

# Materialen: eigenschappen, selectie en duurzaamheid

## M1. Inleiding & maatschappelijk belang

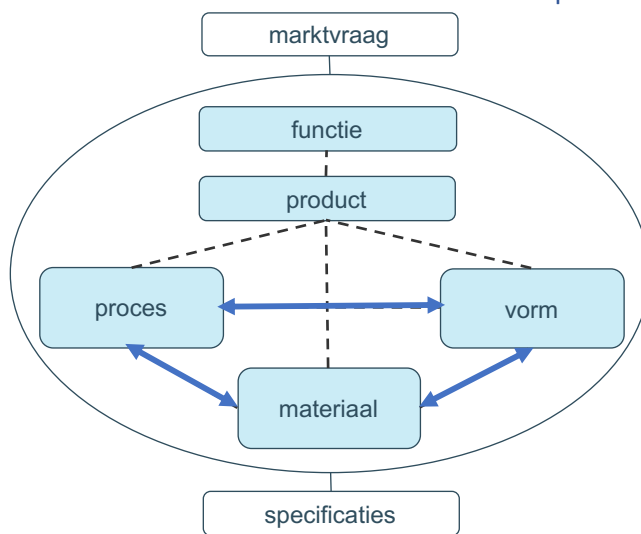
Systeem perspectief

- Geopolitieke, economische, energie- en milieuaspecten → materiaalselectie

Materiaal perspectief

- Materiaaleigenschappen, verwerking, microstructuur → toepassingen

## M2. Materiaalfamilies en ontwerpstrategie



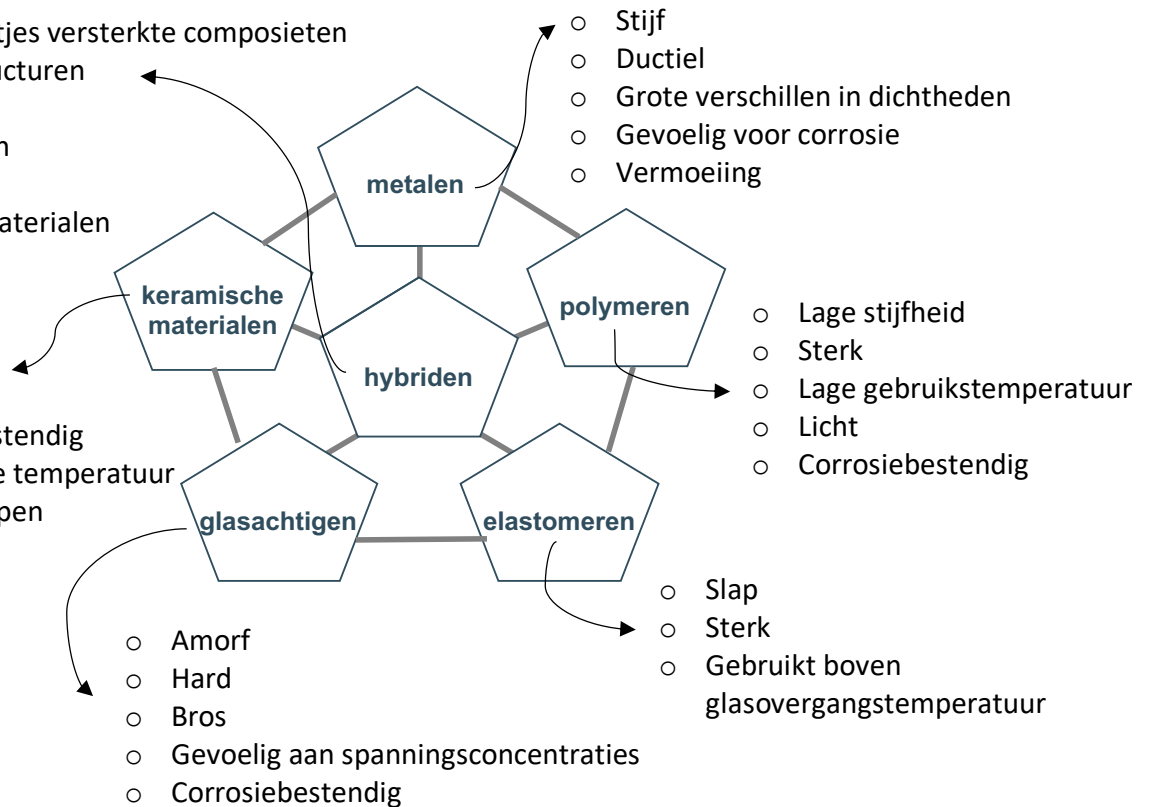
## Materiaaleigenschappen

- Mechanische eigenschappen
  - Stijf/slap:  $E$
  - Sterk/zwak:  $\sigma_y$
  - Taai/bros:  $K_{Ic}$
  - Zwaar/licht:  $\rho$
- Thermische eigenschappen
  - Gebruikstemperatuur:  $T_{max}$
  - Thermische expansie:  $\alpha$
  - Geleidbaarheid:  $\lambda$
  - Diffusiviteit:  $a \sim \frac{\lambda}{c_p}$
- Elektrische eigenschappen
  - Specifieke weerstand:  $\rho_e$
  - Diëlektrische eigenschappen
