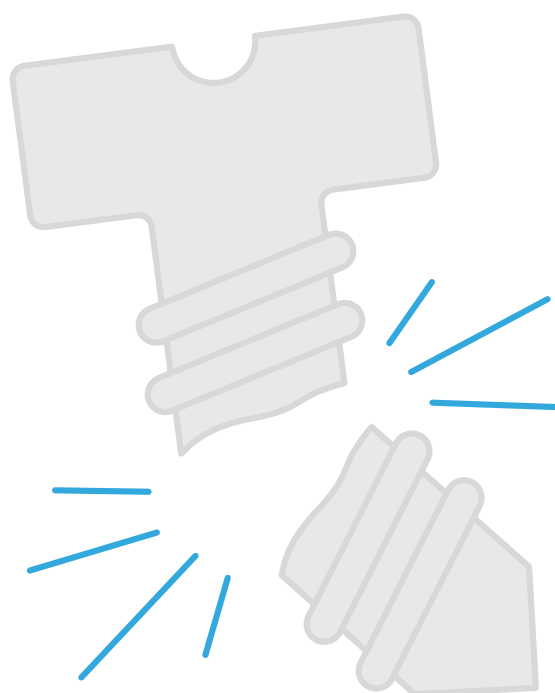




---

# Udmattelse – lydløs, pludselig og dødelig

White Paper

# Udmattelse – lydløs, pludselig og dødelig

---

af Ivan Guban

Assembly Technology Expert  
Bossard Czech Republic

[www.bossard.com](http://www.bossard.com)



ASSEMBLY  
TECHNOLOGY  
EXPERT

## UDMATTELSE – LYDLØS, PLUDSELIG OG DØDELIG

## Historie

Vi har kendt til udmattelse siden begyndelsen på bronzealderen. Mange værktøjer og enkle genstande blev beskadiget eller gik i stykker ved belastning langt under strækgrænsen, uden at man hæftede sig meget ved fænomenet. Hvorfor ikke? Af samme grund som smeden ikke undersøger, hvorfor hans hammer svigter. Han skifter blot til en ny. Man er ligeglad.

Situationen begyndte at ændre sig i forbindelse med industri- og teknologiuudviklingen under revolutionen, der startede med James Watts opfindelse af dampmaskinen. Enkle værktøjer og mekanismer erstattes af tunge maskiner i de første fabrikker, som bygges i Vesteuropa. Man indførte offentlig transport, f.eks. tog, og det er præcis på denne tid, at det hele startede.

Det hele skete en rolig eftermiddag søndag d. 8. maj 1842. Fejringen af Kong Louis Philippe på Versailles var netop overstået, og omkring 700 mennesker begyndte at tage hjemad til Paris. Kort efter at deres tog havde forladt stationen i Versailles og accelererede til 40 km/t., begyndte

nedkørslen ad en bakke, hvilket førte til en let stigning i hastigheden. Der var en kurve lige neden for bakken, som pressede voldsomt på begge sider af skinnerne, hvilket gjorde, at akslen på det første lokomotiv brækkede af. Det første lokomotiv blev straks afsporet, og det andet, der stadig kørte for fuld gas, hævede sig nemt over det første, som var det et legetøj, og trak resten af toget hen over det. Desuden brækkede den anden motor i tusind stykker og begyndt hurtigt at brænde.

Der var ikke konstateret tekniske problemer forinden, lokomotivføreren havde ikke lavet fejl, og man kunne ikke få øje på nogen ydre påvirkninger. Så hvad var årsagen til, at op mod 200 mennesker døde, og flere hundrede blev såret?

Problemet med udmattelse var dårligt kendt dengang. Manglen på svar tvang den akademiske elite til at undersøge ulykken og finde ud af, hvad der virkelige forårsagede den værste togulykke på daværende tidspunkt. Og det tog faktisk ikke så lang tid. Rankine løste udmattelsesproblemet på aksler, og nogle år senere udviklede den tyske matematiker August Wöhler den første systematiske beskrivelse af udmattelsesegenskaber. Han er ophavsmanden til den såkaldte Wöhler-kurve, som stadig bruges.

Til trods for vores øgede viden og udviklingen inden for teknologi har udmattelse været årsagen til katastrofer mange andre gange. I de fleste tilfælde skyldes uheldene forkert design eller vedligeholdelse. Konstruktionsingeniører bør altid være klar over, hvornår der vil opstå dynamisk belastning. Og det gælder også for befæstelseselementer.



Fig. 1: Maleri af katastrofen på jernbanen mellem Versailles og Bellevue d. 8. maj 1842 – A. Provost

