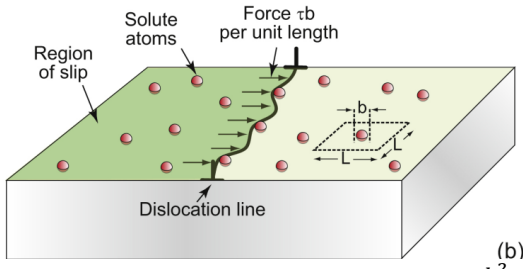
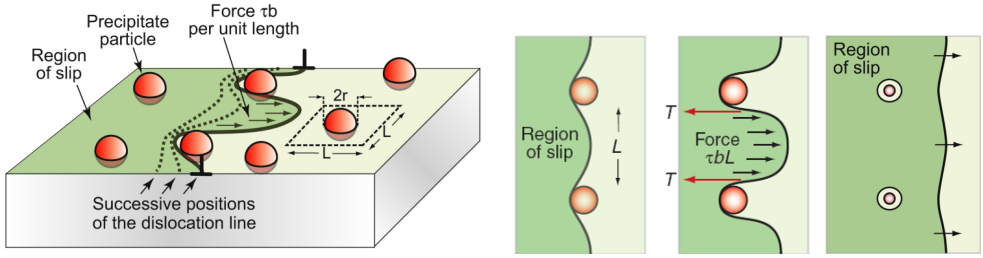
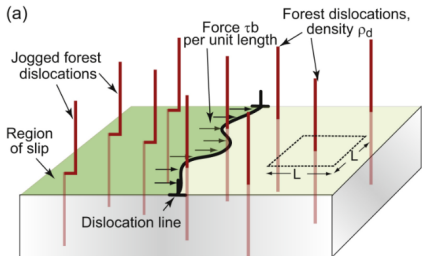
- Sterkte manipuleren
  Weerstand f = intrinsieke f_i + $f_{versteviging}$
  Dislocatie beweegt als $\tau\, b > f = pN = \frac{p}{L} \rightarrow \tau_{extra} = \frac{p}{bL} = \alpha \frac{Gb}{L}$
  - Oplossingsversteviging



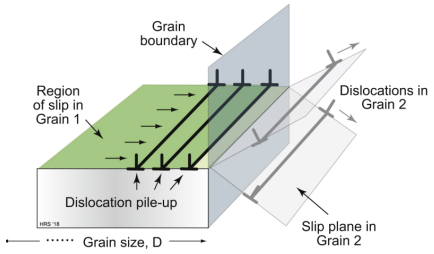
    - Concentratie oplossingen $c = \frac{b^2}{L^2}$
    - $\tau_{extra} = \tau_{ss} = \alpha \frac{Gb}{L} = \alpha\, G \sqrt{c}$
  - Precipitatieversteviging



    - Meest effectieve versteviging
    - Dislocatie trekt met τbL & pinkracht ondervindt 2 keer lijnspanning T
      $\rightarrow \tau_{extra} = \tau_{ppt} = \frac{2T}{bL} = \frac{Gb}{L}$
  - Vervormingsversteviging



    - Vervorming ↑ → dislocatiedichtheid ρ_d ↑ → hindert dislocaties
    - $\tau_{extra} = \tau_{wh} = \alpha \frac{Gb}{L} = \alpha\, G\, b \sqrt{\rho_d}$
  - Korrelgrensversteviging

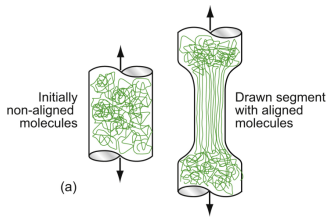


    - Dislocaties kunnen korrelgrens niet passeren, maar stapelen zich op
    - $\tau_{extra} = \tau_{gb} = \frac{k_p}{\sqrt{D}}$

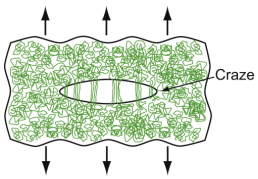
$\rightarrow \tau_y = \tau_i + \tau_{ss} + \tau_{ppt} + \tau_{wh} + \tau_{gb}$

Wanneer vervormen alle kristallen in polykristallijn materiaal plastisch?
≈1,5 (Taylor factor) τ_y = vloeispanning in afschuiving k
$\tau = \frac{F\,sin\theta}{A/cos\theta} = \sigma\,sin\theta\,cos\theta$ → maximaal bij 45° : $\sigma_y = 2k \approx 3\,\tau_y$

