GRUNDLÆGGENDE MATERIALELÆRE OG FORARBEJDNING

5. kursusgang

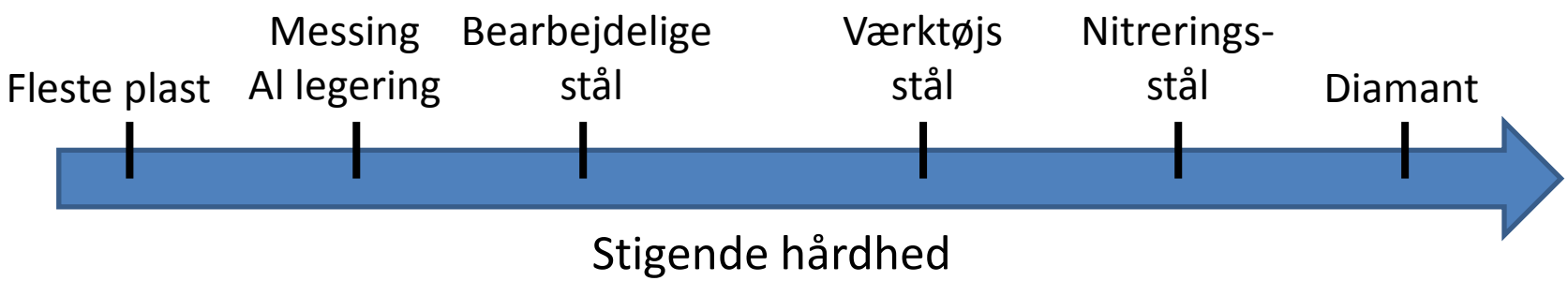
Dagens emner:

- Hårdhed
- Sejhed
- Krybning
- Udmattelse
- Eksamen

HÅRDHED

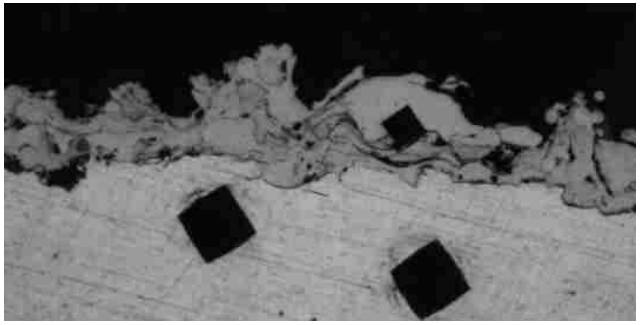
HÅRDHED

- Hårdhed: udtryk for materialets modstand mod plastisk deformation
- Høj hårdhed betyder:
  - Stor modstand mod plastisk deformation eller revnevækst i kompression
  - Gode slidegenskaber
- Hårdhedsmålinger anvendes til:
  - Kvalitetskontrol af f.eks. hærdninger
  - Kontrol af støbegods
  - Skaffe indtryk af materialets styrke



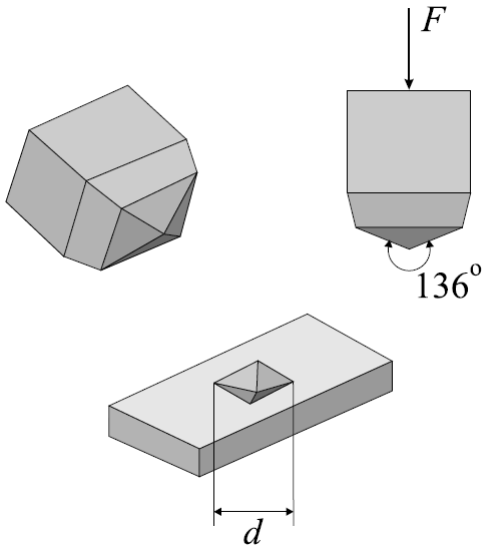
HÅRDHED

- Hårdhedsmåling foretages ved at trykke emne langsomt ind i materialet og måle indtryk
- Forskellige typer af hårdhedsmålinger
  - Metaller:
    - Vickers hårdhed
    - Brinell hårdhed
    - Rockwell hårdhed
  - Keramiske materialer:
    - Vickers & mikro-Vickers hårdhed
  - Polymerer:
    - Brinell hårdhed
    - Shore hårdhed



HÅRDHED

Vickers hårdhed:



- Trykker diamantspids ind i materialet
- Belastning i kilopond (kp) (svarer til kilogram)
- Diagonaler i indtryk (d) måles
- Vickers hårdhed (HV) bestemmes som:

$$HV = \frac{P}{A} = 1{,}854\frac{P}{d^2}$$

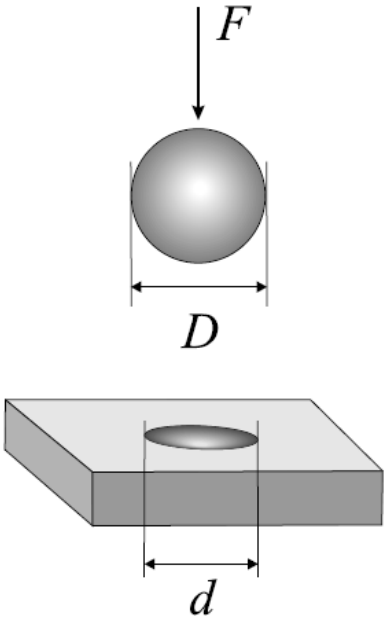
  P i kp og d i mm

- HV angives normalt uden enhed
- Belastningen rapporteres sammen med den målte hårdhed
- For store belastninger (> 1 kp): hårdhed tilnærmelsesvis uafhængig af last
- For små belastninger (indtryk ≈ kornstørrelse): hårdhed stiger med mindre belasting

HÅRDHED

Brinell hårdhed:

- Trykker kugle (hærdet stål) ind i materialet
- Kuglediameter: 1 – 10 mm
- Belastning: 1 – 3000 kp
- Indtrykkets diameter måles
- Brinell hårdheden (HB) bestemmes:



$$HV = \frac{P}{A} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

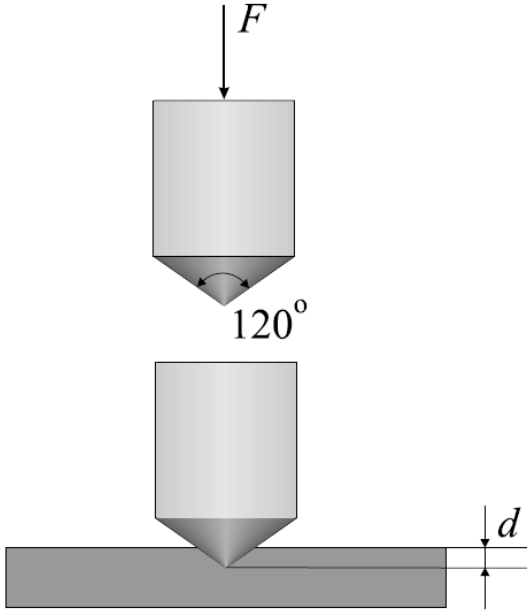
- Velegnet til bløde materialer + grovkornede materialer
- Ved hårde materialer: anvende hårdmetalskugle (stålkugle deformerer elastisk)

Rockwell hårdhed:

- Trykker stålkugle eller diamantkegle ind i materialet
- Pålægger forbelastning på 10 kp
- Pålægger hovedbelastning efterfølgende
    - Rockwell A (HRA): 50 kp (diamant)
    - Rockwell C (HRC): 140 kp (diamant)
- Rockwell hårdheden bestemmes udfra nedtrykningsdybden u

$$HV = C - \frac{u}{0{,}002mm}$$

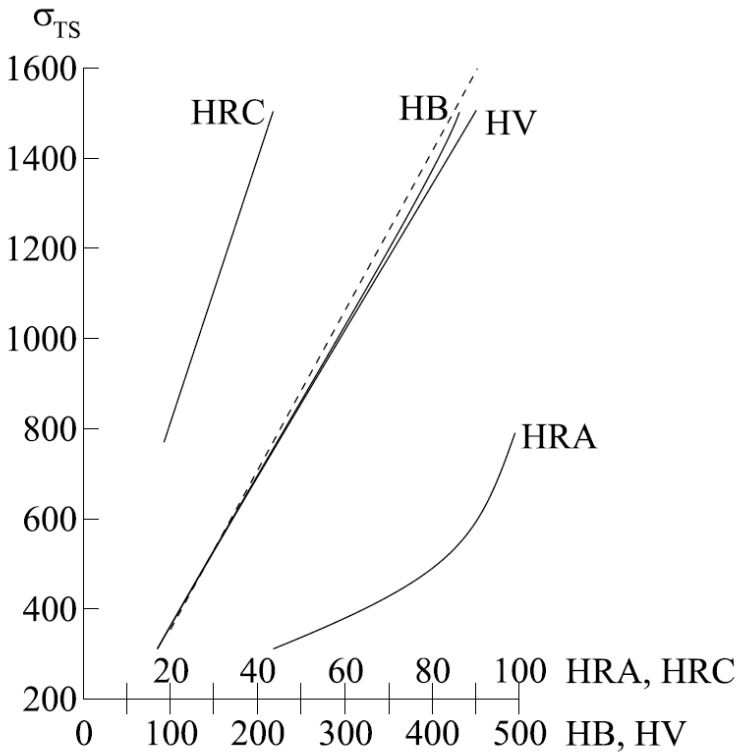
- C (HRA & HRC) = 100, u i mm
- Muligt at måle u direkte → enkel målemetode