## UDMATTELSE – LYDLØS, PLUDSELIG OG DØDELIG

## Introduktion

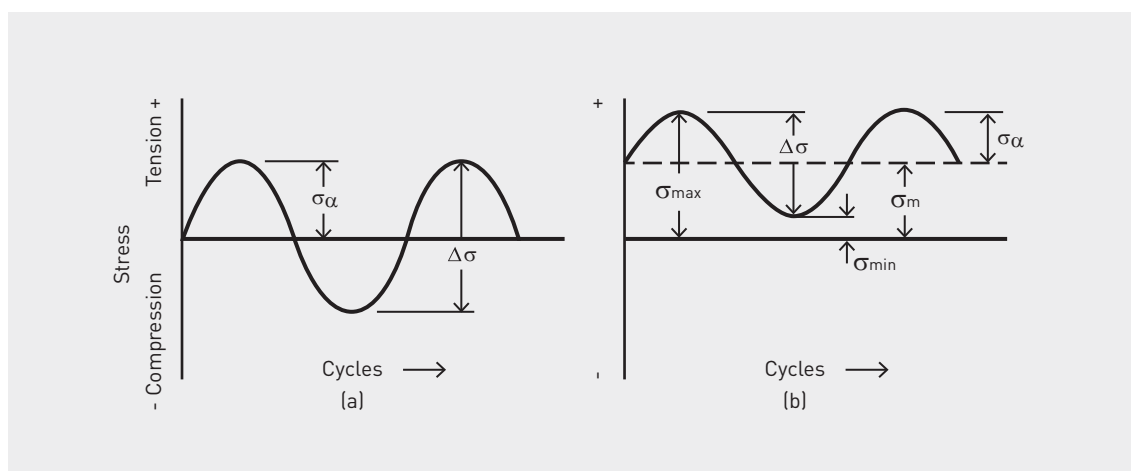
Udmattelse defineres som den akkumulerede nedbrydning af materiale forårsaget af dynamisk belastning med amplitude under grænsen for brudstyrke. Ud fra et praktisk perspektiv kan vi opdele udmattelse i to grupper:

- Udmattelse ved få cyklus belastninger på op til  $10^4$  og spændingsamplitude over strækgrænsen, hvor plastisk deformation er fremherskende
- Udmattelse ved mange cyklus belastninger på mere end  $10^4$  og spændingsamplitude normalt langt under strækgrænsen, hvor elastisk deformation er fremherskende

Udmattelse ved få belastninger er ikke vigtig, når det gælder en samlings konstruktion. Under udmattelsesprocessen med få cyklus belastninger overskrider spændingsamplituder normalt strækgrænsen. Befæstelselementer bør slet ikke nå dette belastningsniveau. Vi bør derimod være opmærksom på udmattelse ved mange cyklus belastninger! Til konstruktioner med befæstelser bør konstruktører altid overveje effekten af udmattelse ved mange cyklus belastninger, når der må forventes dynamiske kræfter!

På fig. 2 a) ses der et typisk eksempel på en dynamisk belastningscyklus. Den vigtigste variabel er ikke den maksimale belastning ( $\sigma_{\max}$ ), men den påførte belastnings amplitude  $\sigma_a$ . Det er det væsentlige parameter, som bestemmer materialets udmattelsesegenskaber.

Der findes en meget specifik fare i befæstelsesbranchen. Når den nederste amplitude i belastningscyklussen krydser nullinjen, går al forspænding i den fastgjorte samling tabt, og skruen drejer sig løs eller knækker tilmed efter et stykke tid. Konstruktøren af en samling skal forebygge, at dette sker.



Figur 2: Eksempler på forløbet af en dynamisk belastning: a) symmetrisk b) pulserende – typisk cyklus for et spændt befæstelselement.

I mere end et århundrede er Wöhler-kurven i stor udstrækning blevet brugt til at beregne udmattelsens påvirkning. Det er et diagram, der viser afhængigheden mellem belastningsamplituden i én cyklus og antallet af cyklusser uden brud. Det kan ses i fig. 3. I diagrammet er der fire områder, som gengiver fire perioder af udmattelseslevetiden.

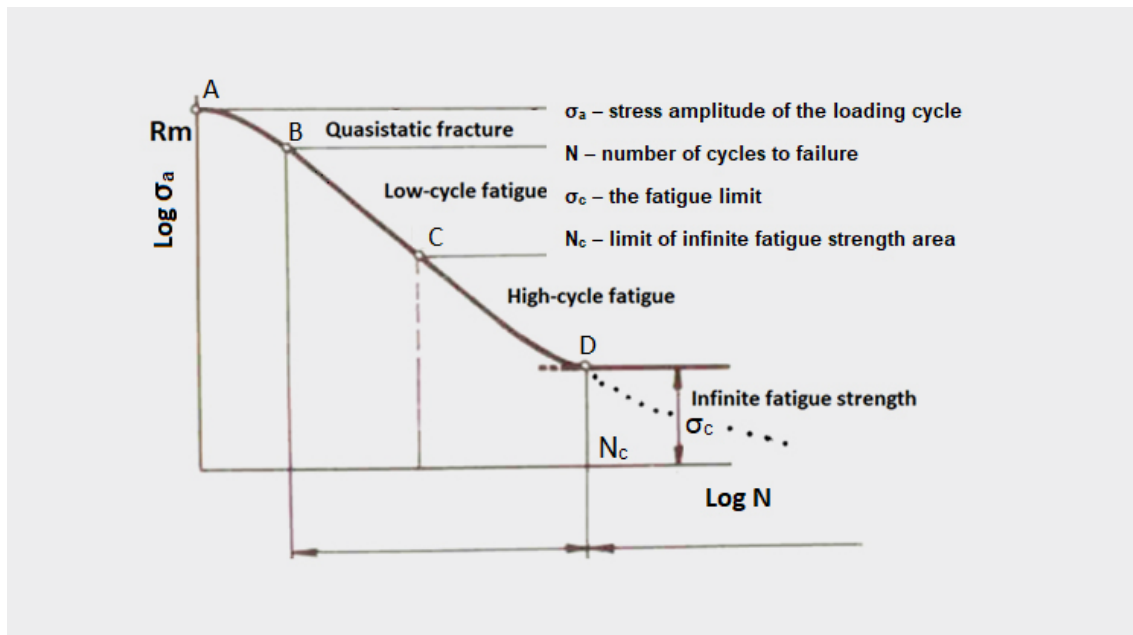


Fig. 3: Wöhler-kurven – afhængighed mellem én amplitude belastningscyklus og antallet af cyklusser. Koordinater kan være enten lineære eller logaritmiske. Kurvens form bevares i begge tilfælde.

