.079	29.79	1.56	
2899		80	8	8	3.330		2.28	73.97	18.50	117.7	2.081	29.83	1.56	
7492		80	9	9	3.730		2.32	81.76	20.14	130.1	2.301	32.97	1.55	
	0851	88.9	6.35	8.38	2.979	r=0.8	2.44	84.06	13.02	133.8	2.128	33.90	1.75	
	0850	88.9	9.52	8.38	4.181	r=0.8	2.56	119.5	18.88	190.2	3.026	48.20	1.73	
5495		90	8	8	3.310		2.53	107.0	24.12	170.3	2.676	43.15	1.76	
2439		100	9	9	4.69	r=0.9	2.81	164.6	22.9	201.5	3.710	67.7	1.97	
5877	1001	100	10	6	5.107	r=0.8	2.86	180.2	25.25	286.9	4.057	72.69	1.95	
	1000	101.6	6.35		3.380		2.78	126.5	17.13	201.4	2.803	51.02	2.02	
	1002	101.6	9.52	9.14	5.025	r=0.8	2.87	181.9	24.96	290.0	4.030	73.35	1.99	
	1003	101.6	12.7	4	6.540	r=0.8	3.003	231.6	32.36	368.6	5.131	93.40	1.96	

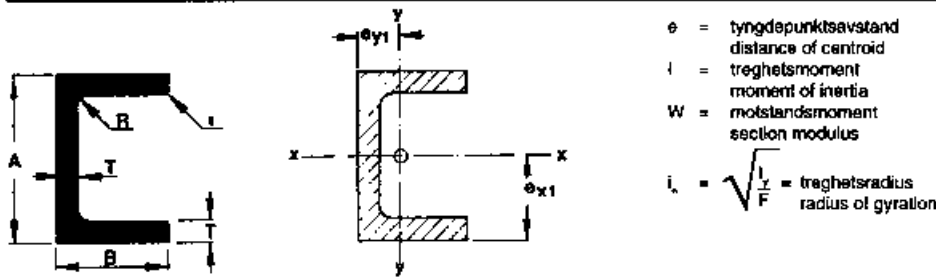


e = tyngdepunktsavstand
distance of centroid
from back of angle
l = treghetsmoment
moment of inertia
W = motstandmoment
section modulus
 $i_n = \sqrt{\frac{I_n}{F}}$ = treghetsradius
radius of gyration

XLV	Millimeter			Kg/m	Ann.	e	I_y	W_x	I_z	W_z	I_n	i_n
Raufoss Karnøy	A	T	R			cm	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm
1201	120	6	4	3.798	r=0.8	3.217	200.8	22.86	319.6	3.766	80.98	2.40
1200	120	10	6	6.229	r=0.8	3.36	318.9	36.92	507.6	5.982	128.6	2.36
1250	125	10	6	6.500	r=0.8	3.49	362.2	40.19	576.5	6.522	146.1	2.46
1251	127	12.7	12.7	8.360	r=1.6	3.62	469.8	51.74	747.8	8.327	189.5	2.47
1500	150	10	6	7.850	r=0.8	4.11	637.9	58.59	1015.0	9.573	257.3	2.98
1504	152.4	12.7	10	10.071	r=1	4.263	830.3	75.64	1322.0	12.26	334.9	3.00
1600	160	13	1.5	10.77	r=1.5	4.48	984.5	85.46	1567.0	13.85	397.1	3.15



XLT	Millimeter				Kg/m	Anm.	e_x	I_x	I_y	W_{x2}	W_y	i_x	
Raufoss	Karmøy	A	B	T	R		cm	cm ⁴	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	
2002		20	20	2	2.0	0.210	0.565	0.29	0.135	0.20	0.13	0.42	
5968		20	20	3	3.0	0.310	0.599	0.407	0.205	0.29	0.20	0.42	
2330		25	25	3	3.0	0.390	0.724	0.828	0.397	0.47	0.32	0.52	
2000		30	30	3	2.50	0.470	0.85	1.465	0.682	0.68	0.45	0.63	
2779		35	35	3	3.0	0.550	0.973	2.381	1.08	0.94	0.62	0.73	
2332		40	40	4	4	0.840	1.13	4.646	2.156	1.62	1.08	0.83	
2001		50	50	3	3	0.800	1.35	7.192	3.137	1.97	1.25	1.03	
5168		50	50	4	4	1.060	1.38	9.328	4.194	2.58	1.68	1.04	
2833		50	50	5	5	1.320	1.41	11.34	5.236	3.16	2.11	1.04	
2780		50	50	6	6	1.579	1.45	13.24	6.345	3.73	2.54	1.05	
0502		50.8	50.8	6.35		1.633	1.50	14.47	7.032	4.04	2.77	1.08	
0602		60	60	6	2.5	1.852	r=0.7	1.72	23.31	10.92	5.44	3.64	1.26
2557		60	60	6	6	1.852		1.70	23.52	10.91	5.47	3.64	1.25
2308		65	65	8	8	2.720		1.89	38.62	18.60	8.37	5.72	1.36
0800		80	80	8	6	3.323	r=0.8	2.28	73.91	34.53	12.91	8.83	1.68
1000		100	100	10	6	5.169	r=0.8	2.85	180.3	84.22	25.23	16.84	2.10
1200		120	120	6	4	3.807	r=0.8	3.21	200.8	86.71	22.84	14.45	2.48
1500		152.4	152.4	12.7	12	10.18	r=1.0	4.23	832.6	377.8	75.65	49.58	3.17

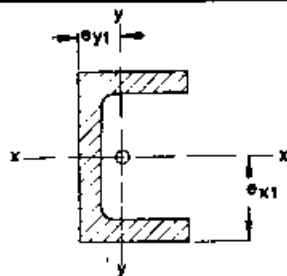
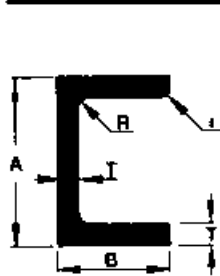


XUP	Millimeter				Kg/m	Anm.	e_w	e_{y1}	I_x	I_y	W_{x2}	W_{y2}	i_x
Raufoss Karmøy	A	B	T	R			cm	cm	cm ⁴	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm
5786	10	10	1		0.080		0.50	0.37	0.045	0.028	0.09	0.05	0.32
5787	12	10	1	0.3	0.08	r=0.3	0.6	0.35	0.07	0.03	0.11	0.04	0.31
2578	14	12	2		0.171	r=1.0	0.70	0.45	0.191	0.094	0.27	0.13	0.37
7620	15	15	2		0.220	r=0.75	0.75	0.58	0.278	0.181	0.37	0.20	0.47
6201	15	28	1.25	1.25	0.232	r=0.12	0.75	1.15	0.35	0.70	0.46	0.42	0.90
8428	20	15	2	0.1	0.248		1.00	0.52	0.556	0.202	0.56	0.21	0.47
8373	20	20	2	0.1	0.302		1.00	0.74	0.719	0.453	0.72	0.36	0.64
2501	23	22	2	0.2	0.339	r=0.2	1.15	0.80	1.08	0.62	0.939	0.44	0.70
5355	25	15	2		0.280		1.25	0.48	0.95	0.218	0.76	0.21	0.46
5172	25	25	2	2.0	0.387	r=0.5	1.25	0.90	1.498	0.921	1.20	0.58	0.80
7678	25	40	2.5	0.5	0.675		1.25	1.62	2.709	4.078	2.17	1.72	1.28
6464	27.3	30	2.5	0.25	0.555	r=0.25	1.36	1.12	2.54	1.89	1.86	1.00	0.95
5111	28	30	3	0.3	0.663	r=0.3	1.4	1.13	3.09	2.23	2.2	1.19	0.95
8430	30	20	2	0.1	0.356		1.50	0.65	1.864	0.824	1.24	0.39	0.63
5077	30	20	2	2	0.36	r=0.2	1.5	0.64	1.89	0.52	1.26	0.38	0.62
2319	30	20	3		0.529		1.50	0.68	2.542	0.731	1.69	0.55	0.62
5924	30	30	3		0.680		1.50	1.11	3.640	2.293	2.43	1.22	0.95
5101	30	30	3	0.3	0.68	r=0.3	1.5	1.11	3.63	2.28	2.42	1.21	0.95
5109	32	20	2	2	0.371	r=0.2	1.6	0.62	2.20	0.53	1.37	0.38	0.62
5110	33	20	2	2	0.376	r=0.2	1.65	0.61	2.36	0.54	1.43	0.38	0.62
5541	40	10	2	0.5	0.301	r=0.5	2.00	0.24	2.21	0.07	1.10	0.09	0.25
5211	40	25	3		0.690		2.00	0.81	6.128	1.524	3.06	0.90	0.78
2320	40	30	3	2.5	0.770		2.00	1.01	7.229	2.556	3.61	1.28	0.95
8431	40	30	3	0.1	0.762		2.00	1.01	7.157	2.544	3.58	1.28	0.95
5331	40	30	5		1.250		2.00	1.08	10.38	3.844	5.19	2.01	0.92
2608	40	40	3		0.940		2.00	1.45	9.215	5.657	4.61	2.22	1.29
9798	40	40	4	0.1	1.210		2.00	1.49	11.50	7.246	5.75	2.88	1.27
0406	40	70	6	4.0	2.738	r=0.7	2.00	2.95	25.740	49.04	12.87	12.11	2.20

Juni -94

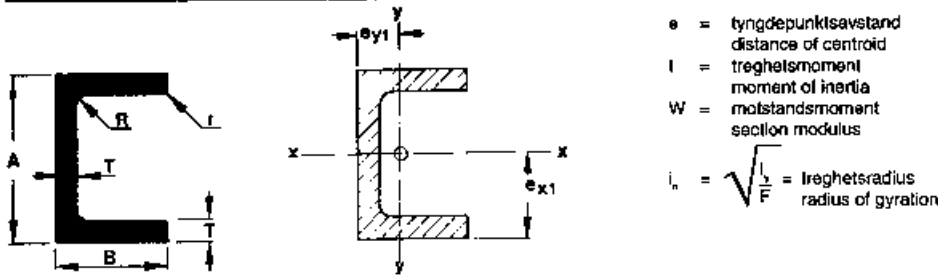
Profilene lagerføres ikke av oss.

33

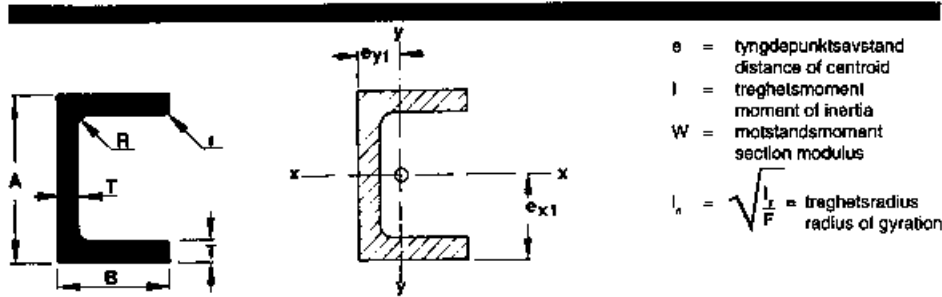


e = tyngdepunktsavstand
 distance of centroid
 I = treghetsmoment
 moment of inertia
 W = motstandsmoment
 section modulus
 $i_n = \sqrt{\frac{I}{F}}$ = treghetsradius
 radius of gyration

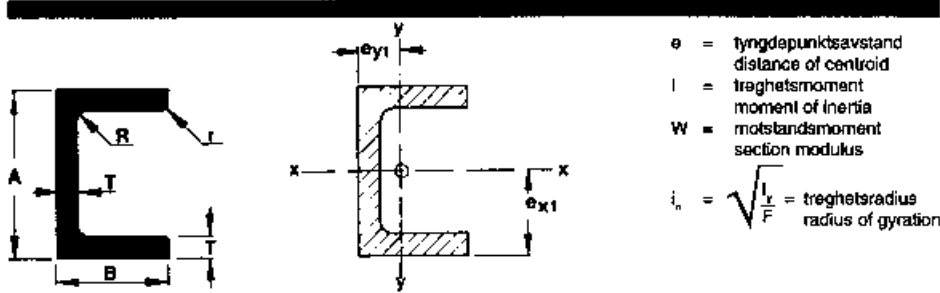
XUP	Millimeter		Kg/m		Anm.	e_y	e_x	I_x	I_y	W_{x2}	W_{y2}	i_n	
Flauless Karmøy A	B	T	R			cm	cm	cm ⁴	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	
9673	50	25	2.5	0.1	0.664	2.50	0.72	8.956	1.406	3.58	0.79	0.77	
9711	50	30	3	0.1	0.840	2.50	0.93	12.08	2.748	4.83	1.33	0.94	
0508	50	30	3	2.5	0.846	2.50	0.92	12.21	2.57	4.88	1.33	0.94	
2467	50	30	3		0.860	2.50	0.93	12.08	2.748	4.83	1.33	0.94	
6890	50	30	4		1.120	2.50	0.97	15.20	3.493	6.08	1.72	0.93	
0516	50	40	3	2.5	1.010	2.50	1.34	15.53	6.151	6.21	2.31	1.28	
0514	50	40	4	2.5	1.323	2.50	1.38	19.55	7.881	7.82	3.00	1.27	
2065	50	45	5	5	1.783	r=0.5	2.50	4.61	25.9	13.2	10.3	4.56	1.41
5253	50	50	3		1.118	2.50	1.78	18.72	11.32	7.49	3.52	1.62	
9797	50	50	4	0.1	1.536	2.50	1.82	23.68	14.61	9.47	4.60	1.60	
0500	50.8	25.4	3.17		0.820	2.54	0.75	11.47	1.806	4.52	1.01	0.77	
0505	50.8	25.4	3.17	3.17	0.830	2.54	0.75	11.67	1.812	4.59	1.01	0.77	
6484	50.8	25.4	4.76	0.8 (m)	1.182	r=0.80	2.54	0.8	15.6	2.48	6.14	1.42	0.75
0518	50.8	25.4	6.35	6.10	1.543	2.54	0.86	19.47	3.073	7.67	1.83	0.73	
0512	50.8	38.1	6.35		1.958	2.54	1.38	26.99	9.999	10.63	4.11	1.17	
0513	50.8	44.45	4.76		1.753	2.54	1.58	25.67	12.39	10.11	4.32	1.40	
5866	0506	50.8	50.8	6.35	2.395	2.54	1.93	35.01	22.65	13.78	7.20	1.60	
0550	57.15	31.75	4.76		1.428	2.86	1.01	25.08	4.941	8.78	2.28	0.97	
2468	60	40	4		1.275	3.00	1.29	29.82	8.379	9.94	3.09	1.26	
5139	60	40	5		1.790	3.00	1.33	35.54	10.10	11.85	3.78	1.25	
0600	60	40	5	4.0	1.772	r=0.7	3.00	1.32	35.94	10.13	11.98	3.78	1.24
0613	60	50	4	2.5	1.648	r=0.4	3.00	1.71	36.27	15.64	12.09	4.75	1.60
0607	63.5	44.45	6.35		2.410	3.18	1.53	53.22	16.85	16.76	5.78	1.38	
5148	64	30	10	1	2.805	r=1	3.2	1.07	51.2	7.37	16.00	3.8	0.84
0650	67	31.50	3	2.5	1.340	r=0.8	3.35	0.87	25.28	3.472	7.55	1.52	0.96
1860	70	20	2.5	2.5	0.715	r=0.25	3.5	0.45	17.38	0.81	4.96	0.52	0.55
0705	70	25	3	0.5	0.920	r=0.5	3.50	0.63	23.41	1.815	6.69	0.97	0.73
0701	70	40	4	2.5	1.541	r=0.6	3.50	1.21	43.08	8.842	12.31	3.17	1.24



