

# **PRACTICUMHANDLEIDING**

## **MATERIAALKUNDE voor Industrieel Ontwerpen**

**mk 75 Materiaalkunde 2**

B.W. Oude Engberink

P. van Mourik

M. Janssen

J. Zuidema

**1997**

Technische Universiteit Delft  
Laboratorium voor Materiaalkunde  
Faculteit der Scheikundige Technologie en der Materiaalkunde



## Voorwoord

Deze practicumhandleiding is bestemd voor deelnemers aan het Practicum Materiaalkunde voor Tweedejaars Studenten Industrieel Ontwerpen. De materiaalkunde is een onlosmakelijk onderdeel van het ontwerpen. De materiaalkeuze en de keuze van de vervaardigingstechniek bepalen in welke mate het uiteindelijke product voldoet aan het programma van eisen dat in het begin van het ontwerpproces geformuleerd wordt. Materiaalkunde, ontwerpen en vervaardigen staan in voortdurende onderlinge wisselwerking.

Voor een industrieel ontwerper zijn materiaalkundige kennis en inzichten dus essentieel. Kennis en inzichten doet men op door studie, maar ook door eigen ervaring. Het practicum Materiaalkunde geeft studenten van de opleiding voor Ingenieur Industrieel Ontwerpen de mogelijkheid eigen ervaring op te doen in een tastbare kennismaking met vervaardigen, eigenschappen, warmtebehandeling en determinatie van materialen. Een materiaal is een stof verwerkt tot een product. Dit betekent, dat materiaaleigenschappen afhankelijk zijn van productgeometrie. Daarom wordt tijdens het practicum Materiaalkunde aandacht gegeven aan de definiëring van proefstukken en de beproeving onder gestandaardiseerde omstandigheden. Ook komt de afhankelijkheid van de materiaaleigenschappen van de vervaardigingsmethode en van de warmtebehandeling tijdens het practicum aan de orde. Zien hoe een proefstuk breekt, voelen hoe een materiaal aanvoelt, kijken hoe een materiaal eruit ziet, dat zijn ook aspecten van dit practicum.

Voor het adequaat uitvoeren van het practicum Materiaalkunde zijn theoretische inzichten vereist en natuurlijk een nieuwsgierige en praktische instelling. De kennis en inzichten voor dit practicum zijn een integraal onderdeel van de tentamenstof voor het vak mk 75 Materiaalkunde 2 voor Industrieel Ontwerpen. De voorbereiding van en deelname aan het practicum Materiaalkunde is dus tegelijk tentamenstudie. Deze opzet is effectief en efficiënt voor de deelnemende studenten. De nieuwsgierige en praktische instelling brengen de IO-studenten zelf mee: het practicum Materiaalkunde berust op zelfwerkzaamheid.

De Practicumhandleiding wil bij deze zelfwerkzaamheid een handige ondersteuning zijn, zowel theoretisch als praktisch. Het practicum Materiaalkunde is voortdurend in ontwikkeling. Verbetering van het practicum is mogelijk door de constante terugkoppeling door IO-studenten die over het practicum een uniek expertise krijgen. Reacties zijn welkom bij dr. ir. J. Zuidema of bij B.W. Oude Engberink. Wij wensen de Tweedejaars IO-studenten veel succes bij het uitvoeren van het Practicum Materiaalkunde.

Laboratorium voor Materiaalkunde TU Delft

juli 1997

B.W. Oude Engberink, P. van Mourik,  
M. Janssen en J. Zuidema



# Inhoud

<b>Voorwoord</b>	<b>3</b>
<b>Inhoud</b>	<b>5</b>
<b>Symbolenlijst</b>	<b>7</b>
<b>Hoofdstuk 1 Inleiding</b>	<b>9</b>
1.1 Doelstellingen van het Practicum Materiaalkunde .....	9
1.2 Huisregels van het Practicum Materiaalkunde .....	10
1.3 Praktische gegevens van het Practicum Materiaalkunde .....	10
<b>Hoofdstuk 2 D - Dieptrekken</b>	<b>13</b>
2.1 Doel van de proef .....	13
2.2 Theorie.....	13
2.2.1 Het dieptrekproces .....	13
2.2.2 Invloed mechanische materiaaleigenschappen .....	14
2.2.3 Invloed van het dieptrekgereedschap .....	16
2.3 Uitvoering van de proef.....	18
2.3.1 Bepaling van verstevigingscoëfficiënt en anisotropiefactor .....	18
2.3.2 Dieptrekkrommes.....	19
2.3.3 Dikte- en hardheidsverloop.....	19
<b>Hoofdstuk 3 E - Elasticiteitsmodulus en verwekingstemperatuur</b>	<b>21</b>
3.1 Doel van de proef .....	21
3.2 Theorie.....	21
3.3 Uitvoering van de proef.....	23
<b>Hoofdstuk 4 K - Kunststoffen</b>	<b>25</b>
4.1 Doel van de proef .....	25
4.2 Theorie.....	25
4.2.1 Mechanisch gedrag van kunststoffen .....	25
4.2.2 Determinatie van kunststoffen .....	28
4.3 Uitvoering van de proef.....	30
4.3.1 Mechanische beproeving .....	30
4.3.2 Determinatie van kunststoffen .....	32
<b>Hoofdstuk 5 P - Precipitatie</b>	<b>33</b>
5.1 Doel van de proef .....	33
5.2 Theorie.....	33
5.2.1 Principe van de precipitatieharding .....	34
5.2.2 Kritische dispersie en overprecipitatie .....	35

5.2.3	Invloed van lassen op precipitatiegehard materiaal .....	36
5.3	Uitvoering van de proef.....	38
5.3.1	Precipitatie en beproeving van trek- en kerfslagstaven .....	38
5.3.2	Invloed van lassen op precipitatiegehard plaatmateriaal .....	39
5.3.3	Beproeving van bouten .....	40
5.4	Terminologie .....	43
<b>Appendix A</b>	<b>De Hardheidsmeting</b>	<b>45</b>
A.1	Hardheid volgens Brinell.....	45
A.2	Hardheid volgens Vickers .....	47
A.3	Hardheid volgens Rockwell.....	48
<b>Appendix B</b>	<b>Vergelijkingstabellen Hardheid</b>	<b>51</b>
<b>Appendix C</b>	<b>De Trekproef</b>	<b>53</b>
C.1	Achtergrond .....	53
C.2	Bediening van de trekbanken.....	56
C.2.1	De INSTRON-trekbank .....	56
C.2.2	De TIRATEST-trekbank .....	58
<b>Appendix D</b>	<b>Determinatie van Kunststoffen</b>	<b>61</b>
<b>Referenties</b>		<b>69</b>

# Symbolenlijst

$A$	oppervlak doorsnede waarop kracht $F$ werkt
$a$	constante in relatie van Lüdwick
$A_m$	momentane waarde van oppervlak $A$
$A_{\min}$	oppervlak minimale doorsnede kerfslagstaaf
$A_s$	effectief oppervlak boutdoorsnede
$A_0$	beginwaarde van oppervlak $A$
$b$	breedte proefstaaf
$b$	percentage van element B in een binaire legering A - B
$D$	diameter van de blenk
$D$	kogeldiameter bij hardheidsmeting volgens Brinell
$d$	diagonaalengte indrukking bij hardheidsmeting volgens Vickers
$d$	diameter indrukking bij hardheidsmeting volgens Brinell
$d$	diameter van de stempel
$d$	dikte proefstaaf
$E$	elasticiteitsmodulus
$E_0$	beginmodulus
$E_{\sec}$	secantmodulus
$E_{\tan}$	tangensmodulus
$F$	kracht (belasting)
$F_1$	kracht $F$ bij een rek van 1%
$F_1 \dots F_5$	opgelegde krachten bij beproeving bout
$h$	hoogte proefstaaf
$h_0$	oorspronkelijke waarde van hoogte $h$
$KSA$	kerfslagarbeid
$KSW$	kerfslagwaarde
$L$	afstand tussen de ondersteuningspunten van de proefstaaf
$L_s$	ingespannen boutlengte
$L_0$	effectieve meetlengte bij beproeving bouten
$l$	meetlengte
$l_0$	beginwaarde meetlengte $l$
$l_m$	momentane waarde meetlengte $l$
$n$	verstevigingscoëfficiënt in relatie van Lüdwick
$p$	gemiddelde boutverlenging per eenheid opgelegde kracht
$R$	anisotropiefactor
$r$	afrondingsstraal dieptrekmatris (trekradius)
$R_{eH}$	bovenste vloeigrens
$R_{eL}$	onderste vloeigrens

$R_m$	maximale spanning
$R_{p0,2}$	0.2%-rekgrens
$S$	uiterste-vezelspanning
$s$	blenkdikte
$s$	treksnelheid
$T$	temperatuur
$T_P$	oplostemperatuur
$T_Q$	kamertemperatuur
$V_f$	vezelvolumefractie
$V_m$	matrixvolumefractie
$w$	ruimte tussen stempel en dieptrekmatrjjs (trekspleet)
$x_0$	nulstand meetklok bij beproeving bout
$x_1 \dots x_5$	waarnemingen meetklok bij beproeving bout
$y$	doorbuiging in het midden van het proefstuk
$y_m$	gemeten waarde van doorbuiging $y$
$y_w$	werkelijke waarde van doorbuiging $y$
$y_0$	nulpunt micrometer bij $E$ -modulus bepaling
$\alpha$	uitzettingscoëfficiënt
$\Delta l$	verlenging
$\Delta l_i$	boutverlenging bij meetpunt $i$
$\varepsilon$	rek
$\varepsilon_w$	ware rek
$\varepsilon_{w,d}$	dwarsrek, evenwijdig aan plaatoppervlak
$\varepsilon_{w,n}$	dwarsrek loodrecht op plaatoppervlak
$\varepsilon_1$	een rek van 1%
$\rho_c$	dichtheid van de composiet
$\rho_f$	dichtheid van de vezels
$\rho_m$	dichtheid van de matrix
$\sigma$	spanning
$\sigma_w$	ware spanning
$\sigma_1$	spanning $\sigma$ bij een rek van 1%



# Hoofdstuk 1

## Inleiding

### 1.1 Doelstellingen van het Practicum Materiaalkunde

Het practicum integreert materiaalkunde met aspecten van vervaardigen en van ontwerpen. Uiteraard ligt bij dit practicum de nadruk op de materiaalkundige hoek van de driehoek Materiaalkunde, Vervaardigen en Ontwerpen (zie [1], § 2.1). Een ontwerper moet een weloverwogen materiaalkeuze kunnen doen. Eigen ervaringen met materiaalgedrag en met waarnemingen aan de buiten- en binnenkant van materialen dragen bij tot de integratie van materiaalkunde, vervaardigen en ontwerpen. Zien, horen, kijken en voelen zijn belangrijke ervaringen voor de ontwerper. Tijdens dit practicum maakt de student Industrieel Ontwerpen kennis met typische vertegenwoordigers van de materiaalklassen Ferro, Non-Ferro en Kunststoffen. In lijn met het voorgaande kunnen de doelstellingen van dit practicum als volgt puntsgewijs geformuleerd worden:

1. Tastbare kennismaking met een aantal constructiematerialen
2. Kennismaking met enkele gangbare beproevingsmethoden
3. Kennismaking met warmtebehandeling als een methode ter beïnvloeding van materiaaleigenschappen
4. Werken in groepsverband
5. Voorbereiding op het tentamen voor het vak mk 75 Materiaalkunde 2

Studeren, en vooral zelfstudie, is een solitaire activiteit. De Industrieel Ontwerper zal zijn beroepsactiviteiten vrijwel altijd in een groepsverband uitvoeren. Het practicum, dat overigens individueel van opzet is, combineert daarom zelfwerkzaamheid met werken in groepen. Soms zijn voor de volledige uitvoering van een proef bijdragen van verschillende personen noodzakelijk.