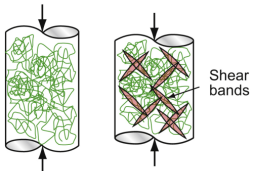
- Plastische vervorming van polymeren
  - Niet-kristallijn: geen dislocatie, binding dienen gebroken te worden
  - Versteviging
    - Mengen van polymeren: mengregel
    - Trekken



Niet alle polymeren kunnen getrokken worden
→ faalmechanisme = crazing (in trek):



of afschuifbanden (in druk):

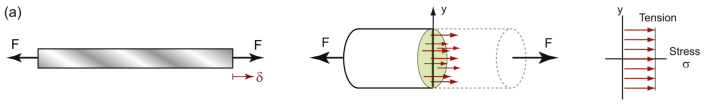


    - Cross-links
    - Verstevigende deeltjes of vezels (composieten)

M7. Ontwerpen met sterkte

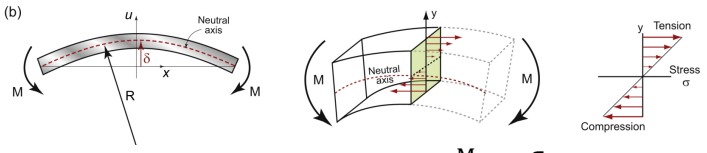
a) Niet plastisch vervormen → σ_y nergens overschrijden
b) Niet plastisch falen → component niet volledig plastisch
Nuttig bij vb. staalwalsen

- Plastische verlenging



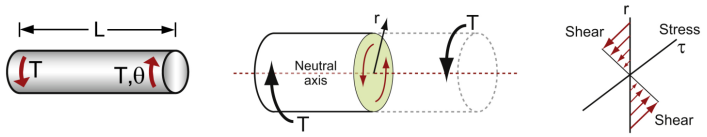
a) Start plastische vervorming: $\sigma = \frac{F}{A} \geq \sigma_y$
b) Onmiddellijk volledig plastisch over doorsnede

- Plastische doorbuiging



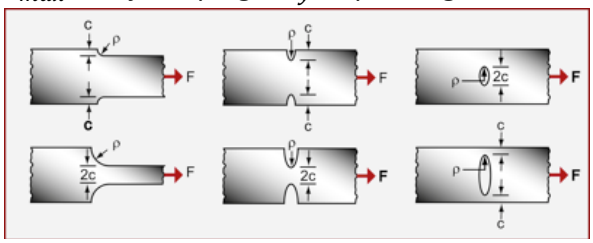
a) Start plastische vervorming: $\frac{M}{I} = \frac{\sigma_y}{y_m} \rightarrow \sigma_{max} = \frac{M\, y_m}{I} = \frac{M}{Z_e}$
b) Volledig plastisch indien volledige doorsnede vloeispanning bereikt:
$M_f = \int_{doorsnede} b(y)|y|\, \sigma_y\, dy = Z_p\, \sigma_y$

- Torsie τ



a) Start plastische vervorming: $\frac{\tau}{R} = \frac{T}{K} \rightarrow \tau_{max} = \frac{T\,R}{K} \geq k$
b) Volledig plastisch indien $\tau = k$ over de ganse doorsnede
Vb. spiraalvormige veer

- (Vliegwiel)
- Contactspanning
- **Spanningsconcentraties**
σ_{max} nabij inkeping = σ_y * spanningsconcentratiefactor K_{SC}



