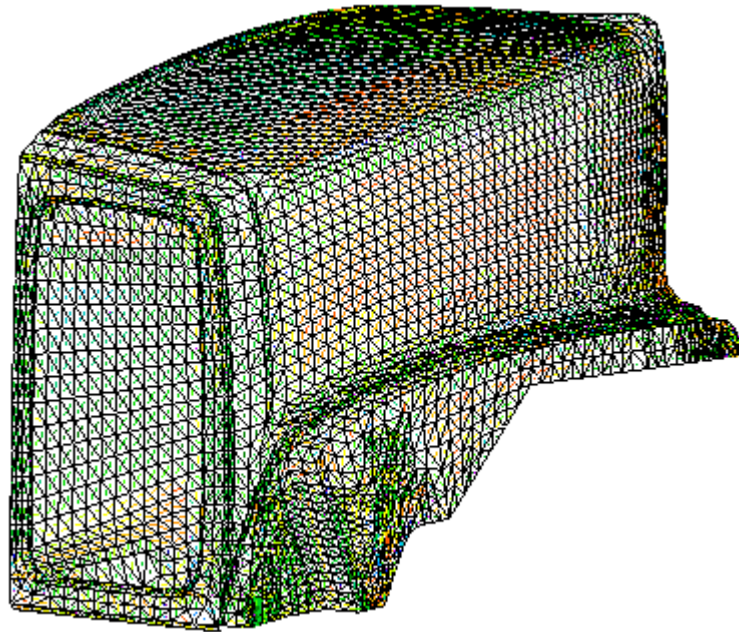




Hoofdstuk 1



Materiaal- eigenschappen



INHOUDSOPGAVE

1. Inleiding	2
2. Chemische eigenschappen.....	2
3. Fysische eigenschappen	3
4. Mechanische eigenschappen	3
4.1. Algemene beschouwingen.....	4
4.2. De trek- en drukproef.....	6
4.3. Het spanning-rek-diagram	8
4.3.1. Het conventionele spanning rek-diagram.....	8
4.3.2. Het ware spanning-rek-diagram	11
4.4. Spanning-rek-gedrag van taaie en brose materialen	12
4.5. De wet van Hooke	15
4.6. Buigproeven	18
4.7. Afschuifsterkte	19
4.8. Hardheidsmetingen	19
4.9. Slagvastheidstesten	21
4.10. Het functioneren van materialen op de lange termijn.....	23
5. Dimensionale eigenschappen.....	25

1. Inleiding

Als ontwerper is materiaal heel belangrijk. Meestal gaat het hier dan niet om het materiaal voor zijn mooie uitzicht, maar om de eigenschappen die aan dat materiaal gekoppeld zijn. Je zou bijvoorbeeld een wagen kunnen maken uit aluminiumfolie, omdat jij vindt dat het mooi is. Maar aluminiumfolie is simpelweg niet geschikt om wagens mee te bouwen.

Het is dus heel belangrijk dat jij als ontwerper een keuze kan maken van een geschikt materiaal voor jouw specifiek ontwerp. En die keuze zal afhangen van de verschillende eigenschappen die een materiaal kan hebben zijnde:

- chemische eigenschappen
- fysische eigenschappen
- mechanische eigenschappen
- dimensionale eigenschappen

2. Chemische eigenschappen

Dit zijn materiaaleigenschappen die verband houden met de atoomstructuur en de chemische samenstelling van het materiaal. Om deze eigenschappen te bepalen, zul je naar een chemisch labo moeten stappen. En meestal zal een stukje van je materiaal in kwestie moeten opgeofferd worden om het onderzoek te kunnen uitvoeren.

- **Samenstelling:** een opsomming van de elementen of chemische verbindingen waaruit dat materiaal bestaat, onder vermelding van de gehalten waarin die bestanddelen voorkomen.



- **Kristalstructuur:** de manier waarop de atomen of moleculen van het materiaal in zich herhalende eenheden zijn geordend.
- **Corrosievastheid:** het vermogen van een materiaal weerstand te bieden tegen chemische of elektrochemische aantasting door stoffen in de omgeving

3. Fysische eigenschappen

Deze eigenschappen hebben te maken met de fysica van het stuk. Het is meestal niet nodig om hier het materiaal te vernietigen om een meting te kunnen doen. Fysische eigenschappen houden dikwijls verband met de omgeving waarin het materiaal zich bevindt, bijvoorbeeld de lineaire uitzettingscoëfficiënt van een stof wanneer ze in een warme ruimte geplaatst wordt.

- **Smeltpunt:** de temperatuur waarbij een vast materiaal vloeibaar wordt door verwarmen en stolt bij afkoeling. Veel materialen hebben geen precies gedefinieerd smeltpunt, maar eerder een smelttraject.
- **Soortelijke massa:** de massa (of het gewicht) van een stof per volume-eenheid. Ook wel dichtheid genoemd.
- **Soortelijk gewicht:** de verhouding tussen de massa van een gegeven volume stof, tot de massa van een gelijk volume water.
- **Brekingindex:** de verhouding van de lichtsnelheid in die stof t.o.v. de lichtsnelheid in het luchtledige.
- **Warmtegeleidingscoëfficiënt:** de hoeveelheid warmte die per eenheid van tijd door een homogeen materiaal stroomt, per eenheid van oppervlakte, per eenheid van temperatuursgradiënt in de richting die loodrecht op het oppervlak staat.
- **Lineaire uitzettingscoëfficiënt:** de lengteverandering per graad temperatuursverandering. De waarde wordt meestal opgegeven voor een bepaald temperatuursgebied.
- **Verwekingtemperatuur:** de temperatuur waarbij een polymeer onder een bepaalde gegeven belasting een bepaalde mate van doorbuiging of vervorming vertoont.
- **Waterabsorptievermogen:** de procentuele gewichtstoename die een stof ondergaat wanneer het gedurende een bepaalde tijd onder gecontroleerde omstandigheden in water wordt gedompeld.
- **Doorslagspanning:** het grootste potentiaalverschil dat een isolator van een gegeven dikte gedurende een bepaalde tijd kan verdragen, zonder dat er in het materiaal elektrische doorslag ontstaat.
- **Soortelijke weerstand:** de elektrische weerstand per eenheid van lengte en per eenheid oppervlakte van de dwarsdoorsnede, of de elektrische weerstand per eenheid van lengte en per eenheid van massa.
- **Soortelijke warmte:** de hoeveelheid warmte die nodig is om één kg van een stof één graad Celsius in temperatuur te laten stijgen

4. Mechanische eigenschappen

Deze eigenschappen zijn belangrijk wanneer er krachten op het materiaal worden uitgeoefend. Deze krachten kunnen zichtbaar (bv.: Een springplank) als onzichtbaar



zijn (bv.: een schroef om twee planken samen te houden). Meestal hangen de mechanische eigenschappen af van zowel chemische als fysische eigenschappen van een materiaal. De mechanische eigenschappen zijn voor de ontwerper heel belangrijk.

- **Treksterkte:** de verhouding tussen de maximale belasting in een trekproef en de oorspronkelijke dwarsdoorsnede van de proefstaaf. Gemeten in N/m^2 .
- **Elasticiteitsgrens:** de spanning waarbij een materiaal plastisch gaat vervormen. Ook wel rekgrens genoemd.
- **Druksterkte:** de grootste druk die een materiaal kan ondervinden zonder te breken.
- **Elasticiteitsmodulus:** de verhouding tussen de spanning en de rek in het elastisch gebied. Dit is ook een maat voor de stijfheid van een materiaal.
- **Buigsterkte:** de spanning in de buitenrand van een eenzijdig ondersteunde balk die onder invloed van een belastingen een vooraf bepaalde buiging ondergaat.
- **Afschuifsterkte:** de spanning waarbij breuk (afschuiving) optreedt in het vlak van de doorsnede van het materiaal.
- **Hardheid:** de weerstand die een materiaal biedt tegen plastische deformatie.
- **Kerfslagvastheid:** de hoeveelheid energie die nodig is om een gegeven volume van een materiaal te laten breken.
- **Vermoeiingsgrens:** als op een materiaal afwisselde krachten worden geplaatst, dan kan dat materiaal dat meestal heel lang volhouden. Maar er staat ook een grens hierop. Na een lange tijd zal het materiaal vermoeid worden, en breken. Dit is de vermoeiingsgrens.
- **Elasticiteitsgrens bij compressie:** de spanning waarbij een samengedrukt materiaal gaat vervormen.
- **Kruip:** tijdsafhankelijke toenemende rek bij een continue belasting
- **Spanningsbreuksterkte:** de spanning waarbij een proefstaaf van een bepaald materiaal breekt.

Om een zicht te krijgen op al deze eigenschappen worden verschillende test uitgevoerd. Het is onmogelijk om deze hier allemaal op te noemen. Er zijn echter wel zes belangrijke:

- Trekproeven
- Buigproeven
- Hardheidsmetingen
- Slagvastheidstesten
- Vermoeiingstesten
- Kruiptesten

4.1. Algemene beschouwingen

Als we aan een product trekken wordt het langer. En als het ver genoeg uitgerokken wordt dan zal het breken. De relatie tussen de kracht, het uitrekken en de sterkte van het product zijn heel belangrijk om het constructieonderdeel te kennen. De vervorming en de sterkte van een stof zijn echter afhankelijk van de grootte van het stuk. Een dikke buis is sterker dan een dunnen buis! Om de afmetingen van het stuk uit de testen te kunnen weglaten, gebruiken we **spanning en rek**.



De spanning (σ , sigma) is de verhouding tussen de kracht en het belast oppervlak.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Er zijn verschillende soorten spanningen. De positieve trekspanning rekt een materiaal uit en een negatieve trekspanning (drukspanning) drukt een materiaal samen. Een wring- of torsiespanning zal een materiaal krom laten wringen, en een buigspanning zal een materiaal buigen.