- Magnetische eigenschappen
- Optische eigenschappen
- Chemische eigenschappen
- Ecologische eigenschappen

## Materiaalfamilies

- Vezel en deeltjes versterkte composieten
- Sandwich structuren
- Schuimen
- Kabels/draden
- Laminaten
- Natuurlijke materialen

- Stijf
- Hard
- Bros
- Corrosiebestendig
- Goede hoge temperatuur eigenschappen



## Vormgevingstechnieken

Grondstoffen



Primaire vormgeving (gieten, walsen, spuitgieten, additive manufacturing)



Secundaire processen (bewerken, warmtebehandeling, verspanen, boren, ...)



Verbindingstechnieken (lassen, lijmen, ...) & oppervlaktebehandeling (anodiseren)



Eindproduct

## Ontwerpstrategie

1. Concept bedenken
2. Materiaal, vorm en proces kiezen

### Vertaalslag:

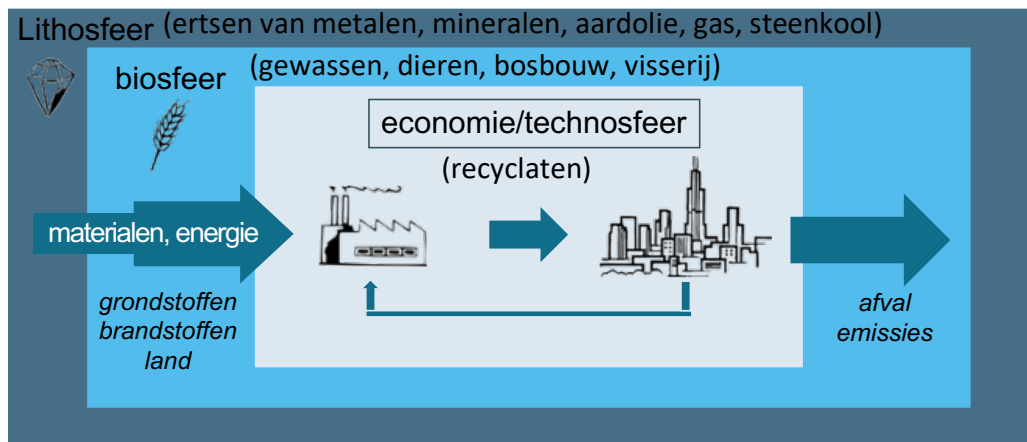
- Functie
- Beperkingen → screening
- Objectief → ranking
- Vrije variabelen

