AALBORG UNIVERSITY

Introduktion til Udmattelse

M5 kursusgang 1

Søren Heide Lambertsen

Udmattelse fremkommer når belastninger/spændinger variere.

Et eksempel på en varierende last kunne være bølgelasten på jacket systemet på en bordplatform.

Udmattelse er en væsenlig faktor for design af maskin/stålkonstruktioner.

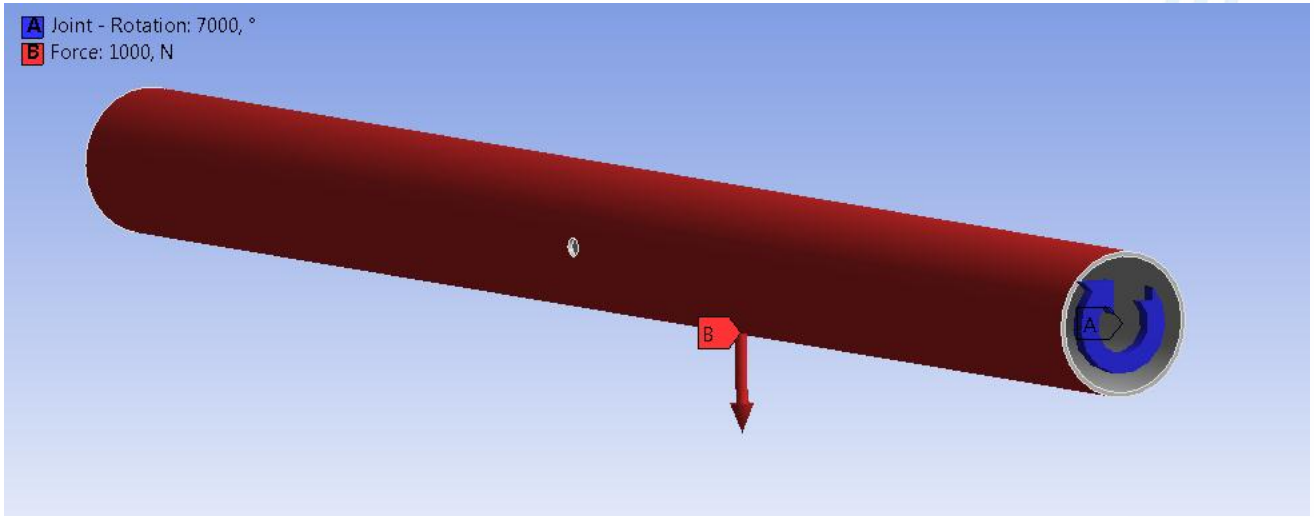
Udmattelsebrud er den hyppigste forekommende brudform i maskinkontruktioner.

De første undersøgelser af udmattelsesfænomenet blev udført af August Wøhler i 1850.

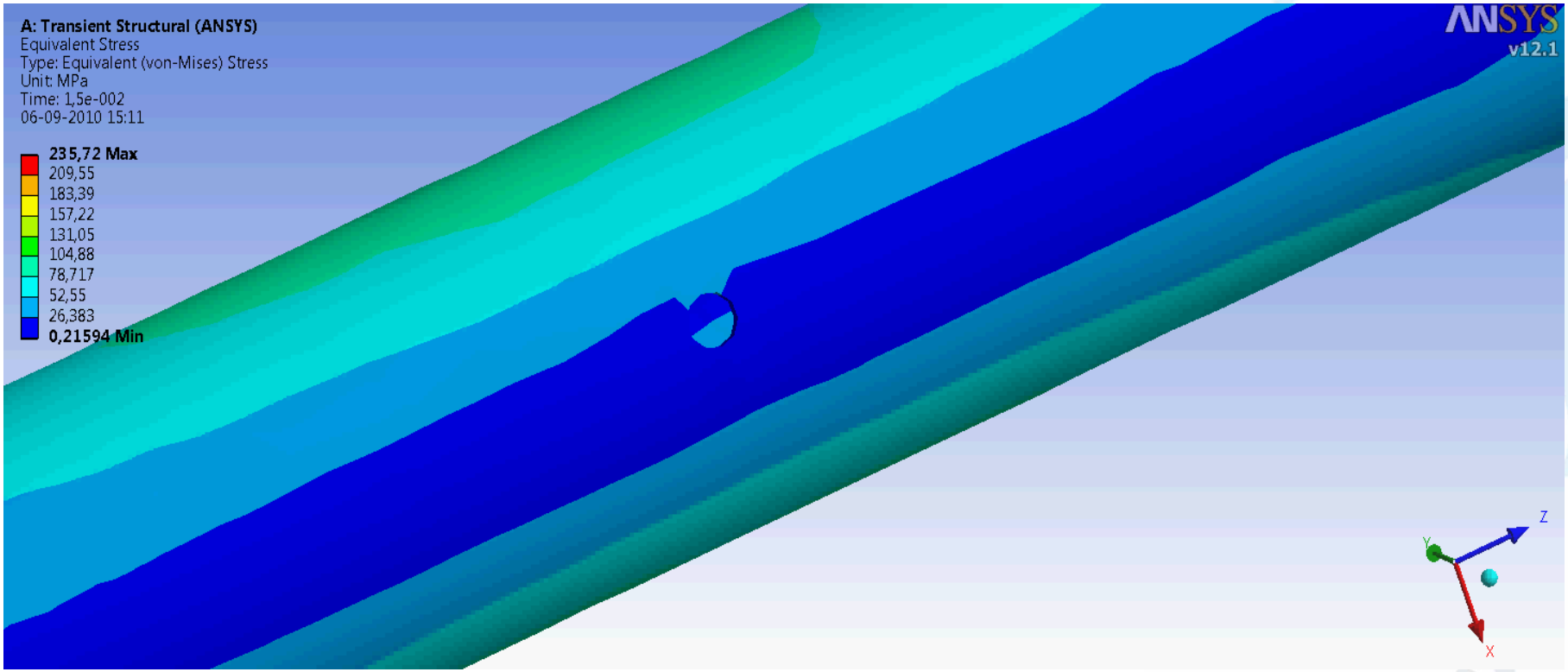
Disse undersøgelser udføres på grund af havari i hjulakslerne på togvognene.

Hvor kommer de varierende spændinger fra?