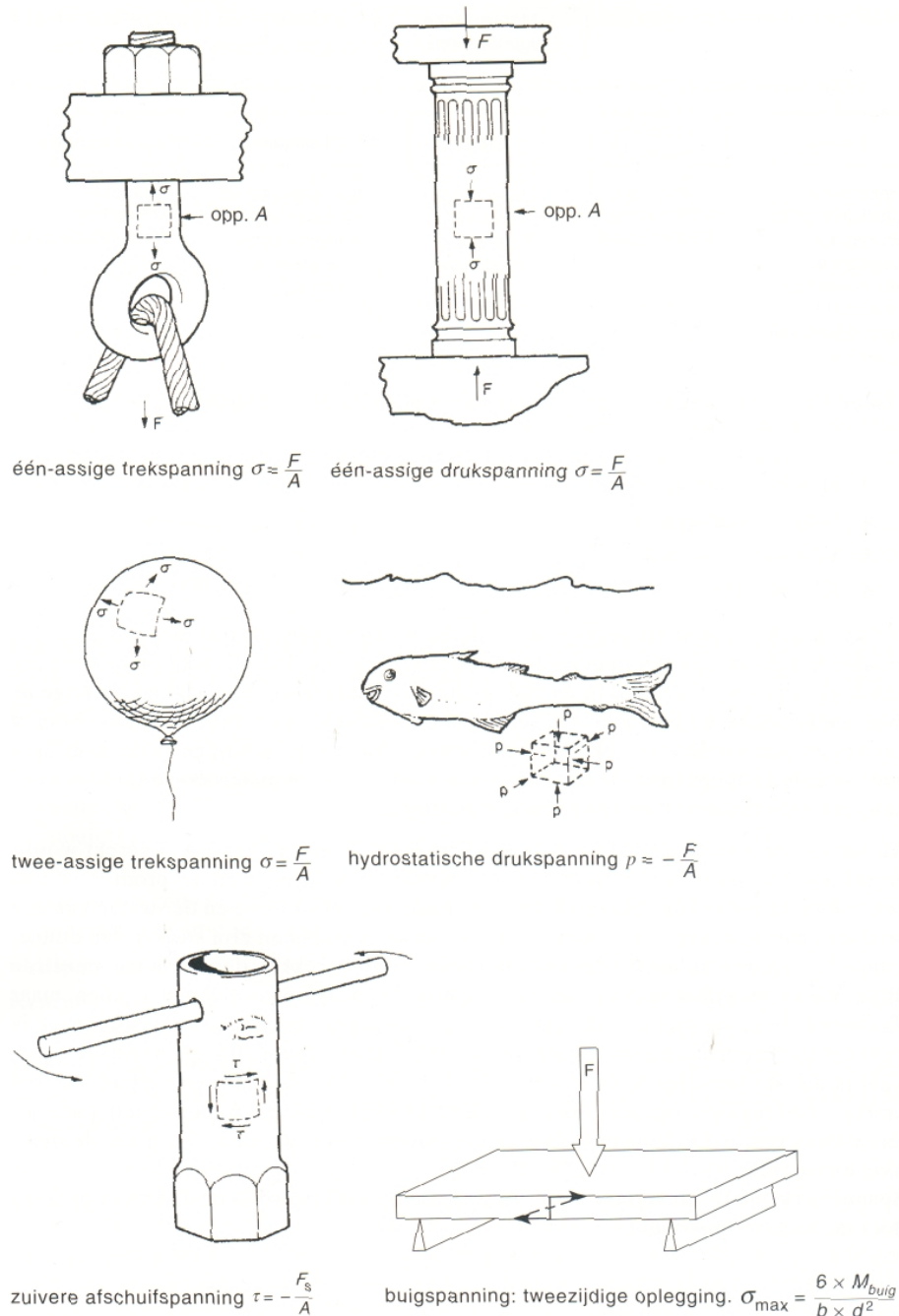


Fig. 1.1: Verschillende soorten spanningen



Omdat er meestal vervorming optreedt bij het inwerken van een kracht. Zal men bijna altijd rekenen met het oorspronkelijk oppervlak van het voorwerp, zijnde A_0 . De formule voor spanning wordt dus:

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Op dezelfde wijze gaan we rek (ε) definiëren als een verlenging van een stof (Δl), t.o.v. de oorspronkelijke lengte (l).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Door altijd te gaan vergelijken met de oorspronkelijke afmetingen van het stuk, kunnen we de grootte van het voorwerp buiten beschouwing laten.

(Natuurlijk moeten we hier dan ook rekening houden met het feit dat de berekende spanning niet zal overeenstemmen met de werkelijke spanning, aangezien het belaste oppervlak nooit gelijk zal blijven aan het oorspronkelijke oppervlak van het werkstuk)

4.2. De trek- en drukproef

De sterkte van een materiaal hangt af van zijn vermogen een belasting te dragen zonder dat overmatige vervorming optreedt of het materiaal bezwijkt. Deze eigenschap is eigen aan het materiaal en moet experimenteel worden bepaald. Daarom zijn er verscheidene soorten proeven ontwikkeld om de sterkte van een materiaal te evalueren onder statische belastingen, wisselende belastingen, stootbelastingen en duurbelastingen.

Een van de belangrijkste proeven is de trek- of drukproef. Hoewel met deze proef vele belangrijke mechanische eigenschappen van een materiaal kunnen worden vastgesteld, wordt hij hoofdzakelijk gebruikt om de relatie tussen de gemiddelde trekspanning en de rek te bepalen in veel constructiematerialen, zoals metalen, keramiek, polymeren en composieten. Om deze proef uit te voeren, wordt van het materiaal een proefstaaf met een 'standaard' vorm en grootte gemaakt.

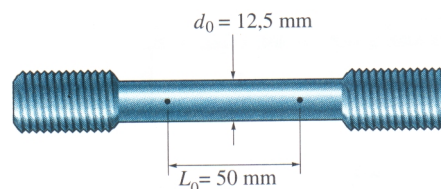


Fig. 1.2: Standaard trekstaaf

Vóór de proef worden over de lengte van de proefstaaf twee kleine ponsmarkeringen aangebracht. Deze markeringen liggen wat verwijderd van de uiteinden van de proefstaaf, omdat de spanningsverdeling wordt verstoord door de krachtsinleiding op de plaatsen waar het proefstuk wordt ingeklemd. Zowel de oorspronkelijke dwarsdoorsnede-oppervlakte A_0 als de meetlengte L_0 tussen de ponsmarkeringen worden aan het begin van de proef opgemeten. Wanneer bijvoorbeeld een metalen proefstaaf in een trekproef wordt gebruikt, heeft deze in het algemeen een initiële diameter $d_0 = 12,5$ mm en een meetlengte $L_0 = 50$ mm (zie fig. 1.2). Om een axiale belasting uit te oefenen zonder dat de proefstaaf buigt, worden de uiteinden meestal in kogelgewrichten bevestigd. Men gebruikt dan een testbank als die in fig. 1.3. Om de proefstaaf in een heel langzaam, constant tempo uit te rekken tot de staaf breekt. Tijdens het uitrekken van de proefstaaf kan de trekkracht worden gemeten.

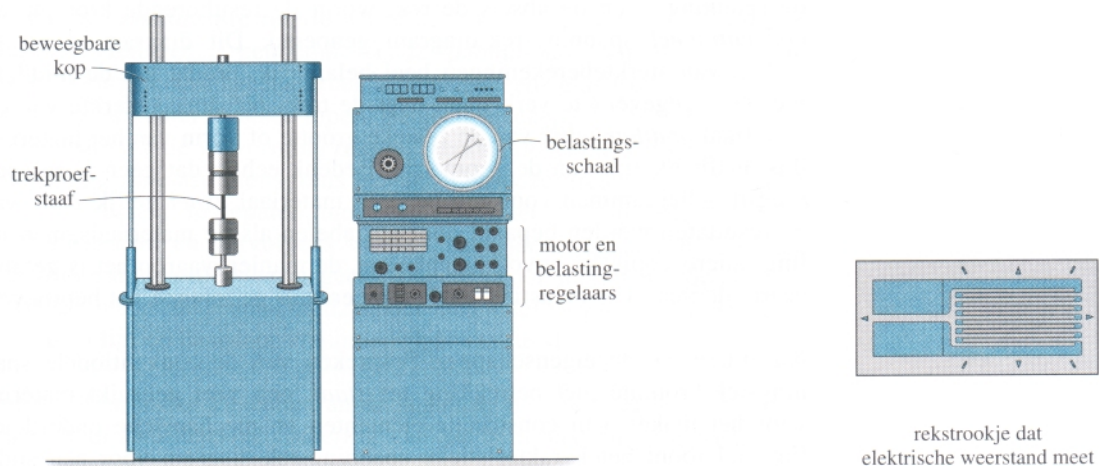


Fig. 1.3: trekbank

Met regelmatige tussenpozen wordt tijdens de proef de waarde van de aangebrachte belasting P geregistreerd en op de schaalverdeling van de trekbank zichtbaar gemaakt. Ook de verlenging $\delta = L - L_0$ tussen de ponsmarkeringen op de proefstaaf kunnen worden gemeten met behulp van een schuifmaat of een mechanisch of optisch apparaat dat extensometer wordt genoemd. Deze waarde δ (delta) wordt vervolgens gebruikt om de gemiddelde rek in de proefstaaf te berekenen. Soms echter, wordt deze vervorming direct geregistreerd door gebruik te maken van een rekstrookje, dat in feite de elektrische weerstand meet. Fig. 1.3 geeft een voorbeeld van een dergelijk meetinstrument.

De werking van een dergelijk rekstrookje berust op de verandering in elektrische weerstand van een zeer dunne draad of metaalfolie die vervormd wordt. Het rekstrookje wordt in een bepaalde richting op de proefstaaf bevestigd. Als het bindmiddel erg sterk is vergeleken met het rekstrookje, kan dit laatste als integraal deel van de proefstaaf worden beschouwd, zodat wanneer de proefstaaf in de richting van het rekstrookje wordt uitgerekt, de draad en de proefstaaf dezelfde vervorming zullen ondervinden. Door de elektrische weerstand van de draad te meten, kan de meter worden geijkt, zodat de waarden voor de rek daarna direct kunnen worden afgelezen.



4.3. *Het spanning-rek-diagram*

Op basis van de gegevens van een trek- of drukproef kan de spanning met bijbehorende vervorming in de proefstaaf worden berekend en de resultaten vervolgens grafisch worden weergegeven. De kromme die hieruit ontstaat, heet het spanning-rek-diagram en wordt gewoonlijk op twee manieren beschreven.

4.3.1. *Het conventionele spanning-rek-diagram.*

Met de gegevens uit de trekproef kunnen we de nominale of ontwerpspanning vaststellen door de uitgeoefende belasting P te delen door de oppervlakte A_0 van de oorspronkelijke dwarsdoorsnede van de proefstaaf. Deze berekening gaat ervan uit dat de spanning over de dwarsdoorsnede en in het hele gebied tussen de meetpunten constant is.

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

Bovendien wordt de nominale of ontwerprek gevonden door het rekstrookje rechtstreeks af te lezen of door de verandering in de meetlengte van de proefstaaf, δ , te delen door de oorspronkelijke meetlengte, L_0 .