3. Detailleren en optimaliseren

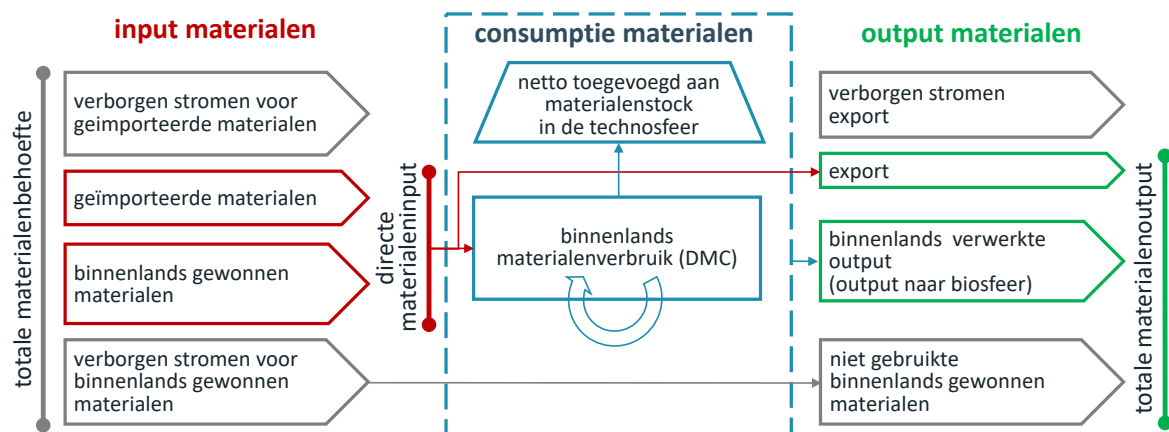
### M3. Grondstoffen, materiaalconsumptie en milieueffecten

#### Oorsprong van materialen

##### Industrieel metabolisme



#### Materiaalconsumptie



Materiaalbehoefte stijgt exponentieel!

#### Grondstoffen schaarste

- Absolute schaarste
  - Statische >< dynamische uitputting
  - Betera prospectie of beter ontginningstechnologie mogelijk
  - Armere grondstoffen
- Structurele schaarste
  - Metalen enkel als bijproduct van andere metalen
- Economische schaarste
  - Geopolitiek – kritieke materialen