De theoretische kennis en inzichten behorend bij de proeven van dit practicum maken een integraal onderdeel uit van de tentamenstof voor het vak mk 75 Materiaalkunde 2. Tweedejaars IO-studenten doen zowel dit practicum als volgen de colleges voor dit vak in het eerste blok van het studiejaar. Qua tijd en qua inhoud zijn dus de colleges en het practicum elkaars complement. Daarom wordt in deze practicumhandleiding regelmatig verwezen naar referentie [1], het boek dat bij het vak mk 75 Materiaalkunde 2 wordt gebruikt. Voor het gemak van de student die zich voorbereidt op het practicum presenteert deze practicumhandleiding per beschreven proef de noodzakelijke praktische en theoretische informatie. Daarnaast vindt de student in de Appendices enige handige vergelijkingstabellen en een determinatietabel voor kunststoffen, informatie die elders niet gemakkelijk te vinden is.

Elke activiteit kan niet zonder enige afgesproken spelregels en praktische informatie. De

Elke activiteit kan niet zonder enige afgesproken spelregels en praktische informatie. De Huisregels van het practicum Materiaalkunde en een aantal praktische gegevens staan vermeld in de respectievelijke Secties 1.2 en 1.3.

## **1.2 Huisregels van het Practicum Materiaalkunde**

1. Kom op tijd: een practicumochtend of -middag begint om 9.00 uur resp. om 13.30 uur na presentiemelding; te laat komen betekent een nieuwe afspraak voor de proef maken met de administratie
2. Bereid de afgesproken proef voor; ter controle wordt een ingangstoets afgenomen; als deze onvoldoende is gemaakt, moet een nieuwe afspraak voor die proef gemaakt worden met de administratie
3. Een proef wordt door minimaal drie studenten gedaan; zijn er voor een proef minder aanwezig, dan betekent dit een nieuwe afspraak maken met de administratie
4. De ingangstoets is individueel; elke vorm van samenwerking betekent een nieuwe afspraak voor de proef maken met de administratie
5. Bestaat een proef uit meerdere onderdelen uit te voeren door verschillende deelnemers aan die practicummiddag, dan is iedere practicant zelf verantwoordelijk voor het verzamelen van het totaal aan waarnemingen
6. Zend bij verhindering een bericht; niet verschijnen zonder bericht van verhindering betekent volledige uitsluiting van het practicum; toelating is eventueel pas mogelijk na een gesprek met de practicumleiding
7. Kom op de afgesproken practicummiddag voor die proef (andere tweedejaars IO-studenten willen ook graag dit practicum doen!); veranderen van practicumdata is onmogelijk; alleen bij verhindering met bericht is het mogelijk een nieuwe afspraak bij de practicumadministratie te maken
8. Werk netjes en zorgvuldig, laat niets onbeheerd achter, als je een ruimte verlaat: doe de kranen dicht, stop alle machines en ruim alles op; niet nakomen van deze regels betekent een nieuwe afspraak voor die proef maken met de administratie

## **1.3 Praktische gegevens van het Practicum Materiaalkunde**

Adres:	Laboratorium voor Materiaalkunde, TU Delft Rotterdamseweg 137, 2628 AL Delft
Practicumzaal:	Hal 1 begane grond (015 - 2782346 / 2782210)
Practicumadministratie:	Magazijn/Dictatenverkoop (015 - 2782190)

**Vrijstellingen:** neem contact op met de practicumleiding; voor individuele proeven en voor individuele studenten zijn eventueel vrijstellingen mogelijk op basis van voldoende getuigschriften en/of voldoende verslagen afgegeven door andere tertiaire onderwijsinstellingen

**Voltooiing & beoordeling:** het practicum is voltooid na aanwezigheid op elke practicummiddag en na alle relevante meetverslagen te hebben ingevuld; de beoordeling voldoende moet voor elke afzonderlijke practicumproef van de practicumleiding verkregen zijn



# Hoofdstuk 2

## D - Dieptrekken

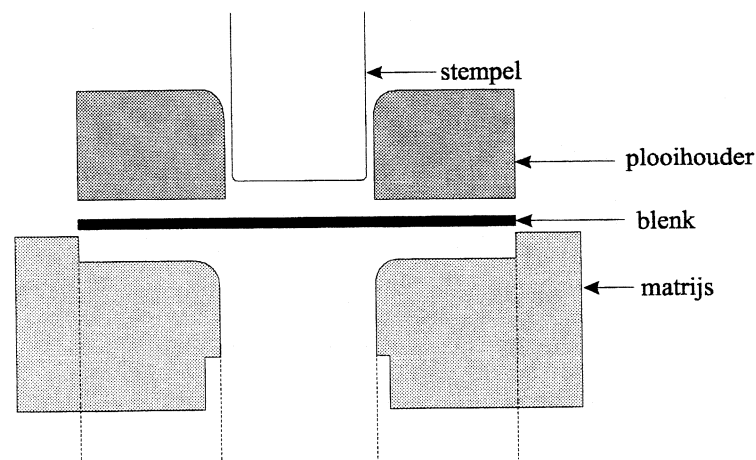
### 2.1 Doel van de proef

- kennis te maken met het dieptrekproces;
- inzicht te krijgen in de invloed die de vervorming tijdens het dieptrekken heeft op aluminium, dieptrekstaal en roestvast staal;
- inzicht te krijgen in het verschil in mechanische eigenschappen tussen aluminium, dieptrekstaal en roestvast staal.

### 2.2 Theorie

#### 2.2.1 Het dieptrekproces

Het dieptrekproces wordt toegepast voor het vervaardigen van o.a. drankblikjes en pannen. Een ronde plaat (blenk) wordt met een stempel door een matrijs gedrukt. Om plooiën in het product te voorkomen wordt bovendien gebruik gemaakt van een plooihouder. Het proces is schematisch gegeven in Figuur 2.1.

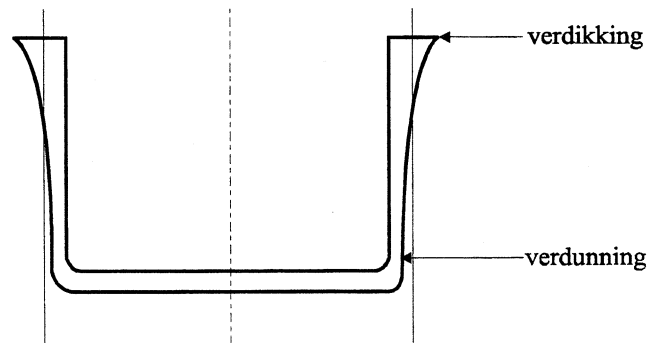


Figuur 2.1: Schematische weergave van het dieptrekproces

Wanneer de stempel het metaal door de matrijs drukt treden er plastische vervormingen op. In het centrum van de bodem heersen weinig spanningen en daar zal het materiaal niet veel vervormen, d.w.z. de dikte zal daar niet veel veranderen ten opzichte van de uitgangsdikte. Op de plaats waar de bodem overgaat in de wand moet de blenk als het ware om de stempel heen “getrokken” worden. De matrijs en de plooihouder zorgen dat dit netjes gebeurt zonder plooiën in het materiaal. Op deze plaats zullen voornamelijk trekspanningen in het materiaal ontstaan waardoor de dikte van het materiaal kleiner wordt.

In de richting van de rand van de blenk (de rand van het product) wordt het materiaal meer

samengedrukt. Dit kan voorgesteld worden door aan te nemen dat op die plaats de buitendiameter van de blenk moet worden teruggebracht tot de diameter van het product. Op deze plaats treedt een vergroting van de dikte op. Deze diktetoename blijkt zowel experimenteel als analytisch [2, 3] afhankelijk te zijn van de oorspronkelijke blenkdikte en de dieptrekverhouding (zie [1], § 5.3.1). Tijdens het practicum zal deze diktetoename gemeten worden (zie Sectie 2.3.3 van deze handleiding). In Figuur 2.2 zijn de dikteveranderingen in het dieptrekproduct schematisch weergegeven.



Figuur 2.2: Dikteveranderingen in een dieptrekproduct

Het verloop van het dieptrekproces wordt globaal bepaald door:

- de mechanische eigenschappen van het diep te trekken materiaal,
- het gebruikte dieptrekgereedschap.

In het volgende wordt op deze punten nader ingegaan.

## 2.2.2 Invloed mechanische materiaaleigenschappen

### *Verstevigingscoëfficiënt*

Plastische vervormingen (trek of druk) in een metaal leiden in het algemeen tot een toename van de hardheid. Deze hardheidstoename wordt veroorzaakt door *versteving* (zie [1], § 2.3.3). Na grotere vervormingen wordt de kracht die nodig is om nog verder te vervormen steeds groter. Overigens is door herstelgloeien, d.w.z. het materiaal enige tijd op een verhoogde temperatuur brengen, weer verdere vervorming bij een lagere spanning mogelijk.

De mate van versteving is afhankelijk van de metaallegering en kan uitgedrukt worden in de zogenaamde *verstevigingscoëfficiënt*. Lüdwick (1909) stelde een relatie op die het verstevigingsgedrag beschrijft. Deze wordt gegeven door een verband tussen de ware spanning  $\sigma_w$  en de ware rek  $\epsilon_w$ :

$$\sigma_w = a(\epsilon_w)^n \quad (2.1)$$

Hierin is  $a$  een constante en  $n$  de verstevigingscoëfficiënt. Of anders geschreven:

$$\ln(\sigma_w) = \ln(a) + n \cdot \ln(\epsilon_w) \quad (2.2)$$

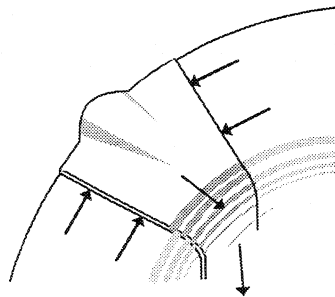
Als  $\sigma_w$  op dubbel logaritmisch papier wordt uitgezet als functie van  $\epsilon_w$ , geeft de helling van de lijn de versterkingscoëfficiënt  $n$ .

Bij dieptrekken wordt gestreefd naar een zo laag mogelijke  $n$ . Dit houdt in dat voor een grote vervorming maar een relatief kleine spanning nodig is. Als tijdens het dieptrekken scheuren in het materiaal ontstaan komt dit doordat de versterking te groot is.

### **Anisotropiefactor**

Blenken worden meestal uit gewalste platen geperst. Door het walsen is in dit plaatmateriaal veelal *anisotropie* ontstaan, d.w.z. het materiaalgedrag is niet in alle richtingen meer gelijk. Plastische vervorming zal daardoor in de ene richting makkelijker gaan dan in de andere richting.

Het gevolg van anisotropie kan zijn dat bij dieptrekken de optredende vervormingen zeer sterk plaatsafhankelijk zijn en er orenvorming optreedt (zie [1], § 4.3.2). De dikte in de bovenrand varieert dan van plaats tot plaats en er kunnen plooien ontstaan (Fig. 2.3).



Figuur 2.3: Plooivorming tijdens dieptrekken

Bij dieptrekken wil men graag dat de dikte van het materiaal weinig verandert tijdens de plastische vervorming. Ook dit verschijnsel wordt bepaald door de mate van anisotropie in het materiaal en wel door de *anisotropiefactor*. Via een éénassige trekproef aan gewalst plaatmateriaal is deze factor  $R$  te bepalen volgens:

$$R = \frac{\epsilon_{w,d}}{\epsilon_{w,n}} \quad (2.3)$$

Hierin is  $\epsilon_{w,d}$  de (ware) dwarsrek evenwijdig aan het plaatoppervlak en  $\epsilon_{w,n}$  de (ware) dwarsrek die daar loodrecht op staat, zoals weergegeven in Figuur 2.4. Overigens komt de langsrek in de trekstaaf overeen met de rek tijdens het dieptrekken in de radiale richting van de blenk.

