

Dokument: SASAK-RAP-E2-AKS-FI-0001-00

Udmattelsesforsøg på afbrudte kantsømme med kraterrevner

SASAK
Projekt E-2

Gunnar Sørensen

FORCE Instituttet, maj 2001

Sammenfatning

Kraterrevner i afbrudte kantsømme accepteres normalt ikke i svejsesamlinger på udmattelses-påvirkede aluminiumkonstruktioner, og denne fejltypen skal derfor slibes op og reparations-svejses.

Som alternativ til reparationen kan der mange tilfælde med fordel foretaget en fitness for purpose vurdering af svejsefejls betydning for konstruktionens sikkerhed.

Med det formål at belyse kraterrevners indflydelse på svejsesamlingens udmattelsesstyrke, er der under SASAK projektet udført udmattelsesforsøg af afbrudte kantsømme uden og med kraterrevner.

Der er ikke konstateret en reduktion af udmattelsesstyrken på grund af kraterrevner for lasttal større end 2 millioner antal påvirkninger, som svarer til den forventede levetid for de fleste udmattelsespåvirkede aluminiumkonstruktioner.

I low cycle udmattelsesområdet med høje spændingvariationer og få antal påvirkninger medfører kraterrevnerne en reduktion af udmattelsesstyrken, der alligevel er to kategori-klasser højere end den karakteristiske udmattelseskurve i konstruktionsnormen Eurocode 9.

Indledning

Afstivede pladepaneller i aluminiumkonstruktioner udføres ofte med afbrudte kantsøms-svejsninger mellem stivere og pladefelt. Ved svejsning af de afbrudte kantsømme er der i praksis konstateret en del tilfælde af kraterrevner specielt i kantsømsafslutningerne.

Ifølge gældende standarder for svejsekvalitet tillades kraterrevner kun for den laveste kvalitetsklasse. DS/EN 30042 "Lysbuesvejste samlinger i aluminium og dets svejsbare legeringer, Vejledning om kvalitetsniveauer for svejsefejl" angiver en tilladelig fejlhøjde af kraterrevner på 20% af kantsømmens a-mål for det laveste kvalitetsniveau D "Moderat".

For de høje kvalitetsniveauer C "Mellemliggende" og B "Skærpet" er detekterbare kraterrevner ikke tilladte.

Konstruktionsnormen Eurocode 9 "Design of aluminium structures - Part 2 Structures susceptible to fatigue" tillader ikke kraterrevner i udmattelsespåvirkede aluminiumkonstruktioner selv for den laveste udmattelsesklasse "Normal".

I baggrundsdokumentet for acceptkriterierne i Eurocode 9 fra ISO TC 167 "Weld quality specification for steel and aluminium structures" er der dog medtaget en Minimum udmattelsesklasse, hvor op til 5 mm lange kraterrevner er tilladte.

Normalt vil kravene til svejsekvaliteten for udmattelsespåvirkede aluminiumkonstruktioner svare til det højeste kvalitetsniveau, hvor kraterrevner ikke accepteres, og disse fejl skal derfor slibes op og reparations svejses.

I mange tilfælde kan det imidlertid være økonomisk fordelagtigt at foretage en fitness for purpose vurdering af svejsefejlenes betydning for konstruktionens styrkemæssige sikkerhed. Da der umiddelbart ikke foreligger eksperimentelle forsøgsdata, som kan underbygge denne styrkevurdering, og er der under SASAK projektet udført en testserie for bestemmelse af kraterrevners indflydelse på udmattelsesstyrken af afbrudte kantsømme.

Testemner

Testemnerne er udformet som T-samlinger af en 6 mm stiver til en 16 mm plade med to afbrudte kantsømme, som vist i figur 1. Der fremstilles emner til to testserier, en uden kraterrevner og en med kraterrevner i kantsømsafslutningerne.

Svejsesamlingen belastes under udmattelsesforsøgene vinkelret på sømmens længderetning ved at trække i 6 mm stiveren og fastholde 16 mm pladen i et opspændingsværktøj (figur 4).

Pladematerialet er AW 5083 H111 med de normerede styrkeværdier

trækstyrke	$f_u = 275 \text{ N/mm}^2$
0,2%-spænding	$f_{0,2} = 125 \text{ N/mm}^2$

Materialeerne er leveret med certifikatværdierne

6 mm plade	$f_u = 285 \text{ N/mm}^2$	$f_{0,2} = 149 \text{ N/mm}^2$
16 mm plade	$f_u = 289 \text{ N/mm}^2$	$f_{0,2} = 126 \text{ N/mm}^2$

Den valgte tilsatsmateriale er 5356 (AlMg4,5Mn) ESAB OK 18.16 med normeret trækstyrke

$$f_w = 240 \text{ N/mm}^2$$

Den regningsmæssige statiske styrke af svejsesamlingen baseret på de normerede styrkeværdier i henhold til Eurocode 9 er beregnet i figur 2.

Som det ses, vil den statiske styrke af svejsemetallet svare til styrken af det varmpåvirkede grundmateriale, hvis kantsømmene udføres med a-mål 4,2 mm.

I figur 3 er der foretaget en tilsvarende optimering med hensyn til samlingens udmattelsesstyrke. Udmattelsesstyrken af grundmaterialet kan henføres til detalje kategori 31-3.2 for revnedannelse fra svejsetåen, mens udmattelsesstyrken af svejsemetallet for revnedannelse fra rodsiden er kategori 18-3.2.

