

Dokument: SASAK-RAP-LE-AKS-FI-0009-04

# **Korrosionsudmattelse af aluminium**

SASAK  
Levetid - 7

Slutrapport

Curt Christensen

FORCE Instituttet, maj 2001

## Indhold:

1	Indledning .....	3
2	Formål og overordnet forsøgsplan.....	3
3	Beskrivelse af forsøgsopstilling.....	4
4	Detaljeret gennemgang af forsøg .....	5
4.1	Serie 1: Basismateriale i luft.....	5
4.2	Basismateriale i havvand .....	7
4.3	Serie 3: Effekt af svejsning .....	8
4.4	Serie 4:Effekt af overlejrede egenspændinger .....	10
4.5	Serie 5: Effekt af R-forhold .....	12
4.6	Serie 6: Effekt af katodisk beskyttelse.....	14
5	Sammenfatning .....	16

Bilag1: Skitse af forsøgsopstilling

## 1 Indledning

Udmattelsestyrken af dynamisk påvirkede konstruktioner afhænger bla. af materialevalg, geometri, samlingsmetode og ikke mindst kvalitet af samlingerne og overfladernes beskaffenhed.

Dette er velkendt for aluminiumskonstruktioner i luft og der findes udbredte data til belysning heraf i form af SN-kurver, der beskriver sammenhængen mellem belastningsniveau, S, og levetiden, N, (levetid defineres som antal påvirkninger til brud), bla. Eurocode 9. SN-kurverne antyder, at der findes en udmattelsesgrænse, forstået således, at hvis belastningsniveauet er under en vis værdi, vil der ikke opstå udmattelsesbrud.

Det er også velkendt, at havvand kan være korrosivt overfor aluminium og at korrosion kan nedsætte udmattelsestyrken i en sådan grad, at der i mange tilfælde ikke vil kunne findes nogen egentlig udmattelsesgrænse. Problemet med korrosions indvirkning på udmattelse er imidlertid, at man ikke ved præcis, hvor stor den er. Eurocode 9 foreskriver en metode til "nedskrivning" af den tilladelige spændingsamplitude efter arbitrære regler. Denne metode må nok anses for at være konservativ, men præcis hvor konservativ vides ikke, ligesom det heller ikke vides, hvorvidt korrosionsbeskyttende foranstaltninger, som katodisk beskyttelse i havvand, vil indvirke positivt eller negativt på udmattelsestyrken.

## 2 Formål og overordnet forsøgsplan

I et projekt, der omhandler sammenføjning af store svejste aluminiumskonstruktioner (skibe, broer o.lign), vil det derfor være naturligt at undersøge svejste samlingers udmattelsestyrke i havvand med, og uden, katodisk beskyttelse.

Resultaterne i dette projekt skal helst munde ud i direkte brugbare data, der enten påviser, at Eurocode 9 er overkonservativ eller ikke-konservativ. Derfor er det valgt at gennemføre en række forsøg med et enkelt materiale (EN AW 6082-T6), baseret på SN-kurver, hvor de betydningsfulde parametre for korrosionsudmattelse i havvand og udmattelse under katodisk beskyttelse vil blive belyst og sammenlignet med SN-kurver gældende for luft.

Der er benyttet samme forsøgsopstilling såvel til luft- som til korrosionspåvirkede forsøgsemner, således at eventuelle maskinspecifikke forskelle i udmattelsesresultaterne ikke skal påvirke

sammenligningen. Dermed er en af de mere betydende årsager til spredning mellem resultater blevet elimineret.

Ud fra kendskab til frekvensens indflydelse på korrosionsudmattelse på andre materialer, gennemførte FORCE Institutet nogle indledende udmattelsesforsøg i 1-akset træk med aluminium. Forsøgene er tidligere rapporteret i SASAK regi og resultaterne viste, at man bør benytte en udmattelsesfrekvens på  $< 0,2$  Hz, for at korrosionens indflydelse på resultaterne skal slå igennem. Frekvenser på  $< 0,2$  Hz svarer samtidig også til bølgefrequensen i f. eks Nordsøen ( $= 0,167$  Hz), hvilket yderligere gør forsøgene mere realistiske. Hvis der benyttes højere frekvenser, vil udmattelsesstyrken nærme sig værdierne i luft og forsøgene ville dermed være overflødige.

Der benyttes konstant gennemiltet kunstigt havvand ved stuetemperatur. Vandet er udskiftet hver 3.dag for at hindre evt. algevækst eller bakteriel aktivitet. Der er lavet kontrolforsøg med såvel kloreret havvand, som UV-behandlet vand. Disse forsøg har bekræftet, at algevækst og/eller bakteriel aktivitet, ikke har haft nogen påviselig indflydelse på korrosionsforholdene i den benyttede forsøgsmetodik.

Vi har undersøgt effekten af mikrostrukturer, opstået ved svejsning, effekt af middelspænding, effekt af egenpændinger samt effekt af shot peening. I hvert forsøg elimineres effekten af geometri ved at benytte glatbearbejdede prøveemner med en ensartet overfladekvalitet, (opnået ved slibning af overfladen), så resultaterne kan sammenlignes parameter for parameter.

Vi har undersøgt effekten af katodisk beskyttelse i kunstigt havvand med og uden indflydelse af bortspuling af gasbobler (hydrogenbobler) fra emneoverfladen. Elektrokemiske målinger viste visse uregelmæssigheder i form af potentialeskift mellem anode og katode. Forsøgsresultaterne er derfor valideret gennem supplerende forsøg, kørt med naturligt havvand for at eliminere mistanken om, at katodisk beskyttelse i kunstigt havvand skulle være årsagen til de observerede uregelmæssigheder.

### **3 Beskrivelse af forsøgsopstilling**

Bilag 1 viser en principskitse af 4-punkts bøjning sammen med formler til bestemmelse af spændinger i emnet, samt nedbøjning som funktion af de pålagte kræfter.