Hierbij wordt aangenomen dat de rek over het hele gebied tussen de meetpunten constant is. Zodoende is

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0}$$

Wanneer we σ als functie van ε grafisch weergeven, waarbij de ordinaat de spanning is en de abscis de rek, wordt de resulterende kromme een conventioneel spanning-rek-diagram genoemd. Dit diagram is bij het maken van sterkteberekeningen heel belangrijk, omdat het de middelen biedt om gegevens te verkrijgen over de trek- (of druk-) sterkte van een materiaal onafhankelijk van de fysieke grootte of vorm van het materiaal, dus onafhankelijk van de geometrie. Bedenk echter dat geen twee spanning-rek-diagrammen voor een bepaald materiaal exact gelijk zijn, want de resultaten worden bepaald door variabelen als de materiaalsamenstelling, microscopische onvolkomenheden, de manier waarop het is gefabriceerd, de mate van belasting en de temperatuur gedurende het beproeven.

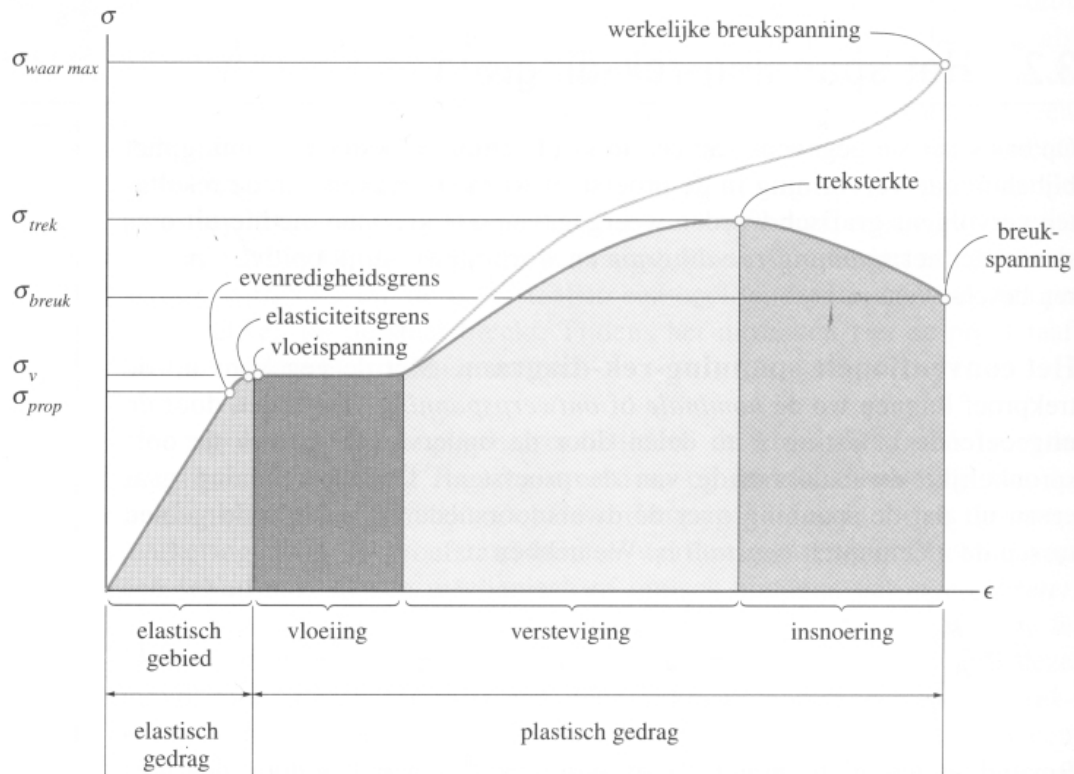


Fig. 1.4: Conventioneel en werkelijke spannings-rek-diagram

Nu zullen we de eigenschappen bespreken van de conventionele spanning-rek-kromme met betrekking tot staal, een veel gebruikt materiaal voor het maken van constructie-elementen en mechanische onderdelen. Fig.1.4 toont het karakteristieke spanning-rek-diagram voor een stalen proefstaaf, waarbij de hierboven beschreven methode is gebruikt. Uit deze kromme kunnen we in het gedrag van het materiaal vier typen onderscheiden, afhankelijk van de mate waarin het materiaal vervormt.

Elastisch gedrag

De proefstaaf wordt elastisch genoemd als deze tot zijn oorspronkelijke vorm of lengte terugkeert wanneer de belasting die erop werkt wordt weggenomen. Dit elastisch gedrag treedt op wanneer de spanningen in de proefstaaf in het lichtgrijze gebied van het diagram in fig. 1.4 liggen. In het grootste deel van dit gebied is de kromme duidelijk een rechte lijn; de spanning is dus evenredig aan de vervorming. Men zegt ook wel dat het materiaal lineair elastisch is. De bovenste spanningsgrens voor deze lineaire relatie wordt de evenredigheidsgrens of proportionaliteitsgrens, σ_{prop} genoemd. Als de spanning de evenredigheidsgrens iets overschrijdt, kan het materiaal zich nog steeds elastisch gedragen; de kromme gaat echter vlakker lopen, hetgeen betekent dat bij een toename van de spanning de vervorming relatief sterker toeneemt. Dit gaat door tot de spanning de elasticiteitsgrens bereikt. Om deze grens voor een willekeurige proefstaaf te bepalen, moet een steeds iets grotere belasting worden aangebracht en vervolgens worden verwijderd totdat een blijvende vervorming in de proefstaaf is geconstateerd. Voor staal wordt de elasticiteitsgrens echter zelden bepaald, omdat deze heel dicht bij de evenredigheidsgrens ligt en daardoor vrij moeilijk is vast te stellen.

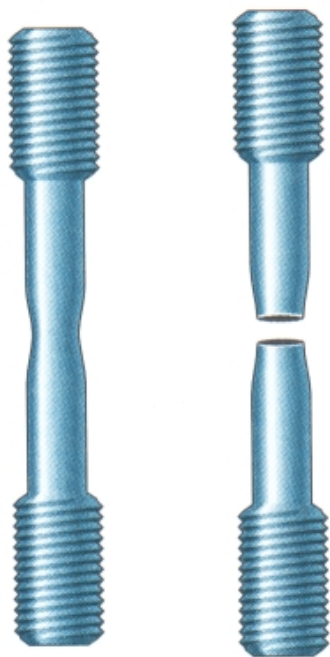


Vloeien

Een lichte toename van de spanning boven de elasticiteitsgrens resulteert in kwaliteitsvermindering van het materiaal en zorgt voor blijvende vervorming. Dit gedrag wordt vloeien genoemd en wordt in fig. 1.4 aangegeven door het donkergrijze gebied van de kromme. De spanning die vloeien veroorzaakt, wordt vloeispanning of vloeipunt, σ_v , genoemd; de vervorming die optreedt, heet plastische vervorming. In tegenstelling tot elastische belasting zal een belasting die het materiaal doet vloeien, de eigenschappen van het materiaal permanent veranderen. Hoewel niet in fig. 1.4 te zien, zijn bij het vloeipunt voor staalsoorten met een laag koolstofgehalte of warmgewalste soorten vaak twee waarden aangegeven. Het hoogste vloeipunt verschijnt het eerst, waarna het vermogen belasting te dragen plotseling terugvalt tot het laagste vloeipunt. Als echter het laagste vloeipunt is bereikt, wordt, zoals in fig. 1.4 is te zien, de proefstaaf verder verlengd zonder dat de belasting toeneemt. Bedenk dat fig. 1.4 niet op schaal is getekend. Als dat wel het geval was, zouden de door het vloeien opgewekte vervormingen ongeveer 10 tot 40 keer zo groot zijn geweest als de tot aan de elasticiteitsgrens geproduceerde vervormingen. Tijdens het vloeien wordt het materiaal vaak perfect plastisch genoemd.

Verstevinging

Als het vloeien is opgehouden, heeft vergroting van de belasting tot gevolg dat de kromme continu stijgt, maar vlakker wordt tot een spanning wordt bereikt die treksterkte, σ_{trek} wordt genoemd. De stijging in deze kromme wordt verstevinging genoemd en in fig. 1.4 is dat gebied in de lichte kleur weergegeven. Gedurende de proef neemt de dwarsdoorsnede-oppervlakte bij verlenging van de proefstaaf af. Deze afname van de oppervlakte is over de hele meetlengte nagenoeg constant, zelfs tot aan de vervorming die met de treksterkte overeenkomt.



Insnoering

Bij σ_{trek} begint de dwarsdoorsnede-oppervlakte af te nemen op één plaats op de proefstaaf, niet over de gehele lengte. Hierdoor ontstaat in dit gebied, naarmate de proefstaaf verder wordt verlengd, een versmalling of 'insnoering' (zie fig. 1.5). Omdat de dwarsdoorsnede-oppervlakte in het gebied steeds kleiner wordt, kan de kleinere oppervlakte ook maar een steeds afnemende belasting dragen. Hierdoor daalt de kromme in het spanning-rek-diagram tot de proefstaaf breekt op het punt breukspanning, σ_{breuk} . Het gebied van de kromme waar insnoering optreedt, is in fig. 1.4 in de donkere kleur afgebeeld. Het resultaat van het bezwijken van een proefstaaf is te zien in fig. 1.5.

Fig. 1.5: insnoering

4.3.2. Het ware spanning-rek-diagram

In plaats van steeds de oorspronkelijke dwarsdoorsnede-oppervlakte en de originele lengte van de proefstaaf te gebruiken om de ontwerpspanning en -rek te berekenen, hadden we ook de werkelijke dwarsdoorsnede-oppervlakte en de werkelijke lengte van de proefstaaf op het moment dat de belasting wordt gemeten, kunnen gebruiken. De uit deze metingen berekende waarden voor spanning en rek worden ware spanning en ware rek genoemd; een grafische weergave van deze meetwaarden heet het ware spanning-rek-diagram.

Als dit diagram wordt getekend, heeft het een vorm die in fig. 1.4 wordt aangegeven door de licht gekleurde kromme. Merk op dat het conventionele en het ware σ - ϵ -diagram praktisch samenvallen als de vervorming klein is. De verschillen tussen de diagrammen beginnen op te vallen in het versterkingsgebied, waar de grootte van de rek belangrijker wordt. Let met name op de grote divergentie in het insnoeringsgebied. Hier is in het conventionele σ - ϵ -diagram te zien dat de proefstaaf feitelijk een afnemende belasting ondersteunt, omdat A_0 constant is wanneer de rekenspanning, $\sigma = P/A_0$ wordt berekend. Uit het ware σ - ϵ -diagram kan echter worden opgemaakt dat de werkelijke oppervlakte A in het insnoeringsgebied steeds kleiner wordt tot breuk optreedt, σ_{breuk} , en dus ondervindt het materiaal in feite een toenemende spanning, want $\sigma = P/A$.