Som vi kan se af fig. 3, aftager amplitudeafhængigheden ikke yderligere fra punkt D. Efter spændingsamplituden er reduceret til under en bestemt værdi, er der ingen udmattelsesskader. Området lige til højre for punkt D under Wöhler-kurven er kendt som området for uendelig udmattelsesstyrke. Når en ingeniør konstruerer en tilspændt samling, bør vedkommende gøre sit bedste for at arbejde i området for uendelig udmattelsesstyrke. Men selvfølgelig er værdierne  $N_c$  og  $\sigma_c$  teoretiske. Ideelt set er de en funktion af materialet. Men virkeligheden ser meget anderledes ud. Når man beregner et befæstelseselements udmattelsesstyrke, skal man tage hensyn til aspekter såsom geometri, overfladebeskaffenhed, temperatur, materialets renhed, belastningsforhold og omgivelserne. Til generelle formål inden for maskinteknik er værdien  $N_c$  standardiseret. For eksempel har stållegeringer  $N_c = 10^8$  cyklusser, og i standarden VDI 2230:2015 er  $N_c = 2,106$  cyklusser for befæstelseselementer.

## UDMATTELSE – LYDLØS, PLUDSELIG OG DØDELIG

## Mekanisme

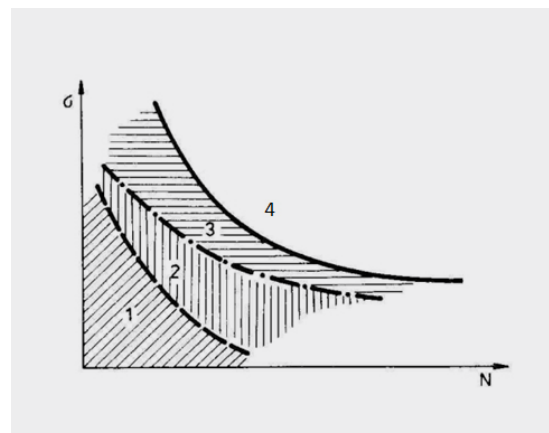
Udmattelseslevetiden kan inddeles i fire faser som vist på billedet nedenfor.

1. fasen for ændring af mekaniske egenskaber – ubetydelig for konstruktion af befæstelseselementer
2. fasen for påbegyndt udmattelsesrevne
3. fasen for udbredelse af udmattelsesrevne/r
4. endeligt brud på befæstelseselementets reducerede tværsnit

Den første fase er forbundet med ændring af mekaniske egenskaber. På grund af den cykliske belastning kan materialet blive en smule hårdere eller blødere, og der opstår hysteres. Ændringen af mekaniske egenskaber er sjældent større end 1 %, og den er ikke vigtig, når ingeniører konstruerer en samling.

Udmattelsesrevnen opstår i den anden fase, men er endnu mikrometrisk. Den dannes på grund af ekstrem lokal ophobning af plastisk deformation i overfladearealet med ruheder og diskontinuiteter. I disse områder kan spændingsamplituden være større end materialets strækgrænse. På det tidspunkt har plastisk deformation ophobet sig her og kan forårsage en revneinitiering. Udmattelsesrevnen starter altid i overfladen.

I den tredje fase sker en forplantning. Den netop opståede revne vokser på grund af den vedvarende dynamiske belastning. Små revner vokser sammen til én dominerende revne, som i høj grad har mulighed for at forårsage det endelige udmattelsesbrud. I denne fase dannes en sribet brudfladen – ækvidistante kurver, der kan ses på brudfladen.



Figur 4: Skematisk fremstilling af udmattelsesfaser

Det endelige brud, som er forårsaget af overbelastning af det reducerede tværsnit, anses for at være fjerde fase. Det endelige bruds beskaffenhed afhænger af materialet og belastningsforhold. Se billedet nedenfor.

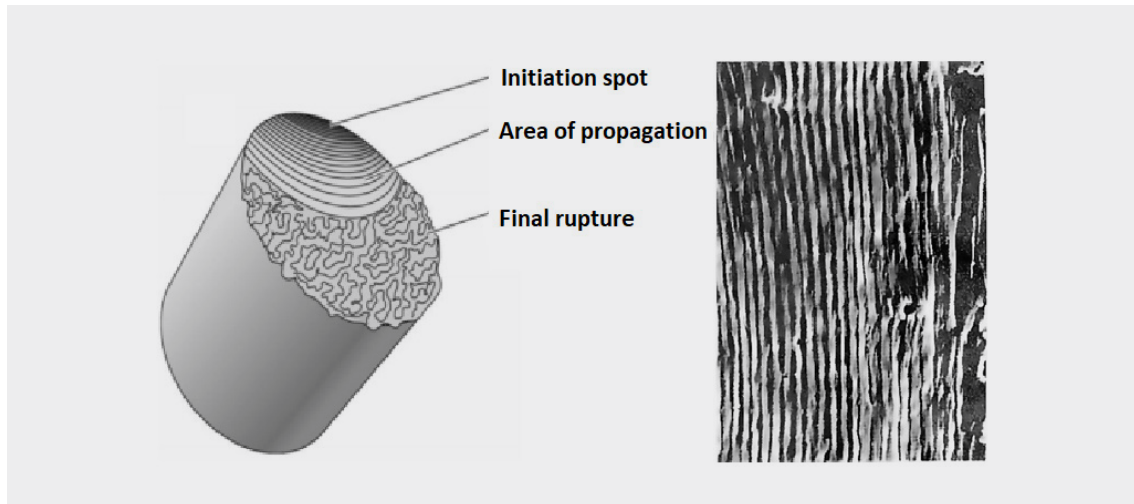


Fig. 5: Udmattelsesbrud – stribet beskaffenhed i området, hvor udmattelsesrevnen vokser sig sekventielt større, og detaljeret visning af striberne til højre.