Ud fra de ønskede spændingsamplituder indstilles excentrikken til den beregnede nedbøjningsamplitude. Der finjusteres ved at måle kræfterne med de indbyggede vejeceller. De indstillede værdier holdes indenfor  $\pm 5\%$  ved manuel justering efter behov som følge af evt. stivhedsændringer i prøveemnet og sætninger i understøtninger m.m).

Prøveemnet kan holdes totalt neddykket i vand med konstant gennembobling med luft.

I forbindelse med forsøg med anodisk/katodisk belastning af emnerne, kan der måles sammenhængende potentialer og strømforbrug.

Alle måledata, dvs kræfter og elektrokemiske data, registreres on-line ved hjælp af datalogger og en tilknyttet computer.

Der er benyttet kunstigt havvand efter ASTM D 1141 (u. tungmetaller). Vandet er udskiftet hver 3. dag. Temperaturen har været mellem 20 og 25 °C under hele forsøgstiden.

I forbindelse med forsøgene med katodisk beskyttelse er der også benyttet naturligt havvand.

Prøveemnerne er bearbejdet på alle flader. På træksiden er der altid fjernet mindst 2 mm for at eliminere eventuel indflydelse fra fremstillingsvalsningen. Træksiden er derudover vådslebet på korn 320 og kanterne er rundet.

## 4 Detaljeret gennemgang af forsøg

### 4.1 Serie 1: Basismateriale i luft

Forsøgsresultaterne er summeret i tabel 4.1. Udfra de indledende udmattelsesforsøg i ref. 1 blev der valgt et sæt belastninger. Det viste sig imidlertid, at udmattelsesstyrken i 4-punkts bøjning er betydeligt højere end i 1-akset træk.

**Tabel 4.1: Udmattelse i luft**

Test metode	Emne nr.	Spændingsamplitude i Mpa	Antal påvirkninger til brud
1-akset træk	1	100	>1.000.000
1-akset træk	2	120	>1.000.000

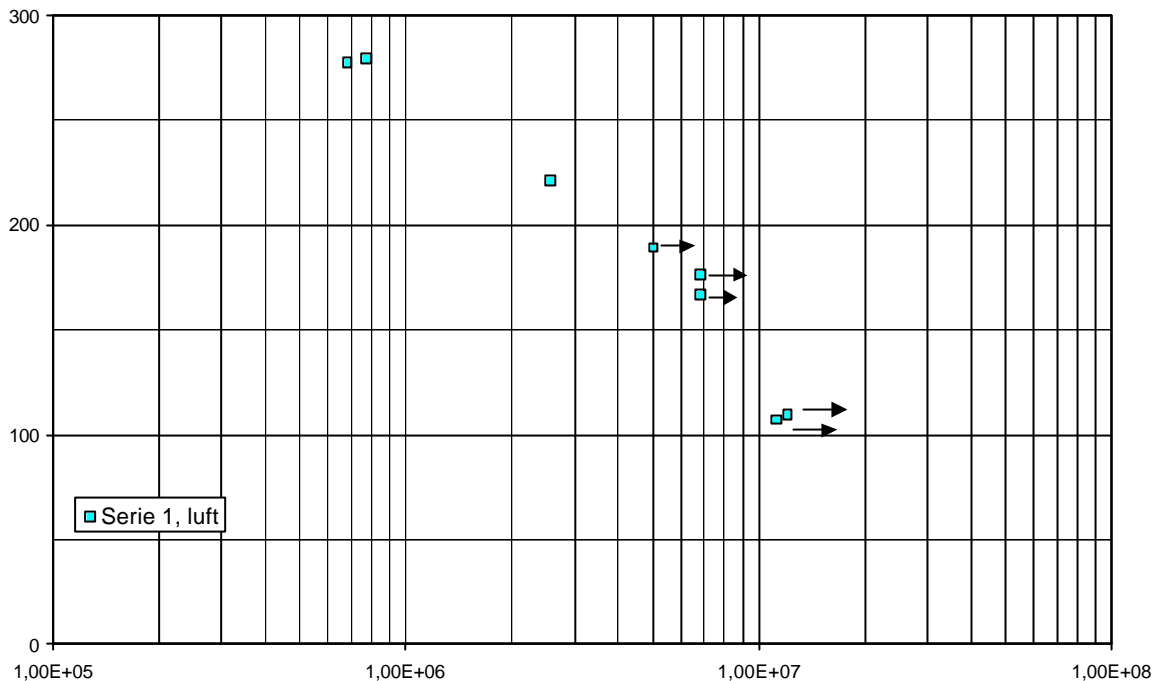
1-akset træk	3	150	>1.000.000
1-akset træk	4	200	320.000
1-akset træk	5	180	390.000
4-punkt bøjn.	0-1a	107	11.200.000
4-punkt bøjn.	0-1b	110	11.200.000
4-punkt bøjn.	0-2a	177	>6.800.000
4-punkt bøjn.	0-2b	167	>6.800.000
4-punkt bøjn.	0-3a	190	>5.000.000
4-punkt bøjn.	0-3b	221	2.550.000
4-punkt bøjn.	0-4a	280	768.000*
4-punkt bøjn.	0-4b	278	677.000*

\* Værdier behæftet med nogen usikkerhed på grund af uregelmæssig belastningsniveau.

Emnerne 4 og 5 samt emne 0-3a har haft nogenlunde samme belastning, men det ser ud til at der er over en størrelsesorden til forskel i levetid.