Undersøgelse af spændingerne i en aksel som rotere med en jævnt fordelt last.

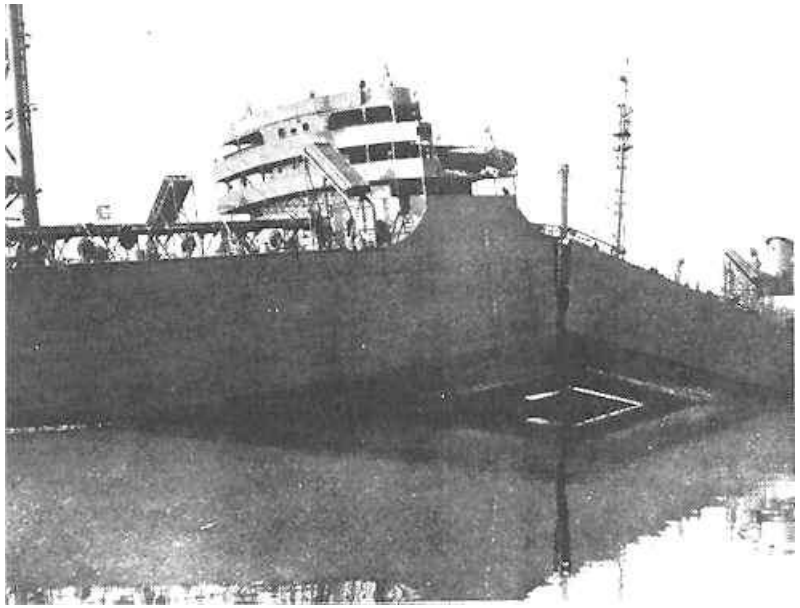


Spændingerne omkring hullet variere når akslen rotere



Spændingvaritionen giver udmattelse som kan føre til udmattelsesbrud.

Et udmattelsesbrud kommer pluseligt.



Der er 3 faser i et udmattelsesbrud.

1. Revneinitiering.
2. Revnevækst.
3. Slutbrud.

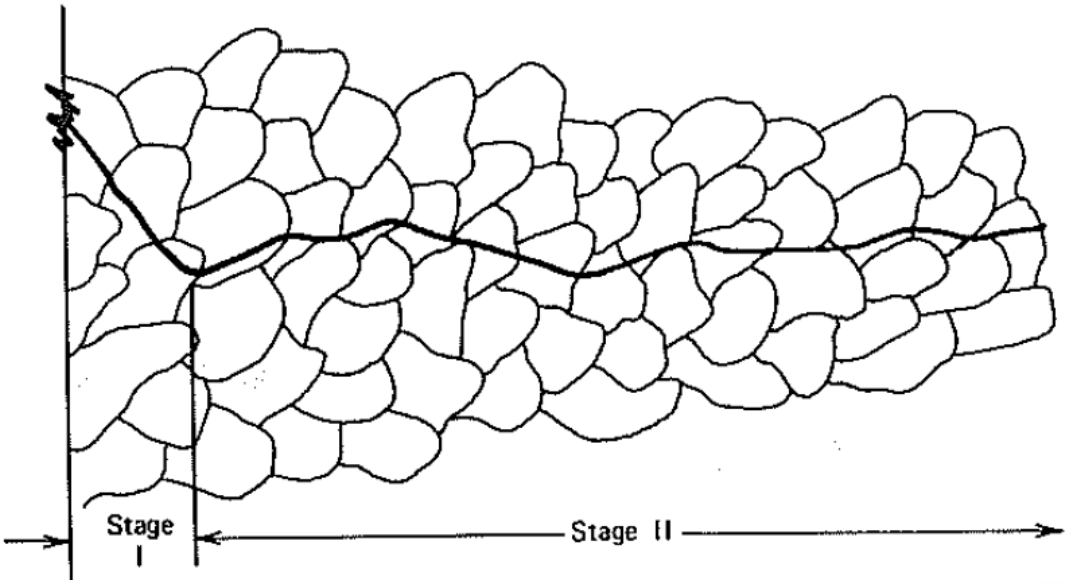
Revneinitiering.

Revneinitieringen fremkommer ofte i overfladen.

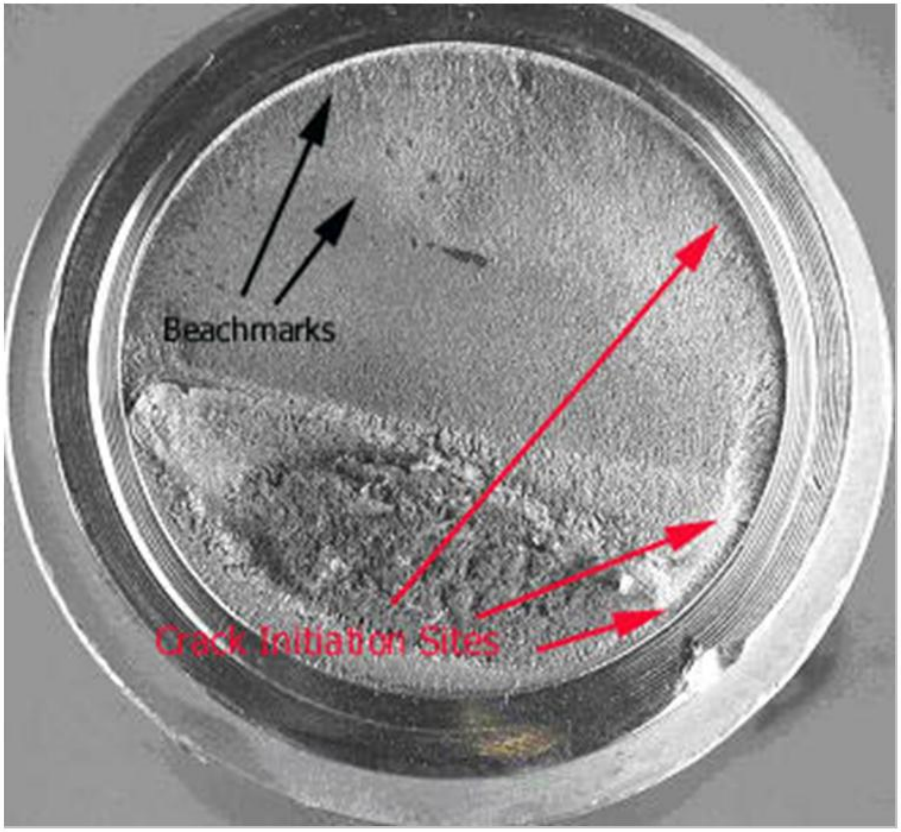
Starter som micro revner.