XUP	Millimeter				Kg/m	Anm.	e_{y1}	e_{x1}	I_x	I_y	W_{x2}	W_{y2}	i_n	
Raufoss Karmøy	A	B	T	R			cm	cm	cm ⁴	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	
7998	70	45	4		1.660		3.50	1.41	47.20	12.28	13.48	3.98	1.42	
2469	75	40	6	3.0	2.320		3.75	1.25	70.15	12.64	18.71	4.59	1.21	
0766	75	50	6	4.0	2.657		3.75	1.64	84.74	23.90	22.60	7.12	1.56	
0776	76.2	25.4	6.35	7.5	2.023	r=0.5	3.81	0.74	55.19	3.501	14.49	1.95	0.68	
0753	76.2	38.1	3.17		1.253		3.81	1.07	41.23	6.465	10.82	2.36	1.18	
6755	0768	76.2	38.1	4.76	1.835	r=0.7	3.81	1.13	58.11	9.151	15.25	3.41	1.16	
0760	76.2	38.1	4.76	7.62	1.901	r=0.8	3.81	1.11	60.61	9.212	15.91	3.41	1.14	
0751	76.2	38.1	6.35		2.395		3.81	1.18	72.73	11.53	19.09	4.39	1.14	
0767	76.2	38.1	6.35	4.78	2.389		3.81	1.18	73.66	11.55	19.33	4.39	1.13	
5008	0752	76.2	50.8	6.35	2.831		3.81	1.69	92.46	26.27	24.27	7.74	1.58	
0756	76.2	50.8	6.35	9.14	2.912	r=1.59	3.81	1.66	95.64	26.53	25.10	7.75	1.56	
0755	76.2	76.2	4.76	4.76	2.830		3.81	2.70	105.5	63.78	27.68	12.97	2.46	
1352	80	25	3	3.0	1.010		4.00	0.59	32.89	1.883	8.22	0.99	0.71	
5003	80	25	5	0.5	1.619	r=0.5	4.00	0.66	49.4	2.82	12.35	0.65	0.68	
0803	80	40	4		1.642		4.00	1.15	58.69	9.220	14.67	3.23	1.23	
2997	80	40	5		2.060		4.00	1.18	70.63	11.12	17.66	3.95	1.22	
0802	80	40	6	6.0	2.438		4.00	1.21	83.23	12.93	20.81	4.64	1.20	
0904	90	50	5	4.0	2.445	r=0.7	4.50	1.49	112.8	21.81	25.07	6.22	1.55	
5001	96	40	4	4	1.829	r=1 (m)	4.8	1.05	91.4	9.69	19.04	3.28	1.19	
9800	100	40	3	3.0	1.378	utv 6	5.00	1.02	74.36	7.532	14.87	2.53	1.22	
1011	100	50	5	4.0	2.580	r=0.7	5.00	1.43	144.6	22.55	28.93	6.31	1.54	
6166	1035	100	50	5	0.4	2.565		5.00	1.43	143.3	22.50	28.66	6.31	1.54
2992	100	50	5		2.587	utv 3	5.00	1.43	143.3	22.50	28.66	6.31	1.54	
8491	100	50	6		3.370		5.00	1.47	166.8	26.25	33.36	7.44	1.53	
1013	100	50	6	4.0	3.062	r=0.7	5.00	1.47	168.1	26.29	33.61	7.44	1.52	
6775	100	80	3		2.080		5.00	2.58	133.7	51.95	26.74	9.58	2.61	
1033	100	100	4	2.0	3.117	utv 6	5.00	3.53	207.0	123.1	41.41	19.02	3.27	
1014	101.6	50.8	6.35		3.267		5.08	1.50	183.7	28.94	36.17	8.09	1.55	



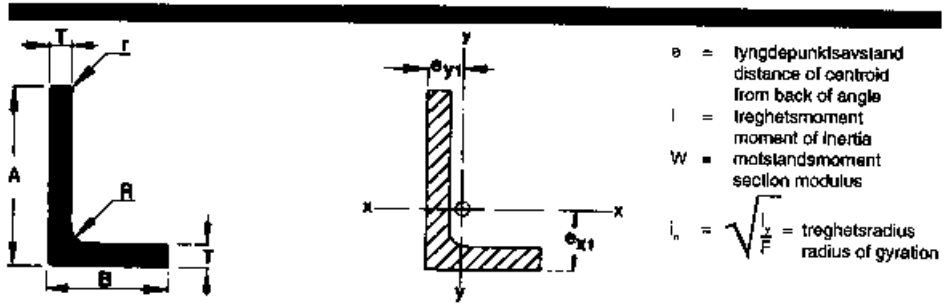
XUP	Millimeter				Kg/m	Anm.	e_y	e_x	I_x	I_y	W_{x2}	W_{y2}	i_x	
Raufoss	Karmøy	A	B	T	R		cm	cm	cm ⁴	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	
1027	101.6	50.8	9.52		4.737	r=0.6	5.08	1.62	250.4	39.67	49.29	11.50	1.51	
1026	101.6	76.2	4.76		3.140	r=0.7	5.08	2.47	201.2	70.05	39.60	13.59	2.45	
1028	101.6	76.2	9.52	9.52	6.030		5.08	2.61	356.2	128.9	70.72	25.63	2.37	
1017	101.6	101.6	4.76	9.52	3.698	r=0.8	5.08	3.49	265.4	157.2	52.25	23.57	3.30	
1103	114	30	3	1	1.358	r=1	5.7	0.62	86.672	3.434	15.20	1.447	0.82	
1100	114.3	50.8	6.35		3.483	r=0.8	5.72	1.43	243.7	30.03	42.64	8.22	1.53	
1201	120	40	4	2.5	2.079		6.00	0.95	155.3	10.38	25.89	3.40	1.16	
5845	1204	120	45	10	6.0	r=0.6	6.00	1.33	360.0	30.54	60.00	9.62	1.26	
5112	120	50	6	6.0	3.407	r=1.0	6.00	1.35	262.0	27.70	43.66	5.96	1.48	
	1202	120	55	6	4.0	3.549	r=0.7	6.00	1.53	279.6	36.51	46.59	9.20	1.67
5002	120	60	5	0.8	3.103	r=0.8	6.00	1.68	253.7	39.7	42.28	9.19	1.85	
	1256	127	50.8	6.35	3.741		6.35	1.36	319.4	31.05	50.30	8.34	1.50	
	1251	127	63.5	9.52	6.0	6.080	r=0.8	6.35	1.93	522.2	81.98	82.23	18.54	1.91
	1253	127	76.2	6.35	4.571	r=0.8	6.35	2.31	431.6	97.66	67.86	18.40	2.40	
6398	130	50	5		3.010		6.50	1.27	267.4	24.35	41.14	6.53	1.49	
6286	136	33	4	4.0	2.113	r=0.4	6.80	0.7	187.5	6.12	27.57	2.35	0.88	
8741	1400	140	52.5	11	3.0	6.660	r=0.8	7.00	1.53	633.6	54.16	90.51	14.54	1.48
	1401	140	60	7	6.0	4.690	r=0.8	7.00	1.64	494.4	55.88	70.63	12.80	1.79
	1507	150	50	6	4.0	3.880		7.50	1.22	445.8	29.61	59.44	7.84	1.44
	1550	156	50	3	0.5	2.020	r=1.5 _{top}	7.90	1.09	260.0	16.23	33.34	4.15	1.47
	1603	160	60	12	6.0	8.335	r=0.6	8.00	1.72	1049.0	89.25	131.1	20.87	1.70
	1601	160	60	12	12.0	8.340		8.00	1.72	1068.0	89.29	133.5	20.86	1.69
5109	180	60	5	5.0	3.942	r=0.5	9.00	1.38	671.2	44.8	74.5	9.69	1.75	
	1804	180	67.5	13	1.0	10.140		9.00	1.92	1634.0	138.9	181.5	28.77	1.92
	1950	195	50	3	5.0	2.362	r=1.5	9.75	1.10	482.8	22.51	49.47	5.11	1.57
	2002	200	50	4	2.5	3.160	r=0.8	10.00	0.99	622.6	22.36	62.26	5.57	1.38
	2005	200	65	9	6.0	7.622		10.00	1.82	1381.0	90.82	138.17	19.41	2.00
	2006	200	80	6	2.0	5.639	r=1.0	10.00	2.00	1237.0	122.6	123.7	20.43	2.42



XUP	Millimeter				Kg/m	Anm.	e_x	e_y	I_x	I_y	W_{x2}	W_{y2}	i_x
Raufoss Karmøy A	B	T	R				cm	cm	cm ⁴	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm
2008	200	100	5	4	5.281	r=0.7	10.00	2.68	1242.1	193.5	124.2	26.42	3.14
2257	225	40	4	1.0	3.205	r=1.0	11.25	0.69	731.8	11.86	65.06	3.61	1.00
2300	230	75	10	5	9.745	r=1.0	11.5	1.85	2597.9	164.2	225.9	29.06	2.13
2502	254	76.2	12.7	10.0	13.180	r=1.0	12.70	1.90	4138.0	214.7	325.8	37.55	2.10
2503	254	88.9	11.3	14.3	12.710	r=1.6	12.70	2.24	4239.0	306.8	333.8	46.10	2.55
2550	255	40	3.5	5.0	3.120	r=1.5	12.75	0.62	903.9	10.88	70.89	3.22	0.97

ULIKEBENT VINKEL
UNEQUAL ANGLES

XUV

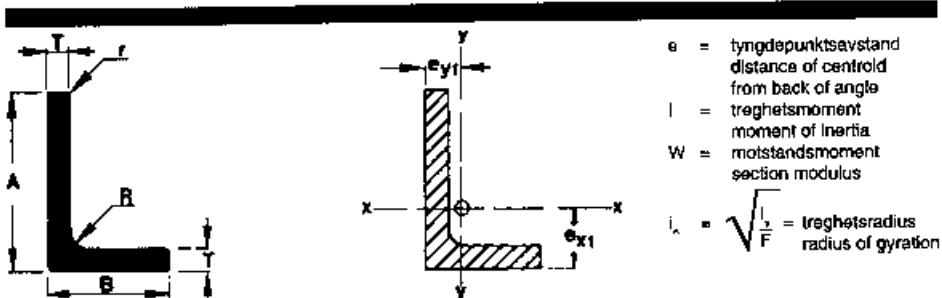


XUV	Millimeter				Kg/m	Ann.	e_x	e_y	I_x	I_y	W_{x2}	W_{y2}	i_x	
Raufoss	Karnøy	A	B	T	R		cm	cm	cm ⁴	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	
8027		20	15	2		0.180	0.845	0.395	0.262	0.127	0.19	0.12	0.44	
1511		23	13	3	3	0.270	r=1.5	0.842	0.347	0.512	0.121	0.35	0.13	0.35
5965		25	12	2		0.190		0.921	0.271	0.450	0.070	0.29	0.08	0.32
5117		25	12	3	0.5	0.274		0.30	0.96	0.63	0.09	0.28	0.37	0.29
9311		25	15	2		0.205		0.857	0.357	0.488	0.135	0.30	0.12	0.42
2726		25	15	2	2	0.210		0.853	0.356	0.486	0.135	0.30	0.12	0.42
5104		25	20	1.5	0.3	0.175	r=0.3	0.75	0.5	0.41	0.24	0.23	0.16	0.60
2746		30	15	2	2	0.240		1.073	0.326	0.805	0.141	0.42	0.12	0.40
8429		30	20	2		0.259		0.975	0.475	0.892	0.325	0.44	0.21	0.58
1508		30	20	2	2	0.260		0.972	0.474	0.891	0.324	0.44	0.21	0.58
8849		30	20	3		0.380		1.01	0.51	1.272	0.458	0.64	0.31	0.57
5108		30	20	3	3	0.390		1.007	0.511	1.268	0.457	0.64	0.31	0.57
5103		30	25	3		0.420	r=0.8	0.93	0.68	1.374	0.871	0.66	0.48	0.75
5112		31	25	3	0.3	0.429		0.67	0.97	1.50	0.87	0.51	0.56	0.74
8705		32	26	3.5		0.515		1.012	0.712	1.903	1.130	0.87	0.60	0.77
2567		35	25	3	3	0.470		1.128	0.631	2.109	0.908	0.89	0.49	0.72
2801		38	25	5	5	0.794	r=2.5	1.324	0.680	4.068	1.416	1.64	0.78	0.69
6185		40	20	2		0.320		1.410	0.410	1.964	0.349	0.76	0.22	0.55
9722		40	20	3		0.462		1.448	0.448	2.829	0.492	1.11	0.32	0.54
5106		40	25	1.5	0.3	0.256	r=0.3	1.29	0.54	1.62	0.51	0.59	0.26	0.73
7515		40	25	2		0.340		1.306	0.556	2.123	0.662	0.79	0.34	0.73
2591		40	25	2	2	0.340	r=0.2	1.303	0.555	2.120	0.662	0.79	0.34	0.72
5114		40	25	2.5	0.25	0.421		0.57	1.32	2.60	0.80	0.75	0.67	0.71
2442		40	25	3	3	0.513		1.339	0.592	3.055	0.942	1.15	0.49	0.71
5906		40	35	2.5		0.489		1.159	0.909	2.914	2.095	1.03	0.81	1.07
5118		45	25	3	0.3	0.541		0.51	1.60	4.19	0.95	1.12	1.19	0.58
9807		50	20	2.5		0.454		1.884	0.384	4.434	0.444	1.42	0.27	0.51
0501		50	20	5	4	0.880		1.676	0.676	6.036	1.689	1.82	0.73	0.86

Jun: '94

Profilene lagerføres ikke av oss.