Det var forudset, at der ville være en forskel, idet udmattelsesdata for pladematerialer er mere eller mindre maskin- og metodespecifikke. Bl.a. vil materialets tværsnit i 1-akset træk og i roterende bøjning være udsat for samme påvirkning som det overfladekongruente lag, mens det kun er sidstnævnte, der er eksponeret til udmattelse i 4-punktsbøjning. Udfra tidligere erfaringer ville vi antage op til 25% højere udmattelsesstyrke i 4-punktsbøjning end i 1-akset træksforsøg. Der er imidlertid ikke data nok her til at afgøre hvor stor forskellen er, men da forsøgene fra starten er lagt op til at sammenligne parameter for parameter indenfor samme type udmattelsesmaskine, har vi ikke forsøgt at fremskaffe bedre sammenligningsgrundlag for at sammenligne udmattelsesmaskinerne.

Resultaterne for 4-punkt bøjning er vist i figur 4-1.



**Figur 4-1. Udmattelse i luft.**

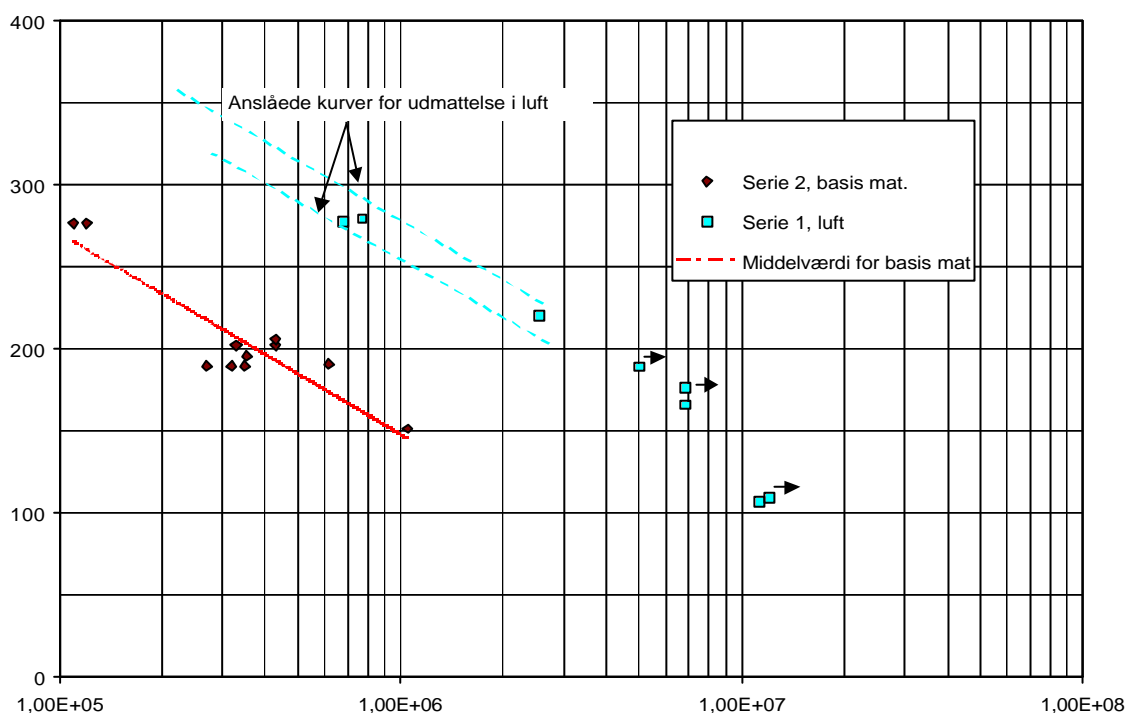
#### 4.2 Basismateriale i havvand

Her er der benyttet glatte prøveemner uden svejsning. 4 af prøverne er udtaget på tværs af valseretningen, mens resten er udtaget på langs. Der blev ikke fundet nogen systematisk indflydelse af valseretningen.

Forsøgsserien er gengivet i tabel 4.2, mens resultaterne er optegnet i figur 4-2 sammen med 4-punkts bøjningsresultaterne fra serie 0. Som det ses er der en markant nedsættelse af udmattelsesstyrken. Ved 1.000.000 påvirkninger er udmattelsesstyrken faldet med 30 til 40% i forhold til luft, alt udfra, hvor hældningen for luftkurven skal placeres (og forudsat hældningerne på S-N kurverne er de samme i luft som i havvand). Til sammenligning kan nævnes, at den ved Eurocode 9 pålagte reduktion i designkategori, for den undersøgte legering svarer til mellem 20 og 30%. Da mængden af data, til bestemmelsen af luftdata'ene er relativt begrænset, er der ikke grundlag nok til at hævde, at Eurocode 9 er ikke-konservativ, men det kan med rimelighed fastslås, at code'n ikke er for konservativ på dette punkt.

Tabel 4.2: Udmattelse i havvand, basismateriale

R-forhold	Antal påvirkninger til brud	Spændingsamplitude i Mpa	Bemærkninger
0,06	430.000	202	
0,06	330.000	202	Tværs af valseretning
0,06	355.000	196	
0,04	430.000	206	Tværs af valseretning
0,09	350.000	190	Tværs af valseretning
0,02	615.000	191	
0,08	1.050.000	152	
0,01	120.000	277	Tværs af valseretning
0,01	110.000	277	
0,09	270.000	190	
0,09	320.000	190	



Figur 4-2. Sammenligning af udmattelsesdata i luft og havvand.

### 4.3 Serie 3: Effekt af svejsning

Svejsningerne er lavet som en slags “bead on plate svejsninger”, hvor der er svejst ned i en præmaskineret fuge. Emnet var i forvejen blevet forbukket på en sådan måde, at kastninger, på grund af svejsningen, minimeredes. Den samlede svejselængde inklusive indløbs- og udløbsstrækninger var valgt, så der kunne opnås ensartede egenskaber i hele den strækning, hvor

udmattelsesprøverne blev udskåret fra. Derefter er pladerne blevet maskineret ud i den ønskede facon (parallelipipedum), så der ikke påføres mekaniske spændinger. Der er benyttet et tilsatsmateriale svarende til AA 5654. Svejsningerne er udført på FORCE Institutet under streng kvalitetskontrol, så svejsematerialet var fri for fejl.