Disse microrevner vokser langs den maksimale forskydnings plan.

Revneforløbet ved transkrystallinsk revneudvikling.



Revnevæksten kan ses på brudfladen.



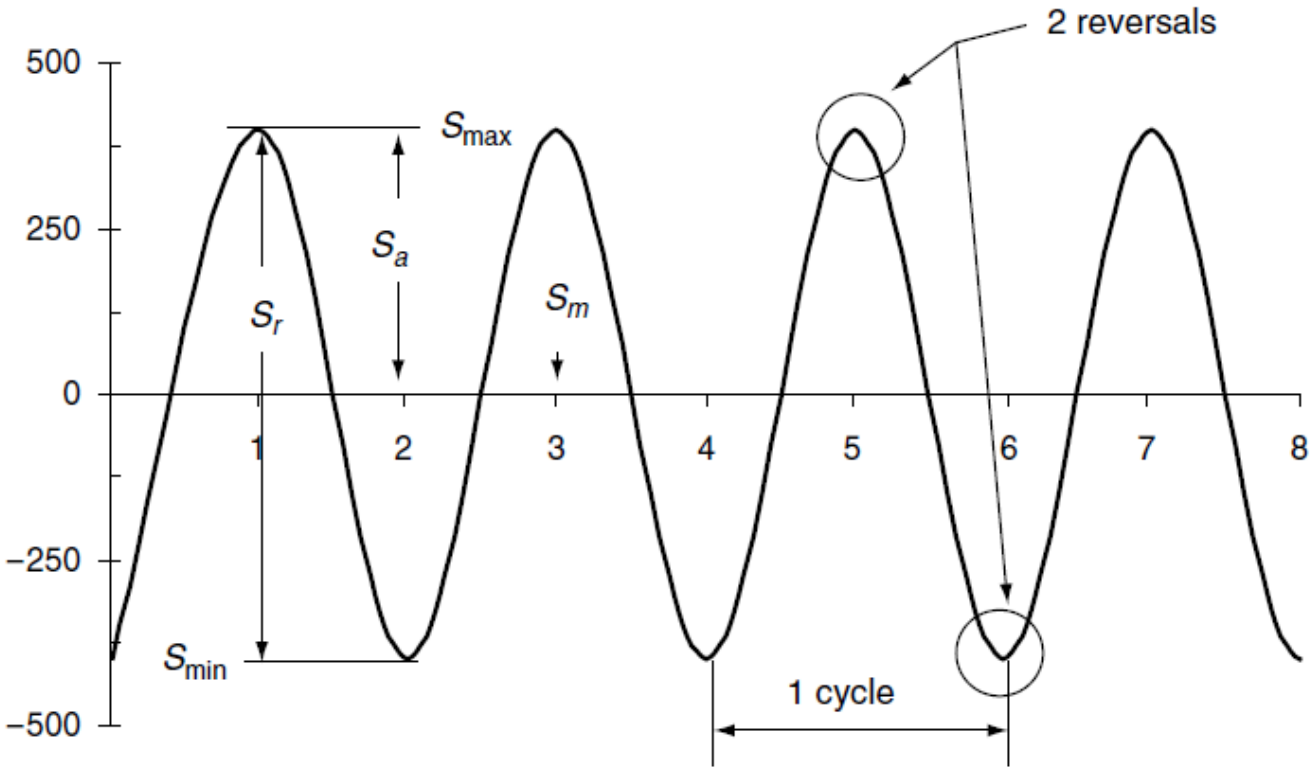
Belastningens indflydelse på udmattleseslevetiden

Trykspændinger giver mindre risiko for revnedannelse.

Des højre middelspændingen er des større er risikoen for udmattelse.

Derfor har belastningtypen stor interesse.

Væsentlige belastningsparametre.



Beregning af de væsentlige belastningsparametre.

$$S_a = \frac{S_{max} - S_{min}}{2}$$

$$S_m = \frac{S_{max} + S_{min}}{2}$$

$$R = \frac{S_{min}}{S_{max}}$$

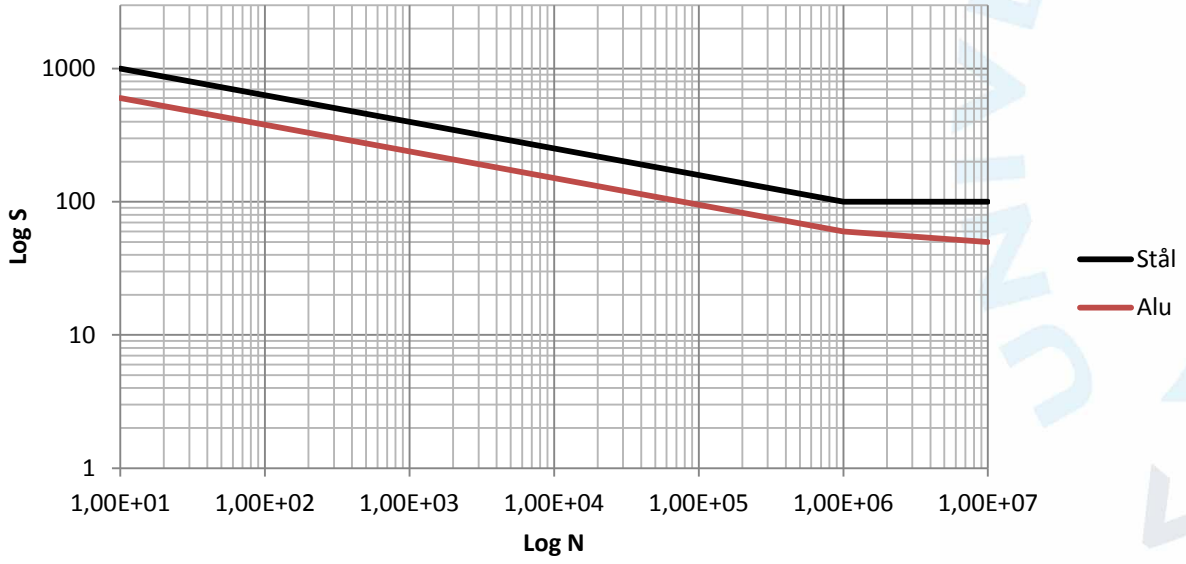
Beregning af udmattelseslevetiden.