HÅRDHED

Sammenligning af hårdheder:

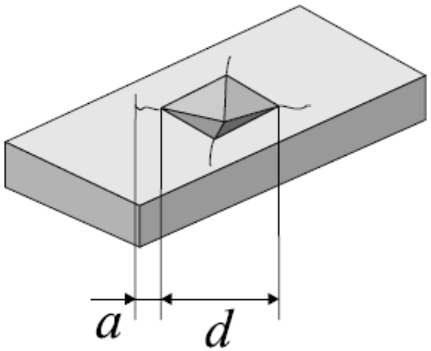
- Vickers og Brinell hårdhed giver sammenlignelige resultater
- Anvende hårdhederne til at vurdere trækstyrke af metaller
- Fleste metaller har proportionalitets-konstant på 3,2 – 3,5 mellem σ_{TS} og HB
- Rockwell A ikke lineær sammenhæng med styrke



HÅRDHED

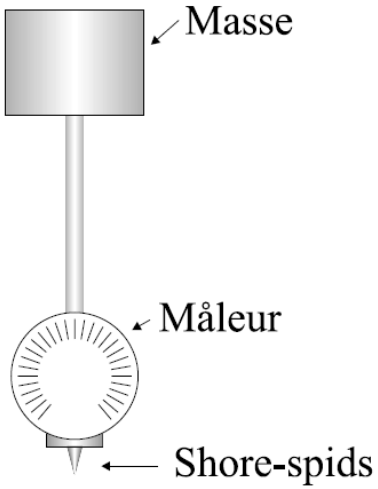
Hårdhedsprøvning af keramiske materialer

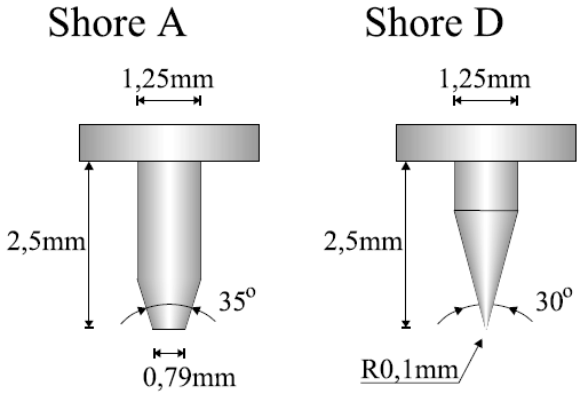
- Vickers og mikro-Vickers hårdhedsmålinger anvendes oftest
- Ved små belastninger kan indtrykket være plastisk hvorved en hårdhed kan bestemmes
- Ingen entydig sammenhæng mellem styrke og hårdhed (styrke ikke relateret til flydning i keramer)
- Ved større belastning fås revner omkring indtryk
  Størrelse af disse kan anvendes til bestemmelse af brudsejhed



Hårdhedsprøvning af polymerer

- Præcise hårdhedsmålinger er vanskelige (deformation er tidsafhængig)
- Anvender oftest Brinell og Shore hårdhedsmålinger
- Shore måling:
  - Spids presses ind i materiale og indtrykningsdybden aflæses
  - skala 0 – 100 (100 = ingen indtrykning)
  - Shore A: masse på 1 kg og keglestub
  - Shore B: masse på 5 kg og afrundet keglestub

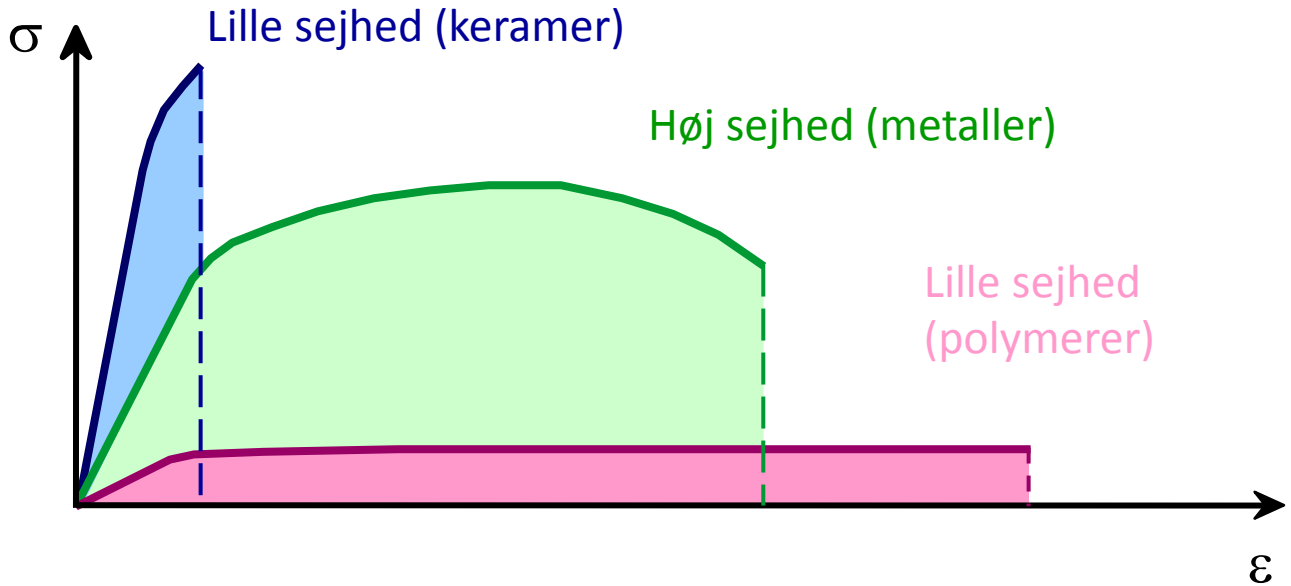




SEJHED

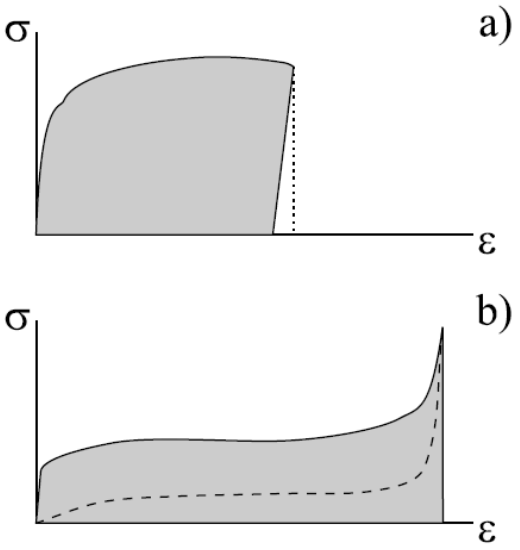
SEJHED

- Tidligere introduceret begrebet sejhed i beskrivelsen af metaller, keramer og polymerer



- Forskellige begreber anvendes i beskrivelsen af sejhed → kan skabe uklarhed
- Forklare forskellige begreber indenfor sejhed
  - Brudtøjningsenergi
  - Slagsejhed
  - Brudsejhed

Brudtøjningsenergi:



- Kan anvende plastisk arbejde som mål for sejhed
    - Arealet under kurven uden elastisk del
    - Giver fornuftig rangering af metaller og keramer
- Kan anvende det totale arbejde
    - Arealet under hele kurven
    - For elastomere vil elastisk del udgøre stor del

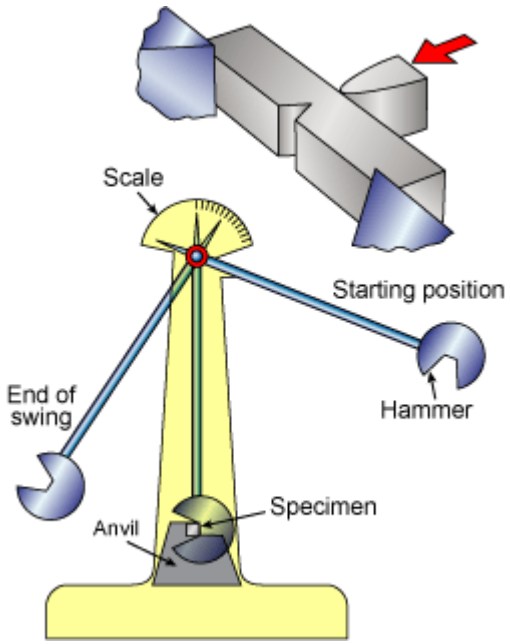
      → mere rimelig beskrivelse af dette materiale
- Hvis ovenstående arbejder normeres med volumet af prøveemnet fås hhv. plastisk og totalt brudtøjningsenergi