Resultaterne er vist i Tabel 4.3 og i figur 4-3, sammenlignet med basismaterialet fra serie 2. Mange af prøveemnerne er helt sammenfaldende i de to serier, fordi der reelt er tale om samme prøveemne. De emner der udviste brud/revnedannelse i svejsemetallet eller i den varmpåvirkede zone, og samtidig brud/revnedannelse i grundmaterialet, i mindst 15 mm afstand fra fusionslinien tæller med i både serie 2 og 4. Den fejl, der derved er begået med hensyn til det eksakte antal påvirkninger til brud er beskeden. I løbet af forsøget, har vi set, at vi har kunnet registrere, hvornår synlige revner er tilstede og at der fra dette tidspunkt er mindre end 1 døgn (< 20.000 påvirkninger), og ofte endnu mindre, til forsøget stopper. Den fejl, der er begået er til den konservative side, det vil sige de "korrekte" standtider for de "områder", hvor der kun er synlige revner, er undervurderede.

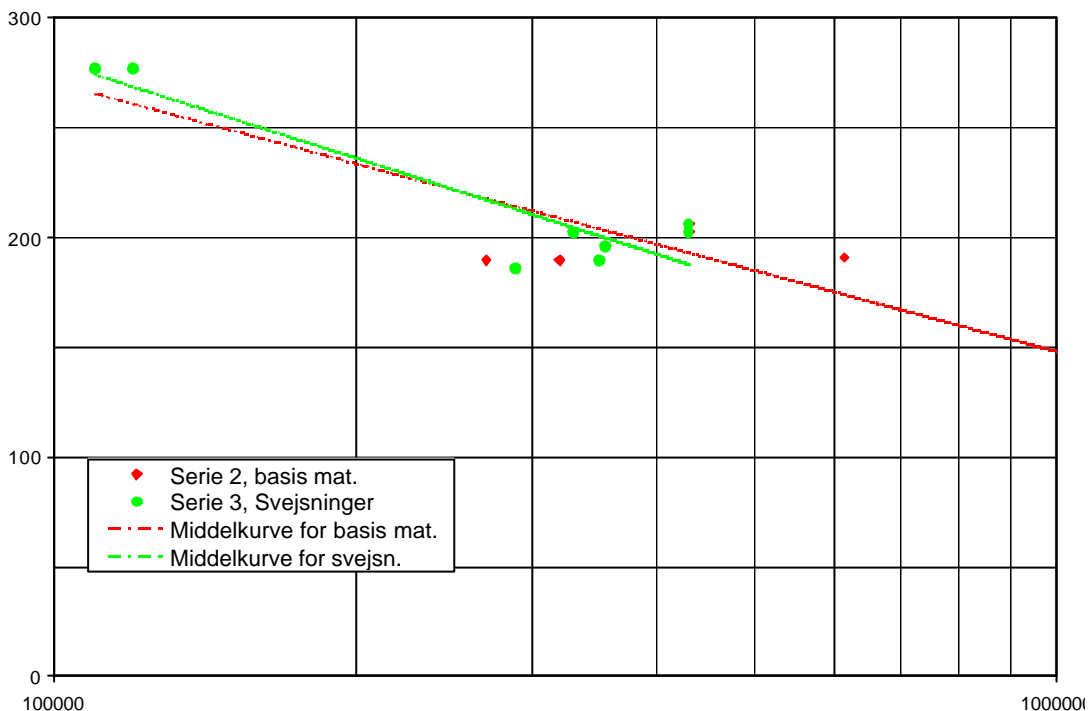
Forsøgene viser, at der ikke er dannet skadelige mikrostrukturer i grundmaterialet ved svejseprocessen. 4-punkts bøjeprovnen eksponerer såvel svejsezone som varme-upåvirket grundmateriale i en og samme prøve, så revnedannelsen frit kan ske i den/de mindst udmattelsesresistente områder. I 1 tilfælde er der revnedannelse i svejsezone, uden at der samtidig er revner i grundmaterialet udenfor den varmpåvirkede zone, mens det modsatte kun konstateredes i 3 tilfælde. I alle andre tilfælde er der sket revnedannelse i grundmaterialet før eller samtidig med revnedannelse i svejsemetallet. I det ene solo-tilfælde af revner i svejsezone samt i de 2 tilfælde hvor revnerne tydeligt er startet først i svejsezone, ligger revnen i svejsemetallet, men tæt op ad fusionlinien.

**Tabel 4.3: Udmattelse af svejste emner i havvand**

R-forhold	Antal påvirkninger til brud	Spændingsamplitude i Mpa	Bemærkninger
0,06	430.000	202	GM+SV
0,06	330.000	202	GM+SV+FL
0,06	355.000	196	GM+SV
0,04	430.000	206	GM+SV
0,09	350.000	190	GM+SV
0,02	288.900	186	SV
0,01	120.000	277	SV+GM
0,01	110.000	277	SV+GM

GM betyder revne i grundmat., SV betyder revne i svejsemetal; FL betyder revne i fusionslinien.

Førstnævnte er hovedrevnen, de andre er sekundære revner.