De anvendte udmattelsesstyrker på henholdsvis 31 N/mm^2 og 18 N/mm^2 er referenceværdierne ved 2×10^6 påvirkninger, hvor udmattelseskurverne normalt er defineret.

For et nominelt a-mål på 5,2 mm vil der være samme teoretiske sandsynlighed for revnedannelse fra rodsiden i svejsemetallet som for revnedannelse fra svejsetåen i grundmaterialet. For a-mål mindre end 5,2 mm vil man have den største sandsynlighed for revnedannelse i svejsemetallet.

I praksis vil det effektive a-mål være noget større end det nominelle på grund af indtrængning af svejsemetal i rodsiden. Hvis indtrængningen f. eks. er 20% af a-målet, bliver optimeringskravet til det nominelle a-mål kun 4,3 mm.

FORCE instituttet har tidligere fortaget nogle få udmattelsesforsøg på tilsvarende testemner med kraterrevner. Kantsømmenes a-mål var i dette tilfælde 4 mm, og alle emnerne revnede i grundmaterialet fra svejsetåen, og der blev ikke konstateret begyndende revnedannelse i rodsiden.

Da formålet med undersøgelsen er at eftervise kraterrevnernes indflydelse på udmattelsesstyrken af svejsemetallet, vælges et lille a-mål på 3,5 mm, hvor udmattelsesrevnerne med stor sandsynlighed vil starte i svejsningens rodside.

Svejsprocedure

Svejsprocessen er MIG med maskinel fremføring, og kantsømmene svejses i én streng. Der svejses med de samme svejseparametre på begge testemner

spænding	$U = 23,3 \text{ V}$
strømstyrke	$I = 210 \text{ A}$
hastighed	$v = 1000 \text{ mm/min}$

Emnerne uden kraterrevner svejses med forgas og eftergas og strømmen slubbes ned ved afslutningen af kantsømmen.

Kraterrevnerne dannes i svejsesømmens afslutning ved at stoppes svejsprocessen kort mens fremføringen forsættes. Der svejses i dette tilfælde uden forgas og eftergas.

Kraterrevnerne er placeret i midten af de dybe endekrater og løber fra overfladen til svejsesømmens rod.

Testprocedure

Emnerne udmattelsesbelastes i servo hydraulisk udmattelsesmaskine, MTS 810.

Maskinen er indstillet til at kobler ud ved en given relativ stivhedændring af testemnerne, som vil opstå efterhånden som udmattelsesrevnerne vokser i svejsesømmene.

Alle udmattelsesprøver stoppes således ved sammen revneudbredelse umiddelbart før statisk overbelastningsbrud. Den endelige revneudbredelse vil typisk svare til halvdelen af sømlængden.

Testemnerne belastes med pulserende trækkræfter med lastforholdet $R = F_{min}/F_{max} = 0,1$. Antallet af belastningscykler til brud registreres i forhold til den nominelle spændingsvidden i svejseømmenes halssnit. For hver testserie udføres der ialt 9 udmattelsesforsøg fordelt med 3 testemner hver ved 3 forskellige spændingsvidder.

Testresultater

Alle testemner er revnet i svejsemetallet, hvor udmattelsesrevnerne er initieret i svejseømmens rodside. For emnerne med kraterrevner er alle udmattelsesrevnerne startet ved kraterrevnene. Et karakteristiske revneforløb er vist i figur 5 for emner uden kraterrevner og for emner med kraterrevner i figur 6.

De eksperimentelle udmattelseskurver bestemmes ved en dobbelt logaritmisk lineær regressionsanalyse af de registrerede belastningscykler og spændingsvidder.

Der beregnes en middellokke og en designkurve defineret som middellokken minus to gange standardafvigelsen svarende til en brudsandsynlighed på 2,3%.

Da de karakteristiske udmattelseskurver i Eurocode 9 repræsenterer den samme brudsandsynlighed, kan designkurverne for forsøgsresultaterne umiddelbart sammenlignes med beregningskurverne i konstruktionsnormen.

Den estimerede designkurve for kantsømme uden kraterrevner ligger væsentligt over den karakteristiske udmattelseskurve for detalje kategori 18-3.2 i Eurocode 9 (figur 7 og 8).

Standardafvigelsen af logaritmen til lasttallet er beregnet til 0,131, som er væsentligt mindre end den forventede standardafvigelse ifølge konstruktionsnormen på 0,176.

Referenceværdien for udmattelsesstyrken ved 2×10^6 påvirkninger er estimeret til 34 N/mm^2 , og udmattelseskurvens hældningskoefficient er tilnærmet 3,5.

Udmattelsesstyrken ved 2×10^6 antal påvirkninger er ca. en faktor to gange større end kategori 18-3.2 kurvens udmattelsesstyrke på 18 N/mm^2 , og kurvens hældning er lidt fladere end beregningskurven, hvor hældningskoefficienten er 3,2.

Designkurven for kantsømme med kraterrevner er tilnærmet 36 N/mm^2 ved lasttallet 2×10^6 påvirkninger med hældningskoefficienten 4,5 (figur 9 og 10)

Middellokken er også i dette tilfælde estimeret med en acceptabel standardafvigelse af logaritmen til lasttallet på 0,126.