En stribet beskaffenhed er den bedste indikator for udmattelse. I mange tilfælde kan de ses med øjnene, så ved hjælp af dem kan man meget hurtigt og nemt opdage udmattelse. Men man skal være opmærksom på, at der godt kan være materiale udmattelse, selvom der ikke er vækst striber.

I virkelighedens verden kan vi næppe opnå situationer, hvor materialet belastes med en cyklus af

konstante amplituder. Det betyder, at der skal tages hensyn til ændringer i spændingsamplituden over tid. Til at illustrere dette kan vi bruge vingen på et passagerfly. I flyindustrien, herunder vedligeholdelse og trafik, er der meget fokus på sikkerhed. Det betyder, at der foretages mange beregninger af udmattelsesstyrke og udmattelseslevetid. Et typisk eksempel på påført belastning af vingen under flyvning er vist i figur 6.

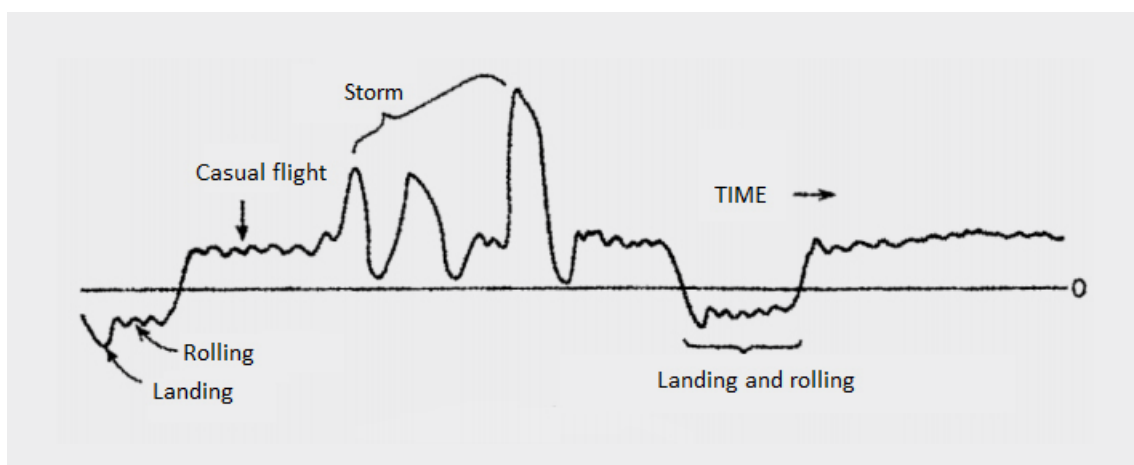


Fig. 6: Registreret belastning af hængslet på en flyvinge

Som det fremgår af fig. 6, er spændingsamplituden anderledes, når flyet taxier og letter, og meget anderledes, når det flyver igennem en storm og lander. Desuden kan forholdene under forskellige flyvninger variere meget. Man bør altid huske på de forskellige flyveforhold.

Når en ingeniør konstruerer en fastgjort samling, bør vedkommende være opmærksom på ændringer i spændingsamplituden. Selv befæstelseselementer rammes af ændringer i amplitude, når de er udsat for dynamisk belastning. For at give en grundlæggende forståelse af, hvordan man beregner udmattelseslevetiden eller den resterende levetid for et befæstelseselement, udsat for vekslende dynamisk belastning, beskrives den mest enkle forudsigelsesmodel i følgende afsnit.

Alle slags skader (selv mikroskopiske) opstået på grund af dynamisk belastning har akkumuleret karakter. Og det er meget vigtig viden, som ingeniører altid skal huske på. Lad os illustrere dette med vingen på en vindmølle. Denne vindmølle var konstrueret til 5.000.000 cyklusser ved spændingsamplitude på 150 MPa. Men på grund af en orkan blev vindmøllen udsat for en spændingsamplitude på 250 MPa i 100.000 cyklusser. Hvor mange cyklusser er der tilbage? Hvor længe fungerer vindmøllen sikkert? Kan vi sænke belastningen til 100 MPa og regne med, at det er sikkert?

Den ældste og enkleste model til at forudsige udmattelseslevetiden hedder Palmgren-Miner-reglen. Det er den relativt enkle ligning i fig. 8, som stadig bruges hyppigt i praksis.

$N_i$  – antal cyklusser ved amplitude  $\sigma_{ai}$

$N_{fi}$  – antal cyklusser indtil brud under amplitude  $\sigma_{ai}$

Når summen på højre side af ligningen når 1, er der stor sandsynlighed for, at befæstelseselementet svigter på grund af udmattelse. Når man skal bestemme den resterende levetid for et befæstelseselement, skal man meget omhyggeligt udregne hele påvirkningen fra tidligere belastning. Summen af alle forholdstallene  $N_i/N_{fi}$  skal ligge under 1.