Brudtøjningsenergi:

- Ikke stor udbredelse pga. usikkerhed
  - For metaller: mængden af plastisk arbejde efter halsdannelse afhængig af prøveemnets størrelse (lange emner → lille energi ift. korte emner)
  - For polymerer: Tidsafhængighed har indflydelse på arbejdskurven (tyggegummi)
  - For keramer: vanskeligt at konstatere plasticitet

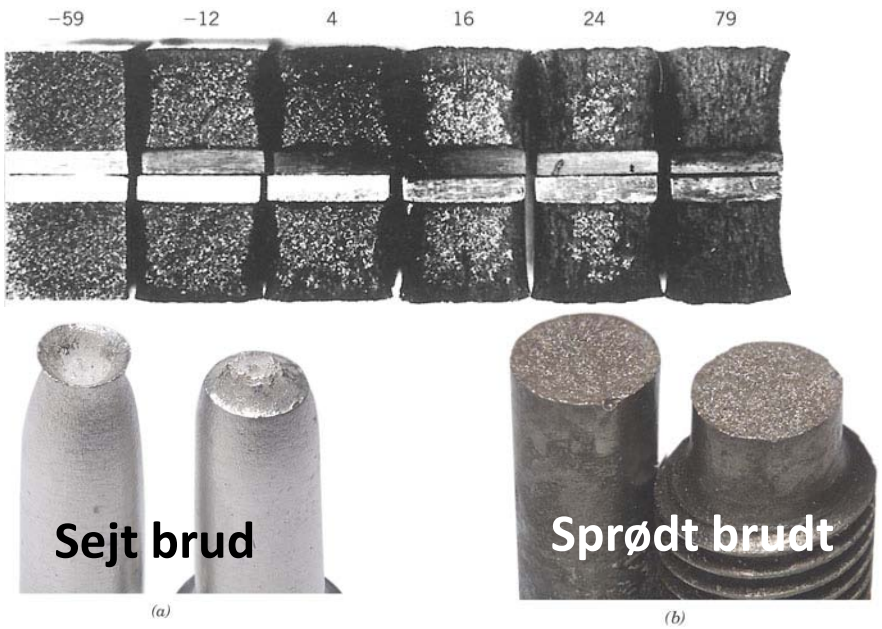
Slagsejhed:

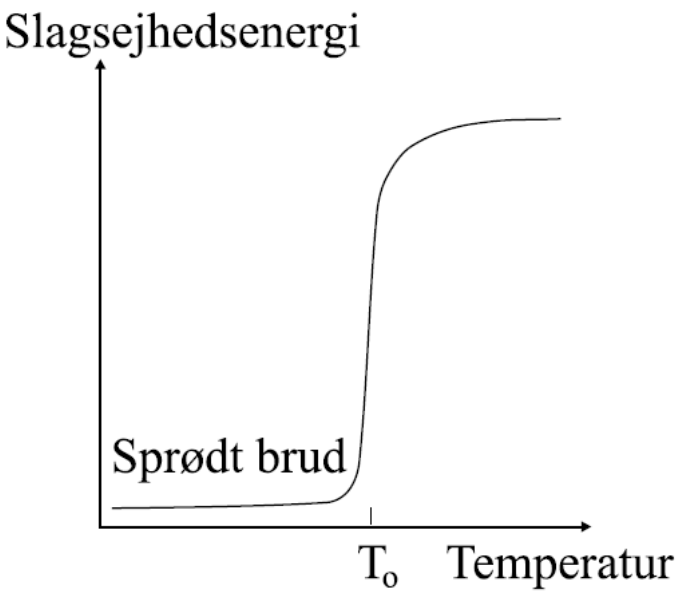
- Prøvemetode kombinerer kærvfølsomhed og dynamiske effekter og er simpel
- Metaller: mest anvendt er Charpy metoden
  - faldhammer med en energi på 300 J og ~ 5 m/s når den rammer prøveemnet
  - Energien der absorberes ved slaget måles gennem faldhammerens opsving
  - Charpy-V: prøveemne med V-formet kærv
  - Charpy-U: prøveemne med U-formet kærv
  - Prøveemne placeres så slaget rammer bag ved kærv



Slagsejhed:

- Kærvslagsejhedsprøvning er meget udbredt grundet dets enkelthed
- Kan bl.a. eftervise temperaturafhængigheden for slagsejhed for kulstofstål
- Ved høj temperatur: stor slagsejhedsenergi + sejt brud
- Ved lav temperatur: lille slagsejhedsenergi + sprødt brud
- Definerer omslagstemperatur som temperatur hvor slagsejhed er 28 J (kun BCC)
- Jo lavere temperatur jo bedre kvalitet





SEJHED

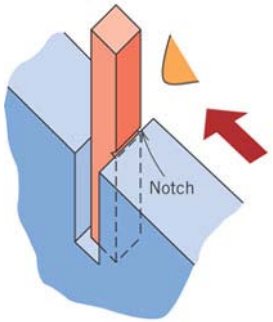
Liberty skibe

Anvendte stål som ved svejsning fik højere omslagstemperatur

Fatale konsekvenser for britisk skibstrafik under WW II

Slagsejhed:

- Ved kærvslagsejhedsprøvning af:
  - keramer anvendes oftest Charpy-V metoden med en lettere faldhammer
  - Til sprøde polymerer kan Charpy-V metoden med en lettere faldhammer anvendes
  - For seje polymerer anvendes i stedet Izod-slagsejhedsprøvemetoden
    - Ene del af emne holdes fast lige under kærv
    - Emne rammes på samme side som kærv



Kærvslaghedsprøvning afhængig af både kærveffekter og tøjningshastighed → nødvendigt at anvende standardiserede emner + prøvemaskiner

Resultater kan ikke anvendes direkte i dimensionering

Brudsejhed:

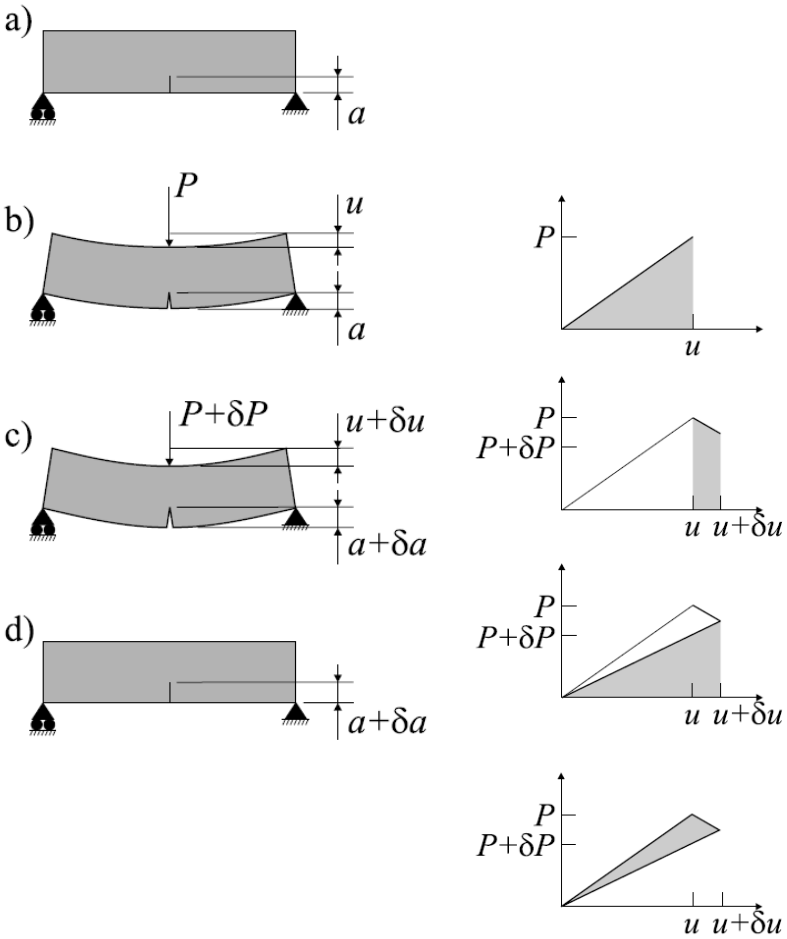
- relaterer revnevækst med sejhed
- Sejhedsmål kan defineres som materialekonstanter (under visse antagelser)