Udmattelsesstyrken ved 2×10^6 antal påvirkninger er to gange større end kategori 18-3.2 udmattelsestyrken, men med den meget flade hældning af kurven aftager udmattelsestyrken relativt hurtigere for lavere antal belastningscykler.

I low cycle udmattelsesområdet under 10^5 antal påvirkninger nærmer designkurven sig kategori 22-3.2 kurven, som to kategoriklasser højere end 18-3.2 beregningskurven.

Middelkurverne og designkurverne for de to forsøgsserier uden og med kraterrevner er optegnet i figur 11 og 12.

Design udmattelsesstyrken ved referencelasttallet 2×10^6 antal påvirkninger er i begge tilfælde ca. 35 N/mm^2 , som er 2 gange større end den normerede karakteristiske udmattelsesstyrke for detalje kategori 18-3.2.

I low cycle udmattelsesområdet ved 10^5 antal påvirkninger falder design udmattelsesstyrken fra 81 N/mm^2 for kantsømmene uden kraterrevner til 70 N/mm^2 for kantsømmene med kraterrevner. Udmattelsestyrke af kantsømme med kraterrevner er ved dette lasttal ca. 1,5 gange større end detalje kategori 18-3.2 udmattelsesstyrken.

I hele anvendelsesområdet ned til 10^4 antal belastninger ligger design kurven for kantsømme med kraterrevner over detalje kategori 22-3.2 kurven.

Konklusion

Udmattelsesstyrken af svejsemetallet for afbrudte kantsømme uden og med kraterrevner er bestemt ved forsøg med en acceptabel spredning.

For lasttallet større end 2×10^6 antal påvirkninger er der målt den samme udmattelsestyrke for de to forsøgsserier uden og med kraterrevner, og den eksperimentelle designværdi af udmattelsestyrken er her en faktor to gange større end udmattelsestyrken af den normerede detalje kategori 18-3.2 i Eurocode 9.

Der er registreret en reduktion af design udmattelsesstyrken i low cycle udmattelsesområdet ved 10^5 antal påvirkninger for afbrudte kantsømme med kraterrevner på ca. 85% forhold til forsøgsserien uden kraterrevner.

Designkurven for udmattelsesforsøgene med kraterrevner er i hele low cycle udmattelsesområdet to kategoriklasser bedre den karakteristiske normkurve.

De fleste udmattelsespåvirkede aluminiumkonstruktioner er normalt beregnet for en forventet driftstid større end 2×10^6 antal påvirkninger, hvor der ikke er konstateret en reduktion af svejsemetallets udmattelsestyrke på grund af kraterrevner i kantsømsafslutningerne.