Hoewel het ware en het conventionele spanning-rek-diagram van elkaar verschillen, worden de meeste ontwerpberekeningen uitgevoerd binnen het elastische gebied. Vooropgesteld dat het materiaal 'stijf' is, zoals voor de meeste metalen geldt, blijft de vervorming tot de elasticiteitsgrens klein en is de fout bij gebruik van de constructiewaarden σ en ϵ heel klein (ongeveer 0,1%) ten opzichte van de werkelijke waarden. Dit is een van de belangrijkste redenen om conventionele spanning-rek-diagrammen te gebruiken.

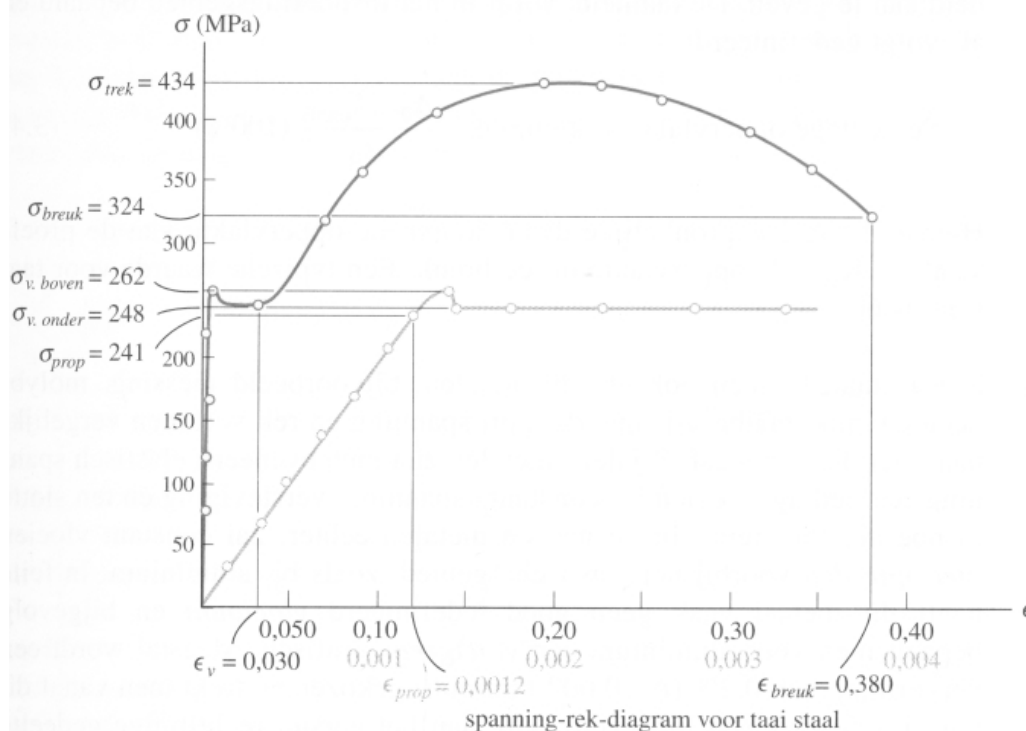


Fig. 1.6: Spanning-rek-diagram voor taai staal



De bovenstaande principes kunnen worden samengevat door naar fig. 1.6 te verwijzen. Deze figuur toont een conventioneel spanning-rek-diagram voor een proefstaaf van zacht staal. Om de details duidelijker weer te geven, is het elastische gebied van de kromme in een lichte kleur afgebeeld, met een vergrote rekschaal die eveneens in een lichte kleur is weergegeven. Als we het gedrag volgen, zien we dat de evenredigheidsgrens wordt bereikt bij $\sigma_{prop} = 241 \text{ MPa}$, waarbij $\epsilon_{prop} = 0,0012 \text{ mm/mm}$. Dit wordt gevolgd door een hoogste vloeipunt van $\sigma_{v,boven} = 262 \text{ MPa}$, en dan plotseling een laagste vloeipunt van $\sigma = 248 \text{ MPa}$. Het vloeien eindigt bij een rek van $= 0,03 \text{ mm/mm}$, 25 keer zo hoog is als de rek bij de evenredigheidsgrens! Vervolgens wordt de proefstaaf verstevigd tot de treksterkte $\sigma_{trek} = 434 \text{ MPa}$ is bereikt en daarna begint insnoering van de staaf totdat deze breekt, $\sigma = 324 \text{ MPa}$. Ter vergelijking: de rek bij breken, $\epsilon_{breuk} = 0,380 \text{ mm/mm}$, dus 317 keer zo groot als ϵ_{prop} !

4.4. *Spanning-rek-gedrag van taaie en brosse materialen*

Materialen kunnen worden geclassificeerd als taai of bros, afhankelijk van hun spanning-rek-kenmerken. Beide groepen worden nu afzonderlijk besproken.

Taaie materialen

Elk materiaal dat aanzienlijk kan worden vervormd voordat het scheurt of breekt, wordt taai genoemd. Zacht staal, zoals eerder besproken, is daarvan een typisch voorbeeld. Ontwerpers kiezen vaak voor taaie materialen, omdat deze schokken of energie kunnen opnemen en bij overbelasting meestal aanzienlijk worden vervormd voordat ze bezwijken.

Eén manier om de taaigheid van een materiaal weer te geven, is door het percentage verlenging of het percentage oppervlakteverkleining op het moment van breuk op te geven. Het percentage verlenging van de proefstaaf is deze verlenging, gedeeld door de oorspronkelijke meetlengte van de proefstaaf L_0 . Als de lengte bij breuk L_{breuk} bedraagt, dan geldt:

$$\text{verlengingspercentage} = \frac{L_{breuk} - L_0}{L_0} (100\%)$$

Zoals we in fig. 1.6 hebben gezien, zou deze waarde voor een proefstaaf van taai staal 38% zijn, want $\epsilon_{breuk} = 0,380$.

Het percentage oppervlakteverkleining is een andere manier om de taaigheid aan te geven. De taaigheid wordt in het insnoeringsgebied bepaald en als volgt gedefinieerd:

$$\text{Percentage_oppervlakteverkleining} = \frac{A_0 - A_{breuk}}{A_0} (100\%)$$

Hier is A_0 de oorspronkelijke dwarsdoorsnede-oppervlakte van de proefstaaf en A_{breuk} de oppervlakte bij de breuk. Een typische waarde voor taai staal is 60%.



Naast staal, kunnen ook andere metalen, bijvoorbeeld messing, molybdeen en zink, taaiheidsskenmerken bij spanning en rek vertonen vergelijkbaar met die van staal. Bij deze metalen ziet men eveneens elastisch spanning-rek gedrag, vloeien bij constante spanning, versteviging en ten slotte insnoering tot breuk. In de meeste metalen echter, zal constant vloeien niet optreden voorbij het elastische gebied, zoals bij aluminium. In feite heeft dit metaal vaak geen goed-gedefinieerd vloeipunt en bijgevolg bepaalt men voor aluminium een vloeigrens grafisch. Meestal wordt een vervorming van 0,2% ($\epsilon = 0,002$ mm/mm) gekozen en trekt men vanaf dit punt op de ϵ -as een lijn evenwijdig aan het eerste, rechte gedeelte van het spanning-rek-diagram. Het punt waar deze lijn de kromme snijdt, geeft de vloeigrens aan. Zo is de bepaling van de vloeigrens voor een aluminiumlegering te zien in fig. 1.7. Uit de grafiek blijkt dat de vloeigrens $\sigma_{0,2} = 352$ MPa.

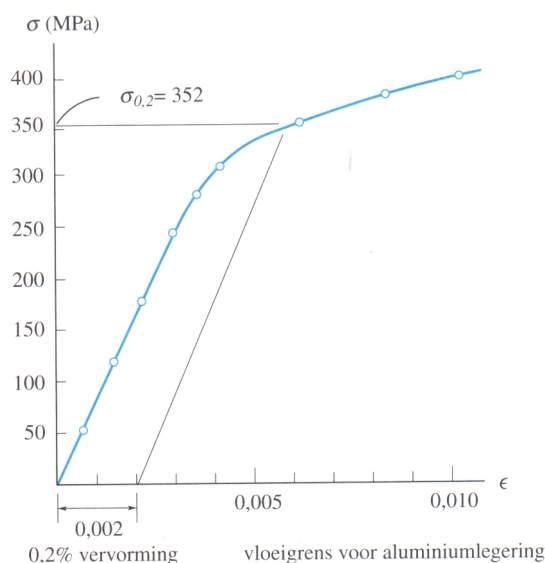


Fig. 1.7: Vloeigrens voor aluminiumlegering

Bedenk dat de vloeigrens geen fysische eigenschap van het materiaal is, want het is een spanning die een bepaalde permanente vervorming in het materiaal veroorzaakt.

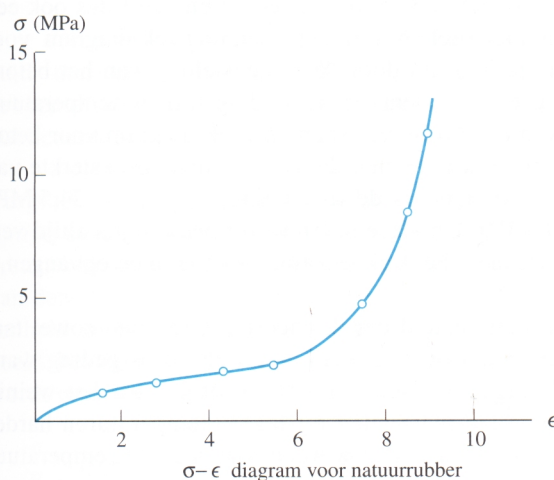


Fig. 1.8: Spannings-rek-diagram van rubber

In deze cursus echter, zullen we aannemen dat zowel de vloeigrens, het vloeipunt, de elasticiteitsgrens als de evenredigheidsgrens samenvallen, tenzij anders is aangegeven. Voorbeeld van een uitzondering hierop is rubber, dat in feite niet eens een evenredigheidsgrens heeft, omdat er geen lineair verband bestaat tussen de spanning en de vervorming (zie fig. 1.8). In plaats hiervan vertoont dit materiaal, een polymeer, niet-lineair elastisch gedrag.

Hout is een materiaal dat meestal niet erg taai is en wordt daarom gewoonlijk gebruikt voor het opnemen van belastingen in het elastische gebied. De sterkte-eigenschappen van hout variëren aanzienlijk van soort tot soort en voor elke soort geldt dat de sterkte afhankelijk is van het vochtgehalte, de leeftijd, en de grootte en rangschikking van knoesten. Omdat hout uit vezels bestaat, is het voor de trek- of drukeigenschappen van groot belang of het evenwijdig aan of loodrecht op de vezelrichting wordt belast. Hout splijt bijvoorbeeld gemakkelijk wanneer het loodrecht op de vezel wordt belast. Vandaar dat de vezelrichting van houten onderdelen bijna altijd evenwijdig aan de richting van de trekbelasting wordt gekozen.