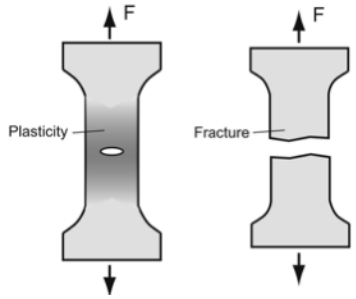
Materiaalindices

Vormfactor $\phi = \frac{Z_e}{Z_{e,vierkant}}$

M8. Breuk en breuktaaiheid

Taai: Plastische zone

Bros: Breuk bij $\sigma < \sigma_y$



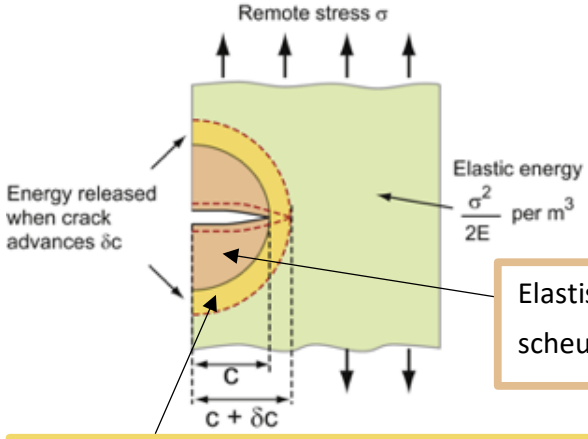
Breuktaaiheid meten

- Scheurtest en slag- of impacttest zijn afhankelijk van grootte en vorm ≠ eigenschap
- Breukmechanica
  Scheur = breuk met heel kleine r_{SC} → K_{SC} oneindig groot,
  wel: spanning op afstand r van scheurtip $\sigma_{lokaal} = \sigma \left(1 + Y\sqrt{\frac{\pi c}{2\pi r}}\right)$
  - r >> c: $\sigma_{lokaal} = \sigma$
  - r << c: $\sigma_{lokaal} = Y\frac{\sigma\sqrt{\pi c}}{\sqrt{2\pi r}}$

  → spanningsintensiteitsfactor $K_1 = Y\,\sigma\sqrt{\pi c}$
  Scheur groeit vanaf $\sigma = \sigma^*$
  → **breuktaaiheid** (eigenschap!) $\mathbf{K_{1c}} = Y\,\sigma^*\sqrt{\pi c} \approx \sigma^*\sqrt{\pi c}$
- CT test kan K_{1C} meten

Energievrijgave bij scheurgroei

- Scheurenergie = 2*(scheurvlak A)*(oppervlakte-energie γ) ↑ bij scheurgroei
  & elastische energie↓ bij scheurgroei
  → totale energie < 0: kritische scheurlengte c_{crit} voor brosse breuk
- Scheur groeit als externe arbeid G ≥ 2γ → $\mathbf{G_c}$ nodig voor scheurgroei = **taaiheid**

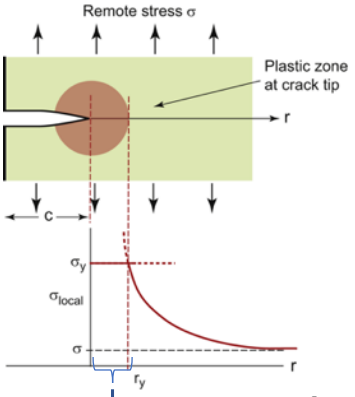


Elastische energie U bij scheurlengte c = $\frac{\sigma^2}{2E} \times \frac{1}{2}\pi c^2$

Toename U(c) bij scheurgroei $\delta c = \frac{\sigma^2}{2E} * (\text{halve omtrek } \pi c) * \delta c = G_c \delta c$

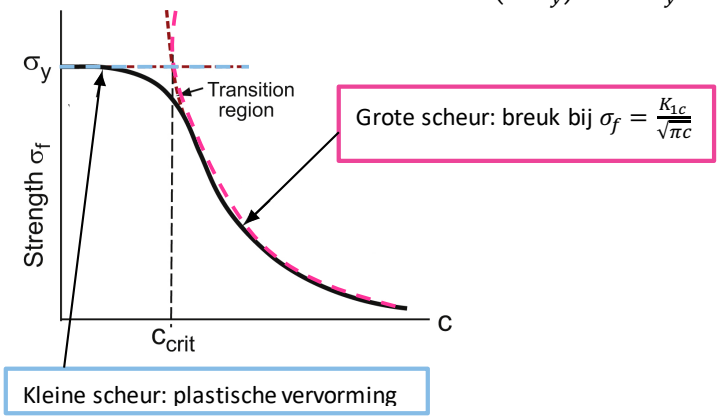
→ $\frac{K_{1c}^2}{2E} \approx G_c$ (correct: $K_{1c} = \sqrt{E\,G_c}$)

Plastische zone scheurtip



Proceszone → arbeid tegen plastische krachten & wrijvingskrachten

- Plastische zone (metaal)
- Microscheuren (keramiek)
- Delaminatie/vezel pull out (composieten)
- Grootte: $r_y = 2\left(\frac{\sigma^2\,\pi c}{2\pi\,\sigma_y^2}\right) = \frac{K_1^2}{\pi\,\sigma_y^2}$ → $r_y \sim \frac{1}{\sigma_y^2}$: sterkte-taaiheid trade-off