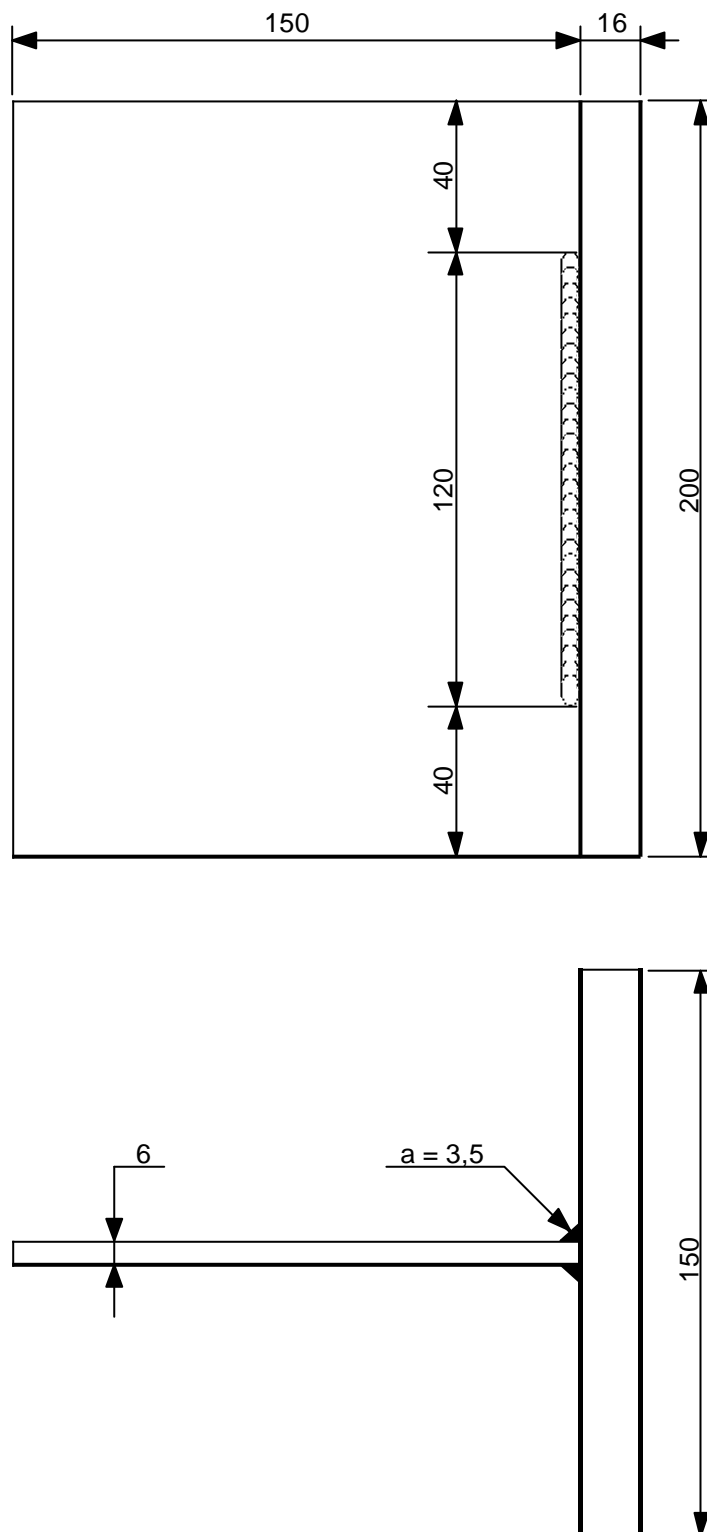


Figure 1 Udformning af testemner

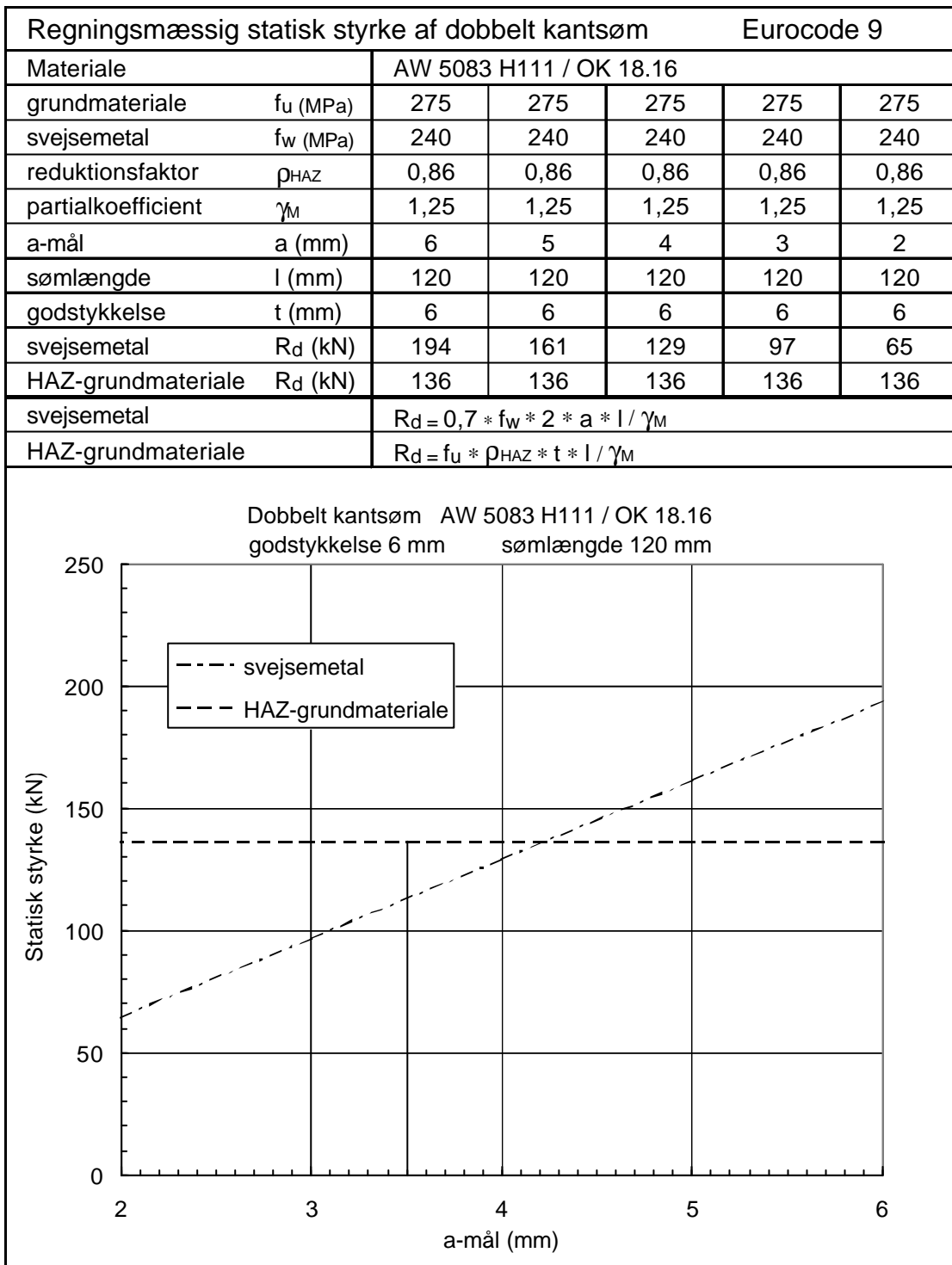


Figure 2 Optimering af statisk styrke