- Simpelt understøttet bjælke uden belastning med revne med længden a
- Lineært elastisk materiale → nedbøjning u vokser lineært med belastning P (uden revne vokser)
- Arbejde udført at ydre belastning:

$$W_1 = \tfrac{1}{2} P u$$

Arealet under kurven

- Oplagret som elastisk energi i bjælken



Brudsejhed:

- Vokser revnen δa øges nedbøjning med δu og belastningen reduces med δP
- De ydre kræfters arbejde under selve revnevæksten:

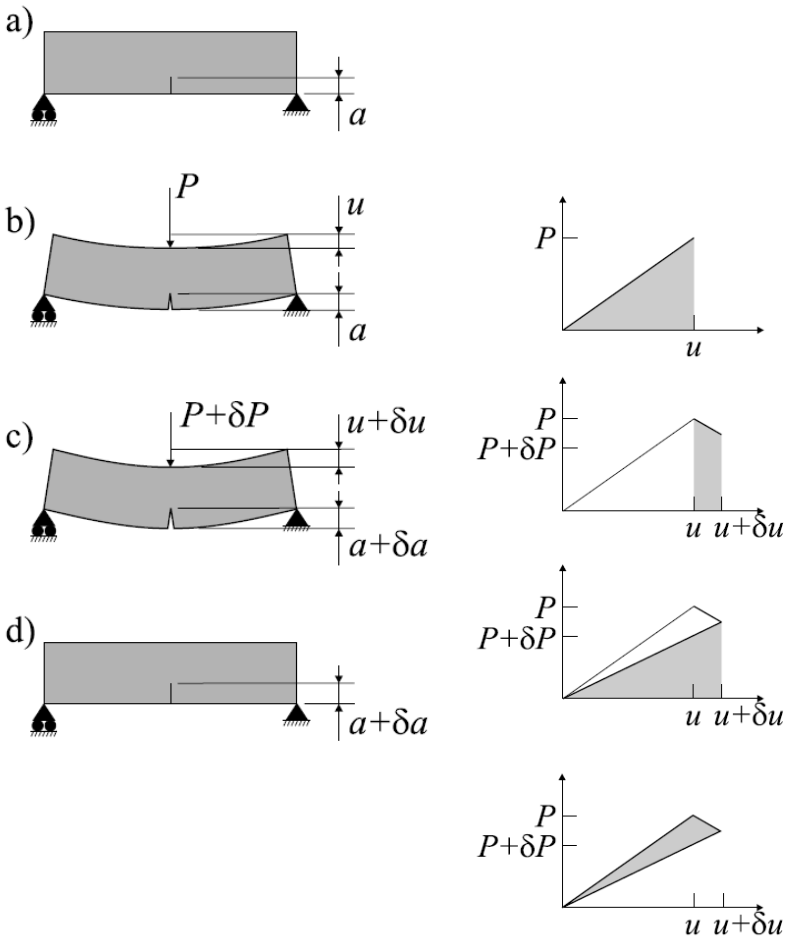
$$W_2 = (P + \tfrac{1}{2}\delta P)\delta u$$

Arealet under denne del af kurven

- Efter revnevæksten er bjælkens stivhed faldet
- De ydre kræfters arbejde under aflastning:

$$W_3 = \tfrac{1}{2}(P + \delta P)(u + \delta u)$$

- Genvunden elastisk energi
- Aflastet bjælke har forøget revnelængden med δa

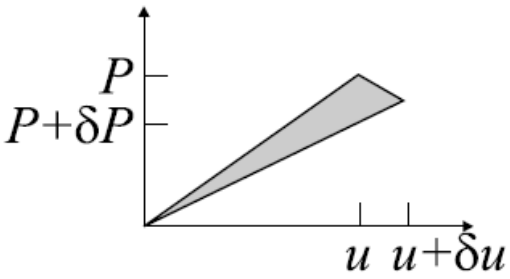


Brudsejhed:

- Ændringen af den elastisk energi under belastning og aflastning kan skrives som:

$$-\delta U = W_1 + W_3$$

- -δU: frigjort elastisk energi under revnevækst
- W_2: ydre kræfters arbejde under revnevækst (benævnes nu δW)



- Samlet energi:

$$\Pi = \delta W - \delta U$$

- Energi til rådighed til dannelse af nye revneoverflader
- 3 mulige måder at trække energi ud til dannelse af nye revneflader:
    - Ydre kræfter kan udføre nødvendigt arbejde
    - Elastisk energi sænkes pga. revnevækst
    - Kombination af ovenstående

Brudsejhed:

- Kan definere energifrigørelsesgraden G:

$$G = \frac{1}{b}\frac{\partial \Pi}{\partial a} = \frac{1}{b}\left[\frac{\partial W}{\partial a} - \frac{\partial U}{\partial a}\right]$$

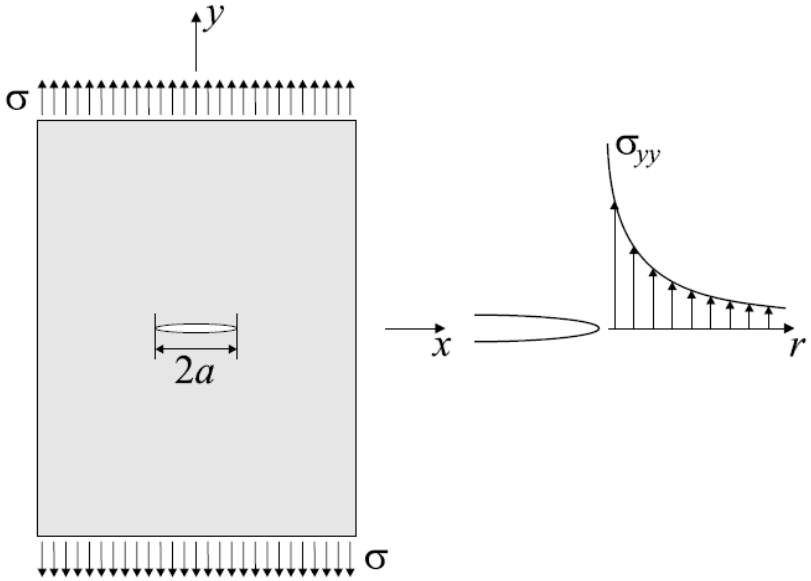
Energi til rådighed til dannelse af ny revneflade per arealenhed

- Erstatter variationer med differentialer (antages uendelige små)
- Kritiske energifrigørelsesgrad G_c:
  - Nødvendig energi til dannelse af revneflade per areal
  - $G < G_c$ ⇒ revne stabil ⇒ ingen brud
  - $G > G_c$ ⇒ revne ustabil ⇒ brud
  - Materialekonstant beskrivende materialets følsomhed overfor revner
  - Stor G_c ⇒ sejt materiale som kan indeholde mange revner uden instabilitet
  - Lille G_c ⇒ sprødt materiale, selv små revner bliver ustabile

Brudsejhed:

- I stedet for energi kan spændingsfelt omkring revne anvendes til beskrivelse af revnevækst
- Spændingen σ_{yy} foran revnespids:

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}$$



- K_I kaldes spændingsintensitetsfaktoren
- K_I kan bestemmes udfra geometrien af prøveemnet og belastningen:

$$K_I = \sigma Y \sqrt{\pi a}$$

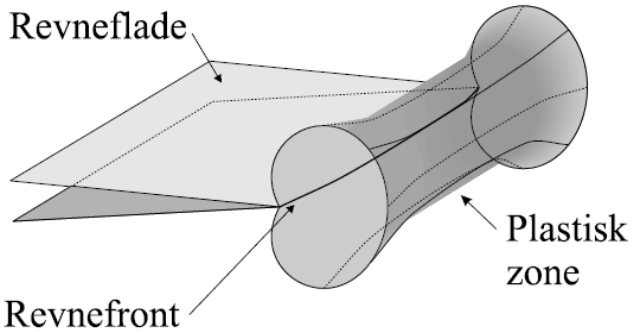
σ = spænding, Y = geometriafhængig konstant

- Som for energifrigørelsesgraden kan en kritisk spændingsintensitetsfaktor defineres, K_{IC}

Brudsejhed:

- $K_I < K_{IC}$ ⇒ stabil revne ⇒ ingen brud
- $K_I > K_{IC}$ ⇒ ustabil revne ⇒ brud
- K_{IC} materialekonstant

- Energi nødvendig til dannelse af revneflader består af to dele:
  - Overfladeenergi (eneste del for ideelt sprødt materiale)
  - Plastisk zone omkring revnespids (for materialer der udviser plasticitet) → plastisk arbejde



- Plastisk arbejde overstiger let overfladeenergi
- Begge dele indgår både i målingen af energifrigørelsesgraden og spændingsintensitetsfaktoren