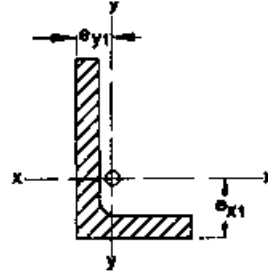
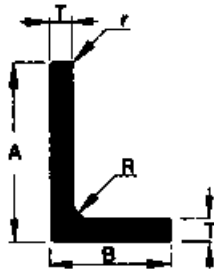
21



XUV	Millimeter				Kg/m	Anm.	e_{y1}	e_{x1}	I_x	I_y	W_{x2}	W_{y2}	i_x
Raufoss	Karmøy	A	B	T	R		cm	cm	cm ⁴	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm
9674		50	25	3	0.3	0.582	0.53	1.78	5.65	0.99	1.26	1.37	0.67
9806		50	30	3		0.624	1.676	0.676	6.036	1.689	1.82	0.73	0.86
	0505	50	30	4	2.5	0.824	1.71	0.71	7.792	2.159	2.37	0.94	0.84
7018		50	30	4	4	0.830	1.706	0.712	7.780	2.157	2.36	0.94	0.84
	0610	50	30	5	4	1.020	r=0.7	1.75	9.430	2.596	2.90	1.15	0.83
2446		50	38	5	5	1.140	1.599	1.003	10.243	5.146	3.01	1.84	1.11
5105		50	40	2		0.475	1.464	0.964	4.573	2.646	1.29	0.87	1.23
5110		50	40	3	0.5	0.703	r=0.5	1.50	6.64	3.82	1.90	1.27	1.21
7514		50	40	4		0.930	1.537	1.037	8.615	4.939	2.49	1.67	1.20
6041		50	40	5	5	1.170	1.567	1.071	10.425	5.962	3.04	2.04	1.18
2765		50	40	6	6	1.390	1.603	1.107	12.140	6.935	3.57	2.40	1.16
1515		50.8	25.4	3.18	0.8	0.626	r=0.8	1.8	6.25	1.1	1.90	0.55	0.68
	0506	50.8	25.4	4.76		0.918	1.88	0.61	8.921	1.538	2.78	0.79	0.67
5061		50.8	38.1	4.76	0.5	1.08	r=0.5	1.63	10.3	4.98	2.98	1.77	0.24
	0514	50.8	25.4	6.35		1.197	1.93	0.66	11.32	1.947	3.60	1.04	0.66
6499		55	30	3		0.670	1.894	0.644	7.838	1.730	2.17	0.73	0.84
	0550	57.15	44.45	6.35		1.633	1.84	0.21	19.32	10.27	4.99	3.17	1.30
9727		60	20	2.5		0.523	2.351	0.351	7.302	0.459	2.00	0.28	0.49
9726		60	30	4		0.930	2.153	0.653	12.902	2.259	3.35	0.96	0.81
	0610	60	30	4	2.5	0.932	r=0.6	2.15	12.89	2.258	3.35	0.96	0.81
2991		60	30	5	5	1.170	2.181	0.691	15.648	2.718	4.10	1.18	0.79
9804		60	40	3		0.785	1.913	0.913	10.985	4.029	2.69	1.31	1.18
5102		60	40	4	4	1.050	1.943	0.948	14.251	5.188	3.51	1.70	1.16
2523		60	40	5	5	1.300	1.979	0.985	17.351	6.279	4.32	2.08	1.14
	0608	60	40	6	4	1.530	2.02	1.02	20.32	7.317	5.11	2.46	1.14
2448		60	40	6	6	1.550	2.015	1.021	20.282	7.310	5.09	2.45	1.13
	0615	60	50	8	0.4	2.200	r=0.4	1.93	37.94	17.68	6.86	4.95	1.47
	0613	63.5	38.1	3.17		0.845	2.11	0.84	13.31	3.749	3.14	1.26	1.09

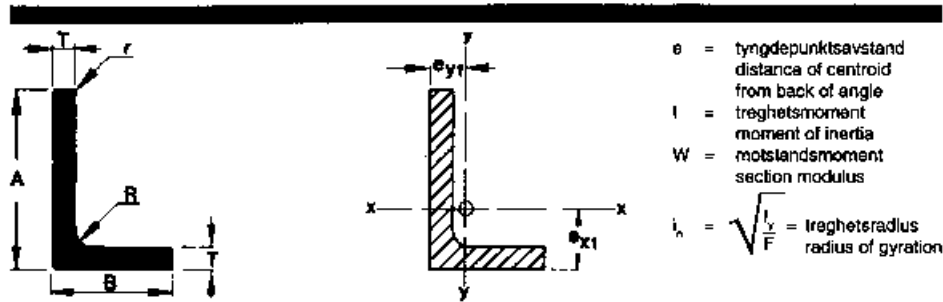
ULIKEBENT VINKEL
UNEQUAL ANGLES

XUV

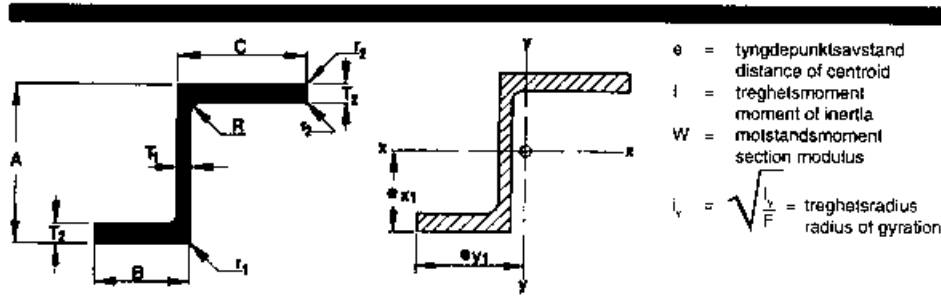


e = tyngdepunktsavstand
distance of centroid
from back of angle
I = treghetsmoment
moment of inertia
W = motstandsmoment
section modulus
 $i_h = \sqrt{\frac{I_x}{F}}$ = treghetsradius
radius of gyration

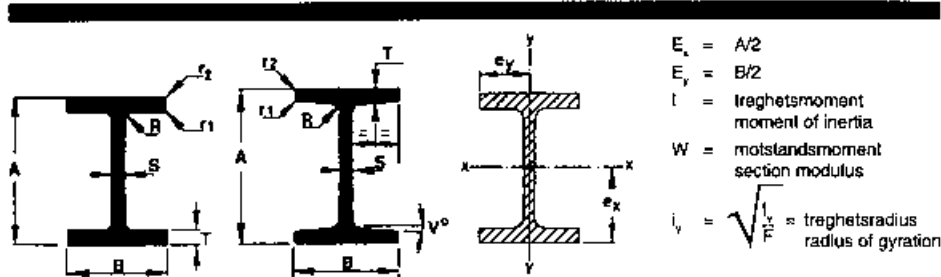
XUV	Millimeter				Kg/m	Anm.	e_{x1}	e_{y1}	I_x	I_y	W_{x2}	W_{y2}	i_h	
Raufoss	Karmøy	A	B	T	R		cm	cm	cm ⁴	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	
9805		80	40	3		0.945	2.78	0.78	24.06	4.32	4.61	1.34	1.11	
	0800	80	40	6	4	1.856	r=0.7	2.89	0.90	45.21	7.874	8.85	2.54	1.07
	0802	80	50	6	4	2.017	r=0.7	2.68	1.19	48.95	15.08	9.21	3.95	1.42
2532		80	50	6	6	2.040		2.68	1.19	48.89	15.07	9.18	3.95	1.42
	0851	85	38	3	1	0.970	r=0.5	3.05	0.70	27.86	3.780	5.12	1.22	1.02
5116		85	40	1.5	0.3	0.499		0.70	2.95	14.60	2.30	1.87	2.19	1.11
	0850	88.9	63.5	6.35	1.62	2.536		2.83	1.56	74.93	32.39	12.36	6.76	1.87
	0901	90	40	6	4	2.017		3.34	0.85	62.57	8.089	11.06	2.57	1.04
	0900	90	50	6	4	2.179	r=0.7	3.12	1.12	67.75	15.54	11.51	4.00	1.39
2554		90	50	6	6	2.200		3.11	1.12	67.68	15.53	11.49	4.00	1.38
2537		90	50	6.5	6.5	2.360	r=3.3	3.13	1.14	72.65	16.61	12.37	4.30	1.38
	0903	80	60	6	6	2.353	r=0.5	2.92	1.42	72.15	26.27	11.86	5.74	1.74
2680		90	65	8		3.220		2.91	1.66	95.77	42.36	15.73	8.75	1.90
1503		100	30	2	2	0.693	r=0.2	3.9	0.43	27.3	1.35	4.47	0.52	0.72
9723		100	50	3		1.191		3.45	0.95	47.57	8.62	7.26	2.13	1.40
	1021	100	50	5	0.4	1.957	r=0.4	3.53	1.03	76.72	13.62	11.85	3.43	1.37
	1001	100	50	6	4	2.341	r=0.7	3.56	1.06	90.51	15.93	14.05	4.05	1.36
2459		100	50	6	6	2.360		3.55	1.06	90.42	15.92	14.02	4.04	1.35
9672	1010	100	50	7	6	2.720	r=0.8	3.59	1.10	103.8	18.14	16.20	4.65	1.34
6004		100	50	8	8	3.110		3.62	1.14	116.57	20.73	18.28	5.25	1.33
1507		100	50	8	8	3.080	r=4	3.62	1.14	116.57	20.73	18.28	5.25	1.33
	1008	100	50	9	6	3.445	r=0.8	3.67	1.18	129.2	22.34	20.41	5.84	1.32
	1009	100	65	6	4	2.584	r=0.7	3.25	1.51	99.23	34.00	14.70	6.80	1.88
6005		100	65	6	6	2.610		3.25	1.50	99.15	33.97	14.68	6.80	1.88
	1004	100	65	8	6	3.410	r=0.8	3.32	1.58	128.2	43.54	19.20	8.85	1.86
6006		100	65	8	8	3.440		3.32	1.58	128.06	43.51	19.16	8.84	1.85
2038		100	65	9	9	3.850		3.35	1.61	141.8	48.03	21.33	9.83	1.84
6220		100	65	9.5	9.5	3.760	r=4.75	3.39	1.65	155.5	52.47	23.54	10.82	1.84



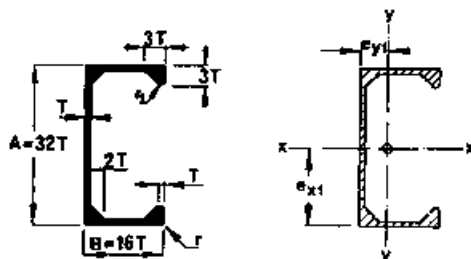
XUV	Millimeter				Kg/m	Anm.	e_{x1}	e_{y1}	I_x	I_y	W_{x2}	W_{y2}	i_h	
Raufoss	Karmøy	A	B	T	R		cm	cm	cm ⁴	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	
1000		100	65	10	6	4.204	r=0.8	3.40	1.65	155.5	52.47	23.54	10.82	1.84
8690		100	70	8	8	3.530		3.23	1.74	131.4	53.86	19.41	10.23	2.03
1006		100	75	8	6	3.626	r=0.8	3.15	1.90	134.7	65.68	19.66	11.73	2.21
6007		100	75	8	8	3.660		3.14	1.90	134.6	65.63	19.63	11.72	2.21
1017		101.6	50.8	3.17		1.280		3.51	0.97	52.77	9.544	7.94	2.32	1.42
1023		101.6	50.8	4.76	4	1.904	r=0.5	3.56	1.03	77.2	13.68	11.69	3.37	1.39
1002		101.6	50.8	4.76	7.62	1.931		3.54	1.03	76.77	13.68	11.60	3.38	1.38
1007		101.6	50.8	6.35		2.504		3.63	1.09	100.1	17.59	15.33	4.41	1.38
1012		101.6	63.5	6.35	8.12	2.752		3.35	1.46	108.0	33.49	15.86	6.84	1.81
1011		101.6	76.2	6.35	8.12	2.940	r=0.8	3.14	1.87	115.3	58.46	16.42	9.82	2.28
1016		101.6	76.2	9.53	8.38	4.370	r=0.8	3.25	1.98	164.7	80.09	23.82	14.21	2.22
1050		105	40	4	0.4	1.522	r=0.4	3.96	0.71	65.95	5.91	10.09	1.80	1.02
1100		110	100	10	0.5	5.397	r=1	3.25	2.75	235.1	185.1	30.33	25.53	3.04
5111		120	60	5	0.8	2.63		1.79	3.79	148.1	54.5	14.50	12.94	2.36
6217		125	50	8	8	3.660		4.76	1.03	216.0	21.32	27.90	5.37	1.26
6008	1252	125	75	9	6	4.660	r=0.8	4.24	1.74	277.4	77.15	33.58	13.40	2.11
1251		125	75	10	6	5.107	r=0.8	4.28	1.78	304.4	84.34	37.02	14.75	2.10
5101	1258	125	80	8	8	4.290	r=0.8	4.10	1.86	255.2	83.92	30.37	13.66	2.30
1257		125	80	8		4.250		4.11	1.86	255.6	84.03	30.47	13.69	2.31
1256		127	50.8	4.76	5.56	2.240		4.71	0.91	141.2	14.37	17.67	3.45	1.32
1250		127	76.2	6.35	9.14	3.420	r=0.8	4.19	1.66	212.2	59.78	24.92	10.04	2.17
1253		127	76.2	9.53	9.14	5.020	r=0.8	4.31	1.79	306.2	85.08	36.51	14.58	2.14
1259		127	88.9	6.35	3.17	3.597	r=0.8	3.97	2.07	224.2	97.86	25.69	13.61	2.64
1302		130	65	8	6	4.060	r=0.8	4.63	1.39	264.4	46.49	31.59	9.10	1.76
6344	1301	130	65	10	6	5.014	r=0.8	4.71	1.47	322.4	56.08	38.88	11.14	1.74
6048		130	75	8	8	4.29	r=0.8	1.67	4.40	279.7	70.3	24.6	22.6	2.10
2040	1300	130	75	9	9	4.810		4.45	1.71	308.8	77.86	36.10	13.45	2.09
1509	150	75	9	6		5.268	r=0.8	5.34	1.60	458.2	80.66	47.42	13.66	2.03