$$S = A(N)^b$$

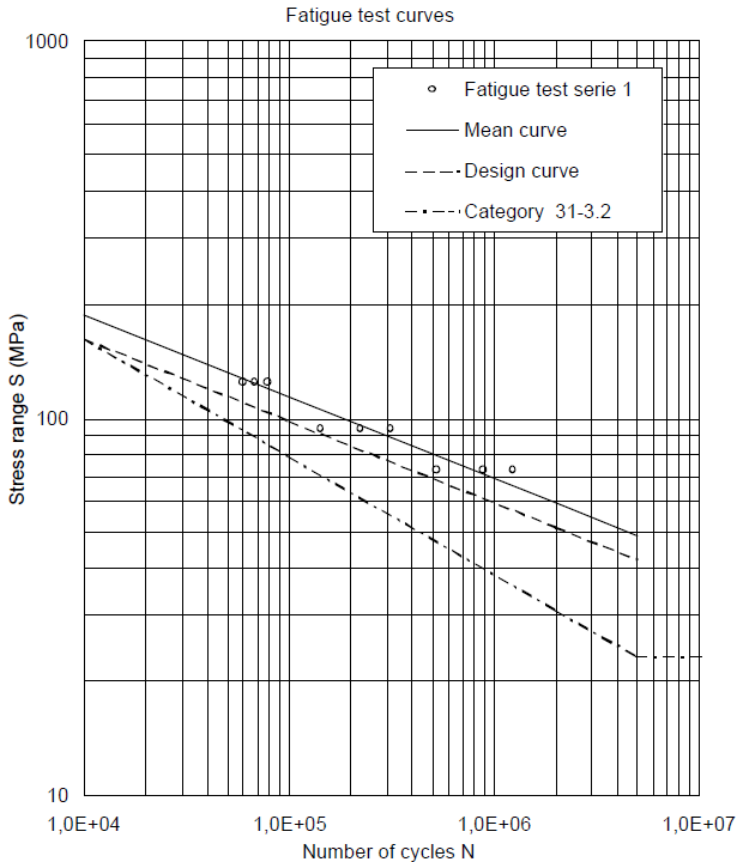
$$\log(N) = \log(a) + b\log(S)$$

$$\Delta\sigma_R{}^m \; N_R = \Delta\sigma_c{}^m \; 5 \cdot 10^6$$

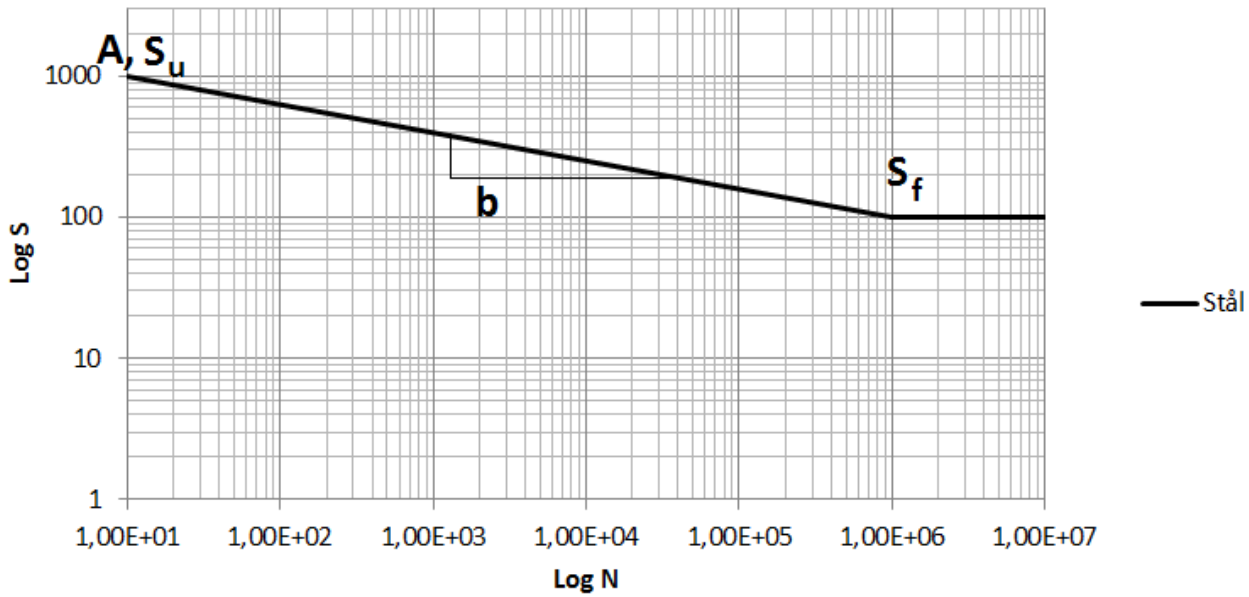
Der findes to typer udmattelseskurver.



S-N Kurve


Fatigue test curves
Fatigue test serie 1
Mean curve
Design curve
Category 31-3.2
1000
100
10
Stress range S (MPa)
1,0E+04
1,0E+05
1,0E+06
1,0E+07
Number of cycles N

Det er muligt at estimere udmattelsesgræsen ud fra brudspændingen og det er mulig at estimere brudspænding ud fra hårdheden.