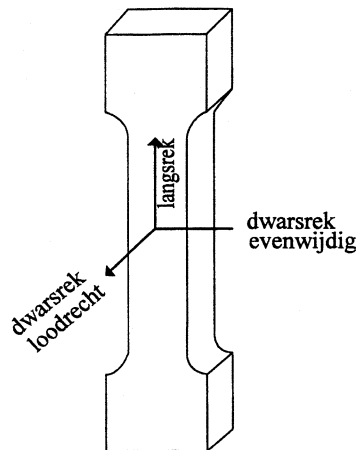
De dwarsrek-evenwijdig en de dwarsrek-loodrecht volgen uit:

$$\epsilon_{w,d} = \ln \frac{b_0}{b} \quad \text{en} \quad \epsilon_{w,n} = \ln \frac{d_0}{d} \quad (2.4)$$

Hierin zijn  $b$  en  $d$  de breedte en de dikte van de trekstaaf na een zekere plastisch vervorming en

$b_0$  en  $d_0$  de oorspronkelijke breedte en dikte.

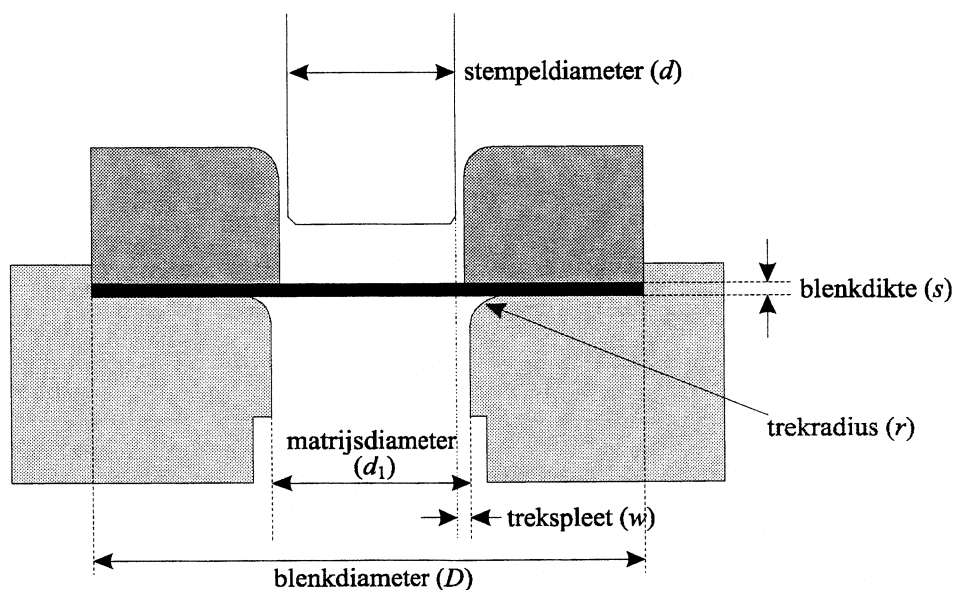
Het mag duidelijk zijn dat bij dieptrekken een grote  $R$  wenselijk is.



Figuur 2.4: Rekken in een trekstaaf afkomstig uit plaatmateriaal

### 2.2.3 Invloed van het dieptrekgereedschap

Hoe groter de dikte en diameter van de blenk zijn des te groter de kracht die nodig is voor het verkrijgen van een dieptrekproduct. Ook worden de afmetingen van het gereedschap groter en de hieraan te stellen eisen hoger (bij grotere krachten moet het gereedschap zwaarder worden uitgevoerd).



Figuur 2.5: Relevante afmetingen van het dieptrekgereedschap

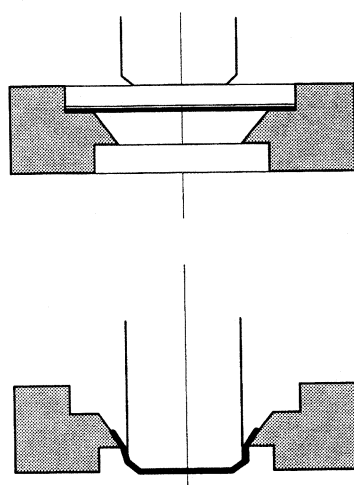
Het horizontale deel van de matrijs gaat via een afronding over in het verticale deel. De straal van de afronding noemt men de trekradius ( $r$  in Figuur 2.5). De blenk wordt om de afronding plastisch vervormd. Bij een te kleine trekradius is de kans op scheuren groot (grote spannings-



concentraties). Een te grote straal kan echter resulteren in de vorming van plooien.

Een andere afmeting van het gereedschap is de trekspleet ( $w$  in Figuur 2.5). Dit is de ruimte tussen de stempel en de matrijs. Wanneer er tijdens het dieptrekken ruimte overblijft tussen het materiaal en de matrijs of de stempel, spreekt men van zuiver trekken. Er hoeft dan geen extra arbeid geleverd te worden voor het verkleinen van de dikte van de blenk. Is er daarentegen geen ruimte over, dan spreekt men van wandstrekken. De dikte van het materiaal wordt dan sterk gereduceerd tijdens het dieptrekken. Dieptrekken in meerdere stappen heet volgtrekken, een methode die gebruikt wordt bij de vervaardiging van drankblikjes.

Voor het vervaardigen van producten waarvan de verhouding tussen de hoogte en de materiaaldikte relatief klein is, is het gebruik van een eenvoudige dieptrekbank mogelijk (Fig. 2.6).



Figuur 2.6: Een eenvoudige dieptrekbank

Moeten er hogere dunwandige producten gevormd worden, dan is er een grotere neiging tot plooivorming. Om dit te voorkomen wordt gebruik gemaakt van een plooihouder (Fig. 2.5).

*Vraag: Is de plooivorming hier een gevolg van textuur of van een bestaand overschot aan materiaal?*

De kracht waarmee de plooihouder wordt aangedrukt mag niet te groot, maar ook niet te klein zijn. Bij een te grote plooihouderkracht ondervindt het materiaal extra weerstand tegen vervorming en kunnen scheuren ontstaan. Is de plooihouderkracht echter te klein dan ontstaan plooien.

Net als de matrijs heeft ook de stempel een bepaalde afronding. De afrondingsstraal van de stempel is net als de trekradius van invloed op het al dan niet scheuren van de blenk. Bij een te kleine straal kan een soort ponswerking optreden waarbij de stempel de bodem van het product uit de blenk drukt nog voordat de wand is gevormd.

Om de kracht die nodig is voor het plastisch vervormen van de blenk zo klein mogelijk te maken, is het gebruik van smeermiddelen tussen materiaal en gereedschap nodig. Hierdoor wordt

ook de slijtage aan het gereedschap verminderd. Tijdens dit practicum zal gebruik gemaakt worden van olie.

## 2.3 Uitvoering van de proef

De proeven worden uitgevoerd aan een drietal materialen. In Tabel 2.1 zijn de beschikbare proefstukken vermeld.

Tabel 2.1: Beschikbaar materiaal voor de D-proef

Proefstukken	Materiaal
2 blenks $\varnothing$ 80 mm 2 mm dik 1 platte trekstaaf	technisch zuiver aluminium 2S-HH (Al)
1 blenk $\varnothing$ 80 mm 1 mm dik 1 platte trekstaaf	roestvast staal (RVS)
1 blenk $\varnothing$ 80 mm 2 mm dik 1 platte trekstaaf	dieptrekstaal (DTS)

### 2.3.1 Bepaling van versterkingscoëfficiënt en anisotropiefactor

Op de trekstaven wordt met potlood een meetlengte van 100 mm afgezet. De uitgangsdikte en breedte wordt gemeten en genoteerd. Vervolgens worden ze in een (handbediende-) trekbank belast tot de rek in de staaf 5, 10, 15, 20 en 25 % bedraagt (dus bij meetlengtes van 105, 110, 115, 120 en 125 mm). Op het moment dat bovengenoemde rekken bereikt zijn wordt niet verder belast. De kracht die de rek tot stand heeft gebracht wordt genoteerd (deze wordt aangegeven door de meesleepwijzer). Tevens worden de dikte en de breedte die de trekstaaf op dat moment heeft, gemeten en genoteerd.

Met de dikte en de breedte kan, voor iedere rek, het ware oppervlak worden berekend. De kracht die nodig was voor het krijgen van die rek gedeeld door het ware oppervlak geeft de ware spanning  $\sigma_w$ . Deze spanning wordt uitgezet als functie van de ware rek  $\epsilon_w$  op dubbel-logaritmisch papier. De richtingscoëfficiënt van de lijn die dan ontstaat, geeft de versterkingscoëfficiënt  $n$  zoals beschreven door de relatie van Lüdwick (zie verg. 2.1 en 2.2). Dit wordt voor de drie materialen gedaan, waarna de uitkomsten vergeleken worden.

*Vraag: Hoe is het gesteld met de "dieptrekbaarheid" van de verschillende materialen?*

Met behulp van de hierboven uitgerekende ware rek en spanning kan met behulp van vergelijkingen 2.3 en 2.4 de anisotropiefactor  $R$  uitgerekend worden. Ook dit wordt voor de drie materialen gedaan, waarna de uitkomsten vergeleken worden.

*Vraag: In hoeverre zijn op grond hiervan de materialen geschikt om diep te trekken?*

### 2.3.2 Dieptrekkrommes

Op een kleine dieptreppers worden bakjes diepgetrokken uit de blenks van de drie verschillende legeringen. Bij aluminium worden om scheurvorming te voorkomen de blenks eerst herstel gegloeid op 300-500 °C gedurende 15-30 min.

Vóór het dieptrekken moeten beide zijden van de blenk met olie ingesmeerd worden. De blenk wordt dan op de plooihouder geplaatst en de matrijs hier overheen geschoven. De matrijs wordt handvast aangedraaid en daarna een halve slag terug (zo ontstaat een spleet tussen de plooihouder en de matrijs). De plooihouderkracht wordt ingesteld zoals in Tabel 2.2 is aangegeven.

Tabel 2.2: Toegepaste plooihouderkrachten

Blenkmateriaal	Kracht [kgf]
aluminium	500
aluminium	0
roestvast staal	1000
dieptrekstaal	1000



Bij het dieptrekken zelf moet de stempel langzaam omhoog komen en na iedere millimeter stempelverplaatsing de dan optredende kracht worden genoteerd. Dit kan het beste gebeuren met drie personen. De eerste persoon beweegt de stempel omhoog door zachtjes aan de handel aan de linkerkant van de trekbank te trekken. Diezelfde persoon geeft een teken aan een tweede persoon bij iedere millimeter die de stempel verder omhoog komt. De tweede persoon leest de kracht af die nodig is voor deze stempelverplaatsing en noemt die aan de derde persoon die de kracht noteert in het waarnemingenblad.

Voor de vier diepgetrokken blenken wordt in één grafiek de kracht uitgezet als functie van de stempelverplaatsing, zodat de gevonden krommes onderling kunnen worden vergeleken.

*Vraag: Wat is het verband met de resultaten van de n- en R-waardebepaling?*

### 2.3.3 Dikte- en hardheidsverloop

Om het verloop van dikte en hardheid te meten wordt een segment ("taartpunt") uit de dieptrekproducten van de verschillende materialen gezaagd. Eerst wordt hieraan het verloop van de dikte gemeten met behulp van een schroefmicrometer, beginnend op de bodem en daarna stapsgewijs naar boven. De resultaten worden genoteerd in de tabel in het waarnemingenblad. Vervolgens wordt op dezelfde plekken de hardheid (voor aluminium HR15T, voor roestvast staal HRC en voor dieptrekstaal HRB) gemeten en in dezelfde tabel genoteerd. Overigens moet, nadat van de bodem en de hoek van het dieptrekproduct de hardheid is bepaald, waarschijnlijk dit deel van het product verwijderd (afgezaagd) worden om verdere hardheidsmetingen mogelijk

te maken.