XZP	Millimeter								Kg/m	Anm.	e_x	e_y	I_x	I_y	$W_{x,z}$	$W_{y,z}$	i_y
Raufoss Karmøy	A	B	C	T_1	T_2	R	r_1	r_2		cm	cm	cm ⁴	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	
8224	15	20	20	1.5	1.5				0.210	0.75	1.92	0.296	0.714	0.39	0.37	0.96	
2326	25	15	15	3	3				0.400	1.25	1.35	1.267	0.497	1.01	0.37	0.58	
2327	30	18	18	3	3				0.490	1.50	1.65	2.322	0.904	1.55	0.56	0.70	
5969	40	30	30	3	3				0.760	2.00	2.85	7.157	4.638	3.58	1.63	1.28	
0400	40	35	60	5	5	4	0.7	0.7	1.700	2.35	4.14	15.13	32.36	6.45	7.81	2.26	
2328	45	20	20	3	3				0.640	2.25	1.85	6.784	1.276	3.02	0.69	0.73	
0500	50	30	30	3	3	1	1.5	1.5	0.837	2.50	2.85	12.11	4.45	4.84	1.56	0.71	
5101	70	30	40	2	2	0.4	0.4	0.4	0.734	3.75	3.15	20.8	5.4	5.54	1.71	1.41	
0800	80	38	38	3	3	3.5	6.5	0.4	1.181	4.0	3.65	41.92	9.725	10.48	2.67	1.49	

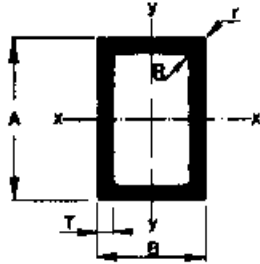


XHP	Millimeter							Kg/m	Anm.	I_x	I_y	W_x	W_y	i
Raufoss Kamøy	A	B	S	T	R	r_1	r_2		cm^4	cm^4	cm^3	cm^3	cm	
7621	48	26	2.5	2.5	2.5			0.640	8.369	0.659	3.49	0.53	0.53	
7779	75	50	2.5	2.5	2	0.5	0.5	1.150	40.36	5.192	10.76	2.08	1.10	
0750	76.2	50.8	6.35	6.35		0.8	0.8	2.827	92.33	13.94	24.23	5.49	1.15	
0801	80	40	4	6	4	0.6	0.6	2.065	77.75	54.24	19.43	2.71	0.84	
5702	80	60	5	6	5	1	1	2.930	103.9	18.01	25.97	6.00	1.32	
0800	80	70	5	5	5	1	1	2.888	115.09	28.47	28.72	8.13	1.63	
1003	100	50	3.5	5	4	0.5	0.5	2.237	136.8	10.43	27.35	4.17	1.12	
1002	100	100	5	5	5	0.4	0.4	3.920	260.3	83.39	52.06	16.68	2.38	
1001	101.6	76.2	6.1	8.8	9.5	4.5	1.5	4.979	V=8° 325.3	54.31	64.04	14.26	1.69	
1000	101.6	76.2	6.35	7.94	0.8	0.8	0.8	4.737	V=5° 296.7	53.45	58.80	14.03	1.75	
1202	120	50	4	10	4	0.8	0.8	3.820	339.6	20.83	56.61	8.33	1.21	
5699	120	58	5	8	5	1	1	3.980	286.3	16.65	47.71	5.74	1.06	
1203	120	120	5	8	6	0.8	0.8	6.671	657.6	230.2	109.6	39.36	3.05	
1200	120	120	10	10	8	0.8	0.8	9.260	818.3	288.5	136.4	48.09	2.90	
1201	124	160	7	7	6	0.8	0.8	8.210	853.7	477.6	137.7	59.69	3.96	
1250	127	50.8	4.76	6.35	7.4	0.8	0.8	3.337	309.2	13.99	48.53	5.51	1.06	
1251	127	76.2	6.35	9.52	9.4	0.8	0.8	5.975	588.3	70.51	92.65	18.51	1.79	
1502	150	40	3	3	4			1.851	211.3	3.241	28.17	1.62	0.69	
1503	152.4	76.2	5.84	9.58	9.5	4.5	1.5	6.167	V=8° 920.4	61.22	120.8	16.07	1.50	
1500	152.4	76.2	6.35	9.52	9.4	0.8	0.8	6.408	898.2	70.56	117.9	18.52	1.72	
1501	152.4	76.2	6.10	10.2	10.2	5.1	1.0	6.484	V=7° 921.7	65.05	121.0	17.07	1.64	
2000	203.2	76.2	7.15	10.4	9.5	4.8	0.8	7.938	V=8° 1870.0	66.52	184.1	17.46	1.50	
2002	200	60	5	6	5	0.5	0.5	4.535	971.4	21.67	97.14	7.224	1.13	
2200	220	75	4	6	6	1	1	4.754	1361.0	42.09	123.7	11.22	1.54	



e = tyngdepunktsavstand
distance of centroid
 I = treghetsmoment
moment of inertia
 W = motstandsmoment
section modulus
 $i_n = \sqrt{\frac{I_n}{F}}$ = treghetsradius
radius of gyration

XUP	Millimeter			Kg/m	Anm.	e_y	I_x	I_y	W_{x2}	W_{y2}	i_n	
	Raufoss	Karmøy	T									
1002	101.6	50.8	3.18	0.5	2.010	$r=1.9$	1.70	126.4	24.50	24.84	7.23	1.81
1029	101.6	50.8	3.20		1.930	se tegn.	1.70	126.2	24.43	24.84	7.22	1.85
1004	101.6	50.8	3.97/4.76		2.549	se tegn.	1.82	156.5	30.3	30.8	9.28	1.79
1258	127	63.5	3.97	0.7	3.145		2.13	303.9	59.10	47.97	14.06	2.26



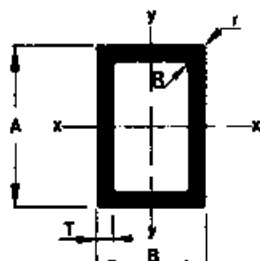
I = treghetsmoment
moment of inertia
W = motstandsmodul
section modulus
 $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{F}}$ = treghetsradius
radius of gyration

XFR	Millimeter						Kg/m	Anm.	I_x	I_y	W_x	W_y	i_y
Flufoos Karmøy	A	B	T	R	r			cm ⁴	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	
1365	15	15	2		2.5	0.270		0.28	0.28	0.37	0.37	0.53	
4007	15	15	2	0.2	0.5	0.280		0.30	0.30	0.40	0.40	0.54	
6623	16	16	2		1.5	0.297		0.38	0.38	0.47	0.47	0.58	
1729	18	15	2	0.2	0.5	0.313		0.48	0.35	0.53	0.47	0.55	
9596	18	18	1	0.2	0.2	0.184		0.328	0.328	0.36	0.36	0.69	
8071	18	18	1.5		1.5	0.280		0.46	0.46	0.51	0.51	0.68	
5002	20	10	1			0.151		0.28	0.09	0.28	0.18	0.40	
8052	20	10	1.5		0.5	0.219		0.38	0.12	0.38	0.24	0.38	
6759	20	20	1.375		0.14	0.252		0.60	0.60	0.60	0.60	0.76	
5106	20	20	1.5	0.3	0.3	0.300		0.63	0.63	0.63	0.63	0.75	
5107	20	20	1.5	1.5	1.5	0.300		0.63	0.63	0.63	0.63	0.75	
2920	20	20	2			0.389		0.79	0.79	0.79	0.79	0.74	
6167	22	22	2			0.430		1.08	1.08	0.98	0.98	0.82	
4008	24	18	1.5	0.15	1.5	0.310		0.93	0.60	0.77	0.66	0.71	
5947	25	15	1.5	0.15	0.15	0.300		0.89	0.39	0.71	0.52	0.59	
2774	25	25	1.5			0.380		1.30	1.30	1.04	1.04	0.96	
2873	25	25	2			0.497		1.63	1.63	1.31	1.31	0.94	
5101	25.4	25.4	1.50			0.388		1.37	1.37	1.08	1.08	0.98	
0257	25.4	25.4	3.18			0.762		2.37	2.37	1.87	1.87	0.92	
5109	30	12	1.5	0.5	0.5	0.316		1.22	0.26	0.81	0.43	0.47	
5467	30	15	2	0.2	0.5	0.440		0.56	1.76	0.74	1.18	0.58	
9714	30	20	2	0.2	0.2	0.497		2.15	1.11	1.43	1.11	0.77	
2822	30	30	2	0.2	0.2	0.610		2.94	2.94	1.96	1.96	1.15	
0402	40	20	2.5	1.5	4	0.710		4.86	1.58	2.43	1.58	0.77	
0307	30	30	3	1	2	0.868		3.92	3.92	2.62	2.62	1.10	
0302	31.75	31.75	2.64	1.5	3	0.814		4.38	4.38	2.76	2.76	1.19	
0301	31.75	31.75	3.25			1.000		5.08	5.08	3.20	3.20	1.17	
2955	34	20	2	0.2	0.2	0.540		2.95	1.24	1.74	1.24	0.79	

Juni -94

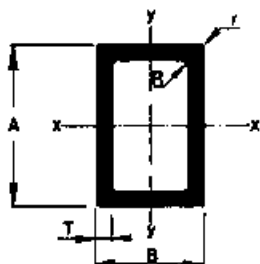
Profilene lagerføres ikke av oss.

63



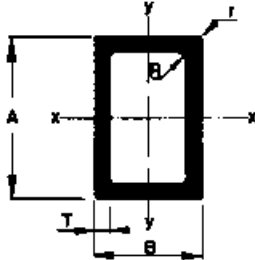
I = treghetsmoment
moment of inertia
 W = motstandsmoment
section modulus
 $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{F}}$ = treghetsradius
radius of gyration

XFR	Millimeter						Kg/m	Anm.	I_x	I_y	W_x	W_y	i_y
Raufoss	Karmøy	A	B	T	R	r			cm ⁴	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm
2823		34	34	2	0.2	0.2	0.690		4.39	4.39	2.58	2.58	1.31
9735		34	34	3			1.000		6.01	6.01	3.54	3.54	1.27
	0358	35	35	5	0.5	0.5	1.688		9.25	9.25	5.28	5.28	1.24
5104		38	38	3	0.3	0.3	1.134		8.63	8.63	4.54	4.54	1.43
	0355	38.10	38.10	3.18			1.200		9.10	9.10	4.78	4.78	1.43
	0352	38.10	38.10	3.25		2.38	1.210		9.25	9.25	4.86	4.86	1.43
	0354	38.10	38.10	3.25	4.76	4.76	1.223		9.25	9.25	4.86	4.86	1.43
2721		39.2	39.2	2.5			0.990		8.54	8.54	3.96	3.96	1.52
5108		40	20	1.5	0.3	0.3	0.462		3.49	1.15	1.745	1.15	0.82
4006		40	20	2	0.2	0.61	0.607		4.45	1.45	2.22	1.45	0.80
	0400	40	20	2			0.605		4.45	1.44	2.22	1.44	0.80
	0402	40	20	2.5	1.5	4	0.710		4.86	1.58	2.43	1.58	0.77
5134		40	20	3			0.875		6.07	1.88	3.03	1.88	0.76
9848		40	25	2			0.660		5.17	2.43	2.58	1.94	1.00
4010		40	25	2.5			0.810		6.19	2.88	3.09	2.30	0.98
7120		40	30	2			0.712		5.89	3.72	2.95	2.48	1.19
5135		40	30	3			1.037		8.13	5.08	4.06	3.39	1.15
2825	0403	40	40	2			0.821		7.34	7.34	3.67	3.67	1.55
	0401	40	40	2.5	1.5	4	0.980		8.83	8.83	4.41	4.41	1.53
5003	0406	40	40	3			1.210		10.20	10.20	5.10	5.10	1.52
9719		40	40	4			1.550		12.60	12.60	6.30	6.30	1.48
	0409	40	40	4.5			1.725		13.64	13.64	6.82	6.82	1.46
	0404	44.45	44.45	3.18			1.451		14.99	14.99	6.74	6.74	1.69
7879		45	20	2	2	1	0.660		5.97	1.47	2.65	1.47	0.78
5929		45	45	2	0.2	0.2	0.930		10.62	10.62	4.72	4.72	1.76
	0450	45	45	4			1.771		18.55	18.55	8.25	8.25	1.68
	0451	47	40	2.5	1	2	1.100		12.89	9.91	5.49	4.96	1.56
9814		50	20	2			0.713		7.86	1.76	3.14	1.76	0.82



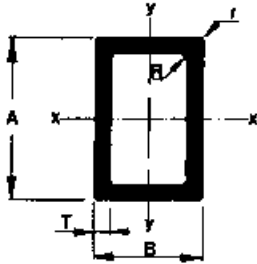
I = treghetsmoment
moment of inertia
 W = motstandsmoment
section modulus
 $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{F}}$ = treghetsradius
radius of gyration