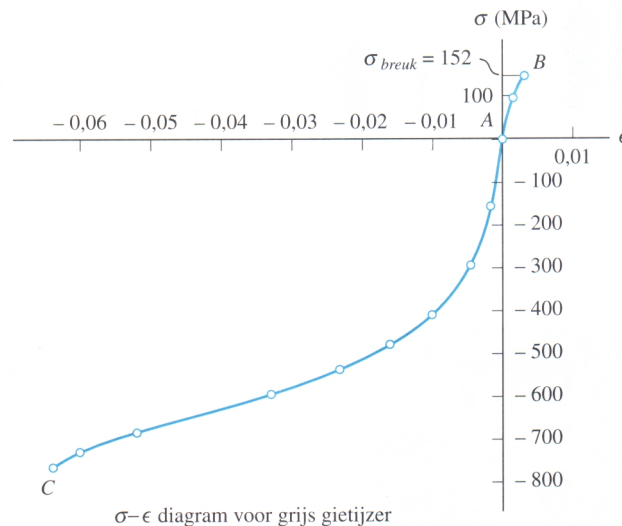


Fig. 1.9: σ - ϵ -diagram van grijs gietijzer

Brosse materialen

Materialen die weinig of niet vloeien voordat ze bezwijken, worden bros of brosse materialen genoemd. Grijs gietijzer is daarvan een voorbeeld. Het heeft een spanning-rek-diagram bij trekbelasting zoals wordt weergegeven door deel AB van de kromme in fig. 1.9. Hier treedt breuk op bij $\sigma_{breuk} = 152$ MPa. De breuk begint bij een onvolkomenheid of microscopisch scheurtje en verspreidt zich dan snel over de proefstaaf. Als gevolg van deze vorm van bezwijken hebben brosse materialen geen goed-gedefinieerde breukspanning bij trekbelasting, omdat scheurtjes in een proefstaaf heel willekeurig optreden. Daarom bepaalt men de gemiddelde breukspanning algemeen uit een reeks trekproeven. Figuur 1.10a laat zien hoe bros materiaal bezwijkt.

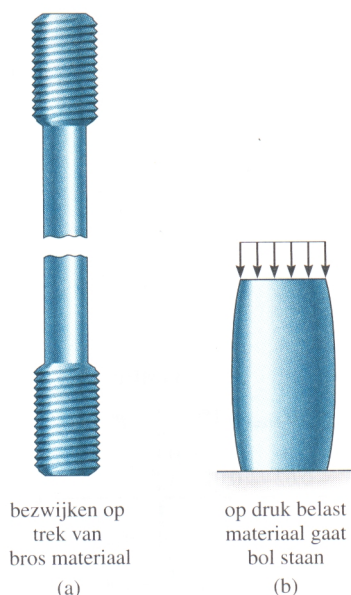
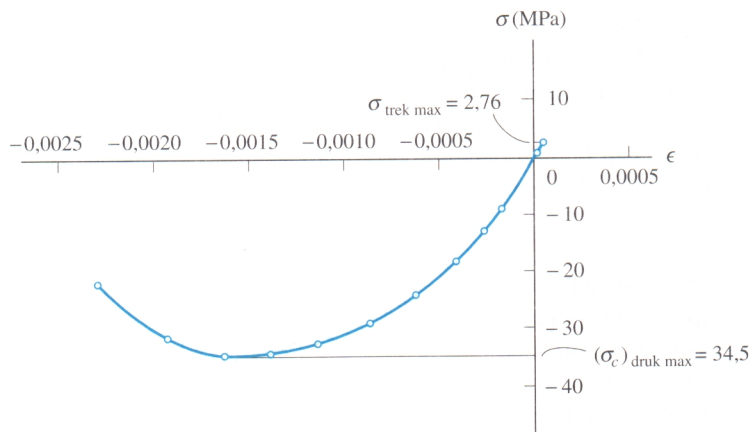


Fig. 1.10: Brosse breuk

Vergeleken met het gedrag bij trek, hebben brosse materialen, zoals grijs gietijzer, een veel hogere weerstand tegen axiale druk, zoals het gedeelte AC van de kromme in fig. 1.9 duidelijk laat zien. In dit voorbeeld worden eventuele scheuren in de proefstaaf dicht gedrukt en naarmate de belasting toeneemt, zal het materiaal bij oplopende vervorming uitpuilen of tonvormig worden (zie fig. 1.10b).

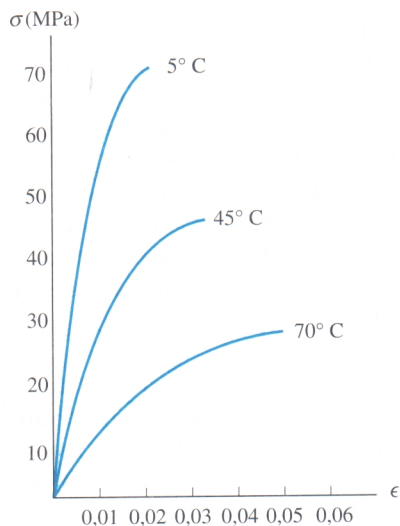


σ - ϵ -diagram voor een gangbaar betonmengsel

**Fig. 1.11: σ - ϵ -
diagram van
betonmengsel**

Net als grijs gietijzer is ook beton een broos materiaal en heeft dus ook een lage treksterkte. De karakteristieken van het spanning-rek-diagram voor beton worden voornamelijk bepaald door de samenstelling van het betonmengsel (water, zand, kiezel en cement) en

de hardingstijd en -temperatuur. Een typisch voorbeeld van een 'volledig' spanning-rek-diagram voor beton is te zien in fig. 1.11. Duidelijk is te zien dat de maximale druksterkte van beton bijna 12,5 keer zo groot is als de treksterkte, $\sigma_{\text{druk max}} = 34,5$ MPa tegenover $\sigma_{\text{trek max}} = 2,76$ MPa. Om deze reden wordt beton bijna altijd versterkt met stalen staven wanneer het trekbelasting moet kunnen opvangen.



σ - ϵ diagram voor een methacrylaat-plastic

Algemeen kan worden gesteld dat de meeste materialen zowel taai als broos gedrag vertonen. Staal bijvoorbeeld, heeft een broos gedrag wanneer het een hoog koolstofgehalte heeft en het wordt taai als het weinig koolstof bevat. Verder worden materialen bij lagere temperaturen harder en brosser, terwijl ze zachter en taaier worden wanneer de temperatuur stijgt. Fig. 1.12 toont dit effect voor een methacrylaat-plastic.

**Fig. 1.12: σ - ϵ -diagram van methacrylaat-
plastic**

4.5. De wet van Hooke

Zoals aangegeven in de vorige paragraaf tonen de spanning-rek-diagrammen voor de meeste constructiematerialen in het elastische gebied een lineair verband tussen spanning en rek. Dientengevolge veroorzaakt een toename in spanning een



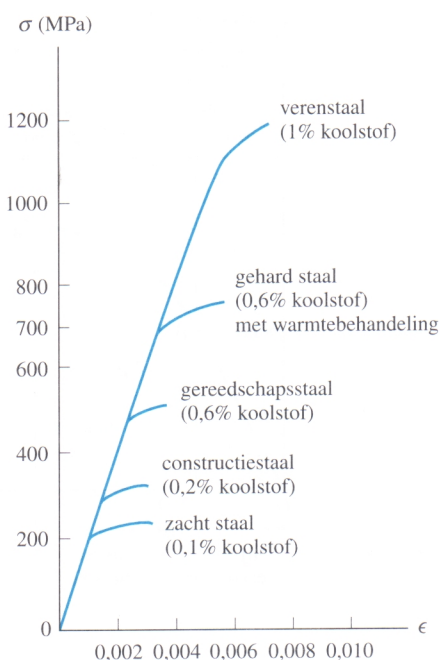
evenredige toename in rek. Dit feit werd in 1676 door Robert Hooke ontdekt bij het werken met veren en staat bekend als de wet van Hooke. Deze wet kan als volgt wiskundig worden weergegeven:

$$\sigma = E\varepsilon$$

Hier vertegenwoordigt E de evenredigheidsconstante, die wordt aangeduid met de term elasticiteitsmodulus, ook wel Young's modulus genoemd — naar Thomas Young, die er in 1807 een uiteenzetting over publiceerde.

De formule vertegenwoordigt in feite de vergelijking van het eerste rechtlijnige gedeelte van het spanning-rek-diagram tot aan de evenredigheidsgrens. Verder wordt de elasticiteitsmodulus weergegeven door de helling van deze lijn. Omdat rek dimensieloos is, blijkt uit de formule dat E in de eenheid spanning wordt uitgedrukt, zoals N/m² of MPa. Als rekenvoorbeeld bekijken we het spanning-rek-diagram voor staal, dat in fig. 1.6 wordt getoond. Hier is $\sigma_{prop} = 241 \text{ MPa}$ en $\varepsilon_{prop} = 0,0012 \text{ mm/mm}$, zodat:

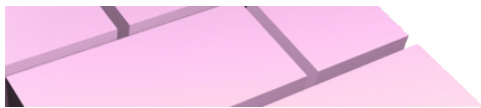
$$E = \frac{\sigma_{prop}}{\varepsilon_{prop}} = \frac{241 \text{ MPa}}{0.0012} = 2.01(10^5) \text{ MPa}$$



Zoals in fig. 1.13 te zien is, hangt de evenredigheidsgrens voor een bepaalde staalsoort af van de legeringsverhouding; maar de meeste staalkwaliteiten, van het zachtste gewalste staal tot het hardste gereedschapsstaal, hebben dezelfde elasticiteitsmodulus, waarvoor in het algemeen de volgende waarde is geaccepteerd: $E_{st} = 2,00(10^5) \text{ MPa}$ of 200 GPa. Veelvoorkomende waarden van E voor andere constructiematerialen zijn vaak te vinden in tabellen in ontwerpvoorschriften en naslagwerken. Opgemerkt moet worden dat de elasticiteitsmodulus een mechanische eigenschap is die de stijfheid van een materiaal aangeeft. Erg stijve materialen, zoals staal, hebben hoge E-waarden [$E_{st} = 2,00(10^5) \text{ MPa}$ of 200 GPa], terwijl sponzige materialen, zoals ge vulkaniseerd rubber, lage waarden kunnen hebben [$E_{ru} = 0,70 \text{ MPa}$].