Eksempel:

$$K_I = \sigma Y \sqrt{\pi a}$$

- Aluminiumoxid

$$\sigma_f = 358 MPa \qquad K_{IC} = 3{,}9 MPa\sqrt{m} \qquad Y = 1$$

$$a = \frac{1}{\pi}\left(\frac{3{,}9}{358}\right)^2 \approx 0{,}038 mm$$

- Stål 355

$$\sigma_y = 355 MPa \qquad K_{IC} = 54 MPa\sqrt{m} \qquad Y = 1$$

$$a = \frac{1}{\pi}\left(\frac{54}{355}\right)^2 \approx 7{,}4 mm$$

a < 7,4 mm ⇒ flydning først

a > 7,4 mm ⇒ revnevækst

KRYBNING

KRYBNING

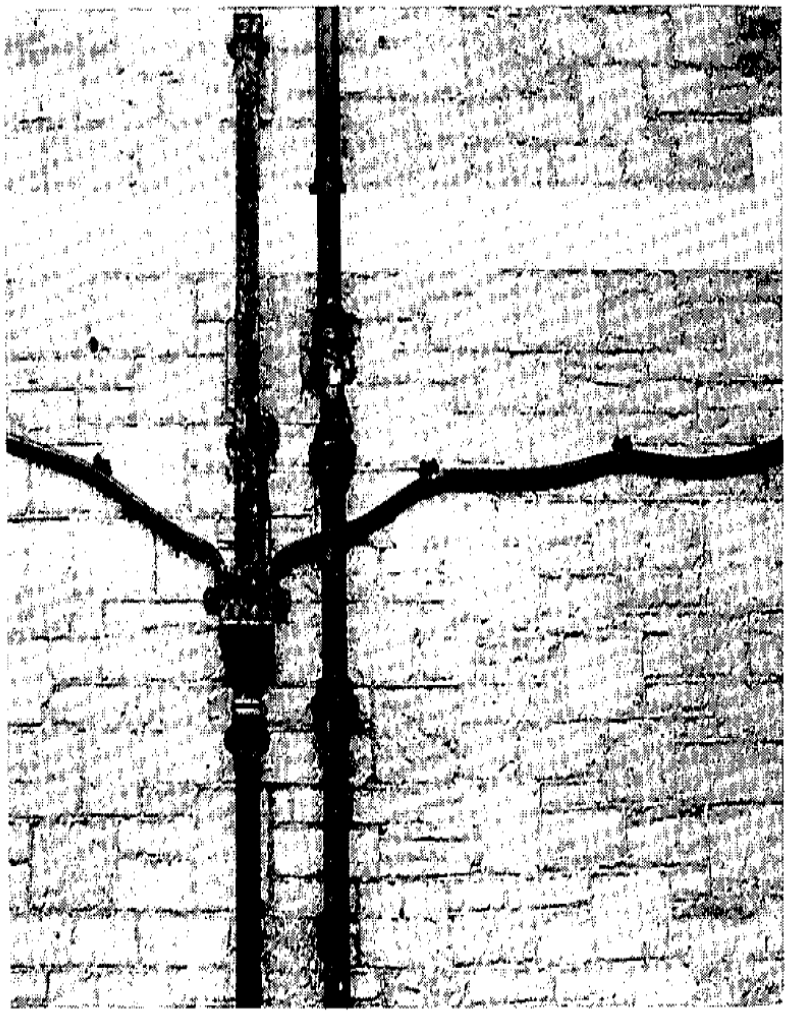


Fig. 17.2. Lead pipes often creep noticeably over the years.

Gamle bly rør
Smeltepkt ~ 600 K

- Rør er ikke lige men krummer mellem hvert ophæng
- Eneste belastning er egenvægt + indhold
- Lille belastning som er indenfor det elastiske område
- Plastisk deformation opstået over tid

<u>Krybning</u>

KRYBNING

Krybning:

- Krybning af polymerer behandlet under polymerers arbejdskurve
- Langsom, tidsafhængig plastisk deformationsproces
- Belastning indenfor det elastiske område
- For de fleste metaller og keramer opstår fænomenet kun ved forhøjede temperaturer

  Ved stuetemperatur ⇨ $\varepsilon = f(\sigma)$

  Ved forhøjet temp. ⇨ $\varepsilon = f(\sigma, t, T)$

- Tommelfingerregel:
  - For metaller: ingen krybning hvis $T < 0{,}3 – 0{,}4\ T_m$
  - For keramer: ingen krybning hvis $T < 0{,}4 – 0{,}5\ T_m$

Krybning:

- Eksempler:
  - Stål:

    $T_{smelte} \approx 1530°C = 1530 + 273\ K = 1803\ K$

    $0{,}4 \cdot T_{smelte} \approx 721\ K \approx 450°C$
  - Aluminium:

    $T_{smelte} \approx 660°C = 933\ K$

    $0{,}4 \cdot T_{smelte} \approx 373\ K \approx 100°C$
  - Bly:

    $T_{smelte} \approx 327°C = 600\ K$

    $0{,}4 \cdot T_{smelte} \approx 240\ K \approx -33°C$
  - Is:

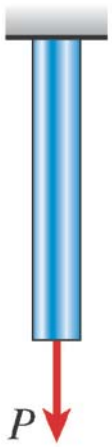
    $T_{smelte} = 0°C = 273\ K$

    $0{,}4 \cdot T_{smelte} \approx 110\ K \approx -165°C$

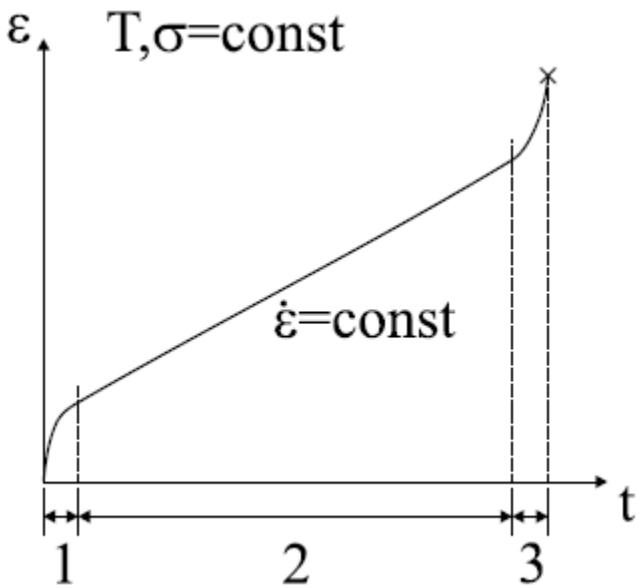
Marmolada gletcheren i Italien

KRYBNING

- For at bestemme et materiales opførsel under krybning udføres krybetest under konstant temperatur og med konstant belastning



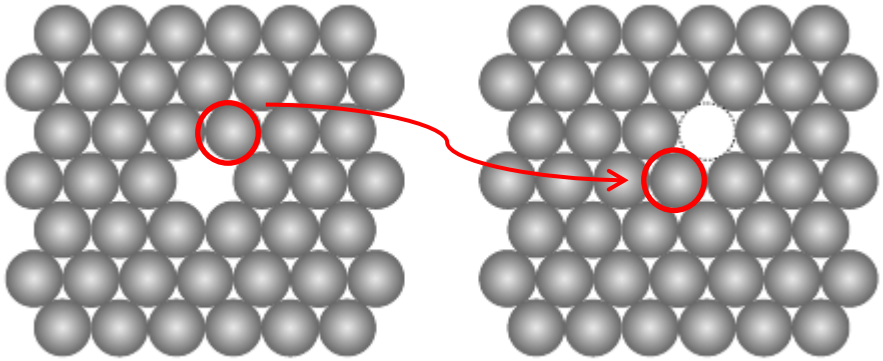
- Belastning vil umiddelbart medføre en elastisk deformation (ikke medtaget)
- Primært krybeområde med aftagende tøjningshastighed (1)
- Sekundært krybeområde med konstant tøjningshastighed (2)
- Tertiært krybeområde med stigende tøjningshastighed (3) → ender med brud
- Normalt designes mod en maksimal tilladelig deformation (sekundært krybeområde) og ikke til brud



Krybemekanismer:

- Vakancer blev introduceret i forrige kursusgang
- Atomer omkring vakancen vil flytte sig til vakancen