XFR	Millimeter						Kg/m	Anm.	I_x	I_y	W_x	W_y	i_y
	Raufoss	Karmøy	A	B	T	R							
5103		50	25	3	0.5	0.5	1.118		12.5	4.0	5.0	3.2	0.98
2826	0506	50	20	2.5			0.877		9.44	2.07	3.78	2.07	0.80
4011	0505	50	30	2	1	1	0.821		10.16	4.51	4.06	3.01	1.22
5271		50	30	2.5		0.5	1.020		12.27	5.40	4.91	3.60	1.20
9736		50	30	3		0.3	1.200		14.21	6.18	5.69	4.12	1.18
6090		50	30	4	2	6	1.490		17.89	8.51	7.15	5.68	1.19
2827		50	34	2.5			1.100		13.39	7.23	5.36	4.25	1.35
2874		50	40	2.5			1.150		15.09	10.59	6.04	5.29	1.58
1351		50	50	2		0.5	1.030		14.78	14.78	5.91	5.91	1.96
	0503	50	50	2.5	0.5	2.5	1.269		17.91	17.91	7.16	7.16	1.94
	0504	50	50	3		2	1.513		20.85	20.85	8.34	8.34	1.92
2828		50	50	3	0.3	0.3	1.530		20.85	20.85	8.34	8.34	1.92
9713		50	50	4			1.990		26.15	26.15	10.46	10.46	1.89
	0510	50.8	25.4	3.18			1.200		13.82	4.38	5.44	3.45	0.99
	0509	50.8	50.8	3.18			1.635		23.00	23.00	9.05	9.05	1.95
	0508	50.8	50.8	3.25	4.75	4.76	1.668		23.40	23.40	9.21	9.21	1.95
	0604	60	25	2	0.4	0.4	0.875		14.28	3.49	4.76	2.79	1.04
4000		60	30	2.5	1	0.3	1.152		19.4	6.35	6.46	4.23	1.22
9734		60	30	3			1.360		22.51	7.28	7.50	4.95	1.20
	0607	60	40	2	0.4	1.5	1.032		19.24	10.07	6.41	5.03	1.62
9737		60	40	2.5		0.25	1.282		23.48	12.35	7.83	6.18	1.61
	0609	60	40	3	1	2	1.516		27.28	14.07	9.09	7.04	1.58
9815	0608	60	40	4			1.987		34.50	17.80	11.50	8.90	1.56
	0603	60	50	3			1.685		32.26	24.17	10.75	9.67	1.97
5729	0605	60	60	4			2.419		47.07	47.07	15.69	15.69	2.29
	0611	60	60	2.25	2	1	1.396		28.69	28.69	9.56	9.56	2.35
5114		60	60	5	3	8	2.842		51.99	51.99	17.33	17.33	2.22
	0602	63.5	63.5	2.09			1.347		31.47	31.47	9.91	9.91	2.51



I = treghetsmoment
moment of inertia
 W = motstandsmoment
section modulus
 $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{F}}$ = treghetsradius
radius of gyration

XFR	Millimeter						Kg/m	Anm.	I_x	I_y	W_x	W_y	i_y
Raufoss	Karmøy	A	B	T	R	r			cm ⁴	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm
0601		63.5	63.5	3.25		0.8	2.113		47.53	47.53	14.97	14.97	2.46
7026		65	65	3.5	1	2	2.330		54.64	54.64	16.81	16.81	2.52
5700	0703	70	70	4	f	1	2.851		76.92	76.92	21.98	21.98	2.70
	0754	75	50	5	f	2	3.098		84.24	43.46	22.46	17.38	1.94
	0750	76.2	44.45	3.18			1.963		55.76	23.61	14.64	10.62	1.90
	0752	76.2	50.8	3.18			2.072		61.15	32.17	16.05	12.66	2.05
	0755	76.2	50.8	3.25	1.6	2.4	2.107		62.30	32.75	16.35	12.89	2.04
	0753	76.2	76.2	3.25	0.4	0.4	2.560		84.28	84.28	22.12	22.12	2.98
	0756	77	77	2.7			2.170		73.93	79.93	19.20	19.20	3.04
5113		80	40	3	0.3	0.3	1.847		55.85	18.42	13.96	9.21	1.64
	0805	80	40	3	1	1	1.846		55.83	18.42	13.95	9.21	1.64
2763	0801	80	40	4	1	0.5	2.430		71.15	23.08	17.79	11.54	1.60
9715	0800	80	50	4	0.5	0.5	2.635		82.40	38.88	20.67	15.55	2.00
5701		80	80	4	2	2	3.300		117.28	117.28	29.32	29.32	3.11
	0803	80	80	5	0.7	0.7	4.050		141.2	141.2	35.31	35.31	3.07
5102		85	38	2	1	3	1.266		42.6	12.1	10.02	6.36	1.60
5105		88	38	2	0.5	1	1.315		47.74	12.70	10.85	6.68	1.61
7239		90	30	2.5	0.5	0.5	1.550		54.31	9.18	12.07	6.12	1.26
7026		90	90	4	1	2	3.720		170.4	170.4	37.86	37.86	3.52
	1002	100	18	2	3		1.252		46.78	2.66	9.36	2.96	0.76
2856		100	18	2			1.260		46.78	2.66	9.36	2.96	0.76
8370		100	20	2			1.254		48.70	3.39	9.74	3.39	0.85
	1009	100	25	2	4	6	1.281		53.24	1.34	10.65	1.07	0.54
	1007	100	27	4	3	7	2.478		101.20	2.86	20.23	2.12	0.56
9816		100	40	4			2.850		125.7	28.21	25.14	14.11	1.63
5977		100	50	2	0.2	0.75	1.580		77.54	26.40	15.51	10.56	2.13
	1000	100	50	2.5		2.5	1.943		95.15	32.03	19.03	12.81	2.10
5133		100	50	3	0.3	0.5	2.340		112.12	37.47	22.42	14.99	2.08



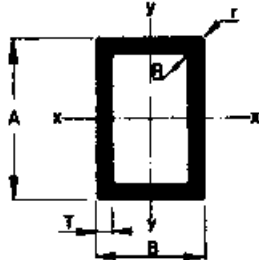
I = treghetsmoment
moment of inertia
W = motstandsmoment
section modulus
 $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{F}}$ = treghetsradius
radius of gyration

XFR	Millimeter						Kg/m	Anm.	I_x	I_y	W_x	W_y	i_y
Raufoss Karmøy	A	B	T	R	r			cm ⁴	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	
8538	100	50	4		0.5	3.070		144.1	47.41	28.83	18.96	2.04	
	1010	100	60	3	1	3	2.488	125.6	54.96	25.13	18.32	2.45	
5001	100	100	2				2.125	125.5	125.5	25.11	25.11	4.00	
9557	100	100	3	2	5		3.120	186.4	186.4	37.28	37.28	3.97	
2681	1005	100	100	4	1.5	5	4.095	231.60	231.60	46.32	46.32	3.91	
4012	1008	100	100	5	1.5	5	5.077	281.80	281.80	56.37	56.37	3.87	
	1013	100	100	6	1.5	4	6.059	330.64	330.64	66.13	66.13	3.84	
	1004	100	100	12.5	2	12.5	11.460	540.00	540.00	108.00	108.00	3.57	
	1003	101.6	44.5	2.54			1.933	116.48	31.04	22.93	13.97	1.85	
	1001	101.6	44.5	3.25			2.449	114.75	30.88	22.72	13.89	1.85	
	1006	101.6	50.8	3.25	1	4.5	2.516	125.50	37.98	24.70	14.95	2.02	
	1104	110	110	2.5	0.4	0.4	2.903	207.20	207.20	37.67	37.67	4.39	
	1101	113.16	113.16	2.33			2.789	211.55	211.55	37.39	37.39	4.53	
	1103	114	114	2.8	0.4	0.4	3.366	256.84	256.84	45.06	45.06	4.54	
	1100	114.3	114.3	2.03			2.461	191.57	191.57	33.52	33.52	4.58	
	1203	120	30	3	0.5	0.5	2.333	135.70	13.86	22.61	9.24	1.27	
6161		120	40	4	0.4	1.0	3.290	201.4	33.63	33.56	16.82	1.66	
	1201	120	60	2.5			2.360	166.93	56.56	27.82	18.85	2.54	
	1205	120	60	3.8	1.5	1.5	3.359	232.50	77.55	38.74	25.85	2.50	
	1206	120	76	3	6.5	9.5	2.967	224.30	98.35	37.38	25.88	2.99	
	1207	120	120	3	1	3	3.772	318.10	318.10	53.02	53.02	4.77	
	1204	120	120	5	1.5	5	6.157	501.10	501.10	83.51	83.51	4.69	
	1202	120	120	7	2	2	8.543	675.70	675.70	112.60	112.60	4.62	
	1200	122	30	2.5	5	1.5	2.037	120.29	12.22	19.72	8.14	1.29	
	1400	140	80	7	2	2	7.787	729.13	295.46	104.16	73.87	3.20	
7991		150	50	2.5		1	2.630	263.1	46.59	35.07	18.64	2.18	
9716		150	50	4			4.150	404.1	69.58	53.58	27.43	2.11	
	1500	150	50	5	0.5	1	5.128	491.54	81.17	65.54	32.47	2.07	

Juni -94

Profilene lagerføres ikke av oss.

67



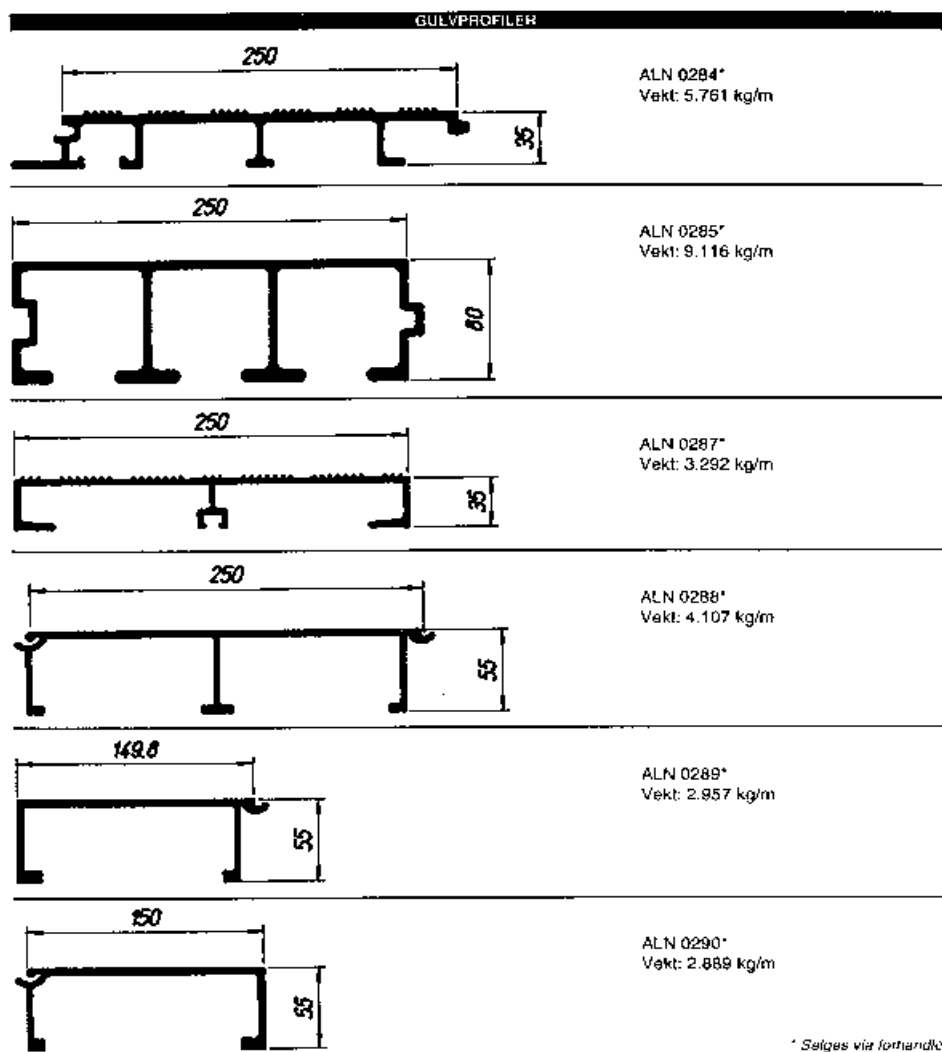
I = treghetsmoment
moment of inertia
W = motstandsmoment
section modulus

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{F}} = \text{treghetsradius} \\ \text{radius of gyration}$$

XFR	Millimeter						Kg/m	Anm.	I_x	I_y	W_x	W_y	i_y
Raufoss	Karmøy	A	B	T	R	r		cm ⁴	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	
1501	150	150	5	1.5	5	7.777		1006.6	1006.6	134.2	134.2	5.91	
1550	159.5	159.5	3.75		1	6.305		945.10	945.10	118.51	118.51	6.36	
1600	160	20	3			2.819		256.57	7.15	32.07	7.15	0.83	
1601	160	30	4	0.5	0.5	3.931		380.17	22.50	47.52	15.00	1.24	
1800	180	70	4.5	1	4	5.820		858.70	180.80	95.41	51.65	2.90	
2001	200	80	6	1.5	5	8.630		1565.00	341.40	156.50	85.36	3.27	
2002	200	90	4	5	5	6.091		1161.0	332.0	116.1	73.77	3.84	
2000	200	100	5	1.5	5	7.780		1518.00	439.20	151.80	98.63	4.14	

Nedenstående ekstruderede profiler er blot eksempler på mulighederne ved ekstrudering. Ved detailoplysninger bør en forhandler kontaktes. For forklaring af principperne ved ekstrudering og mulighederne iøvrigt henvises til kapitel 2 afnit 2.10 omhandlende ekstruderede profiler.