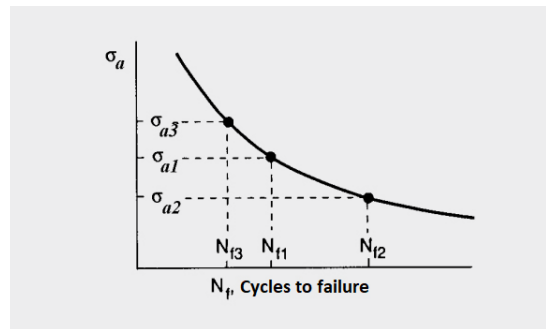
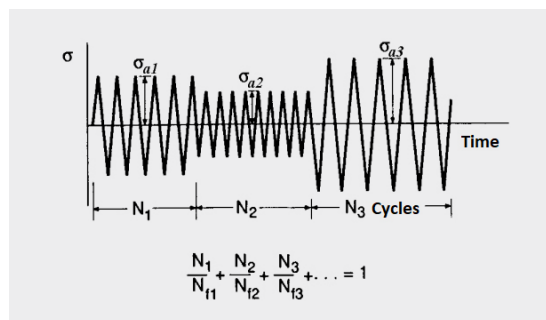


Fig. 7: Forskelligt antal cyklusser indtil brud ved forskellige spændingsamplituder

Fracture occurs when:

$$\frac{n_1}{N_f^1} + \frac{n_2}{N_f^2} + \dots = \sum_{j=1}^k \frac{n_j}{N_f^j} = 1$$



## UDMATTELSE – LYDLØS, PLUDSELIG OG DØDELIG

## Påvisning

Det er en meget vanskelig opgave at påvise udmattelse, før befæstelseselementet knækker. Takket være udviklingen inden for påvisning af defekter kan vi opdage revner i de fleste materialer ved brug af ultralyd, røntgenstråler, kapillarprøvning eller tilmed tomografi. Resultatet af disse analyser kan fortælle os, om der er en revne i materialet eller ej, men der er intet redskab, som klart kan bekræfte kilden til udmattelsen. Det kan kun opnås ved hjælp

af metallografisk undersøgelse efter befæstelseselementet er knækket (eller ved at beskadige delen med henblik på undersøgelse).

Det mest tydelige tegn på udmattelse er tilstedeværelsen af en stribet beskaffenhed som vist på billedet i fig. 5. Med visse forbehold kan man sige, at hver enkelt stribe svarer til én cyklus i løbet af udbredelsesfasen.

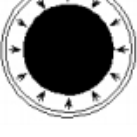
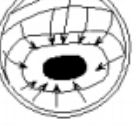
| High nominal stress                                                                 |                                                                                     | Low nominal stress                                                                   |                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Smooth                                                                              | Notched                                                                             | Smooth                                                                               | Notched                                                                               |
| Tension and tension-compression                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|  |  |  |  |
| Single deflection bending                                                           |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|  |  |  |  |
| Reversed bending                                                                    |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|  |  |  |  |
| Rotating bending                                                                    |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|  |  |  |  |

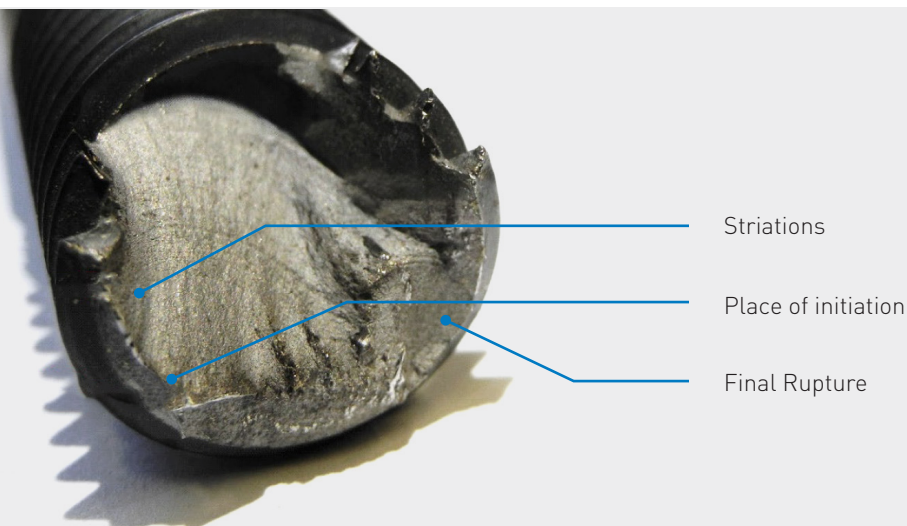
Fig. 9: Skematisk illustration af udmattelsesbruddets overflade under forskellige belastningsforhold.

Generelt set kan man sige, at jo større et område det endelige brud dækker, desto større har de dynamiske belastninger været, som førte til udmattelse og brud på befæstelseselementet. Der er store restbrudoverflade på befæstelseselementet (venstre side af fig. 9), hvilket tyder på udmattelsesrevner på et tidligt stadium i et godt spændt befæstelseselement med høj styrke. Situationen opstår mest på grund af konstruktionsfejl eller høj grad af uventet dynamisk overbelastning. Højre side af fig. 9 viser små restbrudoverflader forbundet med udmattelsesbrud på et sent stadium med lille dynamisk overbelastning. Sådanne bolte har formentlig aldrig været spændt nok eller har mistet deres forspænding på grund af løsdrejning eller sætning.