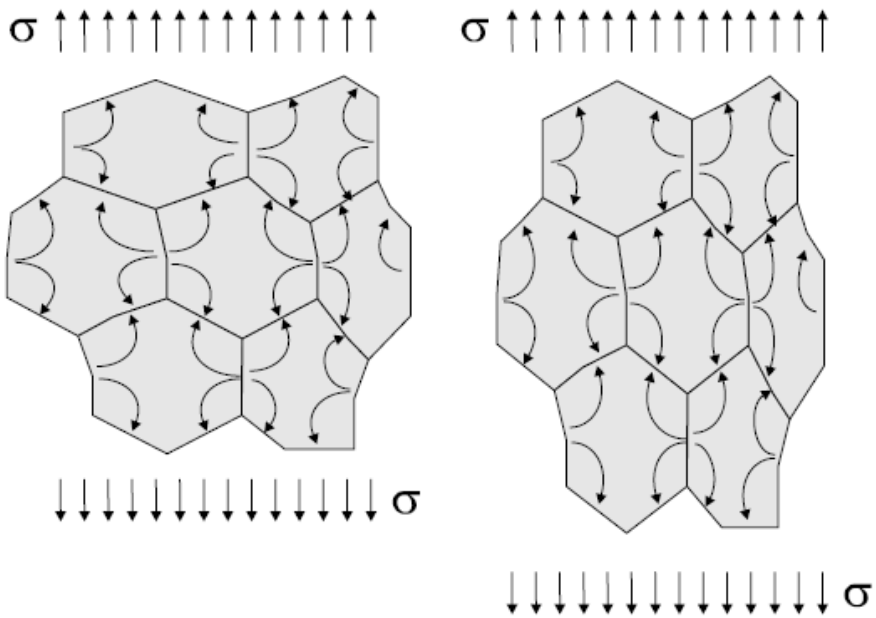
  → vakancen flyttes og materiale transporteres den anden vej → kaldes vakancediffusion
- Antallet af vakancer stiger med forøget temperatur → sandsynligheden for materialetransport stiger



Krybemekanismer:

Diffusion gennem korn:

- Vakancevandring i materiale under belastning vil ikke være tilfældig
- Materialetransport fra korngrænser med lille belastning til korngrænser under træk
- Materiale kryber og struktur deformeres



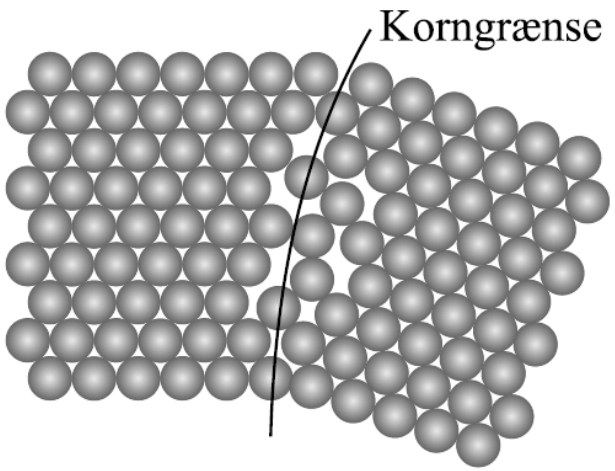
Krybning ved vakancediffusion

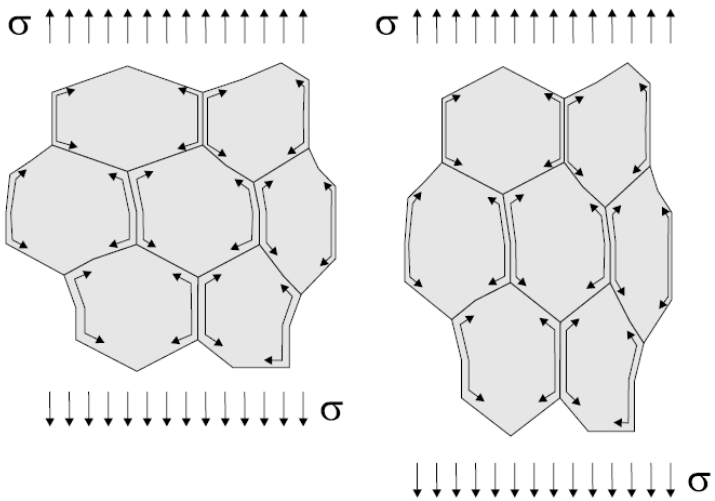
- Store korn resulterer i langsommere krybning → længere afstand for vakancer at skulle diffundere
- Små korn resulterer i hurtigere krybning → mindre krybestyrke

Krybemekanismer:

Diffusion via korngrænser:

- Korngrænserne bidrager også til diffusions-transporten
- Atompakningen i korngrænsen er uordnet
- Korngrænser kan virke som genveje for diffusion
- Materialet kryber og strukturen deformeres
- Jo større korn jo langsommere diffusion





For krybning gennem korn og via korngrænser ses lineær afhængighed af belastning:

$$\dot{\varepsilon} \propto \sigma$$

Krybning domineret af diffusion mellem korn og via korngrænser kaldes lineær krybning

Krybemekanismer:

Diffusion via dislokationer:

- Atomer forholdsvist løst pakket langs dislokationslinie → diffusion muligt lige som for korngrænserne

Kombination af diffusion og dislokationsvandring

- Diffusion muliggør dislokationsvandring som ellers ikke ville være muligt

Krybehastighed for sidste to fænomer er givet ved:

$$\dot{\varepsilon} \propto \sigma^n$$

hvor n ligger mellem 5 - 8

UDMATTELSE

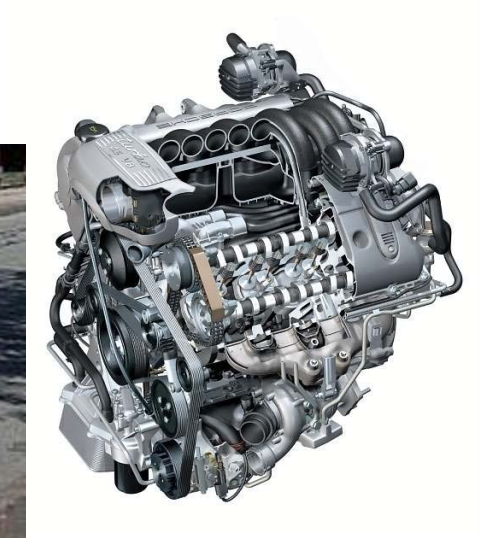
UDMATTELSE

Fågangsbelastninger: varierer meget langsomt over lang tid

Mangegangsbelastninger: dynamiske/cykliske belastninger, mange gentagelser over tid

- Konstruktioner udsat for mangegangsbelastninger svigter ved mindre belastninger end hvis fågangsbelastet → udmattelsessvigt

Mangegangsbelastninger: antal belastninger(N) > 10^4

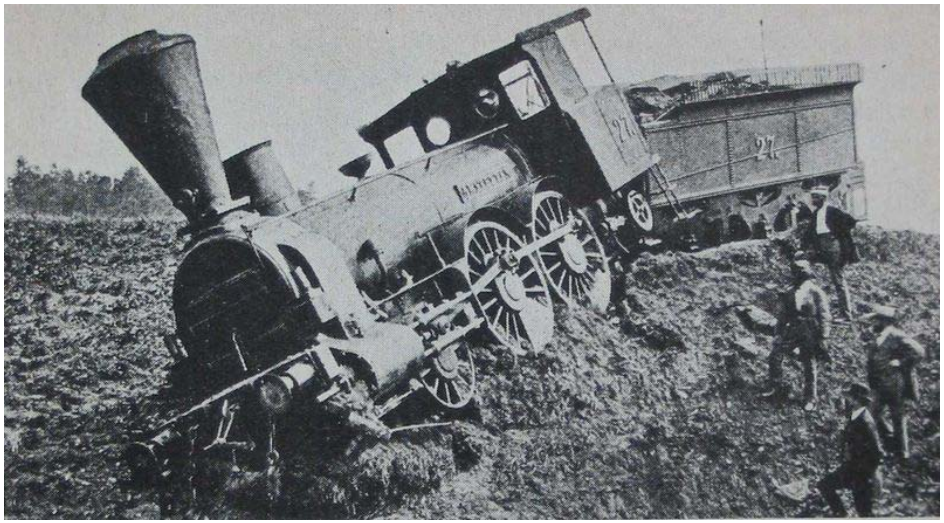


UDMATTELSE

Hvorfor overveje udmattelse ?