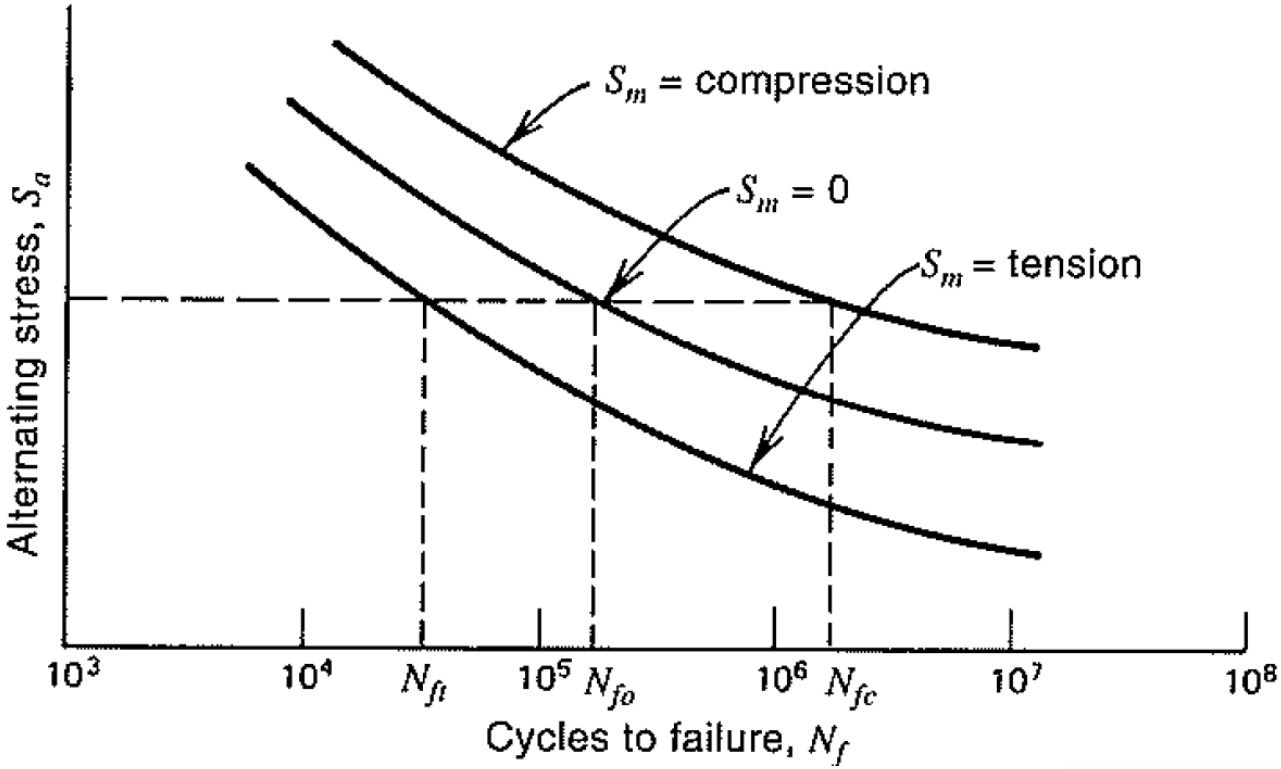
Basquin ligning: S= $A(N)^b$ $eller$ $\log N = \log a - b \cdot \log S$

Udmattelsesgrænse og brudspænding.

$$S_f \approx 0{,}5 \cdot S_u \quad for\ S_u \leq 1400MPa$$

$$S_u \approx 3{,}45 \cdot HB$$

Indflydelse fra middelspændingen på udmattelseslevetiden.



Medtagelse af middelspændingen i beregningen af udmattelseslevetiden.

$Modified\ goodman$:

$$\frac{S_a}{S_f} + \frac{S_m}{S_u} = 1$$

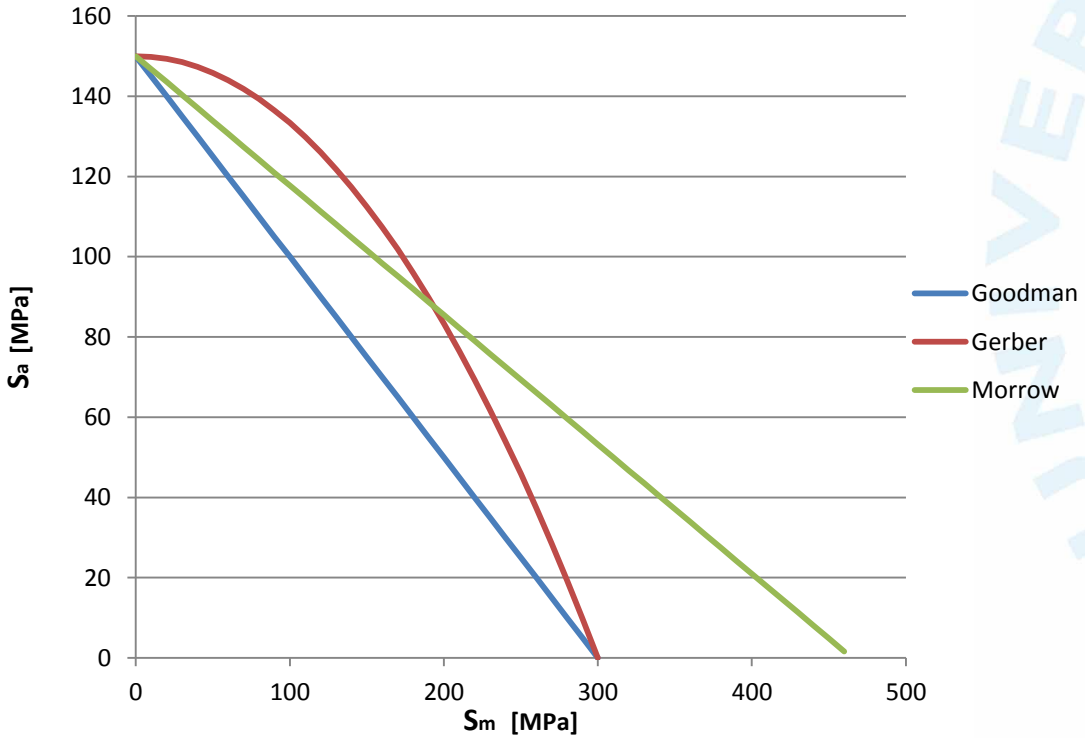
$Gerber$:

$$\frac{S_a}{S_f} + \left(\frac{S_m}{S_u}\right)^2 = 1$$

$Morrow$:

$$\frac{S_a}{S_f} + \frac{S_m}{\sigma_f} = 1$$

Plot af Modified Goodman, Gerber, Morrow



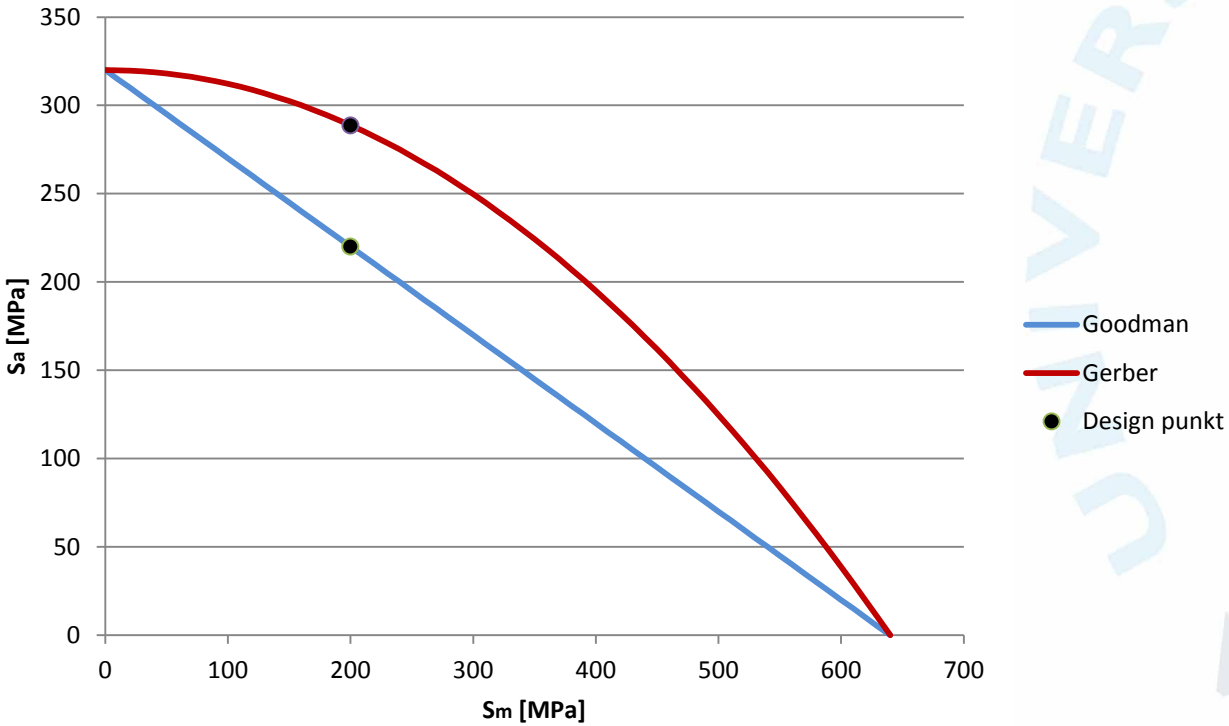
Eksempel.

Konstruktion med en brudspænding på 640 MPa og et middelspændingsniveau på 200 MPa.

$$\frac{S_a}{S_f} + \frac{S_m}{S_u} = 1 \Rightarrow S_a = \left(1 - \frac{S_m}{S_u}\right) \cdot S_f$$

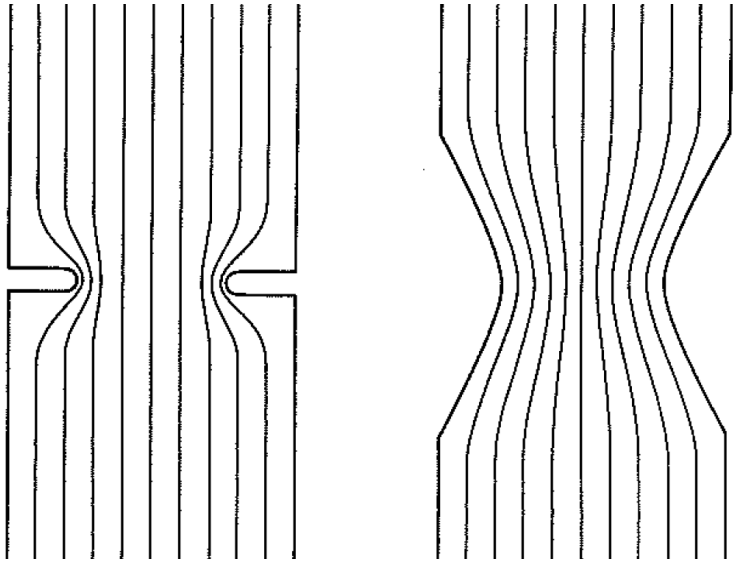
$$S_a = \left(1 - \frac{S_m}{S_u}\right) \cdot S_f = \left(1 - \frac{200\ MPa}{640\ MPa}\right) \cdot 320 \text{ MPa} = 220 \text{ MPa}$$

Resultat.


350
300
250
200
150
100
50
0
Sa [MPa]
0
100
200
300
400
500
600
700
Sm [MPa]
Goodman
Gerber
Design punkt

Spændingskoncentrationer.

Hvilken indfyldelse har emnets geometri på udmattelsesegenskaberne?

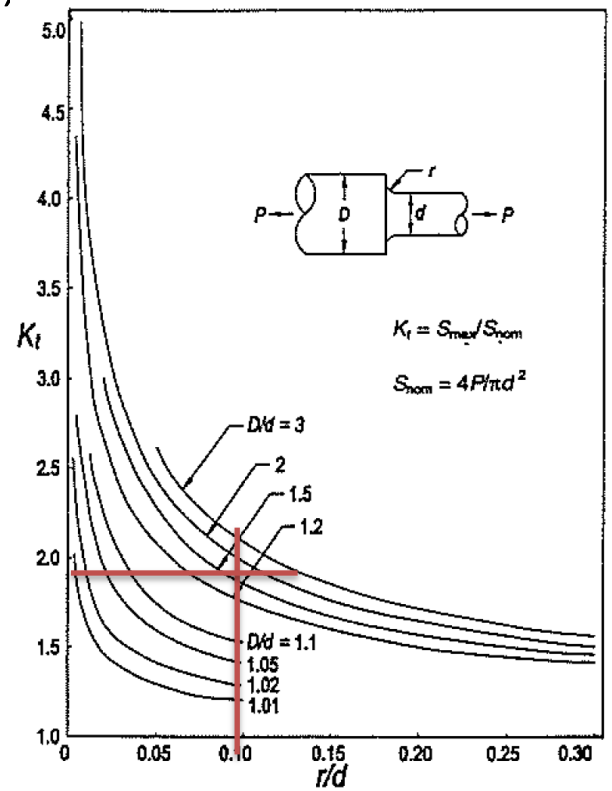


Spændingskoncentrationerne i en aksel.