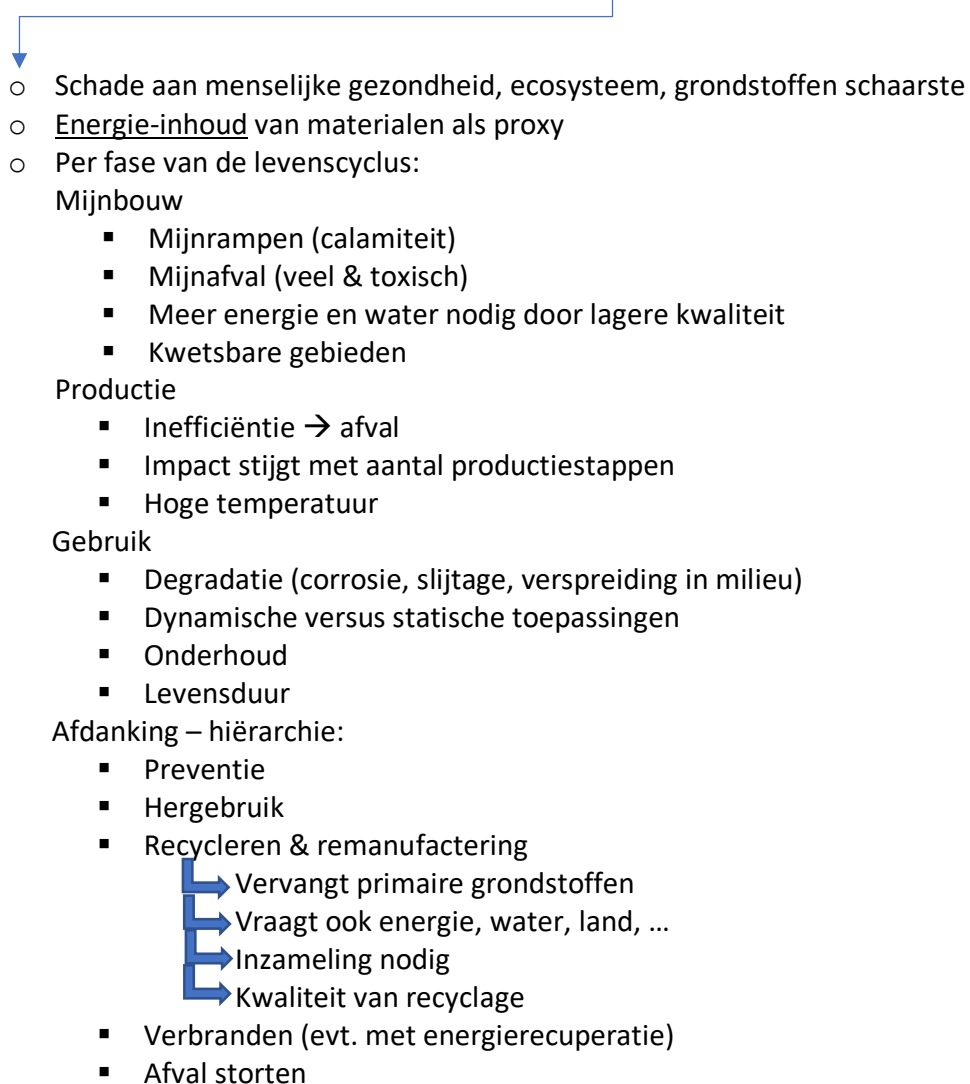
→ Prijzendans van grondstoffen

→ Relatieve of absolute ontkoppeling nodig

## Milieu-impact

### DPSIR framework:

Drivers – Pressures (milieudruk) – State (milieueffect) – Impact – Responses



### Biomassa: impact

- |   |  |   |
|---|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Landgebruik</li><li>• Meststoffen en pesticiden</li><li>• Water-intensief</li><li>• Energie-intensief</li></ul> |  | <ul style="list-style-type: none"><li>• Vervangt vaak aardolie</li><li>• Extra functionaliteiten (biodegradeerbaar, CO<sub>2</sub> neutraal, geluiddempend, ...)</li><li>• Soms energie-efficiënter</li></ul> |
|---|--|---|

### Duurzaamheid: people, profit, planet

- IPAT vergelijking:  $\text{Impact} = P (\text{bevolkingsaantal}) * A (\text{welvaart}) * T (\text{technologie})$
- Kaya vergelijking:  $\text{emissie van een economie} = \text{bevolking} * \text{welvaart (bbp) per bevolkingsaantal} * \text{energie per bbp} * \text{emissie voor die energie}$
- Principes van Herman Daly: behoud van natuurlijk kapitaal
  - Gebruik hernieuwbare bronnen < regeneratiesnelheid
  - Gebruik hernieuwbare bronnen < ontwikkeling substituten
  - Effluenten in omgeving < capaciteit tot assimilatie

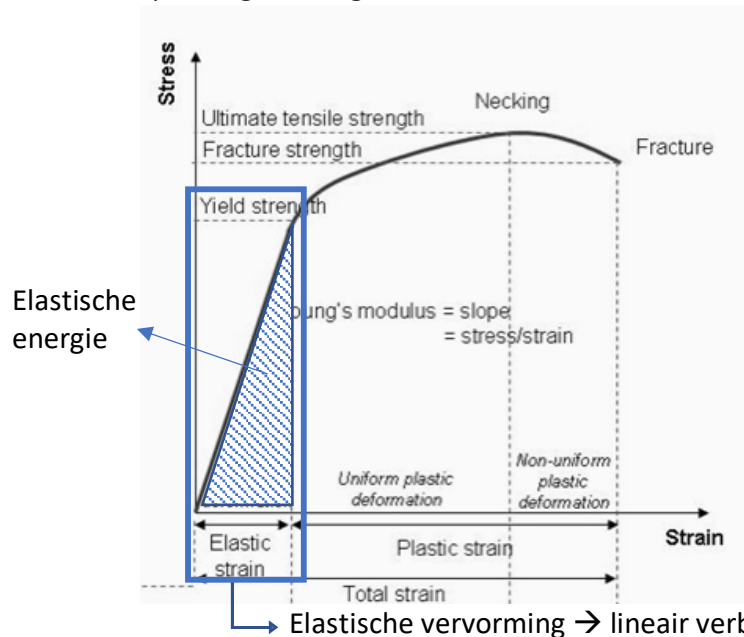
## M4. Stijfheid en dichtheid

- Stijfheid: elasticiteitsmodulus  $E$
- Massa: dichtheid  $\rho$
- Beide niet afhankelijk van microstructuur, maar van atoomgewicht en kristalstructuur