"The most serious railroad accident of the *week* *occurred April 20* (1887) and was caused by the breaking of a drawbar. Three were killed and two fatally injured."
"The. most serious railroad accident of the *week* *occurred may 27* (1887). The bursting of a wheel caused the deaths of six people."
"The most serious railroad accident of the *week* *occurred June 23* (1887) and was caused by a broken rail. One man was killed."
"The most serious railroad accident of the *week* *occurred on July 2* (1887) and was caused by the breaking of an axle.“

(uddrag fra engelske aviser)



Amstetten ulykken

UDMATTELSE

Eschede ulykken (1998):

UDMATTELSE

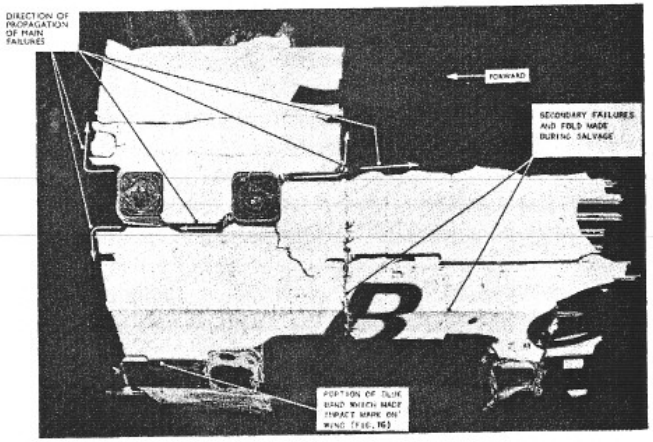
”Den 3. juni 1998 skete **Eschede-ulykken, en af de alvorligste jernbaneulykker i Tyskland nogensinde,** da ICE 884 *Wilhelm Conrad Röntgen afsporedes ved Eschede. 101 personer omkom ved ulykken og 88* blev alvorligt kvæstet.
Cirka 2 km før Eschede brød en defekt hjulring på forreste vogns tredje aksel sammen og ved et efterfølgende sporskifte ved indkørslen til Eschede afsporedes toget. Den forreste motorvogn blev revet løs fra resten af toget og fortsatte næsten uden skader gennem Eschede, indtil den automatisk blev bremset.
Togets tredje vogn stødte mod bropillerne på en vejbro, og dette sammenstød fik den fjerde vogn til at løfte sig og ramme broen på en måde, der fik denne til at bryde sammen. Brodækket faldt ned over bageste del af femte vogn og maste denne fuldstændig, og de efterfølgende vogne, 6 til 12, pressedes i zig-zag sidelæns op mod broen og blev svært beskadiget, medens den bageste motorvogn afsporedes og kørte ind i vragdyngen.
Ulykken fik de europæiske myndigheder til at se nærmere på andre tog. Således resulterede det alene i Tyskland i, at man i løbet af et par uger udskiftede samtlige lignende hjul på togene. Desuden indledte man i Frankrig en lignende undersøgelse af TGV-togene, som ICE-teknologien er inspireret af.”

UDMATTELSE

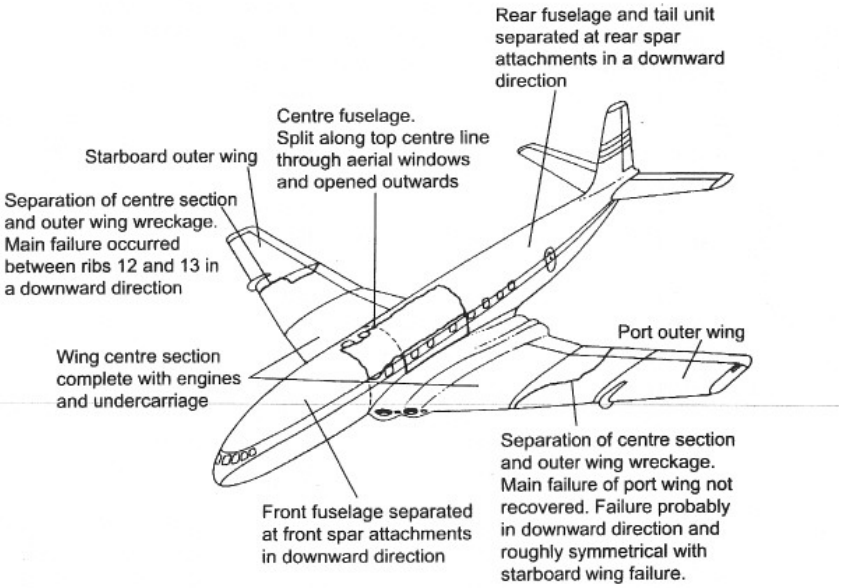
Comet ulykkerne:

- Kabine tryksat og aflastet mange gange
- Vinduer med skarpe hjørner
- Revne begyndte her
- Efter revne havde vokset en vis længde

  → eksplosionsagtigt brud af kabine

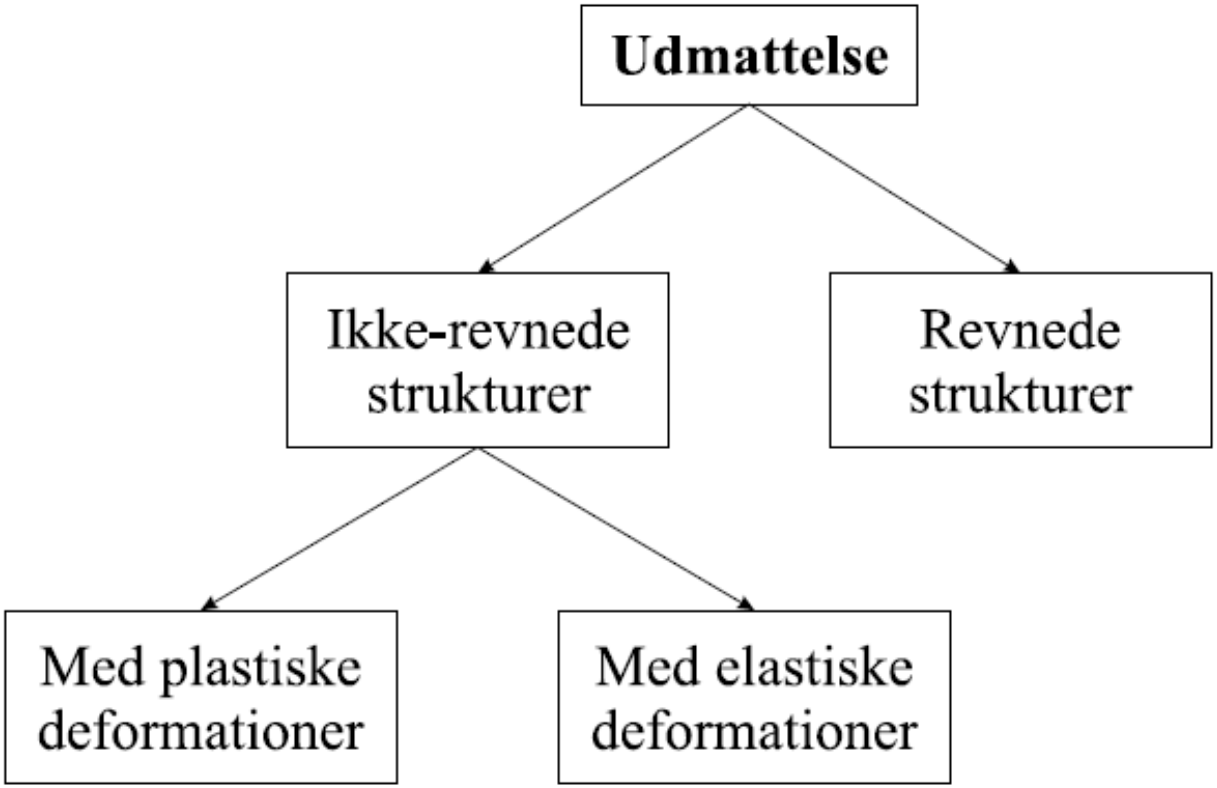


2.19 Wreckage of part of cabin of Comet G-ALYP, pieced together to show the direction of fracture propagation. This section was immediately above the wing.[17]



2.20 Location of main failures in Comet G-ALYP.[17]

UDMATTELSE


Udmattelse
Ikke-revnede strukturer
Revnede strukturer
Med plastiske deformationer
Med elastiske deformationer

UDMATTELSE

- Metaller påvirkes af mangegangsbelastninger
- Keramer udviser kun lille tendens til udmattelse
- Polymerer kan påvirkes af mangegangsbelastninger

Ikke-revnede strukturer:

Udmattelsestest af metaller:

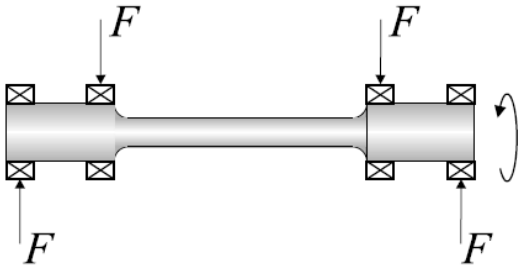
- Roterende bøjning → ren momentbelastning
- Punkt på emne oplever skiftevis træk og tryk