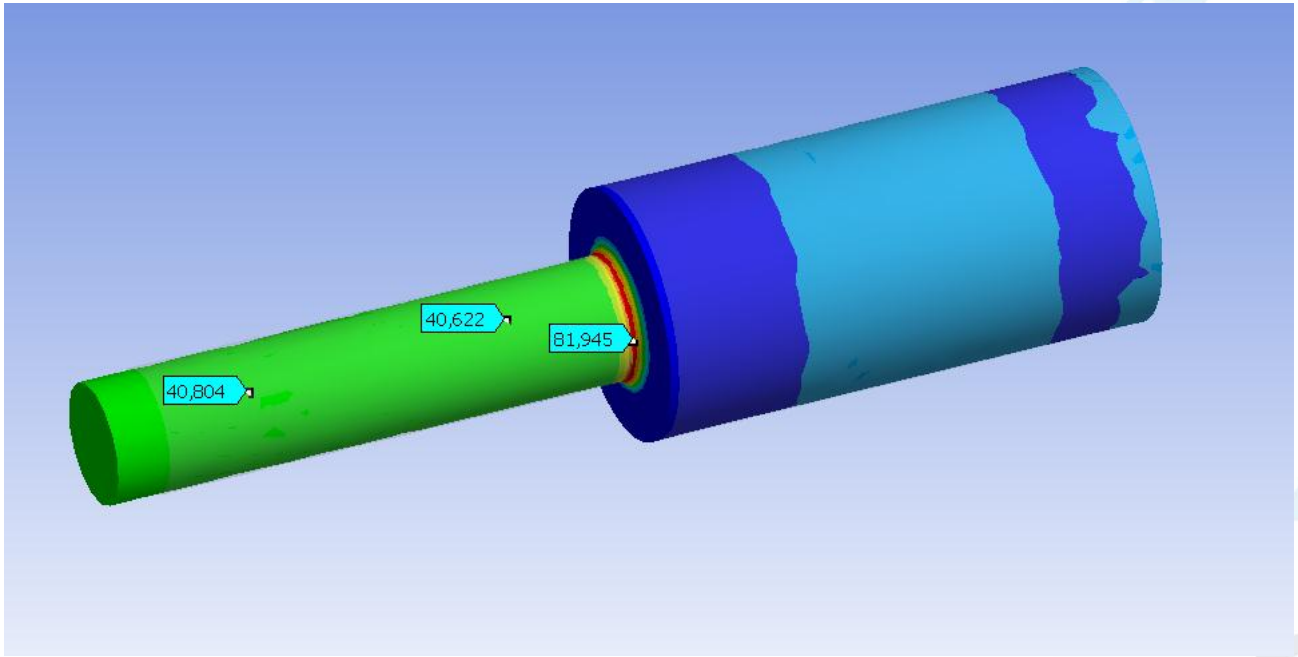
D= 50mm d=25mm r=2,5 P= 20kN D/d=2 r/d=0.1

$$K_t = \frac{\sigma}{S}$$

$$2 \cdot 40{,}75MPa = 81{,}5MPa$$



Spændingskoncentrationerne i en aksel.



Anvendelse af S-N data udfra konstruktionsdetalje.

Eurocode 3: Stålkonstruktioner del 1-9 Udmattelse

DS/EN 1993-1-9 + AC

DS 412

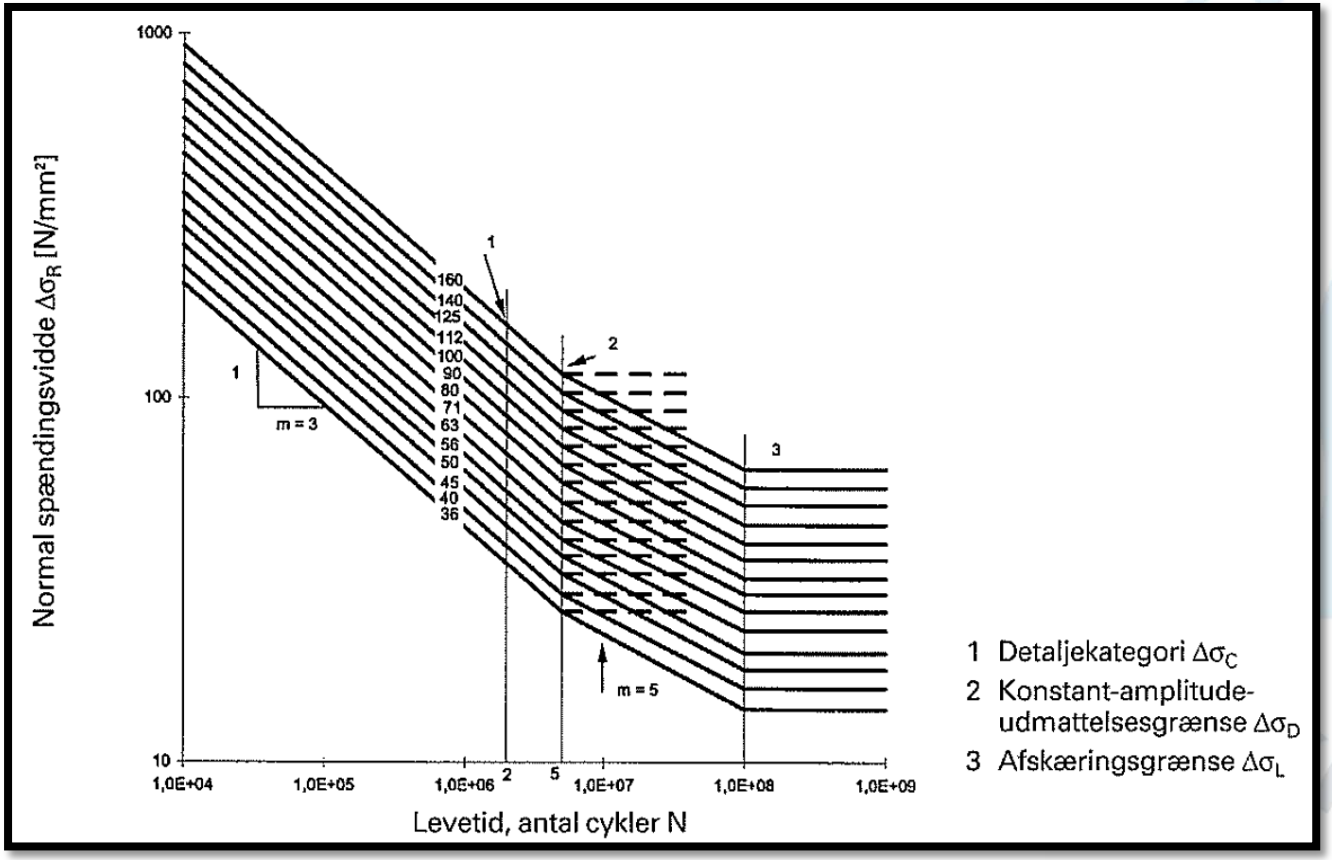
Konstruktionsdetalje
efter Eurocode 3.