### Metten van stijfheid en dichtheid

- Dichtheid: wet van Archimedes
- Stijfheid
  - Meten van frequentie van trillingen
  - Trektest

Spanning-rek diagram



→ Elastische vervorming → lineair verband: wet van Hooke  $\sigma = E \cdot \epsilon$

### Spanning

Trek/druk →  $\sigma = E \cdot \epsilon$

Schuifspanning →  $\tau = G \cdot \gamma$

Druk langs alle kanten →  $p = K \cdot \Delta$

- Coëfficiënt van Poisson
- Wet van Hooke in 3D

### Manipuleren van stijfheid en dichtheid

- Composieten (hybriden)
  - Dichtheid via mengregel
  - Modulus: boven limiet (parallele belasting) en onder limiet (serie belasting)
- Schuimen (materiaal met holtes)

## Fysische achtergrond

### Atomaire structuur

- Grote bindingsenergie per nucleon → stabiel
- Valentie-elektronen bepalen chemisch karakter
  - Elektropositieve atomen geven gemakkelijk  $e^-$  af (links in tabel)
  - Elektronegatieve atomen nemen gemakkelijk  $e^-$  op (rechts in tabel)

**Atoomvolume:** hangt cyclisch samen met aantal valentie-elektronen

- Shielding of screening = opgevolde schillen zwakken aantrekkingskracht nucleus af:  
 $Z_{\text{eff}} = Z - S$
- Afstoting tussen negatieve valentie-elektronen en schillen

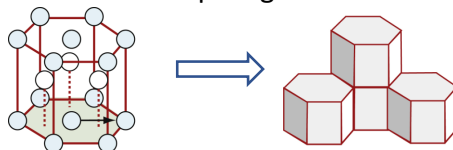
### Interatomaire bindingen

Cohesieve energie  $H_c$  = energie nodig om atomen volledig te scheiden

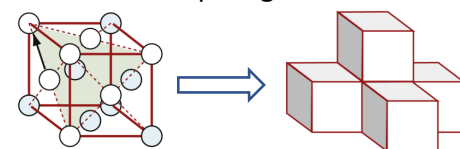
- Metallisch
    - Tussen metaalatomen
    - Elektronenwolk
  - Ionisch
    - Combinatie sterk elektronegatief en -positief atoom (verschil > 1,7)
    - Globale lading neutraal
  - Covalent
    - Gedeelde valentie-elektronen
    - Verschil in elektronegativiteit < 1,7 → polaire binding
    - Verschil in elektronegativiteit < 0,4 → apolaire binding
    - O.a. koolstof: hybridisatie van orbitalen
  - Van der Waals
    - Dipool-dipool door beweging of permanent
- $H_c$  (van der Waals) <  $H_c$  (metallisch) <  $H_c$  (covalent) <  $H_c$  (ionisch)

### Atoomstapeling

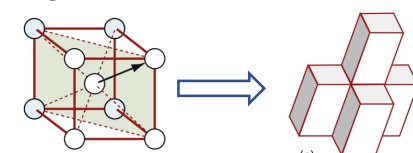
- Kristallijn = geordend gestapelde eenheidscellen (vb. meeste metalen en keramieken)
  - Dichtste bolstapeling: HDP



- Dichtste bolstapeling: KVG



- KRG



→ Hiertussen zitten holtes

- Amorf = niet-geordend gestapeld (vb. polymeren (of semi-kristallijn), metalen en glazen indien te snel afgekoeld)

### Fysische oorsprong van dichtheid

- Atoommassa
- (Atoomvolume)
- (Atoomstapeling)

### Fysische oorsprong van E-modulus

- Atoomvolume: kleiner volume = meer bindingen per eenheid volume = stijver
  - Arbeid om  $H_C$  te overwinnen  $\rightarrow KV_m = C \cdot H_C \rightarrow$  via coëfficiënt van Poisson:  $E$
  - Energie rond evenwichtstoestand  $\sim$  veer  $\rightarrow$  bindingsstijfheid  $\rightarrow E$