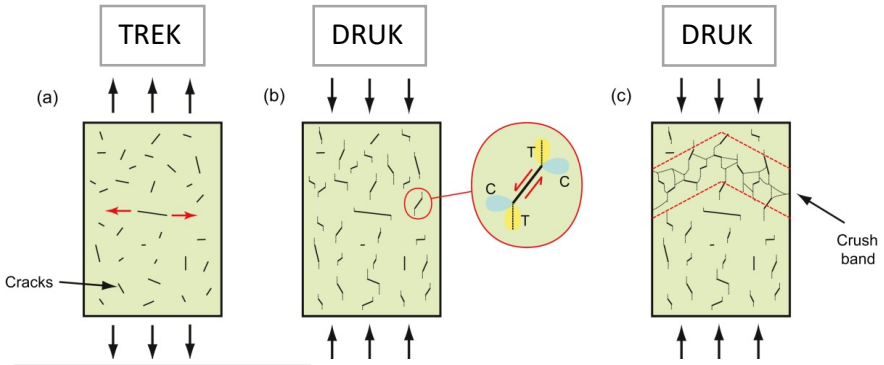
→ $c_{crit} = r_y$!

Fysische achtergrond

- Scheur = 1/6 van atoombindingen breken tot afstand $4r_0$ → $2\gamma = \frac{1}{6}\,H_c \cdot 4r_0$
- Brosse kliefbreuk (keramieken/glas)
  - $\sigma_{max} \approx \sigma_{ideaal}$
  - Geen plastische vervorming
  - C ↑, K_1 ↑, snelheid nadert geluidssnelheid
- Taaie breuk
  - Plastische vervorming → holtes → ductiele breuk zonder scheur
  - Polymeren: crazing (trek) of afschuifbanden (druk)
  - Analoog aan scheurtip: hogere G_C nodig
- Oorzaken ductiel-bros overgang
  - Temperatuur
    - Polymeren en KRG metalen bij lage T bros, bij hoge T ductiel
    - KVG en HDP metalen geen overgang bros-ductiel
  - Chemisch
    - Korrelgrensverbrossing
    - Waterstofverbrossing
    - Polymeren: UV, ozon

Grote verschillen in materialen

- Keramische materialen



Afhankelijk van verdeling microscheurtjes: grootste defect zorg voor brosse breuk	Scheuren groeien → breuk breidt in parallel aan drukbelasting uit Finaal: scheurband (sterker dan in trek)

In trek: <u>ook</u> afhankelijk van grootte
  - Klein monster = minder kans op breuk
  - → Weibull $P_S(V_0)$
  - Bij volume $V = nV_0$: $P_S(V) = [P_s(V_0)]^n$

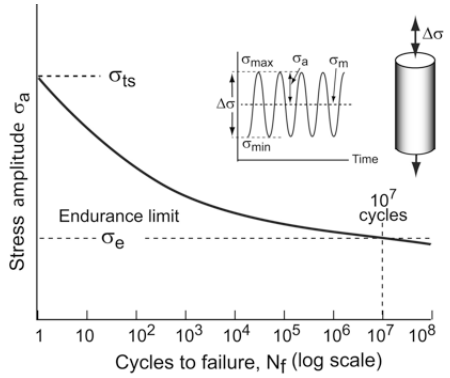
In buiging: enkel bovenste helft in druk belast
  - Spanning varieert lineair over dwarsdoorsnede
  - $P_S(V) = \int_V P_S(V)$
  - $\frac{\sigma_b}{\sigma_t} > 1$: sterker in buiging dan in trek

- Metalen
  - Legeren verhoogt sterkte → ductiliteit daalt (verminderen door verwijderen van inclusies)
- Polymeren/composieten
  - Modifiers: K_{1C} ↑
  - Mengen
  - Brosse vullers: K_{1C} ↓, E ↑
  - Vezels: K_{1C} ↑, E ↑

M9. Cyclische belasting en vermoeiing

Cyclische belasting types:

a) Akoestische trilling
b) Hoge cyclusvermoeiing (spanning < σ_y < σ_{ts})



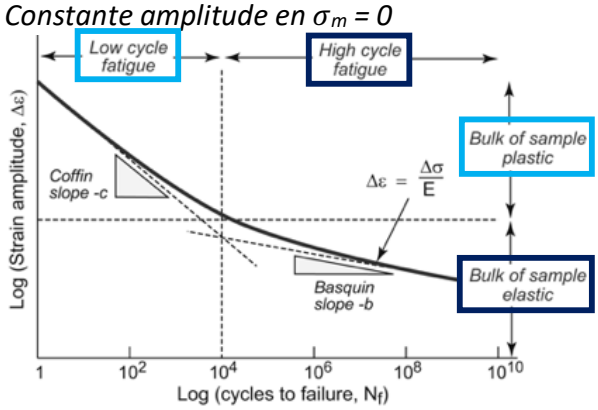
c) Lage cyclusvermoeiing (σ_{ts} > spanning > σ_y)

Merk op: vermoeiingsgrens σ_e < trekspanning σ_{ts}!