**HYDRO ALUMINIUM PROFILER
STANDARD PROFILER**



* Selges via forhandler

**HYDRO ALUMINIUM PROFILER
STANDARD PROFILER**

GULVPROFILER	
	<p>ALN 0234 Vekt: 3.639 kg/m Stillasplank</p>
	<p>ALN 0236* Vekt: 2.737 kg/m</p>
	<p>ALN 0237* Vekt: 3.615 kg/m</p>
	<p>ALN 0238* Vekt: 3.939 kg/m</p>
	<p>ALN 0239* Vekt: 4.752 kg/m</p>
	<p>ALN 0240* Vekt: 3.464 kg/m Trappetrinn</p>

* Selges via forhandler

**HYDRO ALUMINIUM PROFILER
STANDARD PROFILER**

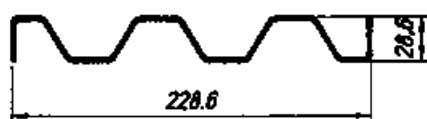
FISKEBINGER



ALP 5718
Vekt: 2.440 kg/m
Bingeprofil, side



ALN 0127
Vekt: 1.723 kg/m
Skottprofil



ALN 0133
Vekt: 1.921 kg/m
Skottprofil



ALN 0135
Vekt: 2.701 kg/m
Hyllaprofil, fiskebinger

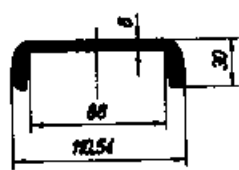
* Selges via forhandler

HYDRO ALUMINIUM PROFILER
STANDARD PROFILER

SKIPSBYGGING



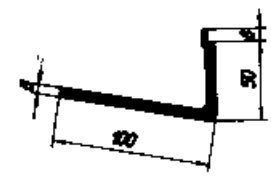
ALN 0701
Vekt: 3.925 kg/m
Rekkestøtte



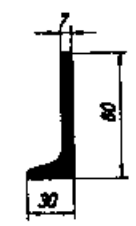
ALN 0702
Vekt: 2.792 kg/m
Rekkeprofil



ALN 0703
Vekt: 4.639 kg/m
Fenderprofil



ALN 0704
Vekt: 2.406 kg/m
Skrogprofil

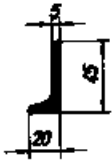


ALN 0705
Vekt: 2.052 kg/m
Platestiver

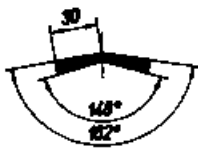
* Selgas wa forhandler

HYDRO ALUMINIUM PROFILER
STANDARD PROFILER

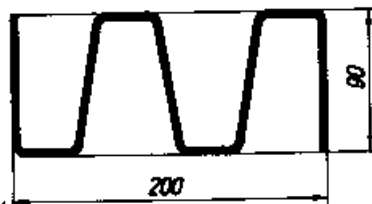
SKIPSBYGGING



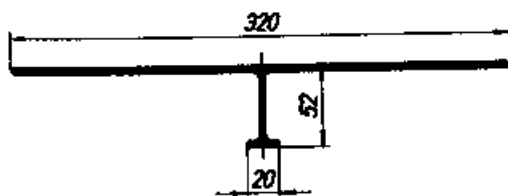
ALN 0706
Vekt: 0,845 kg/m
Platestiver



ALN 0707
Vekt: 1,069 kg/m
Bakhold for svel



ALN 0138
Vekt: 6,206 kg/m
Lasteromsprofil

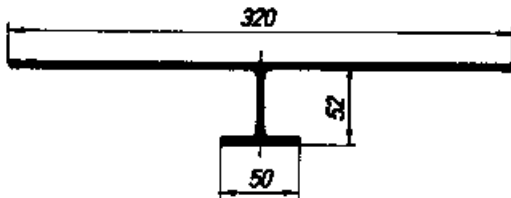


ALN 0709
Vekt: 4,045 kg/m

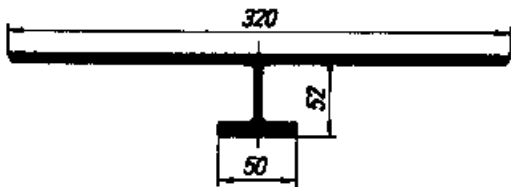
* Selges via forhandler

HYDRO ALUMINIUM PROFILER
STANDARD PROFILER

SKIPSBYGGING



ALN 0710
Vekt: 4.612 kg/m

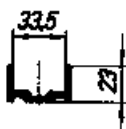


ALN 0711
Vekt: 6.791 kg/m

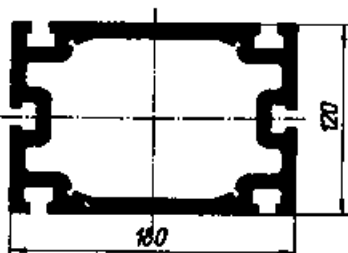
* Selges via forhandler

**HYDRO ALUMINIUM PROFILER
STANDARD PROFILER**

DIVERSE PROFILER



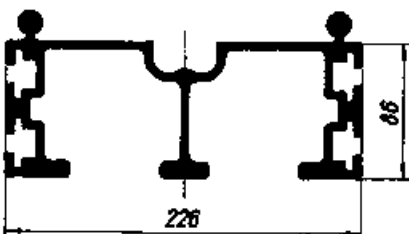
ALN 0105
Vekt: 0.687 kg/m
Streunderlag i korg



ALN 0141
Vekt: 16.725 kg/m
Traktor – Bærebjelke



ALN 0363
Vekt: 1.863 kg/m
Flytralle



ALN 0364
Vekt: 11.373 kg/m
Flytralle

* Selges via forhandler

9 Stikordsregister

A

Absorption.....410, 413, 594, 631
Accelereret prøvning.....737
Acceptkriterie48, 746
Acceptkriterier..48, 454, 551, 562, 608, 663
Acrylat.....791
Additivanlæg626, 630, 634, 637
Adhærend.....580, 581
Adhæsivt brud591
Adkomst.....558
Adkomstforhold19, 73, 141, 181, 182, 183,
236, 237, 238, 239, 240, 241, 245, 247,
272, 397, 429, 456, 557, 558, 562, 612,
662, 665
ADR-Norm.....615
Afbinding.....588, 599
Afbindingsmetoder595
Afskæringsgrænse.....687
Aggressive miljøer.....578
Akryl.....598, 600, 741, 742
Alarm-funktion.....731
Alkydmalinger.....741
Aluminiumlegeringers korrosionsbestandighed
.....725
American Bureau of Shipping52, 289
Anaerobe lime.....596, 598, 791, 795
Anodisering27, 277, 280, 405, 578, 593,
602, 603, 614, 631, 651, 736, 737, 738
Anodisering (eloxering)27, 277, 280, 405,
578, 593, 602, 603, 614, 631, 651, 736,
737, 738
Araldite® 2011.....585, 586
Arbejdsdiagram19, 20, 56
Arbejdskurve.....586, 588
Arbejds miljø298, 512, 578, 604, 623, 633,
769
Arbejds miljørisici.....769, 770, 789
Atmosfærisk korrosion.....732
Automatiseret svejsning.....299

Automobilbranchen.....574

B

Bagbeklædning til køleunit.....617, 618
Beach markings670, 672
Bearbejdning1, 2, 9, 13, 27, 51, 290, 501,
505, 511, 512, 513, 522, 523, 526, 556,
560, 601, 607, 648, 663, 693, 743
Begyndelsesstyrke589
Belastning581, 622
Belastningsfastsættelse48, 49, 55
Beregning af nominelle spændinger689
Beregningsmetode.....48, 680
Beskyttelsesgas24, 180, 303, 306, 309, 324,
329, 334, 338, 339, 343, 350, 351, 366,
367, 368, 372, 376, 378, 380, 381, 405,
410, 421, 426, 439, 514, 552, 554, 567,
571, 770, 777, 784, 785, 788
Argon.....368
argon/helium-blanding369
EN 439 klassifikation.....384
gasflow.....376, 379
Helium.....368
linser.....377
Bimetaller539
Bindemidler741
Bindingsfejl39, 140, 340, 341, 351, 352,
358, 360, 361, 368, 374, 454, 455, 456,
542, 3-550, 557, 560
Bitumenbaserede malesystemer714
Blødgødning.....6
Bolte- og nittesamlingers levetid.....712
Bolte samlinger193
Boltesamling193, 402, 403, 406, 641, 642,
643, 644, 645, 646, 652, 663, 665, 715
Boltesvejsning.....402
Brand24, 198, 200, 201, 202, 205, 206,
208, 209, 210, 213, 222, 223, 226, 229,
230, 770, 789, 790
Brandisolering.....24, 200, 206, 207

Brandisolering - opsætning	223
Brandkrav.....	23
Brandprøve	201, 202
Brandtekniske aspekter.....	200
Broværktøjsmetoden.....	126
Brud20, 28, 112, 400, 414, 440, 582, 583, 591, 592, 621, 629, 660, 672, 674, 679, 680, 687, 733, 747, 756, 759	
Brudfladen.....	670
Brudforlængelse...1, 7, 20, 23, 280, 417, 583	
Brudgrænse (R_m)7, 10, 11, 19, 20, 21, 56, 57, 74, 101, 106, 284, 719, 720, 807	
Brudmekanisk.....	591
Brudmekaniske beregninger.....	682
Brudspænding.....	17
Brudårsagen.....	671
BS 8118.....	459, 465, 559, 673
Bulestivere	68, 77, 92, 93, 95
Buling af søjler.....	61
Bulingsteori56, 61, 69, 76, 77, 80, 81, 88, 100, 107	
Bureau Veritas	52, 289
B-værdi.....	797
Bøjning14, 29, 37, 39, 40, 41, 42, 76, 226, 417, 580	

C

Carbonmonooxid	772, 773
Chromatering.....	27, 603
Chromsvovlsyreætsning.....	591
Chromsyreanodisering.....	591
Crash Tender.....	576
Cyanoakrylater	596
Cyklustælling.....	686

D

Damage tolerance	685
Damage tolerant design	47, 48, 701
Dampaffedtning.....	591
Dansk Standard.....	51, 667, 811
Deformationshærdning1, 2, 4, 6, 7, 8, 9, 12, 13, 267, 455, 753	
Design	558
Design by testing.....	685, 701

Design principper.....	47
Design-kategori	762
Designspektrum.....	686
Destruktiv testning.....	609
Det Norske Veritas52, 57, 59, 264, 615, 637, 676, 678, 679, 719, 720	
Detaljeklategori.....	687
Dimensionering17, 20, 22, 27, 47, 49, 50, 53, 56, 57, 59, 71, 74, 78, 79, 86, 87, 88, 91, 97, 101, 105, 106, 107, 112, 113, 116, 142, 211, 220, 252, 253, 256, 283, 459, 465, 579, 586, 588, 611, 649, 669, 672, 673, 685, 766, 782	
Direkte beregningsmetoder.....	54, 55
Diskontinuitet28, 142, 145, 151, 155, 156, 157, 158, 170, 184, 192, 686, 697, 699	
Doseringsanlæg	611
Driftmiljø.....	174
Driftsbetingelser	23, 24
Dræntank	625, 628, 634, 638
DS 41951, 260, 459, 465, 466, 467, 468, 472, 557, 559, 562, 663, 667	
DS/EN 30042	50, 260, 549
Dæmpning.....	421
Dæmpningsfaktor.....	25

E

Effektiv flange55, 56, 58, 59, 60, 75, 76, 77, 78, 89, 90, 92, 94, 100, 102, 104, 109	
Effektivt areal.....	582
Efterbehandling.....	607, 635
Egenfrekvens	25
Ekscentricitet	580
Ekstruderede profiler9, 14, 25, 27, 124, 125, 126, 127, 129, 417, 451, 483, 693, 844	
Ekstrudering (strengpresning)9, 14, 27, 124, 125, 126, 127, 129, 417, 483, 693, 844	
Elasticitetsmodul5, 16, 18, 19, 23, 25, 30, 35, 39, 44, 61, 67, 72, 73, 118, 480, 807	
Elastisk deformation.....	593
Elastiske lime	583
Elastiske limsamlinger.....	581, 629, 637
Elektrostatisk.....	743, 745
Elektrostatisk påføring.....	745

Elektrostatisk sprøjtning	743	Forbehandling	27, 198, 578, 588, 589, 590, 600, 602, 605, 610, 611, 614, 631, 713, 714, 736, 737, 738, 740, 746
Elforzinkede nitter	712	Fordampningstørrende	741
Eloxering (anodisering)	27, 603	Fordampningstørrende malinger	742
Emission	609, 798	Fordele	296, 303, 326, 406, 429, 509, 578, 597, 658, 659, 781, 782
E-modul	211, 220, 580, 581, 610, 756	Forholdsregler mod korrosion	706
Emulsionsmalinger	742	Forskydningsmodul	16, 807
Endelukninger	180	Forskydningssspænding	57, 75, 80, 106, 110, 151, 152, 258, 260, 580, 581, 582, 587, 649, 652, 809
Enkeltoverlapiplimsamling	580, 581, 582	Forskydningsstyrke	97, 260, 583, 624, 625, 660
Epoxy	196, 543, 585, 596, 597, 598, 599, 600, 604, 614, 620, 621, 636, 741, 743, 791	Forsætning	168, 3-550, 659
Erstatningsluft	780	Fortyndere	742
Euler's formel	61, 63	Frekvens betydning	753
Eurocode 947, 48, 50, 51, 116, 117, 118, 123, 202, 212, 217, 252, 254, 255, 256, 260, 262, 459, 465, 466, 467, 468, 469, 472, 549, 559, 613, 639, 647, 663, 667, 673, 685, 688, 689, 691, 701, 702, 717, 719, 747, 750, 760, 761, 762, 764		Friction Stir	137, 437, 438, 441, 442, 443, 444, 445, 448, 450, 451, 452, 453, 770, 771
EVA	743	Friction Stir svejsning	298, 437 mekaniske egenskaber
F			440
Fabrikspåførte belægninger	715	FTP (Fire Test Procedure) koden	204
Fail safe design	47	Fugeforberedelse	234, 274, 300, 421, 501, 502, 538, 560
FEM	54, 55, 113, 153, 674, 675, 676, 677, 680, 686	Fugegeometri	475, 484, 582
Fiksering	606, 612, 620, 623, 635	Fugetykkelse	581
Fiksturer	578	Fugetyper	528
Filiform korrosion	729, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 746	Fugt	26, 174, 176, 178, 180, 181, 198, 293, 404, 588, 592, 599, 609, 631, 665, 731, 734, 735, 737
Finite element analyse	586, 623	Fugt styring	731
Finite Element beregninger (FEM)	54, 55, 113, 153, 265, 674, 675, 676, 677, 680, 686	Fugtbeskyttelse	589
Fjerne forureningen på aluminiumoverfladerne	707	Fugtpåvirkning	738
Flydegrænse ($R_{p0,2}$)	1, 15, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 29, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 42, 56, 66, 89, 94, 285, 417, 441, 494, 756, 807	Funktionsanalyse	744
Flydende plaster	744	Funktionskrav	744
Flyindustrien	573, 609	Funktionsmæssige levetid	732
Fokker F27 Friendship	573, 574	Fysisk størknende lime	599
		Fysisk tørrende lime	599
		G	
		Galvanisk korrosion	25, 26, 27, 175, 176, 178, 193, 513, 539, 545, 578, 665, 706, 707, 709, 712, 717, 720, 723, 732