Fig.10 viser et billede af et rigtigt befæstelseselement, der er knækket på grund af udmattelse. Det store område med striber indikerer en relativt lille dynamisk overbelastning. Striber dominerer brudfladen, hvilket fortæller os, at udbredelsesfasen var ret lang. Revnen startede nederst til venstre (positionen kl. syv) og voksede vedvarende ind i befæstelseselementets skaft i en vinkel på ca. 30°, hvilket tyder på ensidig bøjning. Startpunktet, der er placeret excentrisk i forhold til tværsnittet, indi-

kerer, at der er en fordybning, som sandsynligvis er en indeslutning, i boltens indvendige gevinddiameter. Konkluderende kan vi sige, at skruen knækkede på grund af udmattelse forårsaget af dynamisk bøjning i én side med lille overbelastning kombineret med kærsvirkningen fra en urenhed i materialet tæt på boltens indvendige gevinddiameter.

Man bør altid huske på, at situationen kunne være meget mere kompliceret. Mange slags belastninger og skader på et emne kan kombineres, hvilket i høj grad kan vanskeliggøre den endelige analyse. Udmattelsesbruddet må aldrig blive yderligere beskadiget. En ridset eller kontamineret brudflade kan gøre den endelige analyse forvirrende eller endda umulig. Det er hovedårsagen til, at ingeniører fra Bossard skal reagere meget præcist, når de undersøger knækkede befæstelseselementer, og kunden skal informeres om ikke at røre beskadigede eller knækkede emner, men lade dem blive på brudstedet uden at manipulere yderligere med dem. Yderligere brudskader og korrosionsdannelse på befæstelseselementets overflade skal undgås. For at hindre fremtidige uheld og bevare et godt kundeforhold er det afgørende at kende årsagen til bruddet på befæstelseselementet.



Figur 10: Eksempel på et befæstelseselement, der er knækket på grund af udmattelse.

## UDMATTELSE – LYDLØS, PLUDSELIG OG DØDELIG

## Forebyggelse

De forrige afsnit har beskrevet udmattelsens forløb. Men hvad skal en konstruktionsingeniør gøre, når dynamiske belastninger må forventes? Hvilke kriterier skal befæstelseselementer eller andre dele opfylde? I næste afsnit giver vi grundlæggende oplysninger om forebyggelse af udmattelse.

Der er mange faktorer, som påvirker udmattelsesegenskaberne. Det vigtigste aspekt er geometri. Bossard anbefaler at bruge bolte med reduceret skaft, hvis boltene skal kunne modstå store dynamiske belastninger. Det reducerede skaft har ca. 90 % af den indvendige gevinddiameter, hvilket gør, at det kritiske område flyttes fra gevindet til det glatte, reducerede skaft. Tilstedeværelsen af gevindet i det kritiske område udgør kilden til kærnvirkningen direkte på overfladen. Som tidligere nævnt starter udmattelsesrevnen altid i overfladen af den mekaniske del (den eneste undtagelse er kompositmaterialer). Det reducerede skaft bliver mere elastisk, hvilket giver mulighed for at kompensere for høje dynamiske belastninger ved hjælp af elastisk forlængelse eller bøjning. Evnen til at modstå brud forårsaget af udmattelse stiger med 42 %, når der bruges bolte med reduceret skaft i stedet for normale. Men bolte med reduceret skaft har lavere bæreevne i forhold til normale bolte.

Kunden skal altid informeres om, at skarpe kanter og andre slags fordybninger kan føre til dannelsen af en udmattelsesrevne. En grafisk illustration af dette princip kan ses i fig. 11 herunder.

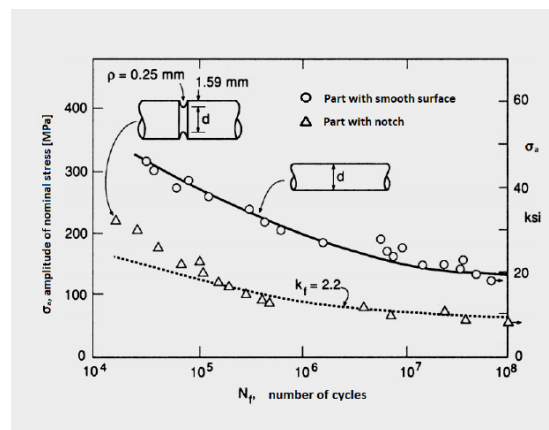


Fig. 11: Geometriens betydning for Wöhler-kurvens position

I forrige afsnit beskrev vi, hvordan et befæstelseselement (eller enhver anden mekanisk del) makrogeometri påvirker udmattelsesegenskaberne. Men mikrogeometriens indflydelse er også af vigtig betydning. Med ordet mikrogeometriens henvises der til overfladeruheden. Profilkurven er vist i fig. 12. Det mest farlige er områderne med lokale minima (ét eksempel er markeret med en rød cirkel).

Som vi har nævnt flere gange før, starter udmattelsesrevner altid i overfladen. Disse områder med lokale minima, er steder med meget høj spændingskoncentration og stor risiko for dannelse af udmattelsesrevner, og de ligger direkte i overfladen. Når dynamiske belastninger må forventes, skal konstruktionsingeniøren bruge en så jævn overflade som muligt. Men pas på! Ikke alle typer maskinbearbejdning har en positiv effekt på udmattelsesstyrken. Det er kun polering, der har en positiv effekt på udmattelsesegenskaberne. Poleringen fjerner effektivt områder med høje koncentrationer uden at efterlade restspændinger i overfladelaget. Alle andre former for maskinbearbejdning efterlader indre trækspændinger og har derfor en negativ effekt på udmattelsesegenskaberne.