In één grafiek wordt, voor de drie verschillende materialen, het verloop van de dikte uitgezet met de plaats in het werkstuk. In een tweede grafiek wordt hetzelfde gedaan voor het verloop van de hardheid. Overigens moeten de verschillende hardheden, om ze in één grafiek te kunnen weergeven, eerst in hardheid Vickers (HV) worden omgezet met behulp van de omrekeningstabellen in Appendix B. De resultaten in de twee grafieken kunnen nu vergeleken worden met de berekende  $n$ -waarden.

ISO A	1838
ISO B	306,67
E	824,63

## Hoofdstuk 3

### E - Elasticiteitsmodulus en verwekingstemperatuur

#### 3.1 Doel van de proef

- het bepalen van de verwekingstemperaturen van een semi-kristallijn en een amorf polymeer en
- het meten van de elasticiteitsmodulus van deze kunststoffen als functie van de temperatuur

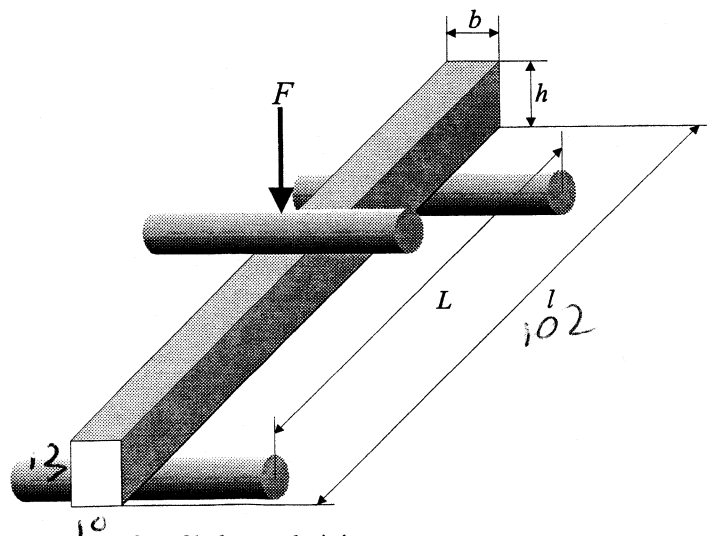
om zodoende inzicht te krijgen in de gevolgen van verhoogde temperaturen op de mechanische eigenschappen van deze materialen.

#### 3.2 Theorie

##### *De verwekingstemperatuur*

De elasticiteitsmodulus van kunststoffen neemt in het algemeen af met toenemende temperatuur. Voor constructieve toepassingen bij verhoogde temperatuur is het natuurlijk van belang te weten hoe deze afname verloopt om er rekening mee te kunnen houden.

Als een staafvormig proefstuk op twee punten wordt ondersteund en midden tussen beide steunpunten met een bepaalde kracht op buiging wordt belast (zie Fig. 3.1), vertoont het een zekere doorbuiging. Voor niet te hoge belastingen is deze doorbuiging direct gerelateerd aan de elasticiteitsmodulus van het materiaal. Wordt de temperatuur van de belaste proefstaaf verhoogd, dan neemt de doorbuiging toe ten gevolge van een afname van de elasticiteitsmodulus.



Figuur 3.1: Een ISO/R75<sup>10</sup> proefstaaf belast op buiging

Van dit verschijnsel wordt gebruik gemaakt om de zogenaamde *verwekingstemperatuur* van

een kunststof te meten. In ASTM-norm D 648 - 82<sup>1</sup> [4] wordt de bepaling beschreven van de *Deflection Temperature*, ook wel *ISO/R75 Heat-Deflection Temperature (ISO-HDT)* genoemd. Bij deze bepaling wordt bij kamertemperatuur een kunststof proefstaaf met voorgeschreven afmetingen (zie Sectie 3.3) belast tot een constante uiterste-vezelspanning van 1810 kPa (ISO-A) of van 450 kPa (ISO-B). Vervolgens wordt de staaf met een zekere snelheid opgewarmd. Die temperatuur waarbij de doorbuiging ten opzichte van de waarde bij kamertemperatuur met 0,25 mm is toegenomen, wordt de verwekingstemperatuur genoemd.

### Elasticiteitsmodulus

Het verband tussen de doorbuiging van een proefstaaf en de elasticiteitsmodulus wordt gegeven door:

$$y = \frac{SL^2}{6Eh}$$

$$\frac{SL^2}{6yh} = E$$

$$m = \frac{Ph \cdot m^2}{P_0 \cdot m^2} = m^2 \quad (3.1)$$

waarin  $y$  = doorbuiging in het midden van de proefstaaf [m]

$S$  = uiterste-vezelspanning [Pa]

$L$  = afstand tussen de ondersteuningspunten [m]

$E$  = elasticiteitsmodulus van het materiaal [Pa]

$h$  = hoogte van de proefstaaf [m]

$$M = \frac{Pa \cdot m^2}{6 \cdot m \cdot m} = \frac{Pa \cdot m^2}{6 \cdot m^2}$$

Uiteraard gaat het hier om de totale doorbuiging van de proefstaaf, d.w.z. de doorbuiging die de belaste staaf heeft bij kamertemperatuur *plus* de extra doorbuiging die het gevolg is van de temperatuursverhoging.

*Vraag: Kan in het licht hiervan met behulp van vergelijking (3.1) iets gezegd worden over de waarde voor de E-modulus bij de verwekingstemperatuur?*

Bij de proefopstelling wordt de doorbuiging gemeten met behulp van een micrometer. In principe kunnen hiermee echter alleen *verschillen* in doorbuiging worden gemeten. Het is namelijk praktisch niet mogelijk het nulpunt van de micrometer aan een onbelaste staaf te meten. Voor het bepalen van de verwekingstemperatuur is dit geen probleem, omdat alleen gekeken wordt naar het moment waarop de doorbuiging met een bepaalde waarde is toegenomen. Als echter de *E*-modulus moet worden bepaald, dan is de *absolute* waarde van de doorbuiging nodig en moet het *nulpunt* van de micrometer  $y_0$  dus bekend zijn.

*Vraag: Hoe kan het nulpunt van de micrometer ( $y_0$ ) gemeten worden?*

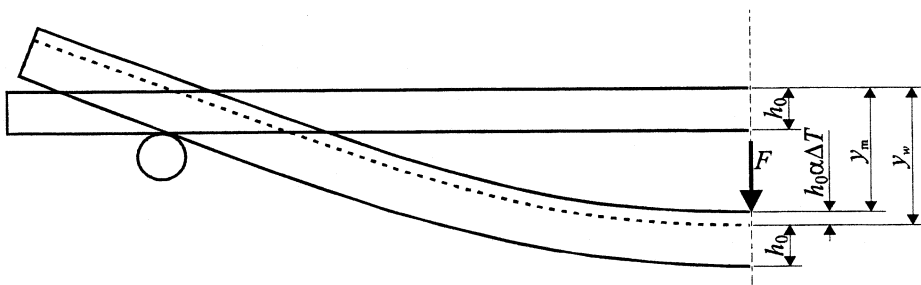
Een ander meettechnisch aspect is dat de proefstaaf tijdens het opwarmen zal uitzetten. Dit zal de micrometerwaarneming beïnvloeden. Als de uitzettingscoëfficiënt van het materiaal  $\alpha$  is,

<sup>1</sup> De afkorting ASTM betekent *American Society for Testing of Materials*. Het gaat hier om norm D 648, die voor het laatst in 1982 is herzien.

zal deze uitzetting  $h_0 \alpha \Delta T$  bedragen, waarbij  $h_0$  de oorspronkelijke staafhoogte is en  $\Delta T$  het opwarmingstraject. Figuur 3.2 geeft schematisch aan wat het verband is tussen de gemeten doorbuiging  $y_m$  en de werkelijke doorbuiging  $y_w$ , of in formulevorm:

$$y_w = y_m + h_0 \alpha \Delta T \quad (3.2)$$

Bij de bepaling van de verwekingstemperatuur volgens ASTM-norm D 648 wordt overigens niet voor thermische uitzetting gecorrigeerd. De reden hiervoor is dat de bepaling op deze manier relatief eenvoudig blijft. Bovendien worden verwekingstemperaturen met name gebruikt om materialen onderling te vergelijken en deze vereenvoudiging zal daarom geen echt probleem opleveren.



Figuur 3.2: Doorbuiging proefstaaf en het effect van thermische uitzetting

*Vraag: Als de E-modulus wordt bepaald uit de doorbuiging bij een gegeven belasting, is dan een correctie voor thermische uitzetting noodzakelijk?*

### 3.3 Uitvoering van de proef

#### **Beschikbaar materiaal**

De metingen worden uitgevoerd aan zowel een amorf als een semi-kristallijne thermoplast. Er wordt gebruik gemaakt van proefstaven met afmetingen ontleend aan de ASTM-norm D 648 [4]. De lengte  $l$  is 127 mm, de hoogte  $h$  is 13 mm en de breedte  $b$  moet liggen tussen 3 en 13 mm (zie Fig. 3.1). In Tabel 3.1 wordt een overzicht gegeven van het beschikbare materiaal.

Tabel 3.1: Beschikbaar materiaal voor de E-proef

Proefstukken	Materiaal
3 staafjes	polymethylmethacrylaat (perspex; amorf)
3 staafjes	hoge dichtheid polyetheen (semi-kristallijn)

#### **Proefopstelling**

Bij de test wordt de proefstaaf met de smalle kant op twee evenwijdige cilindervormige steunen gelegd, met een straal van 6 mm en een onderlinge afstand  $L$  van 100 mm. De belasting wordt midden tussen de steunen met behulp van een cilindervormig voetje (straal 6 mm) op de

proefstaaf aangebracht. Het deel van de opstelling met de proefstaaf wordt ondergedompeld in een met siliconenolie gevuld bad. Met behulp van dit bad kan een gelijkmatige opwarming worden bewerkstelligd.

### ***Belasting***

Allereerst worden de afmetingen van de proefstaven tot op 0,1 mm nauwkeurig bepaald. Hiermee kan dan, afhankelijk van de gewenste uiterste-vezelspanning, de vereiste belasting worden berekend volgens:

$$F = \frac{2Sbh^2}{3L} \quad (3.3)$$

waarin  $F$  = belasting [N]

$b$  = breedte van de proefstaaf [m]

Wel moet hierbij rekening gehouden worden met het gewicht van de staaf waarmee de belasting wordt aangebracht (vraag of bepaal het gewicht hiervan).

### ***Bepaling verwekingstemperatuur***

De bepaling van de verwekingstemperatuur begint met het plaatsen van de proefstaaf in het oliebad bij een temperatuur van ongeveer 23 °C. Dan wordt de belasting aangebracht, overeenkomend met een uiterste-vezelspanning van 1810 kPa (ISO-A) of van 450 kPa (ISO-B). Voor beide belastingen geldt een marge van  $\pm 2,5\%$ . Hierna wordt 5 minuten gewacht, waarna de micrometer op nul gezet wordt.

*Vraag: Waarom is deze wachttijd noodzakelijk?*

Vervolgens wordt, terwijl de proefstaaf belast blijft, het bad opgewarmd met een snelheid van  $120 \pm 12$  °C per uur. De temperatuur wordt afgelezen zodra de micrometer een toename van de doorbuiging van  $0,25 \pm 0,01$  mm aangeeft.

De verwekingstemperatuur wordt op deze wijze bepaald voor beide materialen en bij beide genormeerde uiterste-vezelspanningen.

### ***Bepaling elasticiteitsmodulus als functie van de temperatuur***

Voorafgaand aan iedere bepaling wordt het nulpunt van de micrometer ( $y_0$ ) bepaald via metingen bij een drietal verschillende uiterste-vezelspanningen. De meting zelf wordt uitgevoerd bij een uiterste-vezelspanning van 910 kPa in het temperatuurtraject van 20 tot 120 °C. Tijdens de opwarming wordt om de 5 °C de doorbuiging gemeten. De waarnemingen worden omgerekend naar absolute doorbuigingen, gecorrigeerd voor thermische uitzetting en vervolgens omgerekend naar  $E$ -moduluswaarden.