Generel korrosion707, 708, 723
 Generel korrosionsbeskyttelse707, 708
 Geometri.....55, 129, 676, 737
 Geometrisk spænding.....686, 809
 Geometrisk spændingskoncentrationsfaktor
686, 809
 Geometriske spænding145, 675, 676, 678,
 686, 689
 Germanischer Lloyd52
 Gitterkonstruktioner112, 113, 114, 115
 Gittersnit746
 Glasfiber53, 576, 577
 Glasomdannelsesstemperatur594, 737
 Grubetæring.....26, 175, 178, 706, 723
 Grundmaling.....740
 Grænseværdier774, 777, 797, 799
 Grå stær775

H

Havvand717, 720
 HAZ20, 21, 22, 29, 99, 137, 138, 188, 189,
 191, 256, 262, 263, 267, 268, 285, 304,
 412, 423, 440, 443, 459, 461, 463, 464,
 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472,
 551, 560, 683, 708, 728, 807
 HAZ-bredde.....459, 465
 SASAK-model.....467
 High-cycle-fatigue756
 Hjørneforbindelse133
 Hot spot spænding.....686, 689
 HSC (High Speed Craft) koden53, 200, 204,
 676
 Hud742, 774, 776, 784, 786, 788, 795
 Huller.....82, 83, 243
 Hvirvelsintring743, 745
 Hvirvelsnitring745
 Hybrid-svejsning411, 428
 Hydraulisk sprøjtning745
 Hæfte lime596, 600
 Hæftninger.....232, 238, 245, 542
 Hærder198, 595, 596, 597, 598, 599, 630,
 631, 648, 715, 741, 791, 793
 Hærdning2, 6, 7, 9, 11, 256, 269, 597, 599,
 606, 612, 620, 623, 634, 715, 741

Hærdningsgrader12
 Højstyrke aluminiumlegering.....720
 Højstyrke slibbestandige samlinger718
 Højtemperatur udmattelse756
 Hårde punkter112, 143, 145, 147, 148, 149,
 150, 152, 154, 155, 157, 158, 161, 164,
 181, 184, 186, 192, 454
 Hårdhed.....8, 25, 417, 461, 715, 737
 Hårdhedsgrad.....8

I

Ikke destruktiv inspektion578
 Ikke-bitumenbaseret system.....714
 Ikke-modningshærdbare legeringer6, 13, 267,
 283, 461, 464, 497
 Iltkoncentrationselement733
 IMO53, 200, 204, 264
 Indtrængningen462
 Indvendig header til tag617, 621
 Inertiradius.....118
 Infinite life design.....47, 48
 Inspektion.....260, 548, 695, 697, 699, 718
 Inspektion og sikkerhed718
 Instabilitet61, 76, 79, 107, 172, 757
 Interkrystallinsk korrosion.....724, 726
 IR.....775, 777, 784
 ISO51, 201, 264, 280, 283, 288, 289, 311,
 314, 393, 423, 433, 504, 551, 559, 613,
 615, 622, 647, 737, 746

J

Jern (Fe).....5, 596, 665, 735, 736
 Jævnstrøm304, 308, 309, 311, 312, 313,
 322, 323, 390, 400, 405, 507, 779

K

K,675
 Kantbelastning....67, 87, 105, 106, 110, 111
 Kantsøm136, 143, 180, 192, 197, 233, 262,
 271, 272, 283, 297, 318, 319, 342, 346,
 351, 353, 362, 365, 371, 372, 374, 386,
 388, 411, 445, 455, 463, 470, 477, 479,
 481, 482, 487, 495, 537, 541, 554, 562,
 808

Kantsømme	180, 184, 188, 192, 197, 233, 236, 257, 258, 262
Kastninger	97, 577, 578, 618, 626, 634, 743
Katamaranfærge	574
Katodisk beskyttelse	26, 176, 177, 178, 720, 721, 722, 730, 760, 764
Kemisk hærdende	599, 741
Kemisk hærdende lime	599
Kemisk oxidation	738
Kemiske påvirkninger	588
Kileprøve	592
Klassifikations­selskabers regler	51, 52, 565
Klipesamling	133
Klorkautsjuk	742
Klæbe/Limsamlinger	718
Klæbeteknologi	576, 617
Knæklinier	143, 172
Kobber (Cu)	3, 4, 5, 281, 710, 711
Koldmodning	10, 11, 461
Kompositbranchen	577
Konstant amplitude udmattelsesgrænse	687
Konstant amplitude	686
Konstruktionsdetaljer	142, 182, 562, 617, 674, 747
Konstruktive kærve	673
Konstruktive udformning	672
Kontinuitet	140, 141, 143, 160, 161, 162, 164, 165, 168, 605
Kontinuitetsmåling	732
Kontrol	204, 261, 337, 456, 482, 543, 555, 663, 664, 703, 745
Kontrolmetoder	555, 608
Kontrolspecifikation	746
Konverteringsbelægning	738
Korrosion	4, 25, 26, 27, 49, 143, 174, 175, 176, 177, 178, 193, 230, 280, 298, 513, 539, 545, 3-550, 556, 560, 578, 589, 593, 655, 665, 672, 673, 685, 706, 707, 708, 709, 711, 712, 717, 720, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 740, 743, 744, 746, 747, 748, 749, 750, 752, 753, 759, 764
Korrosionsbeskyttelseskoncepter	731
Korrosionsformer	723
Korrosions­hastighed	732
Korrosions­skader	727, 731
Korrosionsudmattelse	747, 748, 753, 755, 759, 760, 766
Korrugerede plader	13, 56, 58, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 104, 105, 106, 107, 110, 164, 165, 166, 167, 190
Kraftoverførende svejste samlinger	691, 699
Kritisk bulespænding	43, 67, 69, 76, 78, 91, 92, 95, 96, 101, 111, 809
Kritiske detaljer	680
Krom (Cr)	5, 725, 738
Krumpanel	85
Krybning	593, 594
Krydsende elementer	134, 147, 168
K_t	676
K_{t_0}	675
Kvalitetskrav	548, 615, 663
Kvalitetssikring	607
Kvalitetssikring af mekaniske samlinger	2, 49, 50, 51, 136, 260, 261, 342, 359, 395, 400, 401, 428, 440, 548, 3-550, 593, 607, 608, 613, 632, 662, 663, 746, 780
Kvalitetsstyring	548, 607, 608, 662
Kæntreknæ	84, 86
Kærvfølsomhed	24
Kærvspændingen	675, 678
Kølecontainere	iv, 141, 231, 248, 616, 617, 621, 625, 656
Køletrailer	577
L	
Lagdelingskorrosion	724
Lagdelingskorrosion (exfoliation)	5, 9, 417
Lagtykkelsesmåling	746
Langtidsegenskaber	588
Langtidsstyrke	589
Laser	296, 298, 299, 301, 408, 410, 411, 412, 421, 423, 424, 428, 429, 433, 434, 435, 436, 461, 501, 502, 503, 505, 565, 569, 777, 778, 784, 799, 800
Laser-svejsning	298, 408
CO ₂	417

Hybrid	428	MAL27, 583, 607, 631, 632, 633, 635,	
YAG	423	714, 722, 732, 736, 742, 790	
Lastbegivenhed	685	Maling27, 178, 179, 195, 206, 298, 404,	
Lastcykler.....	620, 621, 672	456, 545, 3-550, 593, 614, 634, 712,	
Lastoverføringsmekanismer	580	713, 714, 715, 716, 718, 721, 722, 732,	
Lateral belastning58, 71, 79, 85, 91, 97, 105,		737, 738, 740, 741, 742, 746, 760, 764	
150		Malingsystem.....	740, 746
Lavtemperatur udmattelse.....	756	Mangan (Mn)	3, 4, 280
Legering1, 9, 13, 693, 695, 697, 699, 752,		Manuel lysbue.....	298
787, 811		Marin test.....	709
Legeringsbetegnelse	5	Massefylde16, 208, 219, 226, 228, 366,	
Legeringsvalg	719	368, 372, 376, 379, 380, 460, 807	
Let sandblæsning.....	738	Massestrøm.....	798
Lette lastbærende konstruktioner.....	573	Materialeegenskaber1, 16, 17, 29, 128, 143,	
Leveringstilstande.....	5, 17	152, 188, 565, 579, 585, 586	
Levetid47, 48, 49, 142, 145, 174, 249, 313,		Materialeomkostninger.....	28
344, 349, 367, 393, 520, 588, 590, 618,		Mattering ved sandblæsning	738
620, 622, 629, 631, 673, 679, 687, 701,		Mekanisk afprøvning	627
706, 707, 712, 714, 715, 720, 732, 740,		Mekanisk fugeforberedelse	523
747, 764, 810		Mekanisk Interlocking639, 647, 648, 649,	
Levetidsforsøg	591	667	
Limfamilier.....	594	Mekaniske egenskaber	284, 440, 649
Limfugegeometri.....	578	Mellemmaling.....	740
Limning.....	573, 709, 789	Metal-til-metal.....	712, 713
Limningsteknologi.....	574	MIG50, 233, 234, 236, 238, 239, 256, 770,	
Limsamling198, 573, 574, 578, 579, 580,		771, 772, 773, 777, 778, 781, 782, 787,	
581, 582, 585, 586, 588, 589, 591, 594,		789, 798, 805	
600, 601, 608, 609, 610, 612, 613, 614,		MIG-svejsning.....	297, 338
615, 621, 629, 633, 637, 789		bueform.....	340
Litium (Li).....	5	svejsedata.....	362
Lloyd's Register.....	52	udstyr	353, 355
Loftværdi.....	774	MIG-tandemsvejsning.....	344
Lokal buling	60, 93	anvendelse.....	346
Lotus Elise.....	575	fugetolerancer	353
Luftforurening770, 771, 774, 780, 785, 787,		Miljø.....	702
789, 790, 791, 793, 794, 795, 796, 797,		Modelforsøg.....	616
801		Modificeret nominel spænding.....	686
Lys298, 411, 413, 503, 596, 742, 743, 774,		Modning6, 9, 10, 11, 20, 268, 284, 285,	
775, 776, 777, 784, 787, 788, 805		441, 726	
Længdekrympning.....	233	Modningsgrader.....	12
Længdeudvidelseskoefficient	24	Modningshærdbare legeringer6, 9, 13, 178,	
M		267, 268, 269, 281, 283, 284, 461, 464,	
Magnesium (Mg).....	3, 4, 8, 280, 452, 726	496, 600	

Modningshærdning	1, 2, 4, 5, 6, 9, 10, 12, 13, 268, 417, 418, 455, 726, 748, 756
Modstandssvejsning	300, 389, 390, 391, 396, 398, 399, 402, 407, 559, 770, 771
Modstands-svejsning	298, 389
elektroder	392
konstruktionsudformning	397
svejsedata	399
udstyr	399
N	
Nedbrydningsmekanismer	590
Nikkel (Ni)	5
Nippon Kaiji Kyokai	52
Nitrøse gasser	505, 771, 772, 773
Nitter	640, 663, 664
Nittesamling	253, 577, 639, 640, 642, 643, 644, 654, 655, 656, 663, 664, 667, 710, 711, 712, 713, 716
Nomenklatur	807
Nominal spænding	145, 675, 685, 686, 688, 689, 695, 697
Non Destructive Inspection	574, 578, 608, 609, 615
Normer	48, 558, 613
Normer og standarder	48, 558, 613
Nøgletal	633
O	
OCD-cirkelforhold	129, 130
Offeranode	177, 731
Offeranoder	26, 177, 721, 722, 731
Opløsningsmidler	742
Opløsningsglødning	6, 9, 10, 11, 12, 268, 284, 285, 461
Opløsningshærdning	4, 6
Opløsningsmidler	594, 602, 741, 742, 744, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 800
Opstilling/hæftning	232, 243
Osmotiske effekter	738
Overfladebehandling	27, 86, 174, 178, 545, 561, 600, 603, 607, 610, 614, 631, 708, 711, 732, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 743, 745
Overfladebeskyttelse	712
Overfladekonvertering	603
Overfladespænding	416, 426, 601, 607
Overhærdning	11
Overlap	223, 467, 561, 580, 581, 620, 654
Overlejret korrosivt angreb	747
Overmaling	583
Overmalingsinterval	741, 742
Overmalingsintervaller	741
Overmodning	12
Oxid kærve	139
Oxidfilm	505, 509, 510, 512, 522, 706
Oxidoverflade	593
Oxydlagets tykkelse	738
Oxygen affinitet	25
Ozon	298, 371, 558, 770, 771, 772, 773, 774, 781, 782, 784, 785, 786, 787, 788
P	
PABST	573
Passivfilm	750
Peeling (Skrælning)	580, 582, 584
Peelspænding	580, 581, 582, 584
PEH	743
PEM	743
Penselpåføring	745
Phenolepoxy	589
Phosphorsyreanodisering	591, 593
PH-værdier	25, 706, 723
Pigmenter	741, 742
Pitting	26, 175, 178, 723, 740
Pitting (grubetæring)	26, 175, 178, 706, 723, 740
Plasma	154, 197, 236, 282, 295, 296, 297, 299, 301, 323, 324, 333, 334, 366, 380, 384, 403, 410, 411, 417, 428, 461, 490, 506, 518, 553, 556, 565, 566
Plasma-svejsning	297, 322
gasser	329
svejsedata	329
svejsifikstur	334
teknikker	324

udstyr326
 wolframelektroder.....329
 Plastbelægning743, 744
 Pneumatisk sprøjtning745
 Polyamid 11 og 12.....743
 Polyuretan.....198, 619, 621
 Polyurethan.....598, 599, 600, 741
 Porettest746
 Potentialstyring.....722, 731
 Primer27, 588, 593, 597, 598, 602, 603,
 610, 634, 714, 738, 743, 744, 791
 Proces- og kvalitetskontrol.....574
 Produktionsfaciliteter115, 578, 609, 610,
 664
 Produktionsmæssige aspekter115, 154, 165,
 166, 190, 236, 242, 243, 326, 555, 633
 Produktionsomkostninger27, 617
 Produktionstider.....238, 634
 Profil tabeller.....813
 Profiler.....813
 Profiludkap147
 Prøvning51, 203, 258, 260, 593, 609, 615,
 628, 718, 737
 Pulverbelægning715, 745
 Pulvere743
 Punktudsug787
 Påføring.....603, 605, 623, 634, 745
 påføring af lim.....588, 605, 611
 Påtrykt spænding177