Empirische wetten

Initiatie gestuurde vermoeiing (geen initiële scheurtjes):

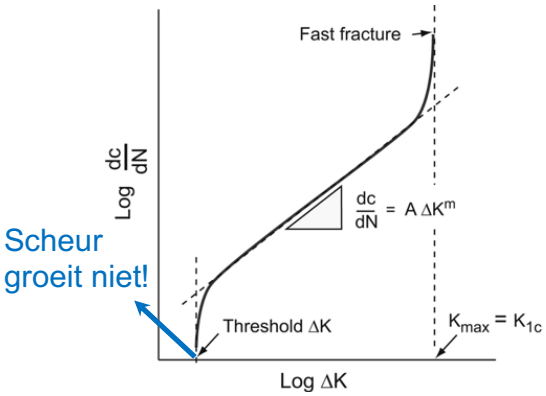
- Wetten van Basquin (hoge cyclusvermoeiing) en Coffin (lage cyclusvermoeiing)
  Constante amplitude en $\sigma_m = 0$



- Wet van Goodman
  Variabele amplitude en gemiddelde σ_m
- Wet van Miner
  Cumulatieve schade

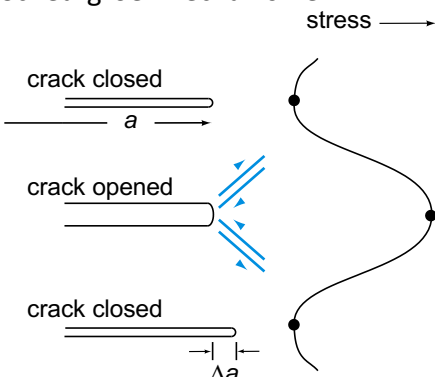
Scheurgroei gestuurde vermoeiing (initiële scheurtjes)

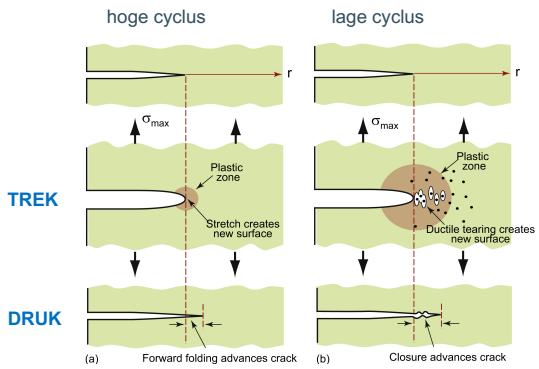
- Wet van Paris



Oorsprong vermoeiing

Scheurgroei mechanisme:





- Als σ < vermoeiingsgrens σ_e → geen lokale plastische vervorming - geen scheurgroei
- Als σ > vermoeiingsgrens σ_e → lokale plastische vervorming dus scheurgroei
  - Hoge cyclusvermoeiing: kleine plastische zone aan de tip
  - Lage cyclusvermoeiing: grote plastische zone met holtes die sneller doorscheuren

Vermoeiingsweerstand verbeteren:

- Sterke materialen hebben hogere σ_e
  Let op: warmtebehandeling doet sterkte stijgen, maar trekspanning ook, dus vloeispanning ligt dichter bij vermoeiingsgrens
- Weinig fouten in materiaal
- Drukspanningen in oppervlakte

M10. Ontwerpen met breuk en vermoeiing

Plotse breuk wanneer spanningsintensiteitsfactor K_1 = breuktaaiheid K_{1c}

- Maximale belasting → materiaalindex K_{1c}
- Maximale rek → materiaalindex $\frac{K_{1c}}{E}$
- Maximale energie → materiaalindex $\frac{K_{1c}^2}{E}$

Cases

Drukvat

- Maximale spanning niet betrouwbaar wegens vermoeiing!
- Visuele inspectie mogelijk: yield-before-break → maximale scheurlengte bij σ_y?
- Geen visuele inspectie mogelijk: leak-before-break → bij scheurlengte = wanddikte nog steeds stabiel onder druk?

Conrod