Tabel 8.1 – Ikke-svejste elementer og mekanisk fastgjorte samlinger

Detalje-kategori	Konstruktionsdetalje	Beskrivelse	Krav
160	NOTE – Udmattelseskurven for kategori 160 er den øverste. Ingen detalje kan opnå en højere udmattelsesstyrke ved noget antal cykler.	Valsede og ekstruderede produkter: 1) Plader og fladstål 2) Valsede profiler 3) Sømløse rørprofiler, rektangulære eller cirkulære.	Detalje 1) til 3): Skarpe kanter, overflade- og valseujævnheder skal bearbejdes ved slibning, indtil de er fjernet, og der er opnået jævn overgang.

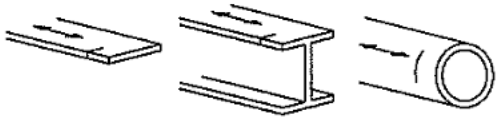
$$\sigma_R^m \cdot N_R = \sigma_c^m \cdot 2 \cdot 10^6$$

Efter Eurocode 3.



Efter DS412.

Kærvanvisningskategori bestemmes (Navngives ved $N = 2 \cdot 10^6$)

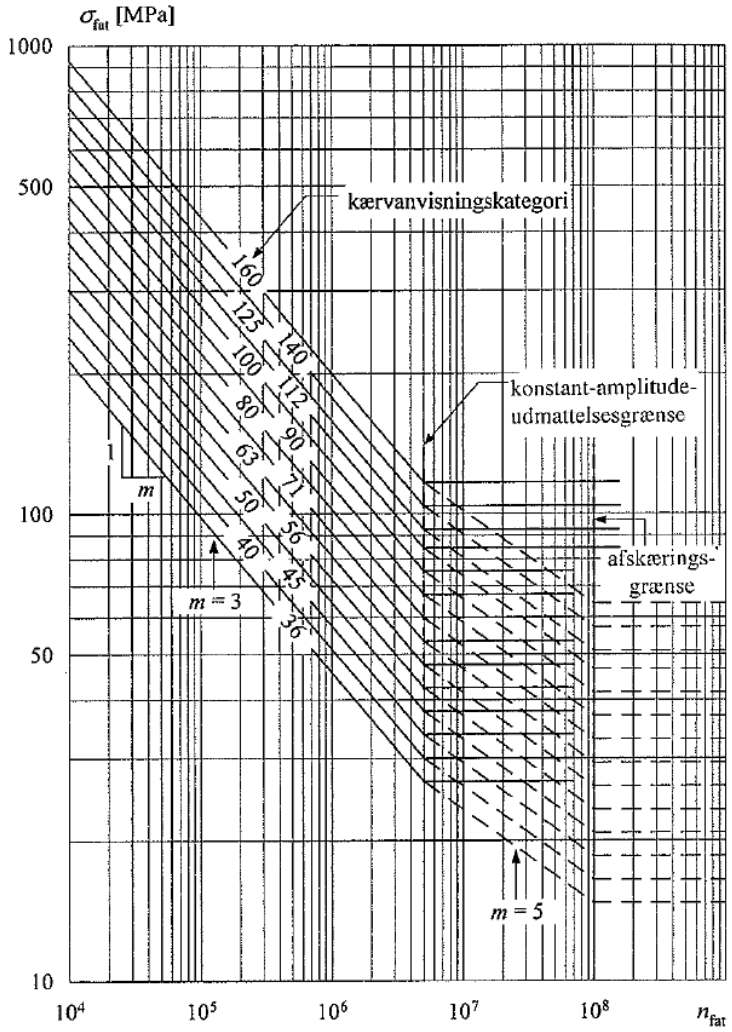
nr.	kategori	kærvanvisning	beskrivelse	krav
1	160	 [1] [2] [3]	*valsede og ekstruderede produkter med normal valsehud:* [1]: • plader og fladstål [2]: • valsede profiler [3]: • sømløse rørprofiler	[1]-[3]: • skarpe kanter, overflade- og valseujævnheder skal bearbejdes ved slibning.

$$\log N = \log a - m \cdot \log S$$

Tabel B.1 – Udmattelsesudtryk for normalspændingsvidder

kærv-anvisnings-kategori	log a for $n < 10^8$		σ_{fat} ved konstant-amplitude-udmattelsesgrænsen $n = 5 \cdot 10^6$ [MPa]	σ_{fat} ved afskæringsgrænsen $n = 10^8$ [MPa]
	$n \leq 5 \cdot 10^6$ $m = 3$	$n > 5 \cdot 10^6$ $m = 5$		
160	12,901	17,036	117	64
140	12,751	16,786	104	57
125	12,601	16,536	93	51
112	12,451	16,286	83	45
100	12,301	16,036	74	40
90	12,151	15,786	66	36
80	12,001	15,536	59	32
71	11,851	15,286	52	29
63	11,701	15,036	46	26
56	11,551	14,786	41	23
50	11,401	14,536	37	20
45	11,251	14,286	33	18
40	11,101	14,036	29	16
36	10,951	13,786	26	14

$$\log N = \log a - m \cdot \log S \rightarrow \log N = \log(12{,}901) - 3 \cdot \log(S)$$


σ_{fat} [MPa]
1000
500
100
50
10
10^4
10^5
10^6
10^7
10^8
n_{fat}
kærvanvisningskategori
160
125
100
80
63
50
40
140
112
90
71
56
45
36
konstant-amplitude-
udmattelsesgrænse
afskærings-
grænse
1
m
m = 3
m = 5

Opgaveregning.