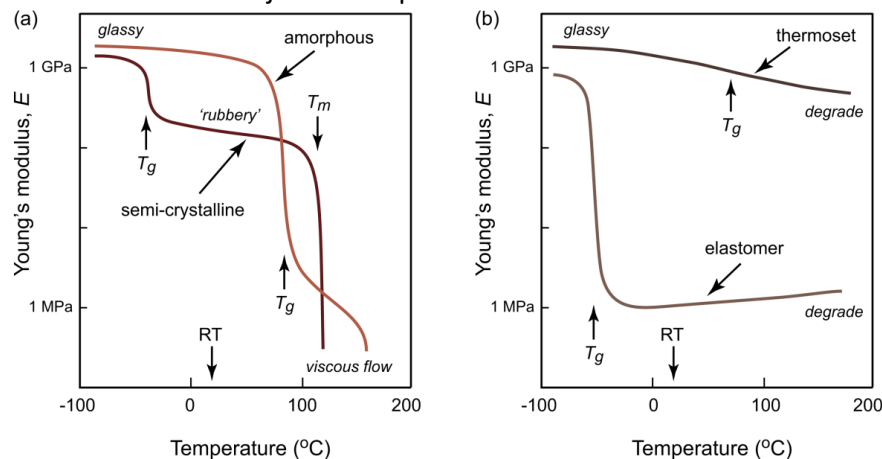
### Polymeren

Ruggengraat van covalent gebonden C-atomen & ketens met van der Waals bindingen

$\rightarrow$  lage bindingsstijfheid tussen ketens

$\rightarrow$  lage  $E$ , tenzij cross-links!

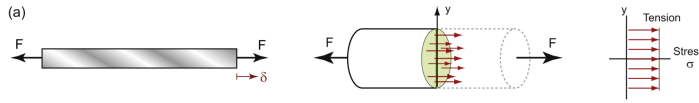
E-modulus afhankelijk van temperatuur:



- Amorfe polymeren: thermoplasten
  - Geleidelijke overgang
  - Bij  $T_g$  smelten van der Waals bindingen, maar haken eerst nog vast
  - Goed recycleerbaar
- Semi-kristallijne polymeren: thermoplasten
  - Omwille van kristallijne zones langere rubberachtige fase
  - Smelten uiteindelijk  $\rightarrow$  goed recycleerbaar
- Amorfe polymeren met cross-links: thermoharders
  - Smelten niet bij  $T_g$  door cross-links
  - Degradieren /branden uiteindelijk
- Amorfe polymeren met enkel cross-links: elastomeren
  - Heel lage  $T_g$ : viskeus bij kamertemperatuur
  - Smelten niet door cross-links, maar degraderen/branden

## M5. Ontwerpen met stijfheid

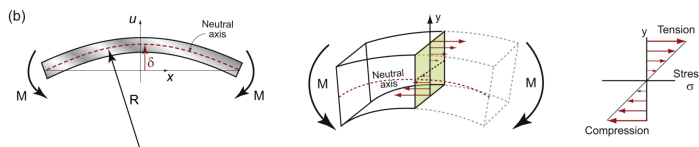
- Elastische verlenging  $\delta$



$$a) \delta = \epsilon L_0 = \frac{F L_0}{A E}$$

- b) Stijfheid S

- Elastische doorbuiging



- a) Kromming  $\kappa$

$$b) \text{Moment } dM = dF \cdot y = \sigma dA \cdot y = E \epsilon dA \cdot y = E \frac{(R+y) d\theta - R d\theta}{R d\theta} dA \cdot y = E \frac{y}{R} dA \cdot y$$

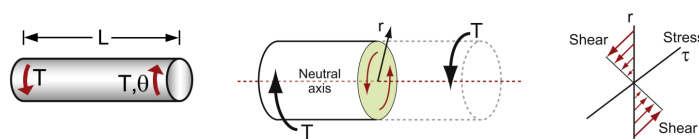
$$\rightarrow M = E \frac{1}{R} \int_{\text{doorsnede}} y^2 dA = E I \kappa \text{ met } I = \text{traagheidsmoment in buiging}$$