Trykspænding i overfladelaget fungerer på præcis den modsatte måde, f.eks. efter koldformning. Når et befæstelseselement koldformer, sker der omfattende plastisk deformation forårsaget af store spændinger i overfladelaget. Men når vi fra overfladelaget går længere ned i materialet, falder spændingsniveauet, og den plastiske deformation erstattes af elastisk deformation. Når formgivningen er afsluttet, forsvinder arbejdsbelastningen, og overfladeniveauet efterlades plastisk deformet, mens området nedenfor er elastisk deformet. Den elastiske deformation har tendens til at afspændes, hvilket trykker på overfladelaget ovenfor og danner en relativt høj trykspænding i overfladelaget. Trykspændingens potentielle energi udgør en forhindring, som udmattelsesrevnen har meget svært ved at overvinde. Mekanisme til at lukke udmattelsesrevner er vist i fig. 13. Pilene viser trykkræfterne.

Det skal der tages højde for ved konstruktionen af en samling. I standarden VDI 2230:2015 advares der om, at bolte med gevindrulning før varmebehandling har betydelig lavere udmattelsesstyrke end bolte med gevindrulning efter varmebehandling. Årsagen er ret enkel: Varmebehandlinger krystalliserer materialestrukturen igen, og den positive effekt af det deformerede overfladelag forsvinder.

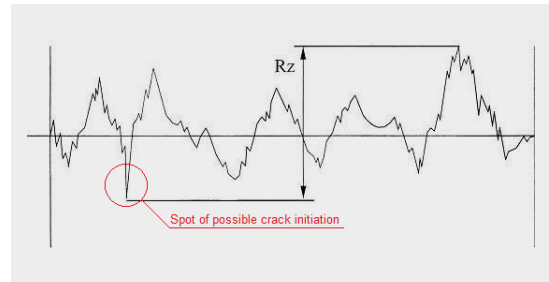


Fig. 12: Overfladeuregelmæssigheder på mikrometrisk skala

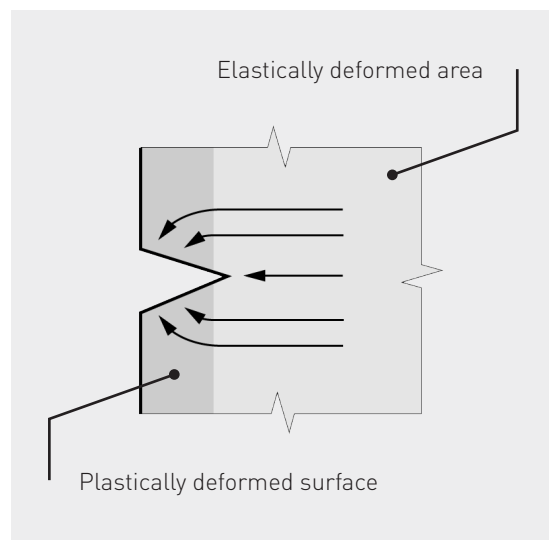


Fig. 13: Mekanisme til at lukke udmattelsesrevne takket være trykkræfter ved afspænding

Med den forrige figur når vi til følgende konklusion. Jo mere stærkt kolddeformeret en overflade er, desto højere udmattelsesstyrke har den.

Befæstelseselementets geometri er ikke det eneste vigtige aspekt, som påvirker udmattelsesstyrken. Hvis der påføres metallag på befæstelseselementets overflade, dannes der altid trækspændinger i overfladearealet, hvilket fører til lavere udmattelsesstyrke. Rå befæstelseselementer har altid bedre udmattelsesstyrke end overfladebehandlede befæstelseselementer. Varmgalvaniserede befæstelseselementer er et særligt tilfælde. Tilstedeværelsen af trækspændinger på grund af zinkaflejring kombineret med en meget ru overflade fører til en dramatisk reduktion af udmattelsesstyrken. Ifølge standarden VDI 2230:2015 kan reduktionen være op til 20 %!

Kombinationen af dynamiske belastninger og høje temperaturer har en samvirkende effekt. Defekter forårsaget af høje temperaturer gør, at udmattelsesrevnen forplanter sig lettere og hurtigere. Denne effekt har størst intensitet i forbindelse med dynamiske belastninger ved lav frekvens. Effekten er illustreret i fig. 14.

I de forrige afsnit har vi beskrevet geometriens påvirkningen af emnet, belastningsforholdene og materialestrukturen. Men vi bør ikke glemme påvirkningen fra kemikalier og kemiske reaktioner. Kemikalier kan påvirke udmattelsesegenskaberne på to måder. Den første negative påvirkning er korrosion, især lokalt. Punktkorrosion kan danne hulrum, som griber dybt inde i materialet. Omkring sådan en defekt opstår der en høj spændingskoncentration, som skaber perfekte betingelser for dannelsen af en udmattelsesrevne. Den anden påvirkning er selve den kemiske reaktion. Når den opstår tæt på revnens rod, kan produktet fra reaktionen absorberes i materialet og svække dets struktur, hvilket gør, at revnen lettere og hurtigere kan brede sig ud. En sammenligning af forskellige omgivelser er vist i fig. 15.