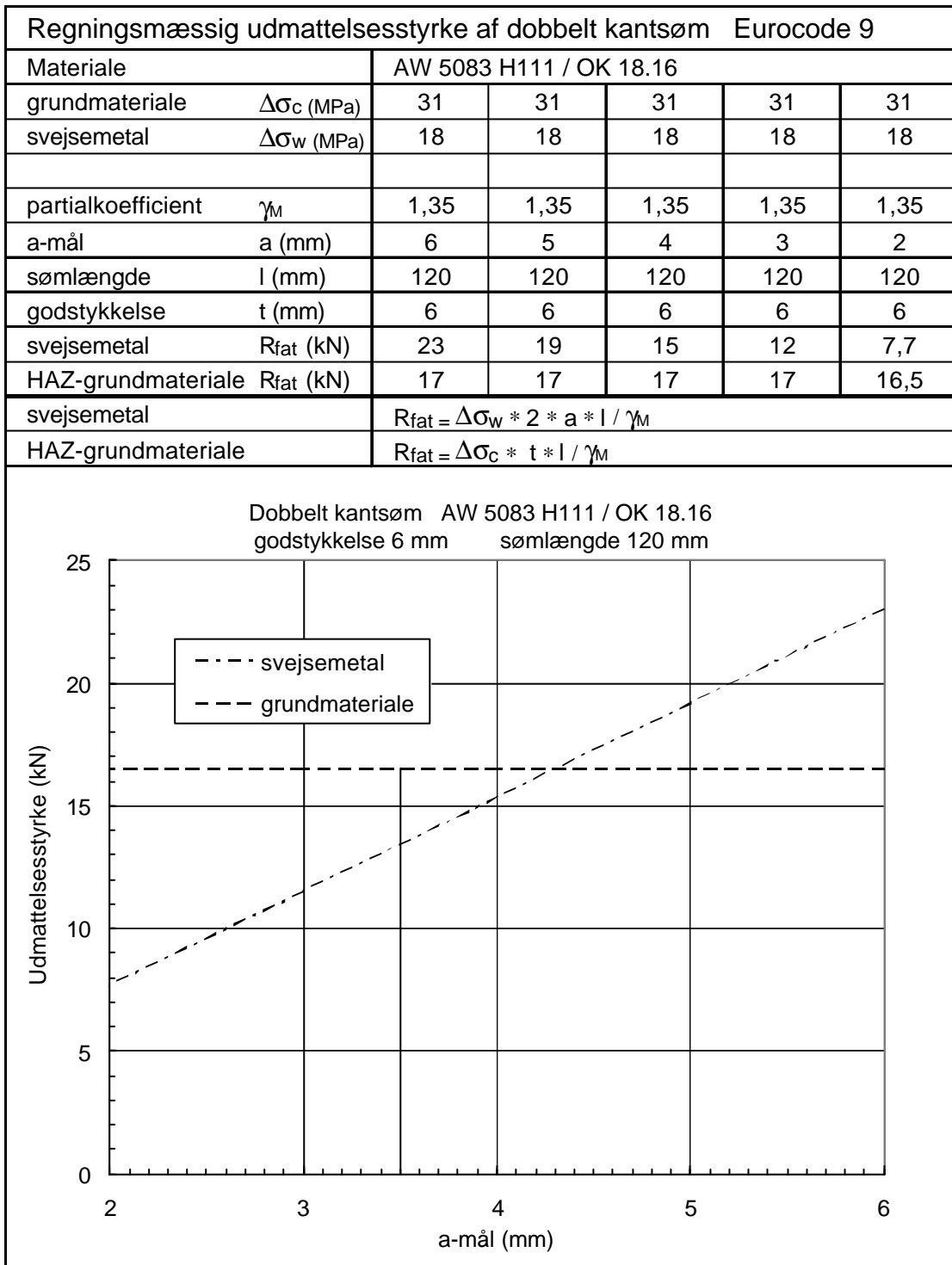


Figure 3 Optimering af udmattelsestyrke



Figure 4 Opspænding af testemner



Figure 5 Revneudbredelse i kantsøm uden kraterrevne