Voor beide materialen kan nu in één grafiek  $\log(E)$  uitgezet worden als functie van de temperatuur.



# Hoofdstuk 4

## K - Kunststoffen

### 4.1 Doel van de proef

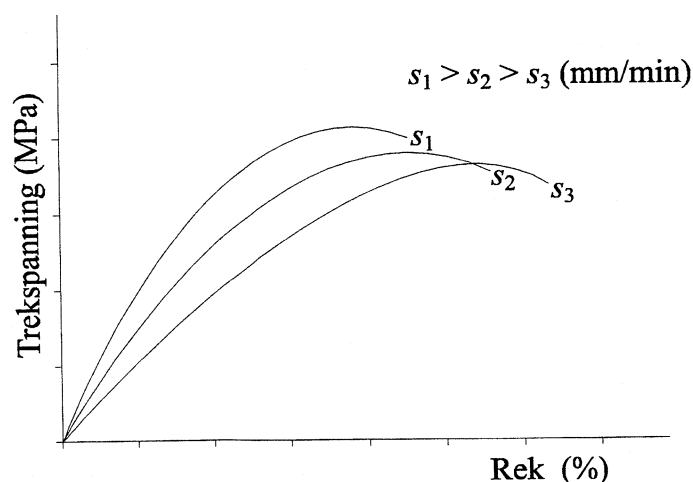
- het meten van de mechanische eigenschappen van enkele thermoplasten en van twee met verschillende oriëntaties vezelversterkte kunststoffen;
- het bepalen van de invloed van de temperatuur op de kerfslagwaarde;
- het met behulp van een eenvoudige methode leren determineren van kunststoffen.

### 4.2 Theorie

#### 4.2.1 Mechanisch gedrag van kunststoffen

Kunststof is een synthetisch materiaal opgebouwd uit grote molecuulketens. De moleculaire structuur van kunststoffen wordt besproken in [1], § 2.4. De mechanische eigenschappen van een kunststof worden in hoge mate bepaald door zaken als ketenlengte, het voorkomen van kristallen, de aanwezigheid van ketenvertakkingen en eventuele dwarsverbindingen tussen de ketens. Verder kunnen de mechanische eigenschappen aanzienlijk beïnvloed worden door kunststoffen als *composiet* te gebruiken. Dit kan door ze te wapenen, bijvoorbeeld met glasvezels, of door het gebruik van vulstoffen (zie [1], § 3.4.2).

De mechanisch gedrag van kunststoffen wijkt sterk af van dat van metalen (zie [1], § 4.5). Een belangrijk verschil is het *tijdsafhankelijk* mechanisch gedrag van met name thermoplastische kunststoffen. Bij het ontwerpen moet met dit fenomeen terdege rekening worden gehouden. Tijdsafhankelijk mechanisch gedrag komt bijvoorbeeld ook tot uiting in een invloed van de treksnelheid op de ligging van de trekkromme, zoals weergegeven in Figuur 4.1.



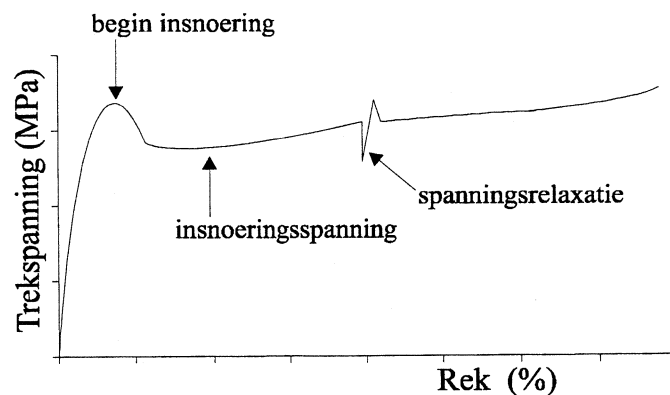
Figuur 4.1: Invloed van de treksnelheid ( $s$ ) op de ligging van de trekkromme van een kunststof

Naast de tijd spelen ook de temperatuur en het milieu een belangrijke rol bij het mechanisch gedrag. Bij het testen van kunststoffen moet daarom gewerkt worden met in normen voorgescreven proefomstandigheden, anders moeten deze omstandigheden (temperatuur, treksnelheid e.d.) apart bij de meetresultaten vermeld worden. In de praktijk komt het erop neer dat de mechanische eigenschappen van kunststoffen eigenlijk als steeds veranderlijk moeten worden beschouwd. De ontwerper dient hiermee rekening te houden als hij een (onderdeel van een) constructie wil doorrekenen.

### Thermoplasten

De molecuulketens van een thermoplast liggen in eerste instantie wanorderlijk door elkaar, net zoals de slierten in een bord spaghetti. Bij het aanbrengen van een mechanische belasting treedt vervorming op doordat de ketens langs elkaar schuiven en zich gaan oriënteren in de richting van de kracht (de kluwen spaghetti wordt meer een bundel evenwijdige slierten). Op een gegeven moment kunnen de ketens zich moeilijk verder richten omdat ze steeds meer verstrengeld raken. Vanaf dat moment neemt de benodigde spanning toe en treedt ontwarring van de ketens en breuk van de molecuulketens op.

In een trekkromme van een thermoplast (zie Fig. 4.2) is, na een maximum in de kracht, vaak een plateau te zien waar de kracht gedurende een groot verlengingstraject min of meer gelijk blijft. Bij het maximum begint dan *insnoering* van de trekstaaf. Er is in eerste instantie een bepaalde kracht nodig om deze insnoering op gang te brengen. Daarna neemt de kracht vaak iets af en blijft dan een tijd min of meer constant. Dit plateau is het gevolg van insnoering die zich bij min of meer constante kracht uitbreidt over de hele staaflengte. Daarna kan de kracht eventueel weer verder oplopen.



Figuur 4.2: Trekkromme van polycarbonaat

Als tijdens het trekken de trekbank stil wordt gezet blijkt de spanning enigszins af te nemen. Dit proces wordt *spanningsrelaxatie* genoemd en is een uiting van het tijdsafhankelijke mechanisch gedrag van kunststoffen: belaste ketens zullen geleidelijk een gunstiger positie innemen, zodanig dat er minder kracht nodig is om dezelfde rek te handhaven. Als de trekbank vervolgens weer gaat rekken, is eerst weer een piekkracht nodig om het proces van insnoering

weer op gang te brengen. Daarna neemt de spanning weer af tot de insnoerspanning.

Behalve van de tijd zijn de mechanische eigenschappen van thermoplasten ook sterk afhankelijk van de temperatuur. Een duidelijk voorbeeld is de elasticiteitsmodulus. Een thermoplast verkeert bij lage temperatuur in de zogenaamde *glastoestand* en heeft dan nog een relatief hoge elasticiteitsmodulus. Boven de *glastemperatuur* gaat het materiaal over in de *rubbertoestand* en daalt de elasticiteitsmodulus enkele decaden (zie [1], § 2.4 en § 4.5). In de rubbertoestand is een thermoplast zonder veel moeite uit te rekken. Na het wegnemen van de belasting zal hij dan echter weer (grotendeels) terugveren. Wordt een thermoplast nog verder verwarmd, dan ontstaat een dikke viskeuze vloeistof.

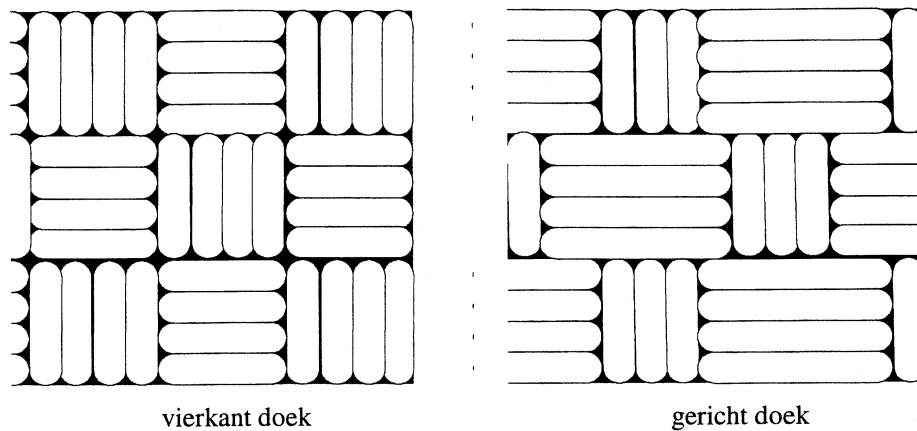
Eén van de gevolgen van het makkelijker vervormen bij verhoogde temperatuur is het verschijnsel *vormgeheugen*. Als een thermoplast voldoende wordt vervormd, zullen de ketens zich richten en blijkt na het wegnemen van de belasting dat de vervorming voor een groot deel blijvend is. Wordt echter vervolgens de temperatuur verhoogd, dan krijgen de ketens op een gegeven moment genoeg (thermische) energie om min of meer naar hun oorspronkelijke positie terug te keren. Het materiaal kan zodoende voor een groot deel weer zijn oorspronkelijke vorm aannemen.

#### ***Vezelversterkte thermoharders***

In een thermohardende kunststof zijn tussen de ketens dwarsverbindingen aanwezig. Hierdoor kunnen bij mechanisch belasten de ketens niet meer langs elkaar schuiven. Verder zal bij verwarming een thermoharder niet in een rubbertoestand komen. Het materiaal blijft hard en gaat op een gegeven moment ontleden of oxideren.

De eigenschappen van *vezelversterkte* thermoharders worden uiteraard mede bepaald door de soort en de structuur van de aangebrachte vezels (zie [1], § 3.4.2). Gewapende thermoharders bevatten meestal continue versterkingsvezels in de vorm van strengen of weefsels. Hierbij zorgen de veel sterkere en stijvere vezels voor de gewenste mechanische eigenschappen en dient de thermoharder slechts als bindmiddel tussen de strengen of de weefsels. De mechanische eigenschappen worden dan ook voornamelijk door het soort vezelmateriaal bepaald. Daarnaast heeft, zoals te verwachten, de volumefractie vezels een grote invloed.

Veelvuldig worden glasvezels als wapening toegepast, maar ook hoogwaardiger vezels, zoals grafiet, worden gebruikt voor veeleisende toepassingen. In het geval van weefsels voor wapening moet nog onderscheid gemaakt worden tussen *gericht doek* en *vierkant doek* (zie Fig. 4.3). Bij gericht doek is een duidelijk verschil aanwezig tussen de sterkte in de hoofdrichting en die in de richting loodrecht daarop. Bij vierkant doek zijn daarentegen de mechanische eigenschappen in beide richtingen hetzelfde. Door meerdere lagen doek in verschillende richtingen aan te brengen kunnen de eigenschappen in alle richtingen gelijk gemaakt worden.



Figuur 4.3: De gerichtheid van glasvezeldoek

GEP 143 en GEP 181 zijn aanduidingen van met glasvezeldoek versterkte epoxyharsen. Het verschil is dat één van de twee een vierkant doek is, terwijl het andere een gericht doek is. Door het trekken van een aantal staafjes van beide materialen, waarbij de hoek tussen de lengteas van het staafje en de hoofdrichting van het doek verschillen wordt gekozen, kan bepaald worden met wat voor soort doek men te maken heeft.