Fig. 1.13: Vergelijking van verschillende staalsoorten.

De elasticiteitsmodulus is een van de belangrijkste mechanische eigenschappen, maar bedenk dat E alleen kan worden gebruikt als een materiaal lineair-elastisch gedrag vertoont. Bovendien is de formule niet meer geldig als de spanning in het materiaal boven de evenredigheidsgrens komt, want dan is het spanning-rek-diagram niet meer een rechte lijn!



Verstevinging

Als een proefstaaf van taai materiaal, bijvoorbeeld staal, in het plastische gebied wordt belast en de belasting daarna wordt opgeheven, wordt de elastische vervorming ongedaan gemaakt. De plastische vervorming blijft echter bestaan, waardoor het materiaal een permanente vormverandering ondervindt. Voorbeeld: een draad die wordt gebogen (plastisch), veert een stukje terug (elastisch) wanneer de belasting wordt opgeheven; hij keert echter niet helemaal naar zijn beginpositie terug. Dit gedrag kan worden geïllustreerd in het spanning-rek-diagram in fig. 1.14a. Hier wordt de proefstaaf eerst belast voorbij de vloeigrens A tot het punt A'.

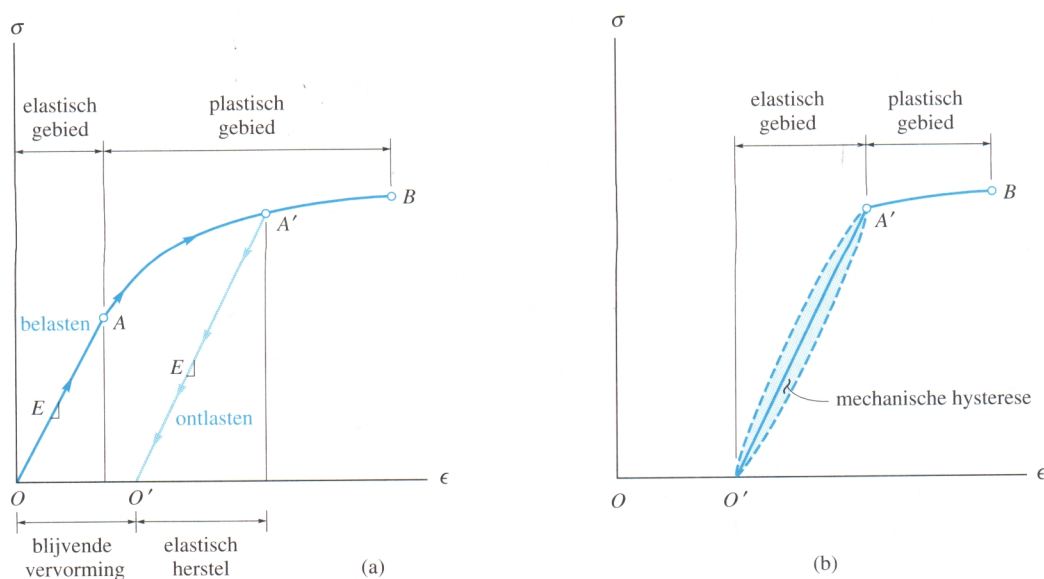


Fig. 1.14: verstevinging

Aangezien er interatomaire krachten moeten worden overwonnen om de proefstaaf elastisch te verlengen, trekken deze zelfde krachten de atomen weer naar elkaar toe wanneer de kracht wordt opgeheven (zie fig. 1.14a). Bijgevolg is de elasticiteitsmodulus, E , hetzelfde en dus is de helling van lijn $O'A'$ gelijk aan die van lijn OA .

Als de belasting opnieuw wordt aangebracht, worden de atomen in het materiaal weer verplaatst tot vloeien optreedt bij of in de buurt van de spanning A' en gaat het spanning-rek-diagram langs hetzelfde traject verder als daarvoor (zie fig. 1.14b). Er moet echter worden opgemerkt dat dit nieuwe spanning-rek-diagram, gedefinieerd door $O'A'B'$ nu (A') als hogere vloeigrens heeft, een gevolg van de verstevinging. Met andere woorden: het materiaal heeft nu een groter elastisch gebied; het is echter minder taai dan in zijn oorspronkelijke staat.

We moeten echter opmerken dat in werkelijkheid enig warmte- of energieverlies kan optreden als de belasting op de proefstaaf wordt opgeheven en de staaf vervolgens weer tot deze zelfde spanning wordt belast.

Hierdoor is gedurende een zorgvuldig gemeten belastingcyclus een lichte kromming in de trajecten A' tot O' en O' tot A' te zien. In fig. 1.14b is dit met de gestippelde



krommen aangegeven. Het gekleurde gebied tussen deze krommen vertegenwoordigt verloren energie en wordt mechanische hysteresis genoemd. Deze eigenschap wordt een belangrijke overweging bij het selecteren van materialen die voor het dempen van trillende constructies of mechanische apparatuur worden gebruikt.

4.6. Buigproeven

Soms is de E-modulus van materialen moeilijk te meten met een trekproef, bijvoorbeeld omdat het materiaal nauwelijks vast te pakken is (keramiek), of omdat het in de klembeelden van de trekproef geplet wordt (kunststof). Dan wordt gebruikgemaakt van een buigproef. Er zijn drie uitvoeringen: de ingeklemde staaf, (zie figuur 1.15), een op twee punten opgelegde staaf (zie figuur 1.1) en een op momenten belaste staaf. Voor een rechthoekige ingeklemde staaf met lengte l , breedte b en dikte d geldt bij een kracht F (in figuur 1.15 50 N) voor de doorbuiging δ :

$$\delta = \frac{4F \times l^3}{E \times b \times d^3}$$

Hieruit kan bij bekende afmetingen en belasting de E bepaald worden. We zien, dat er grote verschillen kunnen bestaan.

Sommige materialen vertonen bij de trekproef in het plastische gebied een zeer grote insnoering. Het gevolg is, dat het niet mogelijk is te meten wat de relatie tussen spanning en rek is voor grote rekken, aangezien de vervorming zo lokaal plaatsvindt in het insnoeringsgebied. Voor het plastisch omvormen van materialen is het toch van belang deze relatie nauwkeurig te kennen. Hiervoor is de derde buigproef ontwikkeld, waarbij een zuiver moment op de uiteinden van een buigstaaf wordt uitgeoefend, waardoor deze plastisch gebogen wordt. Uit de kromtestraal en de benodigde kracht volgt dan de relatie tussen spanning en vervorming.

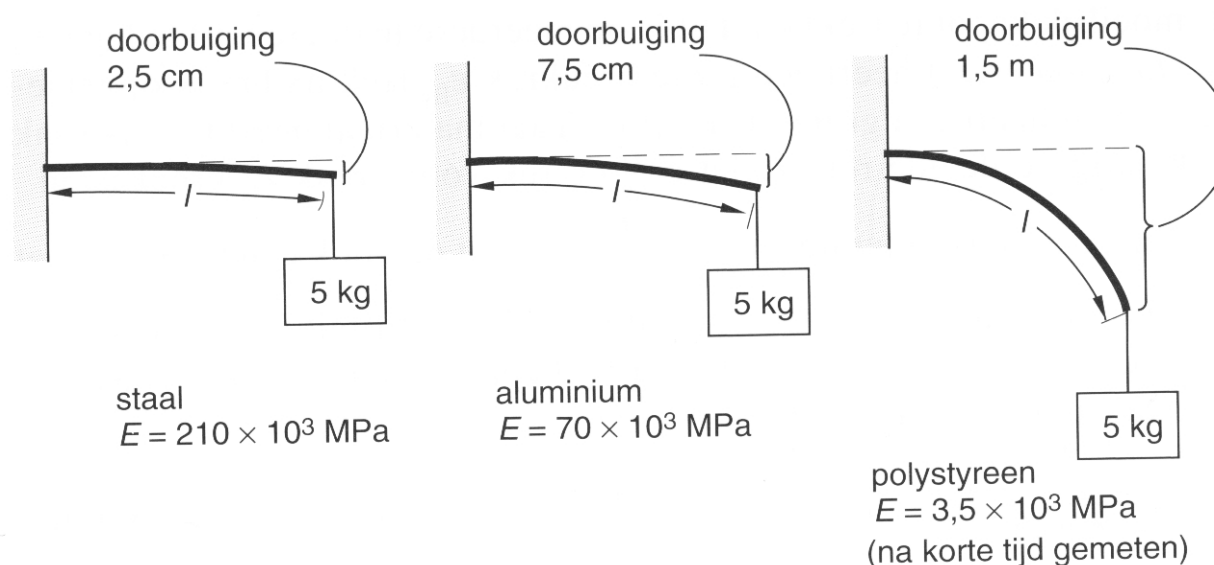


Fig. 1.15: Buigsterkte van verschillende proefstaven



4.7. Afschuifsterkte

In ontwerpen van machines komen vaak metalen onderdelen voor die op schuifspanning worden belast. Bouten, klinknagels en autosleutels worden op zo'n manier belast dat de krachten de neiging hebben het materiaal doormidden te schuiven, zoals een schaar papier afknipt. De afschuifsterkte van een materiaal is de schuifspanning waarbij een constructiedeel breekt. De afschuifsterkte van materialen kan bepaald worden in een trekbank waarbij dan speciale klemmen worden gebruikt.

Kunststoffen en keramische materialen worden zelden gebruikt voor op schuifspanning belaste machineonderdelen, en daarom wordt de afschuifsterkte van deze materialen slechts bij uitzondering in handboeken vermeld. Het belang van de eigenschap afschuifsterkte voor de machineontwerper spreekt voor zich. Zoeken we materialen voor bevestigingsmiddelen (zoals schroefbouten en klinknagels) die schuifspanningen te verduren krijgen, dan is afschuifsterkte de eigenschap waarop we materialen moeten beoordelen. Helaas zijn goede overzichten van afschuifsterkten vaak moeilijk in de literatuur te vinden. Wanneer zulke gegevens niet beschikbaar zijn, kunnen voor een schatting van de afschuifsterkte de volgende vuistregels worden gebruikt:

Afschuifsterkte = 40% van de treksterkte
of
afschuifsterkte = 70% van de rekgrens

4.8. Hardheidsmetingen

Hardheid is waarschijnlijk een van de meest gebruikte criteria bij de materiaalkeuze. Vaak wordt ervan uitgegaan dat de hardheid van een materiaal tegelijkertijd ook een maat is voor de slijtvastheid en de duurzaamheid. Dit is niet helemaal correct, maar in het geval van metalen kan hardheid inderdaad als maat voor de slijtvastheid en de sterkte dienen.