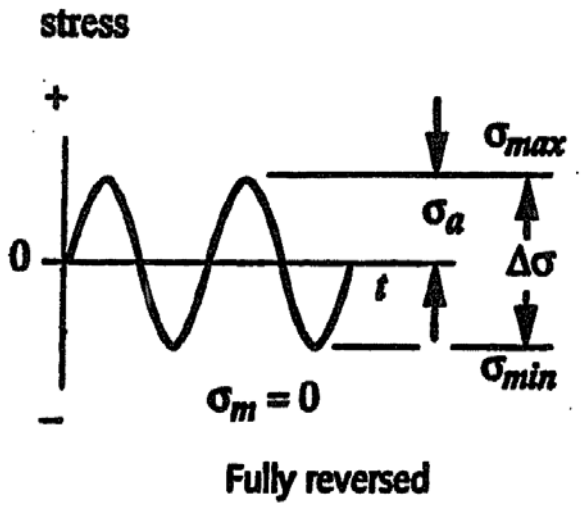
  når det roteres

- Resultater rapporteres i Wöhlerkurve

  Betydende faktorer:
  - Amplitudespændingen $\sigma_a = \Delta\sigma/2$
  - Middelspændingen $\sigma_m = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$
  - Antal belastninger N

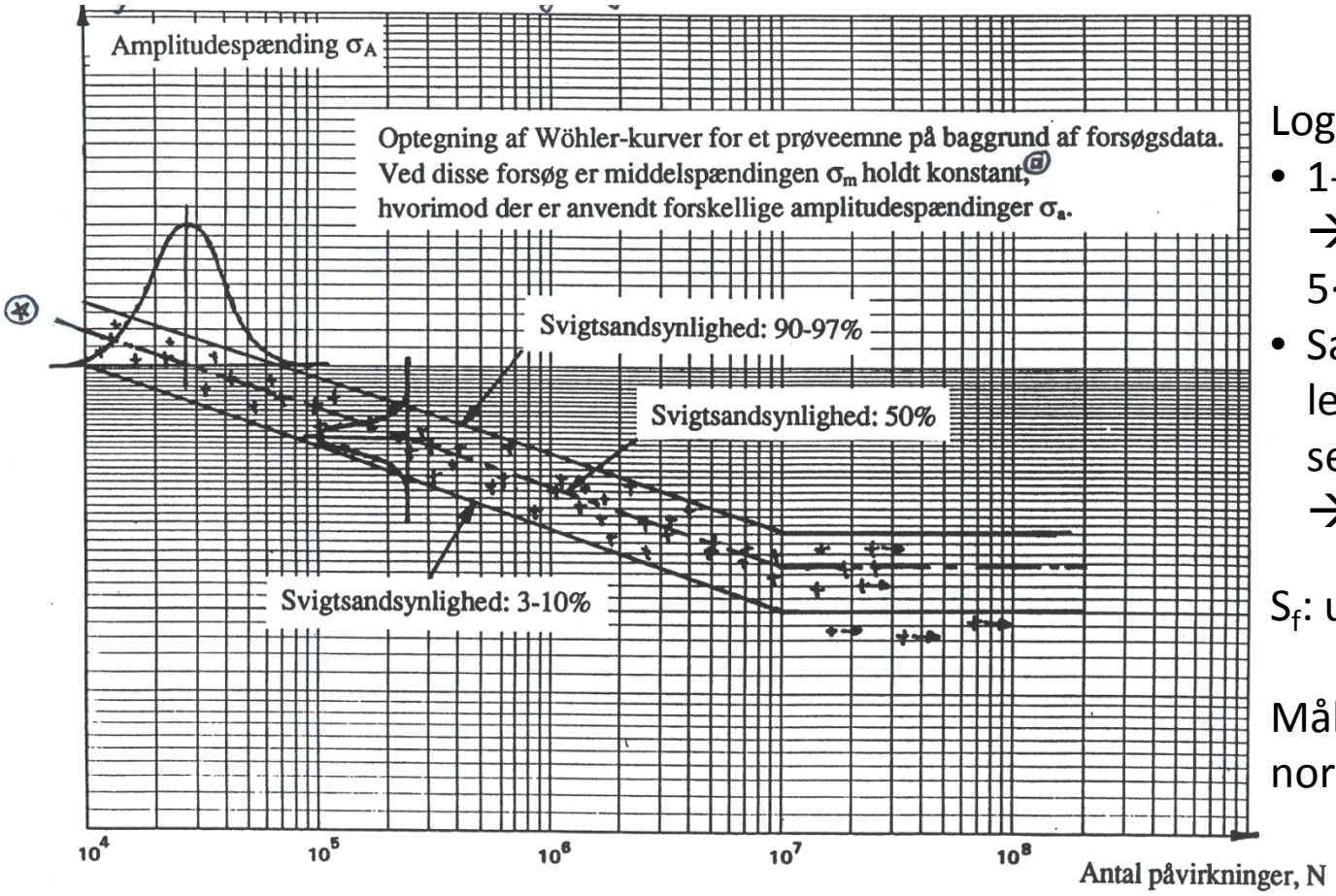
  Roterende bøjning: $\sigma_m = 0$





UDMATTELSE

Wöhlerkurven:



Logaritmisk skala:

- 1-10 belast. = 10 cm
  → 10^6 belast. = 1 km
  $5 \cdot 10^8$ belast. = 500 km
- Sammenhæng mellem N og σ_a tilnærmelsesvis lineær for N = 1
  → 10^6 / 10^7

S_f: udmattelsesstyrke

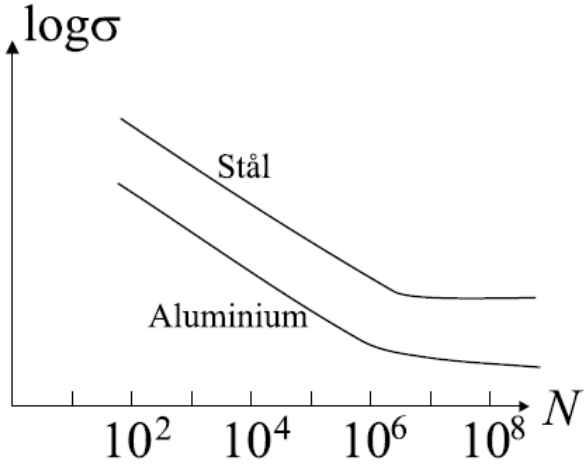
Målinger spredt men normalfordelt

UDMATTELSE

- Mange ståltyper udviser knæk på kurve omkring $10^6 – 10^7$ belastninger
- Efter knæk → uendelig holdbarhed
- Andre metaller udviser ikke dette knæk
- Rette stykke i Wöhlerkurve kan udtrykkes som:

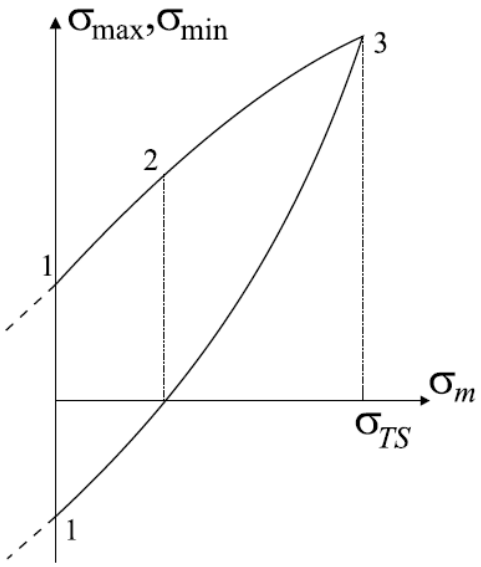
$$\sigma_{\max} N^a = C_1$$

- C_1 og a er materialekonstanter



For belastninger hvor middelspænding ikke er 0:

- Resultater optegnes i Smith diagram
- Max spænding og middelspænding på akserne
- Punkt 1 svarer til ren bøjning
- Punkt 3: $\sigma_m = \sigma_{TS}$ → ingen mulighed for varierende belastning



UDMATTELSE

Revnede strukturer

- fokuserer på revnevæksten ved gentagne belastninger
- Paris' lov: $\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m$
- da/dN: tilvækst i revnelængde per belastning, A og m er materialekonstanter, $\Delta K = K_{I,max} - K_{I,min}$, K: spændingsintensitetsfaktor
- Antages at revne eksisterer i strukturen
- Anvendes til at beregne antallet af belastninger til revne bliver ustabil

  Maksimale spændingsintensitetsfaktor = kritisk spændingsintensitetsfaktor
- Inden antal af belastninger er opnået inspiceres strukturen igen for at undersøge revnevæksten
- Nødvendiggør gentagne inspektioner af strukturen

EKSAMEN

- Varighed: 4 timer
- Pensum: se pensumopgivelse på kursusbeskrivelsen (adgang via nettet)
- Fordeling af opgaver: fordelt nogenlunde efter størrelsen på de enkelte kursusdele f.eks. Materialelære (5 kursusgang ud af 15) 1/3 af alle opgaver
- Hjælpemidler: lommeregner, noter, bøger, kompendier, skriveredskaber og lign ikke computer
- spørgsmål ???

Opgaveregning