#### 4.2.2 Determinatie van kunststoffen

Om een onbekende kunststof te kunnen determineren, kan gebruikt gemaakt worden van een aantal relatief eenvoudig vast te stellen kenmerken, zoals:

- Uiterlijk  
Het materiaal is schuimvormig of massief en homogeen of inhomogeen (gewapend kunststof). Verder is kunststof glashelder (b.v. ongekleurde amorfe kunststoffen), melkachtig of ondoorschijnend.
- Aanvoelen  
Het oppervlak is zacht of star, voelt wel of niet vettig aan en is wel of niet glad.
- Gedrag bij verwarming  
Bij thermoplasten kan het materiaal verweken (makkelijke vervorming) of smelten (uitvloeien). In deze gevallen zal na afkoelen het materiaal weer zijn oorspronkelijke hardheid terugkrijgen. Een andere mogelijkheid is dat er ontleding optreedt (thermoharder). Dit kan een specifieke geur geven. Mogelijkerwijs blijft na afkoeling het materiaal kleverig (ontledende thermoharder).  
Het gedrag bij verwarmen kan worden getest door een klein stukje kunststof op een lepel of in een reageerbuis te verwarmen boven een kleurloze vlam.
- Brandgedrag  
Zaken zoals de brandbaarheid, vlamkleur en optredende geur geven informatie over de samenstelling.  
Het testen gebeurt door een stukje kunststof in een kleurloze vlam te houden. Niet-

doorbrandende kunststoffen kunnen langduriger in de vlam worden gehouden. Met behulp van de *koperdraadtest*, waarbij een stukje kunststof op een tot een spiraal gewikkeld stuk dun koperdraad in een kleurloze vlam wordt gegloeid, kunnen chloor en broom worden aangetoond. Deze geven dan een groene kleur af.

- Mechanisch gedrag

Bij schuim zal een vingerindruk al of niet blijvend zijn. Massief materiaal kan hard en bros (breekt bij geringe vervorming), hard en stijf (kan enkele malen gebogen worden), veerkrachtig (kleine kracht en geen breuk: rubber) of elastisch (grotere kracht en keert terug naar oude vorm) zijn. Door kristallisatie tijdens vervormen kan het materiaal wit uitslaan.

- Dichtheid

Kunststoffen hebben uiteenlopende dichtheden. Verder geven vulstoffen en wapeningsmateriaal in het algemeen een hogere dichtheid.

Een snelle indicatie wordt verkregen door onderdompeling van een stukje kunststof in een vloeistof met een bepaalde dichtheid. Aanhangende luchtbelletjes moeten hierbij vermeden worden.

- Aantasting

De reactie van kunststoffen op bepaalde stoffen kan zeer specifiek zijn. Het materiaal kan oplossen of aangetast worden. Een voorbeeld is scheurvorming van polystyreen na onderdompeling in petroleum.

Door systematisch te testen op een aantal van deze kenmerken kan een onbekend stukje kunststof ingedeeld worden in een hoofdgroep, zoals bijvoorbeeld thermoharders, thermoplasten en elastomeren. Vervolgens kan op bepaalde meer specifieke eigenschappen getest worden, waardoor in het algemeen een definitieve determinatie mogelijk is.

Tabel 4.1: Beschikbare proefstukken voor de mechanische beproeving

naam	Thermoplasten		Thermoharders (GEP)		
	trekstaaf	kerfslagstaven <sup>2</sup>	doekrichting	trekstaaf doek 143	trekstaaf doek 181
ABS	×	(×)	0°	×	×
PA 6	×	(×)	10°		×
PA 6.6	×	(×)	15°	×	
PC	×	(×)	20°		×
PMMA	×	(×)	30°	×	×
PVC-z	×		45°		×
			60°	×	
			90°	×	×

<sup>2</sup> Van één van de aangegeven thermoplasten zijn 5 kerfslagstaven beschikbaar.

### 4.3 Uitvoering van de proef

De mechanische beproevingen worden uitgevoerd aan een aantal thermoplasten en een tweetal thermoharders. In Tabel 4.1 zijn de beschikbare proefstukken vermeld.

Hiernaast zijn proefstukjes beschikbaar de van glasvezeldoek versterkte epoxyharsen GEP 143 en GEP 181 om de dichtheid te bepalen. Bovendien zijn nog twee stukjes van een onbekende kunststof beschikbaar om gedetermineerd te worden.

#### 4.3.1 Mechanische beproeving

##### Trekproef

De trekstaven worden op een Instron-trekbank beproefd. Op dit type trekbank kan namelijk een constante treksnelheid ingesteld worden, wat belangrijk is in verband met de reksnelheidsgevoeligheid van de eigenschappen van kunststoffen. Tabel 4.2 geeft een overzicht van de treksnelheden.

Tabel 4.2: Treksnelheden voor de verschillende kunststoffen

Kunststof	Treksnelheid [mm/min]
ABS	50
PA 6	50
PA 6.6	25
PC	50
PMMA	5
PVC-z	— <sup>3</sup>
GEP 143	2
GEP 181	2

Allereerst wordt de doorsnede van de proefstaven gemeten. De meetlengte waarover de rek wordt berekend, is voor alle staven 65 mm. Bij de trekproef wordt bepaald: de trekkracht bij 1% verlenging, de maximale trekkracht en de breukrek. Tevens wordt gekeken naar spanningsrelaxatie en vormgeheugen.

Van alle materialen wordt vervolgens de elasticiteitsmodulus, de maximale trekspanning en de procentuele verlenging berekend worden. De elasticiteitsmodulus wordt hier bepaald als de secantmodulus (zie Appendix C) en wel bij een rek van 1%. Als de spanning, rek en kracht bij een rek van 1% aangeduid worden met respectievelijk  $\sigma_1$ ,  $\epsilon_1$  en  $F_1$ , dan volgt de secantmodulus  $E_{\text{sec}}$  uit:

<sup>3</sup> Dit materiaal wordt niet op de Instron-trekbank maar op de handtrekbank beproefd.

$$E_{\text{sec}} = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} = \frac{F_1/A_0}{\varepsilon_1} = \frac{F_1}{0.01A_0} \quad (4.1)$$

Voor de GEP staven zijn de trekproefresultaten afhankelijk van de oriëntatie van de trekstaven. Deze afhankelijkheid kan goed worden beoordeeld door drie grafieken te maken, te weten voor de maximale spanning, de verlenging bij breuk en de secantmodulus, en de resultaten voor beide materialen in dezelfde grafieken weer te geven.

*Vraag: Hoe is de gerichtheid van het glasvezeldoek in GEP 143 en GEP 181?*

### **Spanningsrelaxatie**

Bij één van de thermoplasten (polycarbonaat) wordt gekeken naar het verschijnsel spanningsrelaxatie. De trekstaaf wordt hiertoe getrokken tot insnoering begint. Vervolgens wordt de trekbank gedurende 1 minuut stilgezet en gemeten hoeveel procent de spanning daalt ten opzichte van de insnoeringsspanning. Daarna wordt de trekstaaf verder kapot getrokken.

### **Vormgeheugen**

Een getrokken en daarbij ingesnoerde trekstaaf van een thermoplast (b.v. polycarbonaat) wordt na het trekken in een oven gelegd. Als de temperatuur voldoende is opgelopen, zullen de staafdelen weer min of meer hun oorspronkelijke vorm aannemen.

### **Kerfslagproef**

Met behulp van een kerfslaghamer wordt van één thermoplast bij vijf temperaturen de kerfslagarbeid bepaald. Vooraf moeten de dikte en breedte van iedere kerfslagstaaf opgemeten worden.

Na beproeving kunnen de gemeten waarden voor de kerfslagarbeid (*KSA*) worden omgezet in kerfslagwaarden (*KSW*) door te delen door het oppervlak van de kleinste doorsnede van de kerfslagstaaf  $A_{\text{min}}$ :

$$KSW = \frac{KSA}{A_{\text{min}}} \quad (4.2)$$

Het oppervlak  $A_{\text{min}}$  volgt uit de gemeten staafafmetingen, waarbij rekening moet worden gehouden met de 1 mm diepe kerf.

De berekende kerfslagwaarden worden in een grafiek als functie van de testtemperatuur uitgezet. Op deze wijze kan het temperatuursafhankelijk gedrag van de thermoplast worden beoordeeld.

### **Vezelvolumefractie van composieten**

Van de twee composieten, de glasvezeldoek versterkte epoxyharsen GEP 181 en 143, wordt de dichtheid bepaald. Dit gebeurt door het volume en het gewicht van proefstukjes te meten.

Met behulp hiervan wordt de dichtheid  $\rho_c$  van de composieten berekend.

De vezelvolumefractie  $V_f$  kan als volgt bepaald worden. Er geldt:

$$\rho_c \cdot 100\% = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m \quad (4.3)$$

Hierin zijn  $\rho_f$  en  $\rho_m$  de dichtheden van respectievelijk de vezels en de matrix (epoxyhars). Verder is  $V_m$  de matrixvolumefractie. Ook geldt:

$$V_f + V_m = 100\% \quad (4.4)$$

Uit Vergelijking (4.3) en (4.4) volgt voor de vezelvolumefractie  $V_f$ :

$$V_f = \frac{\rho_c - \rho_m}{\rho_f - \rho_m} \cdot 100\% \quad (4.5)$$

Van de twee composieten is gegeven:  $\rho_f = 2,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  en  $\rho_m = 1,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ .

#### **4.3.2 Determinatie van kunststoffen**

Aan de hand van de determinatietabel in Appendix D kan op een systematische manier de soort kunststof bepaald worden.



# Hoofdstuk 5

## P - Precipitatie

### 5.1 Doel van de proef

- kennis te maken met het fenomeen precipitatieharding;
- onderzoeken hoe mechanische eigenschappen beïnvloed worden door deze warmtebehandeling;
- na te gaan wat voor effect temperatuursverhoging heeft op een al precipitatiegeharden metaallegering;
- via een intermitterende trekproef kennis te maken met mechanische grootheden als elastische en blijvende rek, rekgrens en elasticiteitsmodulus.

### 5.2 Theorie

De enige manier om de sterkte van een metaal of metaallegering te verbeteren, is door bewegingen van dislocaties door het kristalrooster te belemmeren (zie [1], § 2.3.3). Hiervoor zijn een aantal verschillende mogelijkheden. Bij *precipitatieharding* worden barrières voor dislocatiebewegingen opgeworpen door deeltjes fijn verdeeld in het rooster te laten uitscheiden. Dit kan bij bepaalde typen metaallegeringen door het toepassen van een specifieke warmtebehandeling. Overigens, hoewel de term *harding* anders doet vermoeden, worden met name eigenschappen als rekgrens en treksterkte verbeterd.

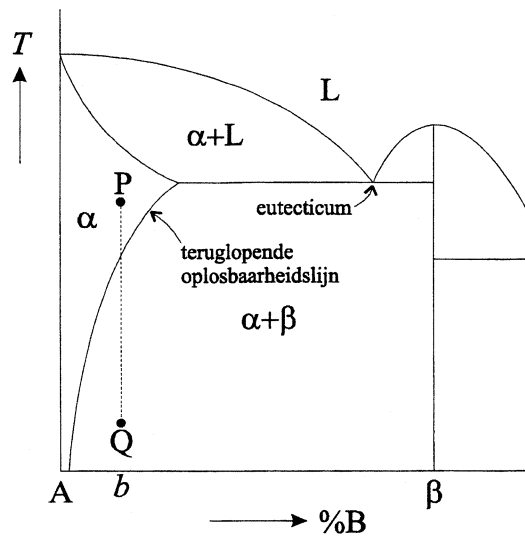
Precipitatieharding wordt bij koper-, magnesium- en nikkellegeringen en in mindere mate bij staal toegepast, maar is met name bij aluminiumlegeringen belangrijk om mechanische eigenschappen van het gewenste niveau te krijgen. Voor alle duidelijkheid: precipitatieharding volgt een heel ander mechanisme dan het veel toegepaste *harden van staal* (zie [1], § 4.2.3.4).