Er bestaan waarschijnlijk wel zo'n 100 methoden voor hardheidsmeting. Toen de metaalkunde nog in haar kinderschoenen stond, werden staalsoorten die een warmtebehandeling hadden ondergaan, vaak op hun hardheid getest door een rand met een vijl te bewerken. Had het vijlen geen effect, dan gold het staal als hard. De hardheid van keramische materialen en mineralen wordt vanouds gemeten door het oppervlak met andere soorten mineralen te bekrassen. Deze methode van hardheidsbepaling wordt de hardheidstest van **Mohs** genoemd. In de meeste hardheidsmetingen die men tegenwoordig gebruikt, wordt een indruklichaam in het materiaal gedrukt, waarbij het effect op het materiaal (de indrukking) wordt gemeten. In figuur 1.16 zijn enkele van de meestgebruikte indruklichamen afgebeeld. Bij de hardheidsmeting volgens **Brinell** wordt een kogel met een diameter van 10 mm in het materiaaloppervlak gedrukt, vervolgens wordt met een optisch meetapparaat de diameter van de resulterende blijvende indrukking gemeten. Uit deze diameter wordt de zogenaamde Brinell-hardheid (HB) berekend.

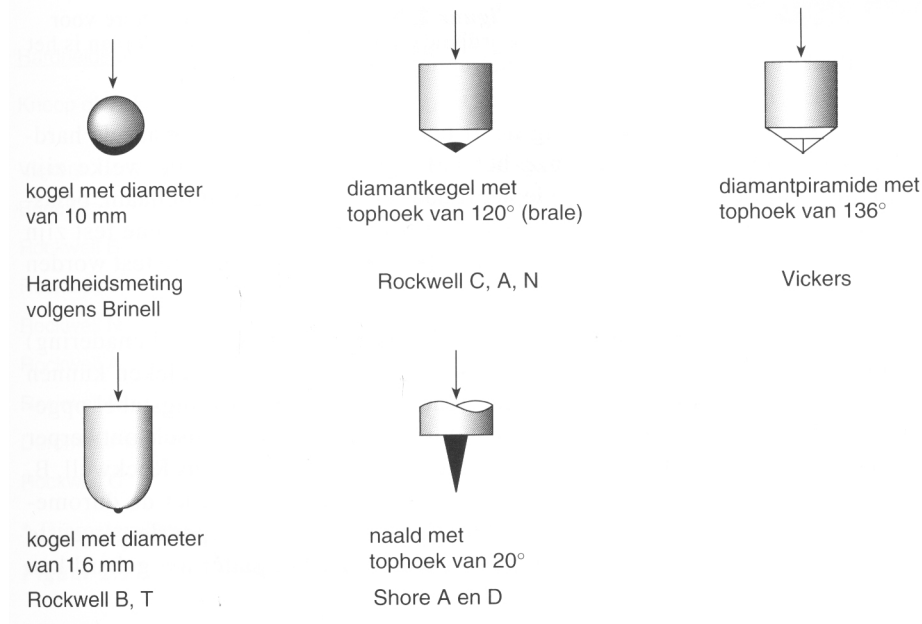
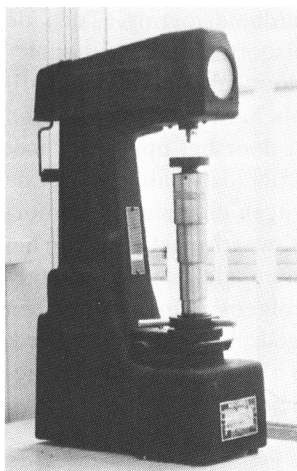


Fig. 1.16: Indruklichamen voor hardheidsmetingen



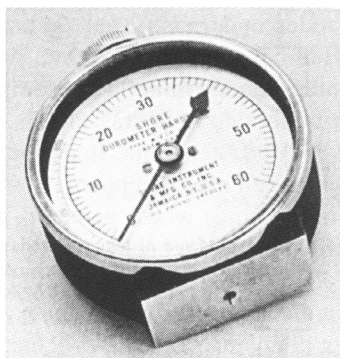
Bij de hardheidsmeting volgens **Rockwell** (figuur 1.17) worden andere belastingen en indruklichamen gebruikt, de diepte van de indrukking wordt daarbij automatisch door het testapparaat omgezet in een hardheidswaarde op de afleesschaal.

Fig. 1.17: Rockwell hardheidsmeter

Een geavanceerder en verfijnder testapparaat is de microhardheidsmeter. Dit apparaat beschikt over een heel precies gevormd indruklichaam van diamant dat gebruikt kan worden om de hardheid van microscopisch kleine deeltjes of metaalfasen te meten. Het schaalbereik is zo breed, dat zowel de hardheid van kunststoffen als die van

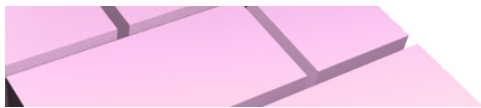
metalen en keramische materialen gemeten kan worden.

De hardheidsmeting volgens **Vickers**, met enkele grammen druk kan hiervoor gebruikt worden; deze maakt gebruik van een indrukking met een piramidevormig geslepen diamant. Na indrukking is de diagonaallengte van de indrukking een maat voor de hardheid. De **Vickers** meting wordt ook met belasting van enkele kilogrammen gebruikt voor gemiddelde metingen.



Een methode die veel gebruikt wordt voor de bepaling van de hardheid van kunststoffen en rubber is de durometerproef van **Shore**. De hardheid wordt daarbij gemeten met behulp van een naald die door een veer in het materiaal wordt gedrukt (figuur 1.18).

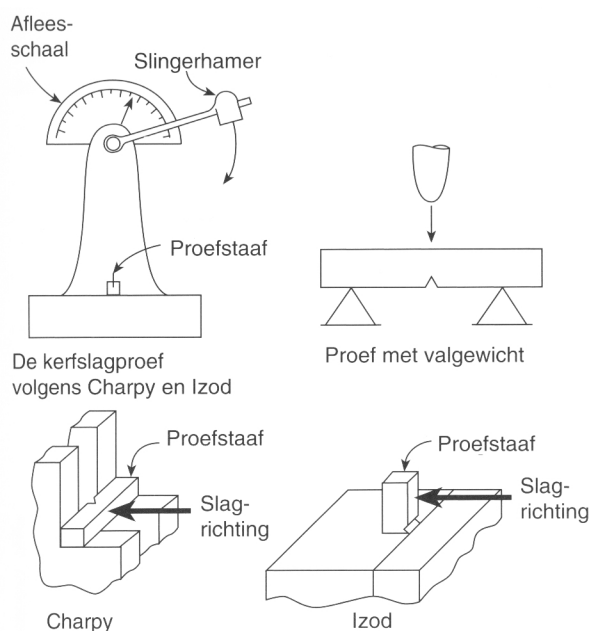
Fig. 1.18: Durometer van Shore



Elke methode voor de hardheidsbepaling heeft haar voor- en nadelen, maar de hardheidsmetingen die bij de materiaalkeuze het belangrijkst zijn, zijn die die zijn weergegeven in figuur 1.16. Elke methode heeft haar eigen type indruklichaam, belasting en toepassingsgebied. Helaas kunnen hardheidswaarden die met de ene test zijn gemeten, niet worden omgerekend in de schaaleenheden die bij een andere test worden gebruikt.

4.9. Slagvastheidstesten

De slagvastheid van een materiaal geeft aan in welke mate dat materiaal bestand is tegen schokbelasting (ook wel slag- of stootbelasting genoemd). Volgens de klassieke definitie is de slagvastheid de energie die nodig is om een gegeven volume of een gegeven doorsnede materiaal te doen breken. In de technische literatuur wordt slagvastheid meestal opgegeven in joules (J) of in joules/kubieke centimeter (J/cm^3) of per vierkante centimeter (J/cm^2).



De slagvastheid van metalen en polymeren bepaalt men gewoonlijk met een apparaat dat voorzien is van een slingerhamer die voor de stootbelasting zorgt. Keramische materialen en brosse metalen zoals grijs gietijzer hebben een zeer geringe taaiheid, daarom vermelden technische handboeken zelden gegevens over de slagvastheid van deze materialen. De methoden voor de bepaling van de slagvastheid die tegenwoordig het meest worden gebruikt, ziet u weergegeven in figuur 1.18.

Fig. 1.19: kerfslagproeven

Bij de bepaling van de slagvastheid van een metaal wordt op de proefstaaf meestal van tevoren een inkerving aangebracht om op die plaats de breuk in te leiden. Men spreekt dan van kerfslagwaarde. Wanneer slagvastheid vermeld wordt als Charpy Vee of notched (gekerfd) Izod, wil dat zeggen dat er in de test een gekerfde proefstaaf werd gebruikt. Indien niet is aangegeven dat de proefstaaf gekerfd was, dan gaat het waarschijnlijk om een erg bros materiaal. Waarden voor gekerfde proefstaven mogen niet worden vergeleken met waarden voor ongekerfd materiaal. De testmethode waarin een valgewicht voor de stootbelasting zorgt, is een relatief recente ontwikkeling. Het grote voordeel van deze methode is dat daarbij betrekkelijk grote proefstaven kunnen worden gebruikt (met doorsneden van soms honderden vierkante centimeters).

Slagvastheden verkregen met de kleine proefstaven die in de standaard Charpy- en Izod tests worden gebruikt, geven volgens gepubliceerd onderzoek geen betrouwbaar beeld van het reële gedrag van grote constructie-onderdelen tijdens het gebruik en dit leidde tot het gebruik van grote proefmonsters. De gekerfde en ongekerfde standaardproefstaven die in proeven met de slingerhamer worden gebruikt, hebben een doorsnede van slechts ongeveer 1 cm². Een belangrijk nadeel van de testen met valgewicht (waarvan sommige dynamische scheurproeven worden genoemd) is dat zulke proeven erg duur zijn.

De slagvastheid kan beïnvloed worden door de temperatuur. Gedurende de Tweede Wereldoorlog bleken zich in veel schepen die dienst deden in de koude noordelijke Atlantische Oceaan catastrofale breuken te ontwikkelen. Men ontdekte dat deze breuken zo gemakkelijk konden ontstaan doordat het staal van deze schepen in erg koud water veel van zijn (breuk-)taaiheid verloor. Het is dan ook raadzaam om bij de materiaalkeuze voor constructie-onderdelen die in een erg koude omgeving moeten functioneren, rekening te houden met de overgangstemperatuur voor brosse breuk (de zogeheten nil ductility temperature, NDT). Deze parameter, die gevonden kan worden door Charpy Vee-kerfslagproeven of dynamische scheurproeven te doen, is gedefinieerd als die temperatuur waarbij de taaiheid van het materiaal lager wordt dan een bepaalde grenswaarde (gewoonlijk 21 J). Figuur 1.20 toont een typerend voorbeeld van een slagvastheid-versus-temperatuur-grafiek en laat zien hoe uit die grafiek de NDT wordt gevonden. Is de NDT van een staalsoort 0°C, dan dient men dat staal niet te gebruiken voor onderdelen die een stootbelasting zullen ondergaan bij gebruikstemperaturen lager dan 0°C.