**Figur 4-3. Effekt af svejsning.**

#### 4.4 Serie 4: Effekt af overlejrrede egenspændinger

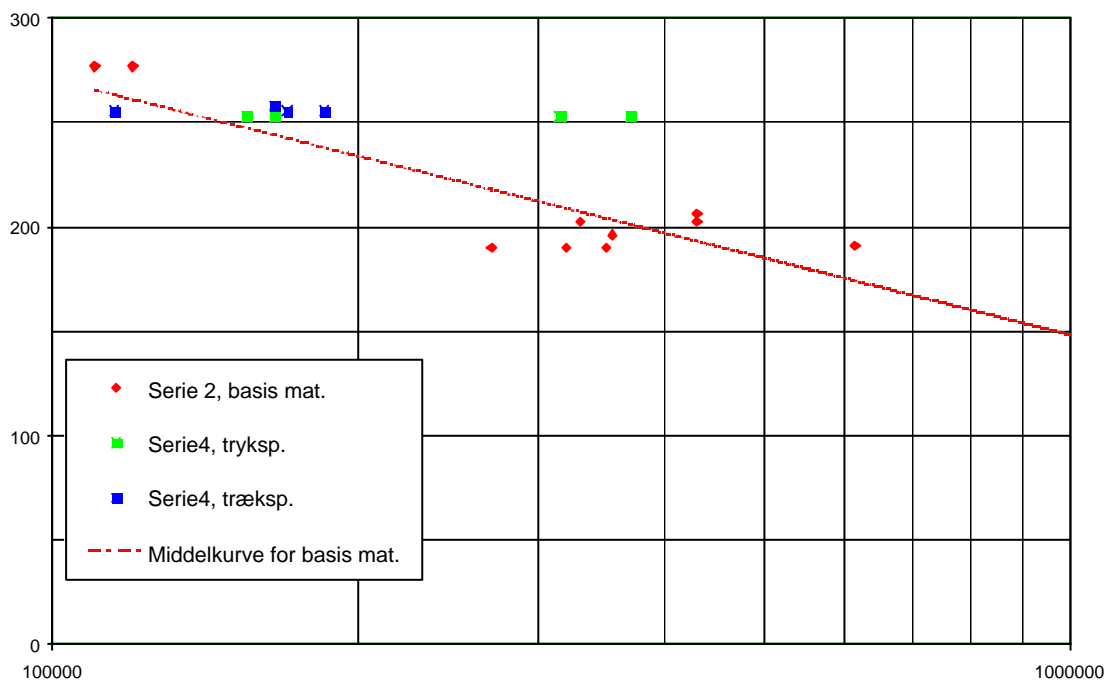
Effekten af egenspændinger er undersøgt på usvejste, glatslebne prøveemner. I h.h.t. Eurocode 9 section 5.3 kan man tillade højere udmattelsesbelastninger, hvis den effektive middelspænding er lille eller negativ (= lille R-forhold) og det nævnes, at introduktion af overlejrrede trykspændinger er en måde at sænke middelspændingen. Dette gavnlige fænomen er ret velkendt, men den modsatte generelle antagelse, at høje middelspændinger er tilsvarende skadelige, fortjener nogen opmærksomhed. Svejsede samlinger generelt lave udmattelsesstyrke tilskrives nemlig ofte, at der forekommer høje egenspændinger i træk, som følge af de termiske cykler som materialet gennemløber, så den effektive middelspænding derved bringes op.

Egenspændingerne er frembragt ved at bukke emnerne i 4-punkts bøjning til en blivende deformation på ~3 mm. På den konkave side vil der stå en restspænding i træk, i størrelsesordenen lig med materialets flydespænding, mens der på den konvekse side tilsvarende vil være trykspændinger.

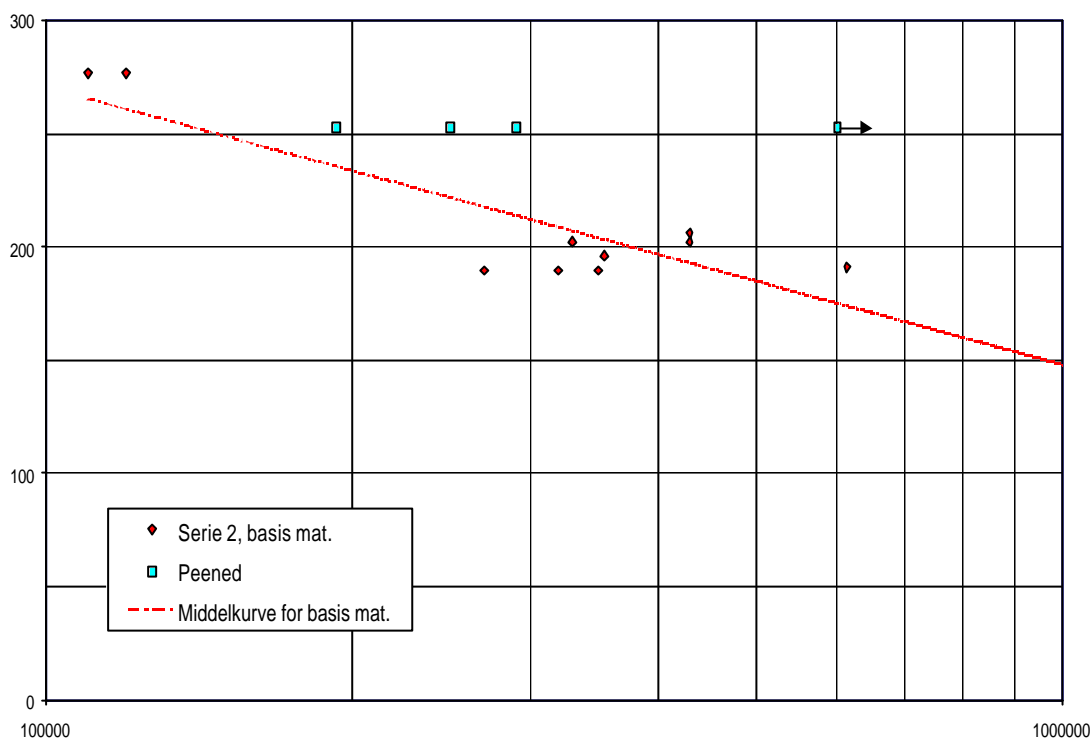
Der er også kørt en ekstra serie, hvor prøverne er blevet shot-peened. Der er valgt en kraftig shot-peening for at introducere et signifikant lag med trykspændinger. Resultaterne er vist i tabel 4.4. I figur 4-4a og b er effekten af egenspændinger sammenlignet med basismaterialet fra serie 2.