De warmtebehandeling voor precipitatieharding is onder te verdelen in de volgende stappen:

1. *oplosgloeien*: het in oplossing brengen van legeringselementen
2. *afschrikken*: het creëren van een oververzadigde oplossing
3. *nagloeien*: het laten uitscheiden (precipiteren) van deeltjes

Voor een optimale verbetering van de mechanische eigenschappen luistert de uitvoering van deze stappen vrij precies. Ook zal een temperatuursverhoging van materiaal, dat al een precipitatieharding heeft ondergaan, gevolgen kunnen hebben voor de mechanische eigenschappen. Bij de precipitatieproef wordt op deze aspecten dieper ingegaan.

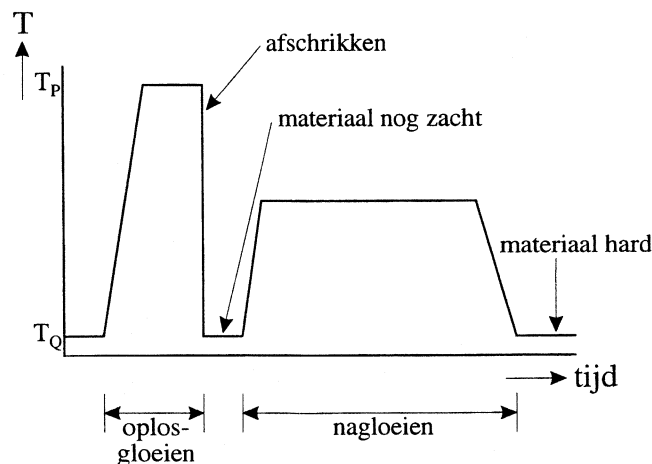
### 5.2.1 Principe van de precipitatieharding



Figuur 5.1: Het toestandsdiagram van een binaire legering met hierin een teruglopende oplosbaarheidslijn.

De principiële mogelijkheid van warmtebehandelingen berust op de verminderde oplosbaarheid van legeringselementen bij dalende temperatuur. Het mechanisme is het eenvoudigst te bespreken aan de hand van een denkbeeldige binaire legering A - B, waarvan het toestandsdiagram in Fig. 5.1 is weergegeven. Een teruglopende oplosbaarheidslijn geeft aan dat in het kristalrooster van het uitgangsmetaal A bij hoge temperatuur een groter percentage van legeringselement B oplosbaar is dan bij lage temperatuur. We beschouwen nu een legering met samenstelling b, die in evenwicht bij kamertemperatuur ( $T_Q$ ) uit twee fasen bestaat, namelijk  $\alpha$ - en  $\beta$ -kristallen. Deze laatste fase is een intermetallische verbinding tussen de elementen A en B.

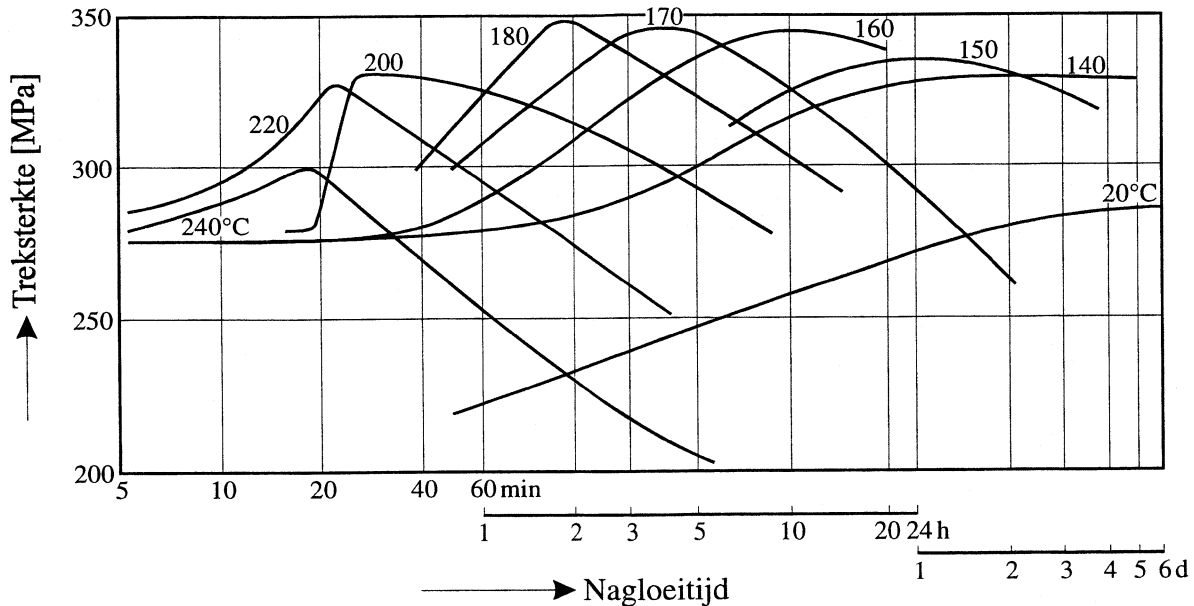
De eerste stap bij precipitatieharding is het verhitten van deze legering tot een temperatuur  $T_P$  gelegen vlak onder de eutectische temperatuur (Fig. 5.2). Door dit z.g. *oplosgloeien* ontstaat na verloop van tijd een homogene structuur van  $\alpha$ -kristallen.



Figuur 5.2: Schema van de warmtebehandeling voor precipitatieharding



tie. We spreken dan van *kritische dispersie*, d.w.z. de uitscheidingen hebben een dusdanige grootte en verdeling dat de verstoring van het kristalrooster maximaal is.



Figuur 5.4: Treksterkte van een AlMgSi-legering als functie van de nagloeitemperatuur en -tijd [5]

Langer en/of bij een hogere temperatuur nagloeien leidt tot veroudering. Zowel het kleinere aantal als het incoherente karakter van de uitscheidingen leidt tot een aanmerkelijk geringere verstoring van het kristalrooster met als gevolg een teruggang van de mechanische eigenschappen (Fig. 5.4). We spreken nu van *overprecipitatie* of *oververoudering*. Wil de precipitatieharding praktisch bruikbaar zijn, mogen de uitscheidingen bij de uiteindelijke gebruikstemperatuur, en binnen de levensduur van de legering, niet noemenswaardig veranderen.

Overigens blijkt de maximale te bereiken hardheid ook afhankelijk te zijn van de nagloeitemperatuur: bij hogere temperatuur bereikt men het maximum eerder, maar is de waarde iets lager. Dit heeft te maken met het feit dat bij hogere temperatuur eerder incoherente uitscheidingen gevormd worden.

Resumerend, voor een effectieve precipitatieharding is het volgende nodig:

- een teruglopende oplosbaarheidslijn
- een in eerste instantie coherente uitscheiding van de tweede fase
- geen overprecipitatie van het materiaal onder gebruiksomstandigheden

### 5.2.3 Invloed van lassen op precipitatiegehard materiaal

Het lassen van metalen introduceert lokaal een warmtebehandeling. De invloed die zo'n behandeling heeft op de mechanische eigenschappen is afhankelijk van de manier waarop deze eigenschappen tot stand zijn gekomen:

- Verstevinging door koudvervorming

De sterkte en de hardheid in een smalle zone naast de las gaan achteruit. Herstel kan optreden door de omgeving van de las te vervormen.

- Oplosharding

De laswarmte heeft geen nadelige invloed. Als het materiaal niet gevoelig is voor warm-scheuren, zal het goed lasbaar zijn.

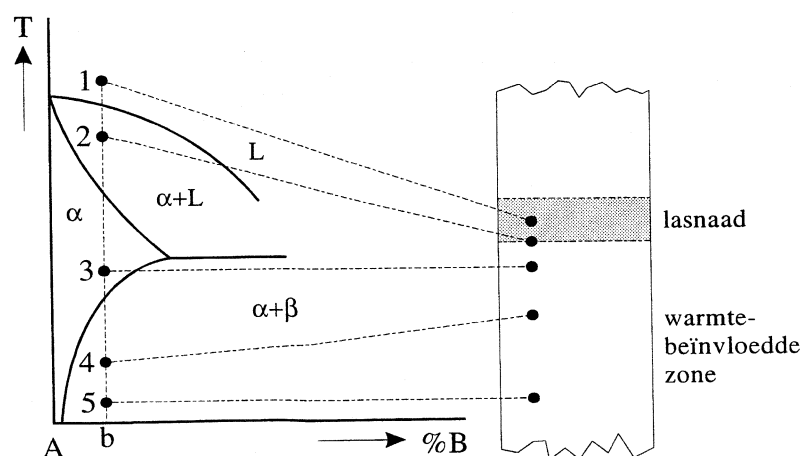
- Precipitatieharding

De mechanische eigenschappen kunnen dermate achteruit gaan dat de betreffende legering slecht lasbaar genoemd moet worden, hoewel de las op zichzelf uitstekend kan zijn.

We beschouwen precipitatiehardende legeringen nader en doen dit weer aan de hand van een denkbeeldige binaire legering van basismetaleen A met daarin  $b\%$  van het legeringselement B. Een deel van het toestandsdiagram A - B is weergegeven aan de linkerkant van Figuur 5.5.

Tijdens het lassen treedt een maximum temperatuur op die afhankelijk is van de afstand tot het midden van de las (rechtterkant Fig. 5.5). Er zijn 5 gebieden te onderscheiden:

- 1: De legering wordt tot boven de smelttemperatuur verhit en stolt daarna met een gietstructuur.
- 2: Er wordt verhit tot in het L+ $\alpha$  -gebied. De korrelgrenzen smelten en vormen na het stollen een brosse zone (segregatie).
- 3: Verhitting tot in het  $\alpha$ -gebied. Dit levert een homogene structuur op, vergelijkbaar met de uitgangsstructuur bij precipitatieharding.
- 4: De legering krijgt een warmtebehandeling die overprecipitatie tot gevolg heeft: de kritische dispersie wordt overschreden.
- 5: De matige verwarming heeft hier nauwelijks effect.



Figuur 5.5: De diverse gebieden in de door lassen warmtebeïnvloede zone van een precipitatiegeharte legering

Duidelijk is, dat na lassen de mechanische eigenschappen in de verschillende gebieden sterk

variëren en veelal slechter zijn dan die van optimaal precipitatiegehard materiaal. Een mogelijkheid is het materiaal na het lassen opnieuw een precipitatieharding te laten ondergaan. In legeringen met een natuurlijke veroudering zal na verloop van tijd een zeker herstel van de mechanische eigenschappen kunnen optreden.

Belangrijk om op te merken is dat het begrip lasbaarheid bepaald wordt door de mate waarin de mechanische eigenschappen beïnvloed worden en niet door het feit of een lasrups makkelijk te leggen is.

### 5.3 Uitvoering van de proef

Alle proeven worden uitgevoerd aan aluminiumlegeringen. In Tabel 5.1 is een overzicht gegeven van de beschikbare proefstukken. Tevens is het materiaal vermeld waarvan ze vervaardigd zijn: de aanduiding van de legering, de belangrijkste legeringselementen en de precipitaten.

Tabel 5.1: Beschikbaar materiaal voor de P-proef

Proefstukken	Materiaal		
	aanduiding	legeringselementen	precipita(a)t(en)
27 kerfslagstaven 9 trekstaven	Al 6061	0,8% Mg, 0.8% Si	Mg <sub>2</sub> Si
1 gelaste strip 1 ongelaste strip	Al 2024	4,4% Cu, 1,5% Mg	Al <sub>2</sub> Cu, Al <sub>2</sub> CuMg
1 gelaste strip 1 ongelaste strip	Al 7075	5,6% Zn, 2,5% Mg	MgZn <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> Mg <sub>3</sub> Zn <sub>3</sub>
3 bouten M12 × 60	Al 7075	5,6% Zn, 2,5% Mg	MgZn <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> Mg <sub>3</sub> Zn <sub>3</sub>

De precipitatieproef kent de volgende drie onderdelen:

1. Precipitatieharding en beproeving van een serie trek- en kerfslagstaven  
De duur van de nagloeibehandeling wordt gevarieerd en de invloed hiervan op eigenschappen als de treksterkte en de kerfslagwaarde wordt bepaald.
2. Bestudering van de invloed van lassen op precipitatiegeharde plaat  
Het gevolg van de opgetreden tijdelijke temperatuursverhoging wordt bestudeerd door middel van hardheidsmetingen in de warmtebeïnvloedde zone van een las.
3. Beproeving van een drietal bouten  
De bouten van dezelfde metaallegering hebben verschillende warmtebehandelingen ondergaan. Het effect hiervan op de rekgrens wordt bepaald. Tevens wordt de elasticiteitsmodulus gemeten.