R

Racking620, 622
 Rain-flow.....679
 Randbetingelse.....468, 469, 674
 Rastelinier.....672
 Reaktionshærdende.....741
 Referencer264, 269, 274, 294, 300, 320,
 337, 364, 385, 407, 434, 453, 458, 473,
 491, 500, 536, 547, 564, 572, 636, 667
 Referenceudmattelsesstyrke.....687
 Relativ deformation143, 173
 Ren aluminium.....1, 590, 725
 Rengøring.....635, 713, 714
 Renhed.....380, 382, 578, 610, 623

Reparation28, 452, 454, 551, 554, 556,
 557, 608, 609, 614, 682
 Reparation af en svejsning682
 Reparationer.....454, 557, 614
 Restbrud.....670, 671
 Retning af aluminium.....493
 Revneinitieringsproces.....749
 Revnevækst.....680
 Risiko analyse.....210
 Rullepåføring.....745
 Rustgrader.....740
 Røg202, 203, 206, 207, 210, 290, 292, 505,
 558, 568, 770, 771, 772, 781, 782, 787
 Rørekstrudering.....126

S

Safe life design.....47, 685, 687, 688, 701
 Salttågetest.....709, 746
 Samlingselement.....118, 640, 641, 643, 646
 Samlingsmetode.....242
 Samlingsrækkefølge238
 Sandsvirpning738
 Sandwich.....195, 617, 637, 656
 Scandium (Sc).....5
 SGA-lime596, 793, 795
 Shot peening.....759
 Sikkerhed48, 51, 52, 53, 64, 115, 210, 287,
 295, 340, 341, 355, 498, 512, 565, 574,
 582, 583, 591, 603, 604, 610, 636, 660,
 664, 670, 718, 762, 769, 770, 777
 Sikkerhedstid.....777
 Silicium (Si)3, 4, 280, 726
 Silikonelime596, 598
 Skruesamling133, 223, 598, 639, 650, 651,
 652, 667
 Skruespor.....132
 Skrælning (Peeling)580, 582, 584
 Skæring.....27, 501, 503, 504, 544, 556
 abrasiv vandstråle518
 laser502
 plasma.....505
 Slagpåvirkning.....580, 584
 Slankhedsforholdet62, 63, 64, 66, 90, 94,
 107, 111, 116, 117, 118, 119, 120, 122

Slipmekanisme	669	Stive lime	583
Slutkontrol.....	746	Stivhed16, 72, 85, 112, 137, 169, 238, 359,	
Slutmaling	740	447, 475, 476, 482, 558, 578, 579, 581,	
Smeltelime	594, 596, 599	582, 583, 587, 610, 683	
Smeltepunkt1, 16, 23, 207, 268, 302, 312,		Strengpresning (ekstrudering)	27
391, 504, 551, 594, 743, 745		Stråling413, 506, 588, 769, 770, 772, 774,	
Smøring.....	712	775, 776, 777, 784, 786, 787, 788, 789,	
SN-kurver145, 146, 628, 629, 674, 678,		805	
679, 680, 682, 748, 755, 756		Stumpsvejsninger	192, 236, 259, 263
SOLAS-konventionen200, 202, 203, 204,		Stumpsøm236, 259, 263, 270, 295, 470,	
264		478, 543	
Spaceframe.....	575	Styrke15, 17, 21, 277, 283, 3-550, 578,	
Spaltekorrosion.....	26, 175, 178, 712, 724	649	
Specialkøretøjer	576	Styrke af boltesamling88, 89, 115, 116, 117,	
Sportsvogne.....	457, 574, 575	123, 194, 253, 255, 258, 260, 262, 263,	
Sprængplatede profiler (bimetal)25, 26,		640, 642, 643, 645, 646, 647	
193, 194, 195, 196, 197, 198		Styrkeforhold.....	812
Sprødhed	23	Styrketab.....	459, 464
Spændingsamplituden.....	674	HAZ.....	459
Spændingscyclus	686	varmretning.....	496
Spændingsdal.....	686	Støbelegeringer.....	2, 3, 4, 268, 269
Spændingsfordeling	198	Støj	493, 505, 770, 778, 779, 799
Spændingshistorie	686	Støtteskodder68, 69, 77, 79, 87, 88, 89, 90,	
Spændingsintensitetsfaktor.....	680	91, 92, 93, 94, 96, 106	
Spændingskoncentration24, 158, 171, 180,		Submikroskopiske strukturer.....	748
186		Substitution.....	618, 774, 780
Spændingskoncentrationsfaktor145, 675,		Svejsedeformationer	233, 475, 554
678, 686, 689, 809		længdekrympning.....	480
Spændingskorrosion26, 175, 178, 417, 725,		minimering	482
766		tværkrympningen.....	478
Spændingsniveau17, 20, 56, 57, 58, 59, 145,		vinkelknæk	476
147, 149, 151, 154, 168, 180, 185, 186,		Svejsfejl28, 50, 186, 333, 360, 361, 413,	
415, 591, 683		424, 427, 454, 455, 525, 549, 551, 560,	
Spændingsspektrum.....	686	565	
Spændingstop	686	bindingsfejl.....	352, 553
Spændingsvidde.....	628, 686, 687	indeslutninger	553
Spændingsviddens størrelse.....	672	porer	394, 413, 552
Spændingsændringspunkt.....	686	sidekærv.....	554
Stabilitet17, 19, 56, 59, 67, 77, 79, 80, 91,		varmrevner	277, 282, 414, 551
111, 115, 142, 223, 330, 411, 428, 430,		Svejsfikstur	334
448, 593, 733, 772		Svejsglas.....	784, 786, 787, 788
Standarder48, 51, 71, 74, 213, 217, 459,		Svejseshastighed233, 234, 247, 297, 303,	
465, 549, 557, 558, 559, 580, 613		304, 306, 309, 318, 331, 332, 333, 334,	
Stiv limsamling.....	580, 582	342, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 369,	

372, 373, 374, 376, 412, 417, 421, 422, 423, 425, 428, 429, 431, 433, 439, 440, 463, 469, 542, 553, 565	jævnstrøm308
Svejskvalitet.....549	puls310
Svejselighed.....267	svejsedata.....317
ikke-modningshærdbare legeringer267	udstyr314
modningshærdbare legeringer268	vekselstrøm307
støbelegeringer.....268	Tilladeligt spændingsniveau.....56, 57
Svejseophobninger.....143, 152, 185	Tilsatsmateriale275
Svejseparametre233, 238	Indflydelse på svejsedata285
Svejserækkefølge231, 233, 485	legeringstyper.....280
Svejsesamlinger252, 256, 270, 272, 273, 463, 673, 684, 685, 691, 701	modningshærdbart283
adkomstforhold.....272	opbevaring.....293
Svejseøjne.....775, 777, 786, 788, 789	røgtest.....290
Svejste detaljer691	shaving287
Svingninger25, 307	valg af.....277
Svovlsyreanodisering.....591	varmrevnetilbøjelighed277
Symboler807	Titanium (Ti)5, 281
Søfartsstyrelsen.....i, 52	Transportbranchen.....577
Søjlebelastning.....79, 97, 105, 106	Transverse normalspænding580, 587
Søjler19, 22, 23, 29, 43, 44, 56, 61, 62, 66, 88, 89, 90, 106, 107, 114, 119, 123, 154, 155, 162, 163, 170, 198, 199, 224, 226, 227, 230, 437	Transverse normalspændinger580
Søjlereduktionsfaktor.....120	Tripknæ.....77, 80, 81, 82
T	Tripping.....79, 80, 86
Tankvogne..... iii, 451, 617	Tryk22, 29, 31, 74, 76, 79, 92, 106, 128, 195, 358, 359, 381, 383, 391, 403, 520, 521, 3-550, 588, 590, 606, 620, 632, 635, 734, 745, 794, 807
Taper.....161, 169	Trykstænger29, 31, 33, 35, 36, 115, 116, 117
Tekniske rapporter265, 274, 294, 300, 320, 337, 364, 388, 407, 436, 453, 458, 474, 491, 500, 538, 564, 572, 637, 667, 766	Trækspændinger26, 168, 173, 178, 185, 268, 475, 669, 725
Temperatur201, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 216, 218, 221, 222, 224, 225, 226, 229, 744, 779, 791	Trådelement733
Temperaturbestandighed23	Turboudstyr783
Termisk udvidelses-koefficient.....16	Tværkrympning.....233
Termohærdende pulvere.....743	Tværsnitsdata ..100, 101, 102, 104, 106, 113
Termoplastiske.....743	Tørrende lime594, 595, 599
Testede nitter710, 711	U
TIG50, 256, 720, 770, 771, 772, 773, 778, 781, 782, 785, 786, 805	Uddannelse.....560, 561, 613, 665
TIG-svejsning296, 302	Udhærdning.....612
	Udkap73, 82, 143, 151, 152, 153, 154, 158, 171, 172, 175, 179, 180, 185, 236, 238, 482
	Udmattelse24, 49, 55, 142, 145, 442, 454, 549, 3-550, 557, 669, 670, 671, 672,

682, 684, 685, 687, 689, 701, 747, 753,
755, 756, 757, 766, 810

Udmattelse i svejste konstruktioner.....669

Udmattelsesegenskaber24, 145, 573, 574,
578, 759

Udmattelsesgrænse ..687, 749, 757, 760, 764

Udmattelseskurve.....687

Udmattelseslast.....685

Udmattelseslevetid683

Udmattelsesproblematik682, 683

Udmattelsespåvirket konstruktion.....747

Udmattelsesrevne47, 48, 142, 454, 669,
670, 672, 673, 683, 687, 747, 748, 750,
756, 757, 759

Udmattelsesskade687

Udmattelsesstyrke24, 49, 128, 143, 180,
455, 556, 557, 673, 675, 687, 702, 752,
753, 756, 757, 758, 759, 760, 762, 764

Udmattelsestal.....687, 691, 701, 705

Udmattelsestest.....458

Udsugningsarme.....781, 786, 787

Ulemp99, 154, 191, 192, 295, 296, 303,
326, 328, 347, 372, 406, 412, 428, 493,
497, 509, 578, 597, 617, 634, 720

Ulineære beregningsmodeller.....588

Ultraviolet stråling588, 774

Underkorrosion.....729, 746

UV298, 506, 596, 744, 772, 774, 775, 776,
777, 784, 786, 788, 789

UV-hærdende lime.....596

V

Valg af lim.....594, 614, 623, 631

Valg af limproces565, 634

Valg af limtype.....623, 631

Valg af proces.....565, 634

Valselegeringer2, 3, 8, 15, 269, 496, 499,
650, 651

Variabel amplitude686

Varmehærdning.....124, 597

Varmeledningsevne1, 24, 180, 207, 216,
335, 336, 366, 368, 369, 371, 391, 411,
460, 499, 503, 508, 510, 807

Varmepåvirkede zone (HAZ)20, 21, 22, 29,
99, 119, 137, 138, 143, 184, 188, 189,
191, 253, 256, 262, 263, 267, 268, 285,
304, 404, 412, 415, 423, 440, 441, 443,
455, 459, 461, 462, 463, 464, 465, 466,
467, 468, 469, 470, 471, 472, 551, 560,
682, 683, 708, 728, 807

Varmepåvirkning460

gentagne466

svejseprocesser461

Varmereaktivérbare lime596

Varmhærdende.....588

Varmhærdning.....11, 597, 793

Varmmodnet284

Vedhæftning588, 589, 590, 593, 597, 607,
609, 623, 631, 633, 713, 737, 740, 741,
743, 746

Vekselstrøm304, 307, 308, 309, 310, 311,
312, 313, 314, 322, 323, 368, 390, 400,
779

Ventilation560, 774, 780, 782, 790, 793,
794, 799

Vibrationer25, 342, 598, 689

Vinkelknæk234, 236, 477, 478, 479, 483,
490, 494, 495, 497, 498, 499, 528, 3-
550, 554

Vinyl.....742

Vinylester744

Visuel inspektion.....608, 670, 727

Væremidler.....604, 607, 610, 802

W

Webbuling.....81, 82, 83

Webstivere81, 82, 83

Wolframelektroder.....311

Wöhler kurver748

Z

Zink (Zn)3, 4, 5, 281, 717

Æ

Ækvivalent spændingsvidde687

Ækvivalent udmattelsesbelastning687

Ældning.....10, 284, 441, 588

Æstetisk levetid732

Ø

Øjne774, 776, 784, 786, 788, 793, 795
Økonomiske aspekter559, 565
Økonomiske konsekvenser.....559, 613, 665

Å

Åbentid.....585, 603, 610, 611, 612
Åndedrætsværn771, 780, 781, 782, 783, 784,
786, 787, 788, 790, 799, 800, 803
AA-systemet (American Aluminium
Association).....2, 3, 4, 5, 7, 12