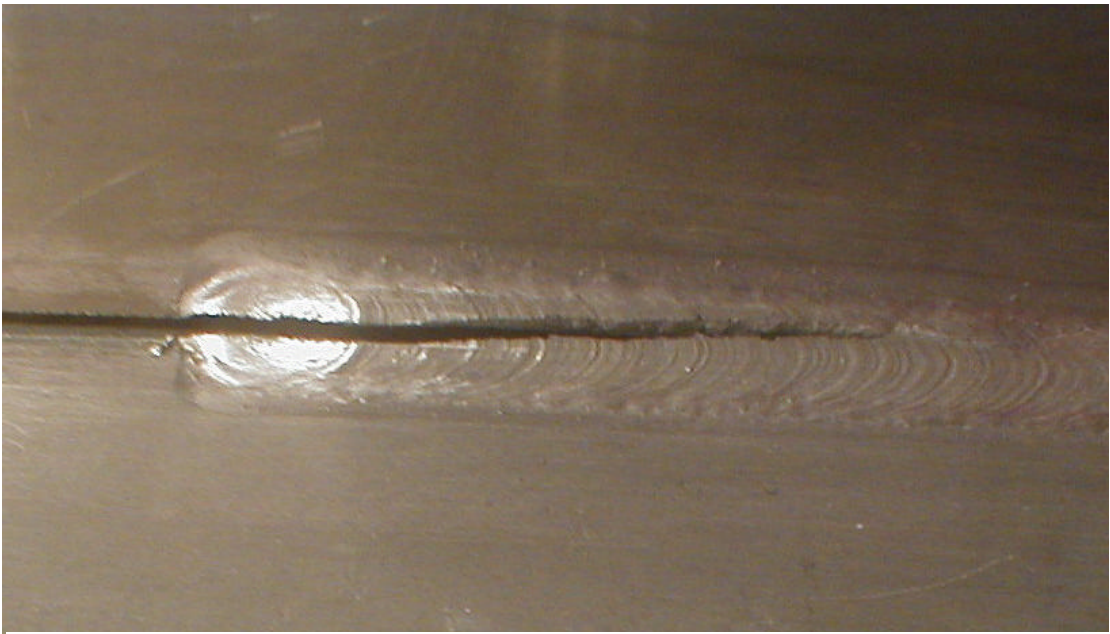


Figure 6 Revneudbredelse i kantsøm med kraterrevne

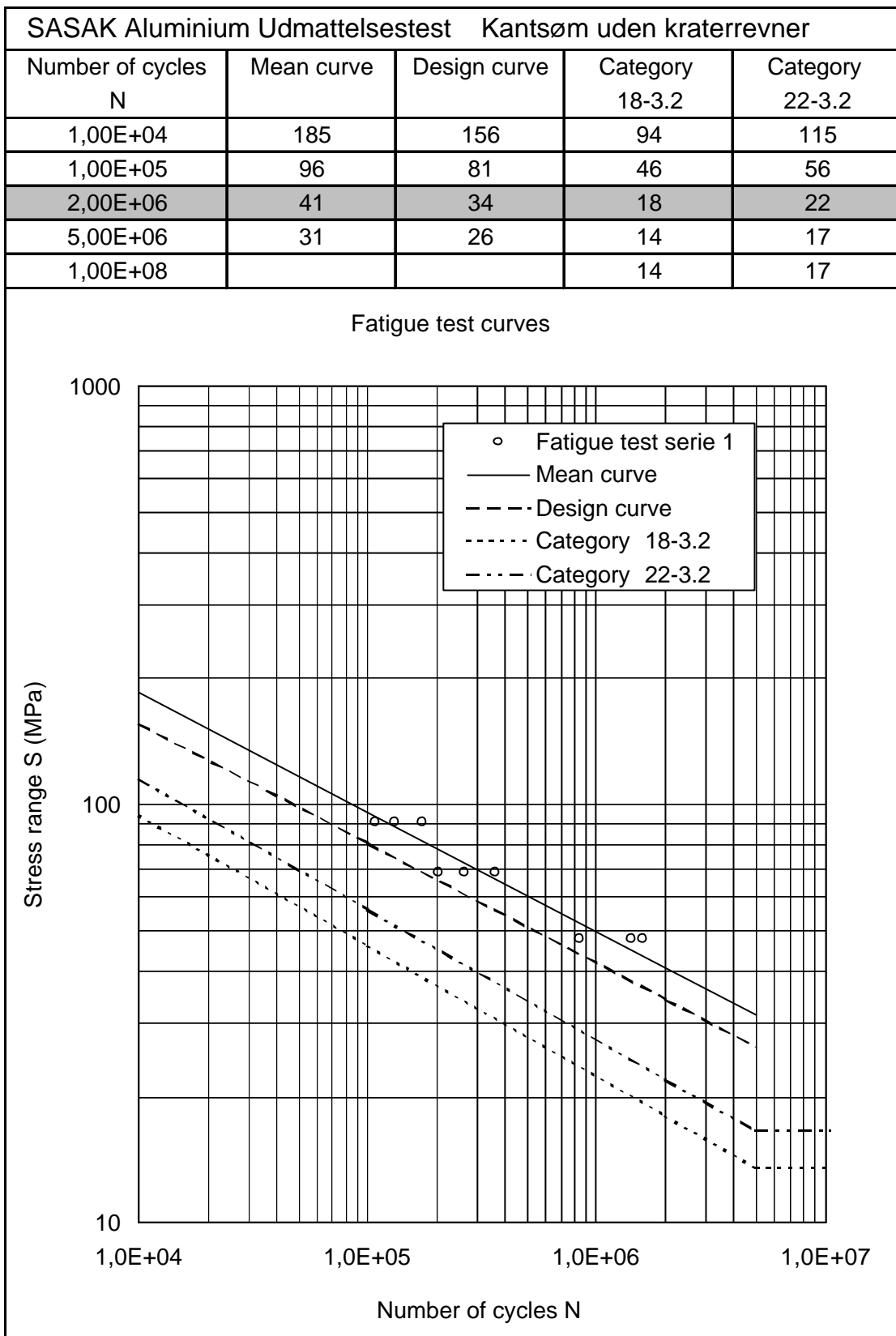


Figure 8 Udmattelseskurve for kantsømme uden kraterrevner