**Tabel 4.4: Effekt af egenspændinger og shot-peening på udmattelse i havvand**

R-forhold	Antal påvirkninger til brud	Spændingsamplitude i Mpa	Bemærkninger
0,10	165.000	253	Egenspænding i tryk
0,10	315.000	253	Egenspænding i tryk
0,10	155.000	253	Egenspænding i tryk
0,10	370.000	253	Egenspænding i tryk
0,09	185.000	255	Egenspænding i træk
0,09	165.000	255	Egenspænding i træk
0,09	115.000	255	Egenspænding i træk
0,09	170.000	255	Egenspænding i træk
0,10	290.000	253	Shot-peened
0,10	>600.000	253	Shot-peened
0,10	253.000	253	Shot-peened
0,10	193.000	253	Shot-peened



**Figur 4-4a. Effekt af egenspændinger.**



**Figur 4-4b. Effekt af shot-peening.**

Der ses ikke nogen skadelig indflydelse fra restspændinger i træk, på trods af den generelle antagelse, at høje egenspændinger i træk er skadelige. I praksis sker der nemlig en vis relaxation af egenspændingerne på grund af flydefænomener i overfladelaget. Efterhånden som egenspændingerne reduceres, bliver det mere og mere de pålagte spændinger, der bliver udslagsgivende for udmattelsespåvirkningen. Når og hvis svejsninger derfor har så ringe udmattelsesstyrke, skyldes det måske snarere geometriske kærve o.lign. og i mindre grad egenspændinger.

Trykspændinger (inklusive shot-peening) viser entydigt en gavnlig effekt, som både er velkendt og forventelig. Selv ved høje pålagte spændinger vil den samlede spænding i overfladen forblive indenfor proportionalitetsgrænsen, og der vil derfor ikke ske samme grad af plastisk deformation med efterfølgende relaxation. Den gavnlige effekt bibeholdes derfor gennem hele udmattelsesforløbet i disse bøjningsforsøg, hvor der køres med R-forhold  $> 0$ .

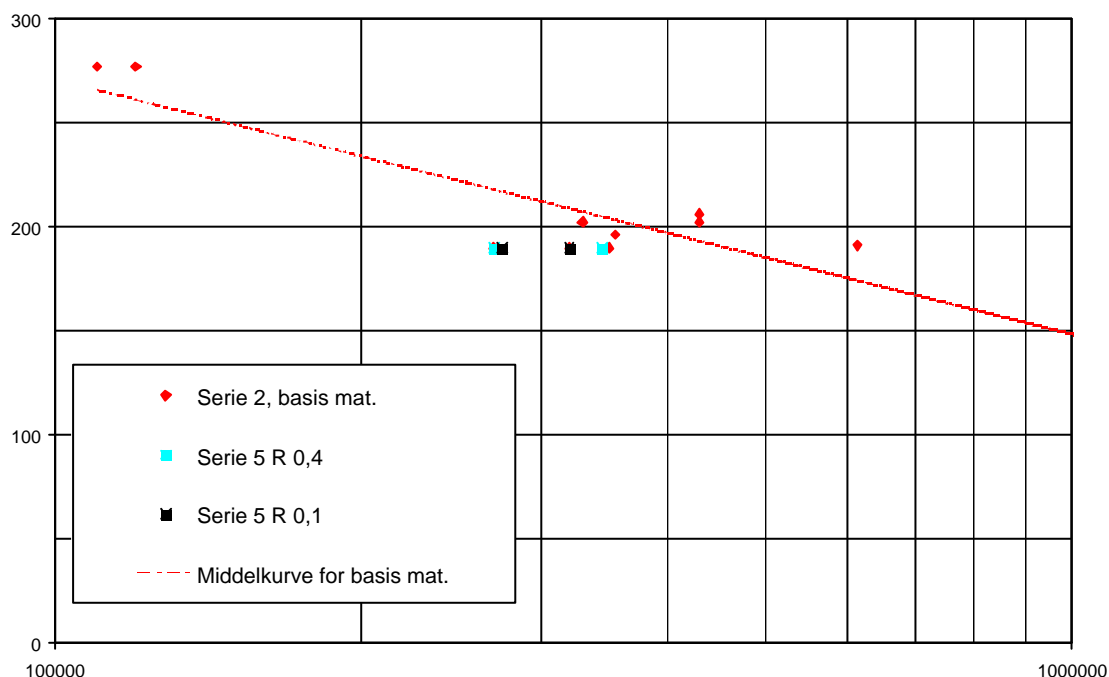
#### 4.5 Serie 5: Effekt af R-forhold

I visse situationer tillades det at forhøje udmattelsesstyrken som funktion af R-forholdet (for  $-1 < R < 0,5$ ), Eurocode 9 Annex G. For at eftervise om det også gælder under korrosive forhold, blev der udført forsøg med forskellige R-forhold, mens øvrige parametre holdes konstant. De maskiner vi har brugt tillader kun positive R-forhold; derfor har vi begrænset undersøgelsen til 2 R-forhold,

nemlig  $\sim 0,1$  og  $0,4$ . Hvis der er en effekt af R-forhold så vil den slå igennem her. Effekten af negative R-forhold og meget høje R-forhold er afklaret ved forsøgene med egenspændinger, idet overlejrrede flydespændinger i tryk repræsenterer negativt R-forhold og overlejrrede flydespændinger i træk repræsenterer høje R-forhold. Resultaterne er gengivet i tabel 4.5 og figur 4-5.