- c) Buigstijfheid  $E I$

- d) Maximale doorbuiging S

afhankelijk van verdeling externe belasting en soort bevestiging

- Torsie  $\tau$



$$a) \text{Torsie veroorzaakt een verdraaiing per lengte-eenheid: } \frac{\tau}{r} = \frac{T}{K} = \frac{G \gamma}{r} = \frac{G \theta}{L}$$

met  $K$  = traagheidsmoment in torsie

- b) Torsie stijfheid  $G K$

- Knik (elastisch)
- Trillingen

## Materiaalindices

Vertaalslag: functie – beperkingen – objectief – vrije variabelen

Performantie = f (functionele vereisten, geometrische parameters, **materiaaleigenschappen**)

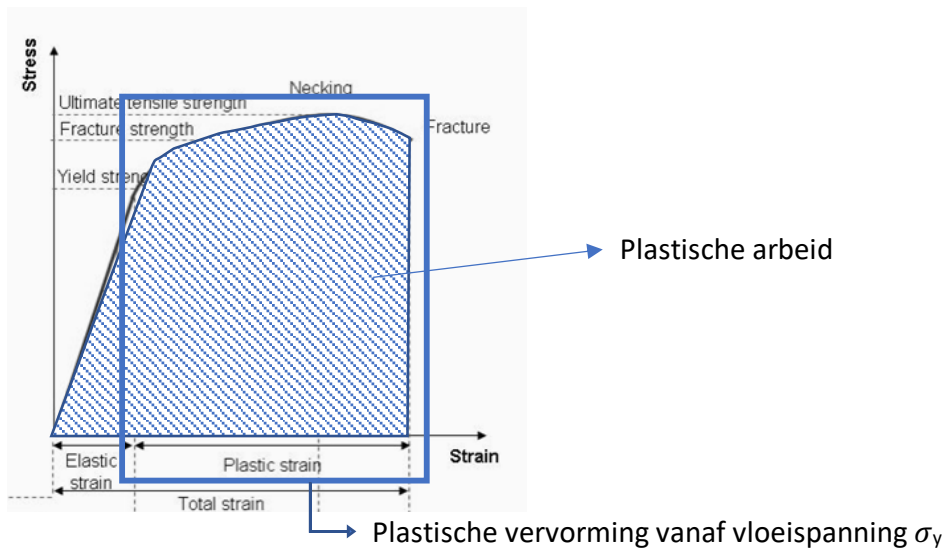
Ranking: max. performantie = max. **materiaalindex**

→ optimale materiaalkeuze voor alle functionele vereisten en geometrische parameters!