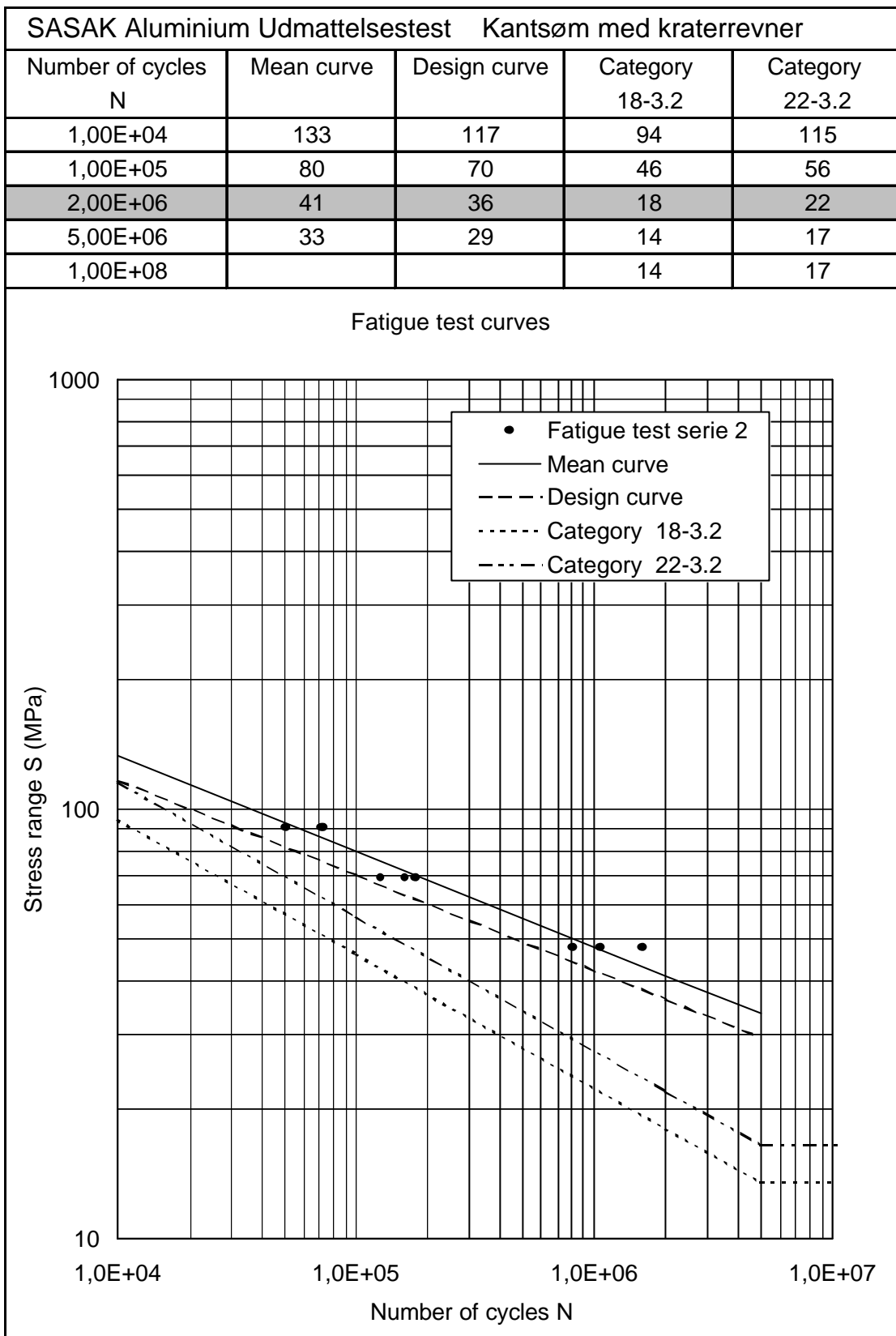


Figure 10 Udmattelseskurve for kantsømmen med kraterrevner

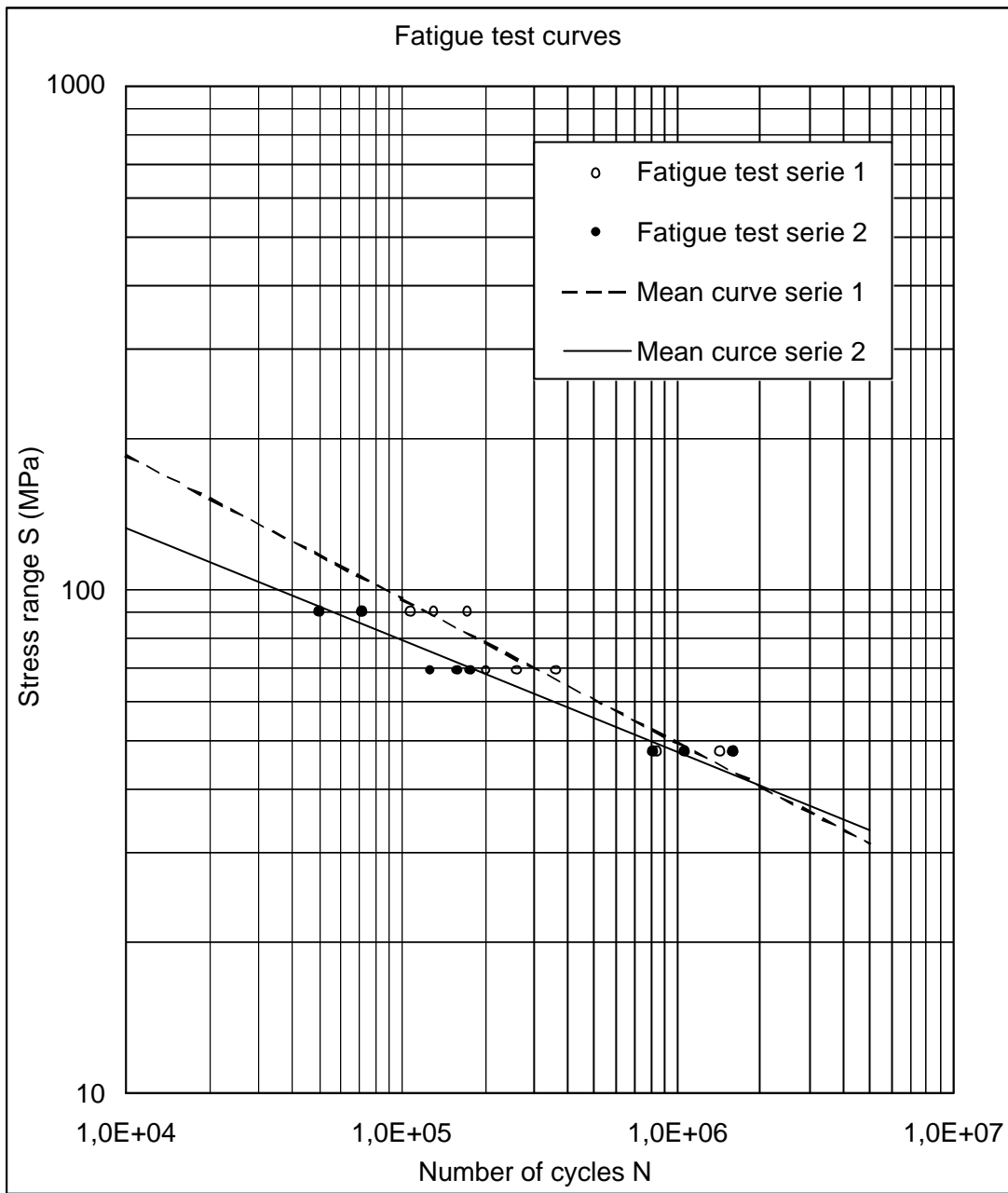