**Tabel 4.5: Effekt af R-forhold**

R-forhold	Antal påvirkninger til brud	Spændingsamplitude i Mpa
0,4	270.000	190
0,4	345.000	190
0,09	275.000	190
0,09	320.000	190



**Figur 4-5: Effekt af R-forhold.**

Ifølge Eurocode 9 giver det lavere R-forhold en højere udmattelsesstyrke i luft, men det synes ikke at være tilfældet i havvand, snarere tværtimod. Datamængden her er dog for lille til at tilskynde til nogen egentlig revision af Eurocode 9, blot kan det nævnes at det understøtter udsagnet andetsteds i Eurocode 9 om, at den gavnlige effekt af lave eller negative middelspændinger udlignes, hvis der sker samtidig korrosion (kærvedannelse).

#### 4.6 Serie 6: Effekt af katodisk beskyttelse

Oprindeligt var det planlagt at undersøge effekten af katodisk beskyttelse ved en serie forsøg ved 3 forskellige potentialer. I de indledende forsøg med at registrere det frie korrosionspotentialer viste materialet en anormal opførsel. Forsøg både med potentiostatisk og galvanostatisk påtrykning af katodiske strømme relativt til materialets tilsyneladende frie korrosionspotentialer, førte, i visse tilfælde, til accelereret pitting. Der blev registreret potentialer udsving på op til 200 mV.

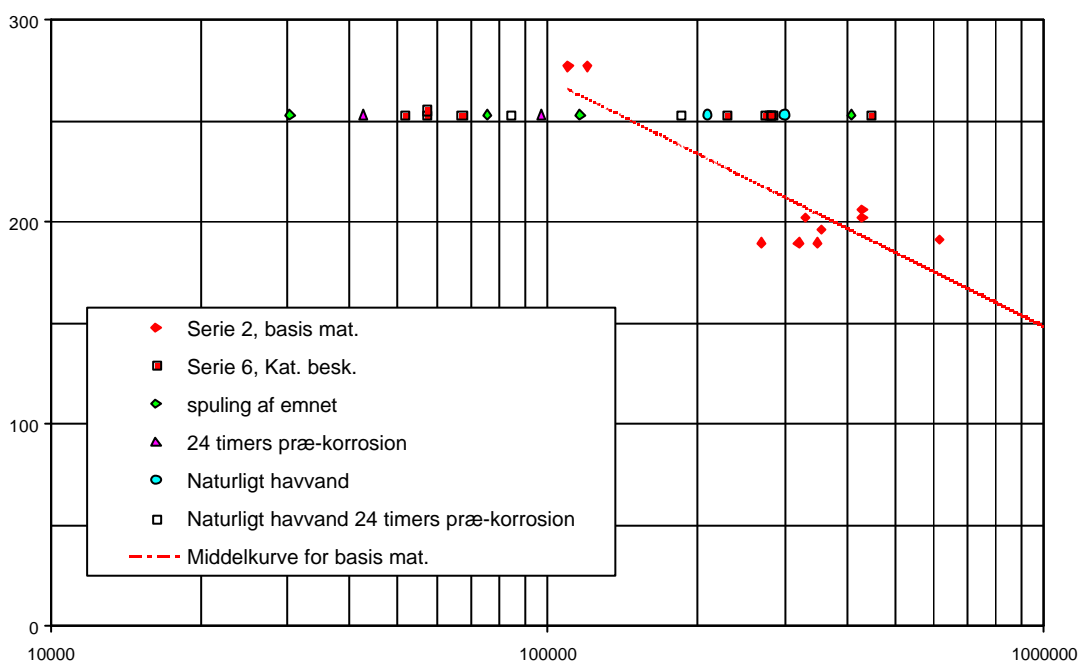
Der blev gennemført 2 forsøg, hvor potentialer blev styret til  $\sim 900$  mV versus Ag/AgCl. Herefter blev det besluttet at gå praktisk til værks og etablere katodisk beskyttelse ved at koble forsøgsemnerne til anoder af zink. Arealet af anoderne er ca 5 gange større end arealet af emnerne. Dette forhold svarer til en malet konstruktion med visse begrænsede malingsbeskadigelser, der er beskyttet med påsatte zinkanoder. De registrerede potentialer er målt til mellem  $-1003$  og  $-1040$  mV v. Ag/AgCl.

I et praktisk forsøg på at omgå de elektrokemiske besværligheder blev nogle forsøg gentaget med spuling af prøvemnet (for at fjerne gasbobler), med 24 timers prækorrosion og med naturligt havvand. Tabel 4.6 viser de opnåede resultater i afhængighed af ovenstående parametre. Figur 4-7 sammenligner resultaterne med basismaterialets udmattelsesdata.

**Tabel 4.6: Effekt af katodisk beskyttelse på udmattelse i havvand.**

R-forhold	Antal påvirkninger til brud	Spændingsamplitude i Mpa	Bemærkninger
0,10	280.000	253	Potentialestyret -894 mV v Ag/AgCl
0,10	67.000	253	Potentialestyret -894 mV v Ag/AgCl
0,10	275.000	253	
0,10	230.000	253	
0,10	282.828	253	
0,10	281.061	253	
0,10	56.880	253	
0,10	56.880	253	
0,10	446.970	253	
0,10	51.515	253	
0,10	116.200	253	Spuling
0,10	30.275	253	Spuling
0,10	75.597	253	Spuling
0,10	409680	253	Spuling

0,10	42.480	253	24 timers prækorrosion
0,10	97.200	253	24 timers prækorrosion
0,10	209.520	253	Naturligt havvand
0,10	300.000	253	Naturligt Havvand
0,10	185.760	253	Naturligt Havvand + 24 timers prækorrosion
0,10	84.240	253	Naturligt havvand + 24 timers prækorrosion



**Figur 4-5. Effekt af katodisk beskyttelse (6).**

Der er en stor spredning i resultaterne, men der er ikke fundet nogen systematik i de opnåede resultater.