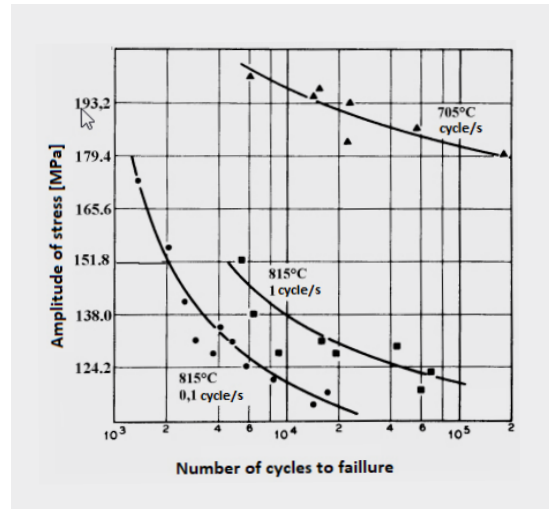


Fig. 14: Effekten af temperatur og frekvens på befæstelseselementets udmattelseslevetid

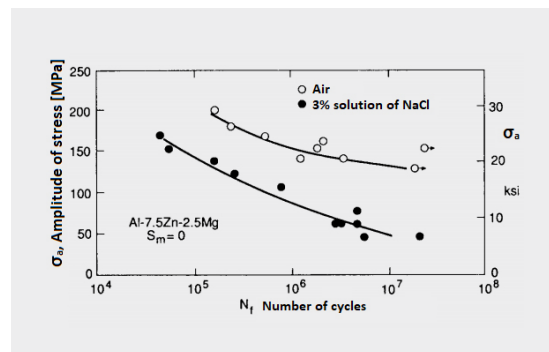


Fig. 15: Påvirkning fra omgivelser

## UDMATTELSE – LYDLØS, PLUDSELIG OG DØDELIG

## Beregning

Det sidste afsnit handler det om grundlæggende måder at beregne ståls udmattelsesstyrke på. Alle data kommer fra en omfattende statistisk undersøgelse, så der må forventes en vis afvigelse fra de angivne værdier. Ved brug af disse forhold bør konstruktionsingeniøren være bekendt med risikoen og arbejde med en højere sikkerhedsfaktor.

Generelt set kan man sige, at jo højere styrke materialet har, desto lavere er udmattelsesstyrken. Hårde og sprøde tilstande i ståls mikrostruktur har lavere udmattelsesstyrke på grund af deres ringe evne til at afspænde omfattende dynamiske belastninger ved hjælp af plastisk deformation.

I tabel 1 vises gennemsnitsværdier for forholdet  $R_m/\sigma_0$  med hensyn til forskellige faser i ståls mikrostruktur.

|                      | Ferrite | Perlite | Martensite |
|----------------------|---------|---------|------------|
| $R_m/\sigma_0$ ratio | 0.6     | 0.4     | 0.25       |

Tabel 1: Gennemsnitsværdier for forholdet  $R_m/\sigma_0$  i relation til ulegeret stål

Informationen i tabel 1 giver os følgende konklusion: Jo højere koncentration af hårde og sprøde tilstande i materialets mikrostruktur, jo lavere er udmattelsesstyrken. Mischke og Shigley har udarbejdet en statistisk afhængighed beskrevet med ligning 1 og 2 nedenfor.

$$\sigma_0 = 0,504 * R_m \quad \text{gælder for} \quad R_m \leq 1460 \text{ MPa} \quad (1)$$

$$\sigma_0 = 740 \text{ MPa} \quad \text{gælder for} \quad R_m > 1460 \text{ MPa} \quad (2)$$

En grafisk fremstilling af ligning 1 og 2 er vist i fig. 16 herunder.

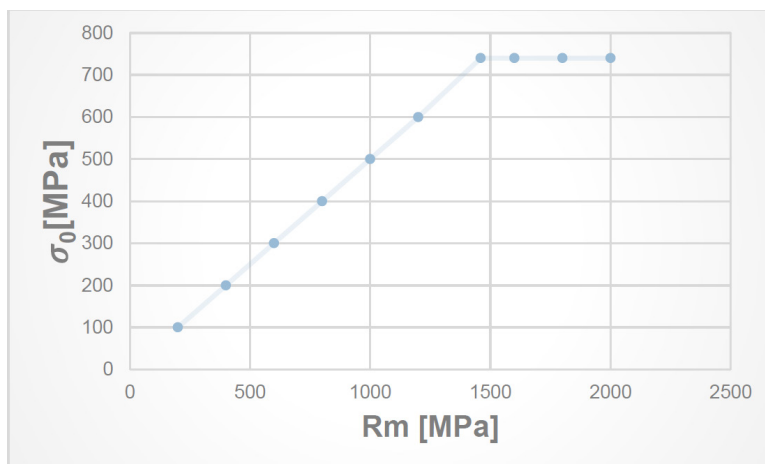


Fig. 16: Afhængighed mellem brudstyrke og udmattelsesstyrke (stål)

Hvad der medfører ændringen i egenskaberne ved 1460 MPa, er endnu ikke fastslået. Mest sandsynligt er det, at de sprøde faser i mikrostrukturen dominerer over strukturens høje værdi for brudstyrke. Det er nødvendigt med yderligere undersøgelser af disse statistiske data for at opnå den fulde forståelse.

Udmattelse er et meget kompliceret emne. Nogle af anbefalingerne er modstridende, hvilket vanskeliggør arbejdet for konstruktionsingeniøren. I betragtning af den fare, som udmattelse kan udgøre, bør konstruktionsingeniører være meget opmærksomme på alle aspekter beskrevet ovenfor, når der må forventes dynamiske belastninger.



Hvis du har brug for yderligere hjælp eller har specielle krav til din applikation, kan du kontakte os på [www.bossard.dk](http://www.bossard.dk) og vores ingeniører vil vende tilbage til dig.