Figure 11 Middelkurver for kantsømme uden og med kraterrevner

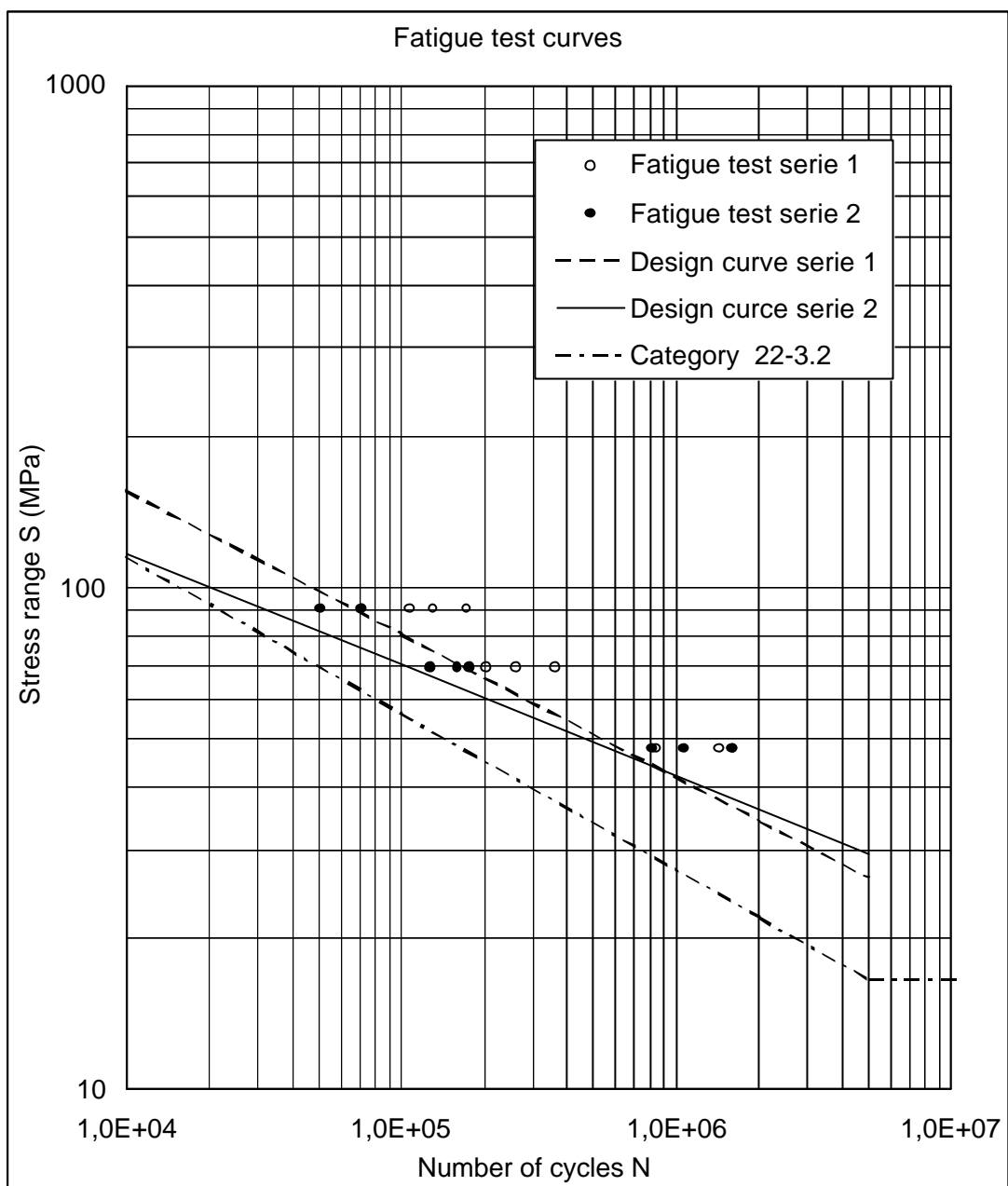


Figure 12 Designkurver for kantsømme uden og med kraterrevner