Katodisk beskyttelse kan tilsyneladende være gavnlig, men også i høj grad skadelig. På trods af den store spredning, kan man dog, med rimelig sikkerhed, konkludere, at det ikke er muligt at re-etablere udmattelsesværdierne for luft vha. katodisk beskyttelse af EN AW 6082-T6.

## 5 Sammenfatning

Forsøgene har vist, at udmattelsesstyrken i havvand er betydeligt reduceret i forhold til i luft. Den arbitrært fastsatte reduktion af udmattelsesstyrken i hht Eurocode 9 er på mellem 20 og 30 %, mens resultaterne her ligger på mellem 30 og 40%.

Valseretningen har ikke vist nogen signifikant indflydelse på udmattelsesstyrken.

Svejsning i EN AW 6082-T6 materiale medfører ikke dannelse af udmattelsesfølsomme mikrostrukturer i de varmepåvirkede zoner. Den metodik, der benyttes i Eurocode 9 med at lade overfladebehandling og geometri have forrang, for såvel materialetype og svejsemetode, synes berettiget. Der behøves derudover ikke at tages hensyn til strukturforandringer.

Egenspændinger i træk er ikke specielt skadelige for udmattelsesstyrken, hvorimod egenspændinger i tryk forøger udmattelsesstyrken på samme måde, som det er påvist i luft.

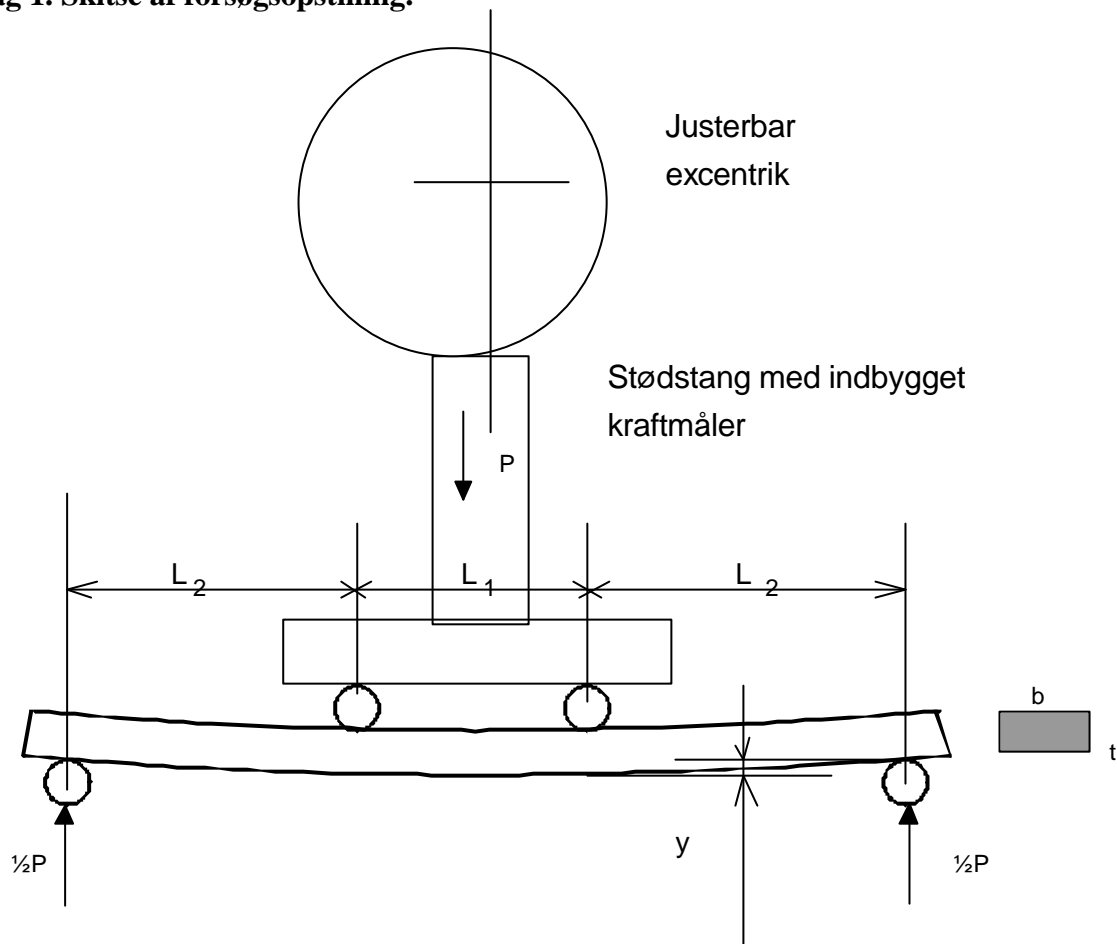
Variation i R-forholdet i området  $0 < R < 0,5$  synes ikke at udøve nogen indflydelse på den undersøgte legering.

Katodisk beskyttelse kan tilsyneladende ikke re-etablere udmattelsesstyrken gældende for luft.

Alt i alt viser forsøgene her, at der er god grund til at følge anvisningerne i Eurocode 9, hvad angår udmattelse i havvand, med den rimelige tilføjelse:

“Kun en tåbe frygter ikke havet”

## Bilag 1. Skitse af forsøgsopstilling.



$$L_2 = 55 \text{ mm}$$

$$L_1 = 100 \text{ mm}$$

$$t = 8 - 10 \text{ mm}$$

$$b = 20 - 25 \text{ mm}$$

$$y = (S/(E \cdot t)) \cdot (2/3 L_2^2 + L_1 L_2 + 1/4 L_1^2)$$

$$E = 71000 \text{ [Mpa]}$$

$$\text{Spænding} = M/W$$

$$M = \frac{1}{2} P \cdot L_2$$

$$W = \frac{1}{6} \cdot b \cdot t^2$$