**Vormfactor**  $\phi = \frac{I}{I_{\text{vierkant}}} = \frac{12I}{A^2}$  indien equivalente oppervlakte A

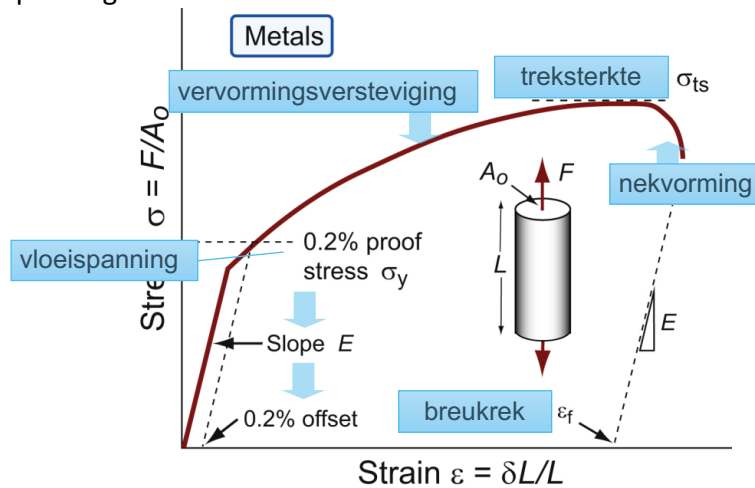


## M6. Plasticiteit

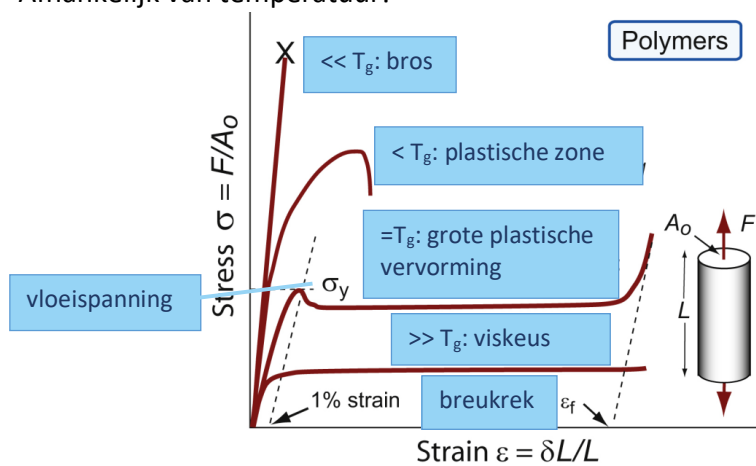


### Sterkte

- Spannings-rek curve: metaal

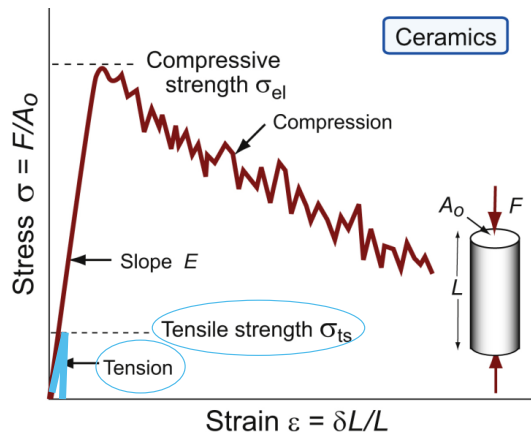


- Spannings-rek curve: polymeer  
Afhankelijk van temperatuur!



- Spannings-rek curve: keramiek

Druk >> trek



- Alternatief: hardheid als maat voor sterkte

### Reële spanning en rek

- Nominale spanning  $\sigma_n = \frac{F}{A_0} = \frac{F}{A} \left( \frac{L_0}{L} \right)$  wegens behoud van volume  $A L = A_0 L_0$
- Nominale rek  $\epsilon_n = \left( \frac{L - L_0}{L_0} \right) = \left( \frac{L}{L_0} \right) - 1$   
 $\rightarrow$  Reële spanning  $\sigma_t = \frac{F}{A} = \sigma_n \left( \frac{L}{L_0} \right) = \sigma_n (1 + \epsilon_n)$   
 $\rightarrow$  Reële rek  $\epsilon_t = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \left( \frac{L}{L_0} \right) = \ln(1 + \epsilon_n)$
- Reële spanning en rek kunnen opgeteld worden bij verschillende vervormingen

### Oorsprong van sterkte en ductiliteit

- Ideale sterkte
  - Kracht waarbij atomen los komen  $F_{\max} \cong \frac{S a_0}{10}$
  - Ideale spanning  $\sigma_{ideaal} = \frac{F_{\max}}{a_0^2} \cong \frac{S}{10 a_0} = \frac{E}{10}$   
 $\rightarrow$  wordt in realiteit niet behaald
- Kristalroosterfouten
  - Puntdefecten
    - Vacatures
    - Substitutionele vaste oplossing (vervangingsatomen)
    - Interstitiële vaste oplossing (extra vreemde atomen)
  - Oppervlakte-defecten
    - Korrelgrenzen
    - Precipitaten
  - Lijn-defecten: **dislocaties**
    - Randdislocatie >< schroefdislocatie
    - Microscopisch vele dislocaties  $\rightarrow$  macroscopische vervorming
    - Arbeid afschuifspanning  $W = \tau L_1 L_2 b$
    - Arbeid tegen weerstand  $W = f L_1 L_2$
    - Lijnspanning T

$$\left. \begin{array}{l} W = \tau L_1 L_2 b \\ W = f L_1 L_2 \end{array} \right\} f = \tau b$$