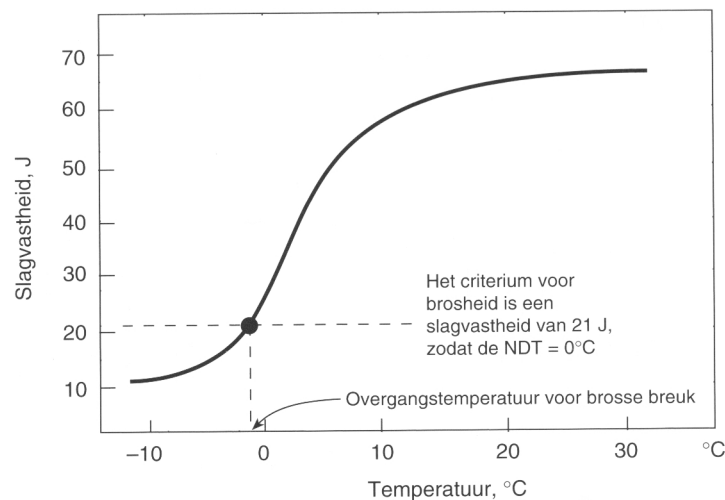


Fig. 1.20: NDT van staal.

Tot besluit van deze bespreking van slagvastheid merken we op dat alleen gegevens die via identieke testmethoden zijn verkregen, met elkaar vergeleken mogen worden. Als de temperatuur in een ontwerp een belangrijke factor is, dient de ontwerper na te gaan hoe de slagvastheid door de temperatuur wordt beïnvloed. Het meest gebruikt men slagvastheidsgegevens om staalsoorten van een uiteenlopende hardheid op het punt van (breuk-)taaiheid met elkaar te vergelijken en verder bij het selecteren van polymeermaterialen op basis van weerstand tegen schokbelasting.

4.10. Het functioneren van materialen op de lange termijn

De informatie die uit trekproeven wordt verkregen, kan gebruikt worden om constructiematerialen op basis van sterkte met elkaar te vergelijken. Een trekproef duurt meestal echter maar een paar minuten en kan ons dus niet vertellen in hoeverre een materiaal bestand is tegen dynamische belasting, en hoe het materiaal zal reageren op een langdurige belasting al dan niet bij hoge temperaturen. Voor een beoordeling van het lange termijngedrag van materialen moeten we dus nog andere mechanische eigenschappen kennen.

De vermoeiingsgrens

De vermoeiingsgrens van een materiaal wordt gevonden door een monster net zolang aan een gegeven cyclische wisselende spanning te onderwerpen tot het breekt. De belasting kan van allerlei aard zijn, en de spanning wordt gewoonlijk berekend of wordt met behulp van rekmeters bepaald. 1.2 a toont een opstelling voor de meting van de vermoeiingsgrens door middel van buiging. Het staafvormige proefstuk wordt belast tot de maximale spanning in de staaf bijvoorbeeld 275 MPa bedraagt. Bij dit spanningsniveau zal de staaf misschien na 10 cycli breken. Deze gegevens worden geregistreerd, en daarna wordt de maximale spanning verminderd tot bijvoorbeeld 200 MPa. Bij dit lagere spanningsniveau zal het monster misschien breken na 1000 (spannings)cycli. Deze procedure wordt herhaald tot er een spanningsniveau is gevonden dat niet tot breuk leidt. Meestal wordt een testduur van 10 miljoen (spannings)cycli als een oneindig lange levensduur opgevat. Het zal u duidelijk zijn dat dit een kostbare proef is.

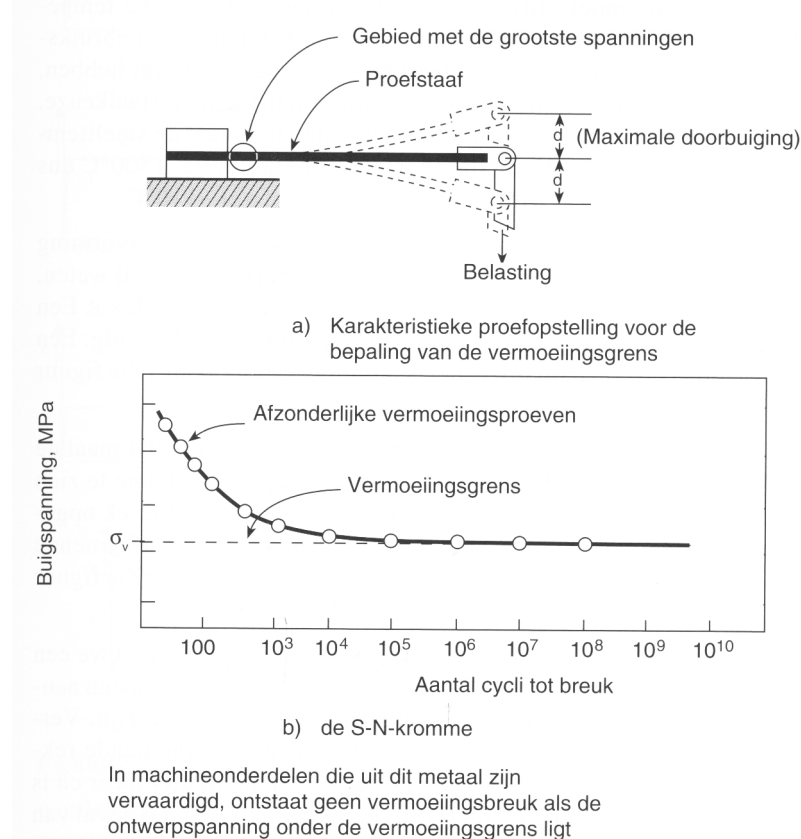


Fig. 1.21: vermoeiingstest



De test vereist een groot aantal monsters en vraagt om een statistische evaluatie van de resultaten. Het eindresultaat, de vermoeiingsgrens van het materiaal, is een zeer belangrijke ontwerpeigenschap. Wanneer we willen nagaan wat de toelaatbare bedrijfsspanning is voor een onderdeel dat tijdens het gebruik cyclische belasting ondergaat, moeten we niet naar de toelaatbare statische spanning kijken, maar naar de vermoeiingsgrens van het materiaal.

In figuur 2.21b is een vermoeiingsbuigproef te zien. Alternatieven zijn een roterende vermoeiingsproef of een trek-druk wisselproef, welke echter meer voorbereiding van de proefstaven vergen.

Kruip

Kruipgevoeligheid zegt iets over de weerstand van een materiaal tegen plastische deformatie onder langdurig volgehouden belasting. Doorgaans wordt uitgegaan van een constante belasting. De kruipgevoeligheid van metalen karakteriseert men vaak door de spanning op te geven waarbij in 1000 uur een rek van 0,1% optreedt (1000 uren kruipsterkte). De kruipgevoeligheid van polymeren wordt meestal gekarakteriseerd door op te geven welke rek er bij een gegeven spanning en gegeven belastingsduur ontstaat. Bij kruipgegevens moet altijd ook worden vermeld bij welke temperatuur werd getest. de meeste ferrometalen vertoe n weinig kruip, tenzij de gebruikstemperatuur boven 400°C ligt. Als metalen en polymeren een laag smeltpunt hebben, kunnen de kruipeigenschappen echter een belangrijke factor zijn bij de materiaalkeuze. Als vuistregel geldt, dat als de gebruikstemperatuur hoger is dan 0,4 maal de smelttemperatuur(in K), dan is e r kans op kruip. Voor staal (smelttemperatuur ca. 1500°C dus 1800K) dus vanaf ca. 400°C. Voor PVC wordt dat vanaf 160K ofwel -110°C.

Een constructeur werkt bij voorkeur in het elastische gebied. Als hij of zij de vervorming als gevolg van een spanning, of de spanning als gevolg van een vervorming wil weten, kan deze bijvoorbeeld uit een trekproef bepaald worden, of via de relatie $\sigma = E \times \epsilon$. Een constante spanning in de tijd heeft een eveneens constant blijvende rek tot gevolg. Een constante rek in de tijd zal ook een constant blijvende spanning veroorzaken.

Spanningsbreuksterkte

Als kruip lang genoeg doorgaat, ontstaat er tenslotte breuk. De spanning die een proefstaaf of onderdeel bij een gegeven temperatuur na een bepaalde tijd doet breken heet de spanningsbreuksterkte. In proeven waarin de spanningsbreuksterkte wordt bepaald, wordt de belasting meestal gevormd doore en zwaar gewicht dat aan het monster trekt, en de rek blijft dan meestal onvermeld

Dit soort metingen worden doorgaans niet voor kunststoffen gedaan.

Spanningsbreuksterkteproeven zijn vooral van belang wanneer metalen of keramische onderdelen bij hoge temperaturen moeten functioneren.



5. Dimensionale eigenschappen

Deze eigenschappen hangen eigenlijk niet af van het materiaal zelf, maar ze worden hier toch vermeld, omdat de meeste materialen slechts in een bepaalde afwerking kunnen aangekocht worden.

- **Oppervlakteafwerking:** Deze wordt beschreven door de microscopische en macroscopische kenmerken van het oppervlak weer te geven, zoals ruwheid, vlakheid en oppervlaktetextuur.
- **Ruwheid:** De fijnschalige onregelmatigheden van een werkstukoppervlak, die van belang zijn voor het gebruik van het oppervlak en worden veroorzaakt door een bewerking.
- **Oppervlaktetextuur:** Indien oneffenheden in de oppervlakte een voorkeursoriëntatie kennen, spreken we van een oppervlaktetextuur. Deze is meestal een gevolg van machinale bewerking. Men spreekt dan ook wel van bewerkingspatroon.
- **Afrondingsstraal:** De straal die gemeten wordt ter plekke van een overgang tussen twee werkstukdelen met een verschillende maatvoering. Dit kan ook een zogeheten kerftipradius zijn, indien in het werkstuk een kerf, dus een scherpe overgang voorkomt.
- **Scheurtaaiheidsfactor:** Kortweg de scheurtaaiheid genoemd. Dit is de kritische waarde van de spanningsintensiteitsfactor als gevolg van inwendige microscheuren of kerven in het materiaal.