#### 5.3.1 Precipitatie en beproeving van trek- en kerfslagstaven

De staven ondergaan een precipitatieharding, waarbij de duur van de nagloeitijd wordt gevarieerd. Op deze wijze zal de uitscheiding (precipitatie) van deeltjes in verschillende mate kun-

nen verlopen. Door vervolgens de staven te beproeven kan de invloed op de mechanische eigenschappen worden bepaald.

### **Precipitatieharding**

Op het practicum wordt een serie van acht genummerde trek- en kerfslagstaven uitgereikt. Deze worden allereerst onderworpen aan een oplosgloeibehandeling (30 minuten op 560 °C) en vervolgens afgeschrikt. Daarna vindt nagloeien plaats gedurende 5 tot 150 minuten op 220 °C (zie Tabel 5.2).

*Vraag: Op grond van welke praktische overweging is deze temperatuur gekozen (zie ook Figuur 5.4)?*

Tabel 5.2: Precipitatietijden

Staafnummer	1	2	3	4	5	6	7	8
Tijd (min.)	5	10	20	40	70	100	130	150

De staven met nummer 9 zijn na oplosgloeien en afschrikken langer dan 3 maanden op kamertemperatuur bewaard. Er mag worden aangenomen dat het precipitatieproces hierin tot stilstand is gekomen, maar de kritische dispersie nog niet is bereikt (zie Fig. 5.4).

### **Mechanische beproeving**

Bij de trekproeven aan de trekstaven wordt het volgende bepaald:

- de kracht waarbij de rekgrens wordt bereikt
- de kracht bij breuk
- de verlenging
- de insnoering

Van de kerfslagstaven meten we de hardheid (in HRE; zie Appendix A) en de kerfslagarbeid.

### **5.3.2 Invloed van lassen op precipitatiegehard plaatmateriaal**

Bij dit onderdeel wordt op een gelaste strip van precipitatiegehard materiaal een serie hardheidsmetingen gedaan als functie van de afstand tot de las. Zodoende kan de invloed van het lassen op de hardheid en de grootte van de warmtebeïnvloede zone worden bekeken.

Op het practicum zijn van twee aluminiumlegeringen vooraf gelaste strippen voorhanden (zie Tabel 5.1). Ze zijn ongeveer 4 mm dik, 40 mm breed en 100 mm lang en zijn gelast volgens het T.I.G.-lasproces, waarbij de legering zelf als toevoegmateriaal is gebruikt. Verder zijn van dezelfde materialen ongelaste strippen beschikbaar.

Er worden de volgende metingen gedaan:

- enkele hardheidsmetingen (HRB) aan het ongelaste materiaal
- hardheidsmetingen naast de las, te beginnen direct ernaast en verder om de 5 mm over

de hele lengte van de strip. Dit gebeurt aan beide zijden.

### 5.3.3 Beproeving van bouten

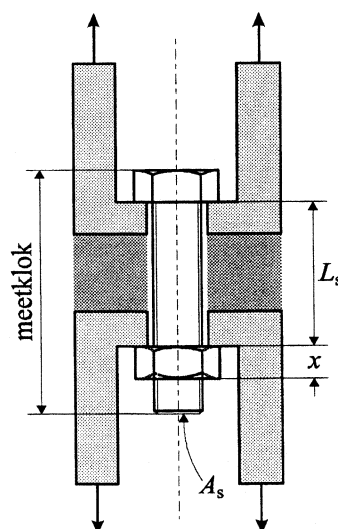
Dit deel van de proef behelst het nauwkeurig bepalen van de rekgrens en de elasticiteitsmodulus aan drie bouten van de legering Al 7075. De bouten zijn door de fabrikant optimaal precipitatiegehard. Om een indruk te krijgen van de mechanische eigenschappen van de bout in verschillende stadia van de precipitatieharding, krijgen twee van de drie bouten opnieuw een warmtebehandeling. Zodoende krijgen we de beschikking over bouten, die in de volgende toestanden verkeren:

- oplosgegloeid (½ uur op 520 °C)
- precipitatiegehard (leveringstoestand)
- overgeprecipiteerd (1 uur gloeien op 350 °C)

De volgende waarden worden bepaald:

- 0,2%-rekgrens
- elasticiteitsmodulus (alleen aan de precipitatiegeharde bout)
- treksterkte

Een nauwkeurige bepaling van rekgrens en elasticiteitsmodulus is onmogelijk met een eenvoudige trekproef. Immers, de daarbij geregistreerde waarde voor de verlenging bestaat uit de verlenging van de proefstaaf plus de vervorming van de trekbank. We moeten daarom onze toevlucht nemen tot rekmeters (bij het practicum niet beschikbaar) òf tot een meetmethode waarbij de totale verlenging en de blijvende (plastische) verlenging apart gemeten worden. Dit is de z.g. *intermitterende trekproef*. Om praktische redenen wordt de treksterkte achteraf met een gewone trekbank gemeten.



Figuur 5.6: De hulpstukken voor het beproeven van een bout

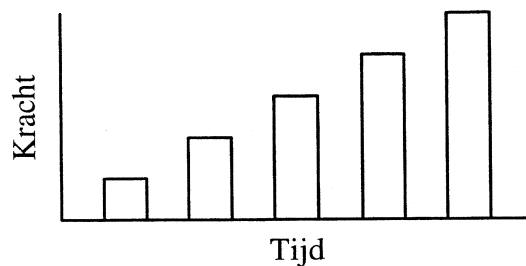


Tabel 5.3: Relevante maten voor beproeven bout

ingespannen boutlengte $L_s = 38 \text{ mm}$ dikte moer $x = 10 \text{ mm}$ effectieve meetlengte $L_0 = L_s + \frac{1}{2}x$ effectief oppervlak doorsnede $A_s = 84,3 \text{ mm}^2$
---

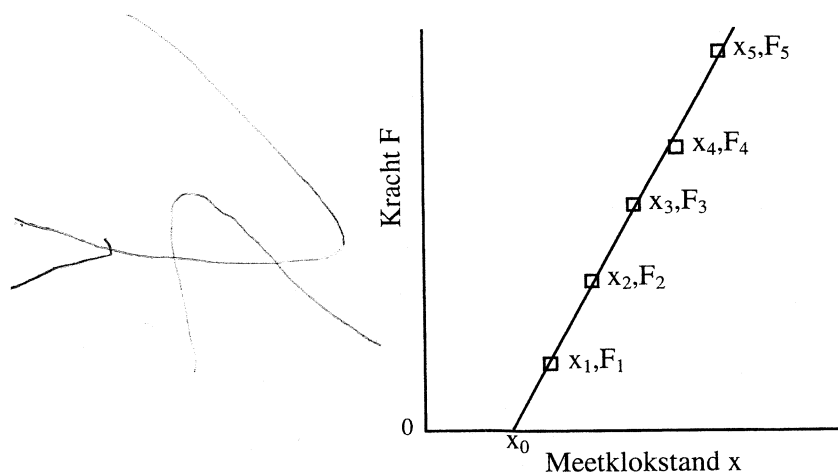
### De intermitterende trekproef

Voor het uitvoeren van een intermitterende trekproef aan een bout zijn speciale hulpstukken beschikbaar (Fig. 5.6). Hiermee kan, met behulp van een meetklok, nauwkeurig de verlenging van de bout worden gemeten. In Tabel 5.3 zijn de relevante maten gegeven.



Figuur 5.7: Het verloop van de opgelegde kracht tijdens een intermitterende trekproef

In Figuur 5.7 is de tijdens de proef opgelegde kracht weergegeven als functie van de tijd. De bout wordt met een bepaalde kracht belast en de resulterende verlenging wordt met de meetklok gemeten: een maat voor de *totale* rek van de bout. Vervolgens wordt de bout ontlast en weer wordt de verlenging bepaald: een maat voor de *blijvende* rek. Deze cyclus wordt een aantal malen herhaald totdat de bout voldoende plastisch vervormd is om de 0,2%-rekgrens te kunnen bepalen.



Figuur 5.8: Bepaling van de correctie voor de meetklokwaarnemingen

### Correctie van de waarnemingen

Omdat de meetopstelling bij een onbelaste bout niet voldoende mechanische stabiliteit heeft, wordt de bout tijdens de trekproef niet volledig ontlast, maar op een voorbelasting van b.v. 2000 N gehouden. Om de werkelijke verlenging van de bout te bepalen is het echter nodig de stand van de meetklok te kennen bij een onbelaste bout.

Deze *nulstand* wordt bepaald met behulp van de eerste vijf waarnemingen van de meetklok  $x_1..x_5$ , zoals deze zijn gemeten bij opgelegde krachten  $F_1..F_5$ . We gaan ervan uit dat de bout zich bij deze belastingen nog elastisch gedraagt, zodat deze vijf meetpunten op een rechte lijn zullen liggen (Fig. 5.8). We berekenen de gemiddelde boutverlenging per eenheid opgelegde kracht volgens de formule:

$$p = \frac{1}{4} \left( \frac{x_2 - x_1}{F_2 - F_1} + \frac{x_3 - x_1}{F_3 - F_1} + \frac{x_4 - x_1}{F_4 - F_1} + \frac{x_5 - x_1}{F_5 - F_1} \right) \quad (5.1)$$

Met behulp van deze waarde kan de nulstand van de meetklok,  $x_0$ , geschreven worden als:

$$x_0 = x_1 - p \cdot F_1 . \quad (5.2)$$

De bij meetpunt  $i$  optredende boutverlenging  $\Delta l_i$  wordt nu gevonden als het verschil tussen de meetklokwaarneming  $x_i$  en de nulstand  $x_0$ :

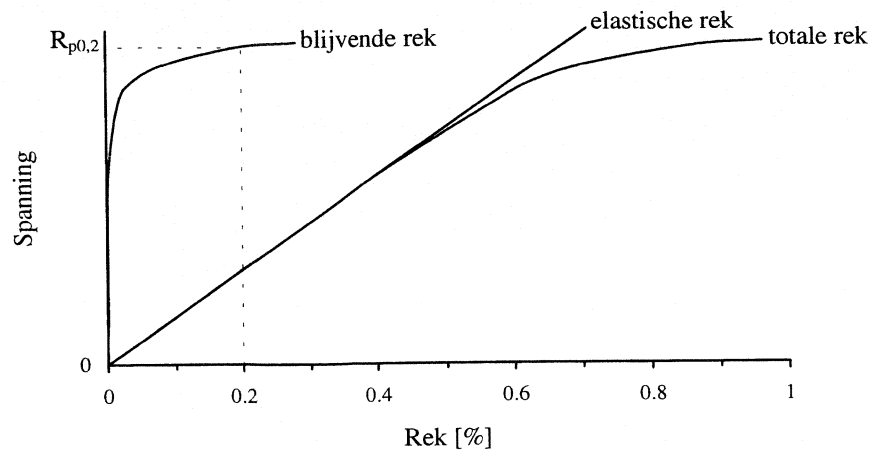
$$\Delta l_i = x_i - x_0 . \quad (5.3)$$

In principe zou deze berekening voor zowel de belaste als de onbelaste waarnemingen moeten worden uitgevoerd. Echter de bepaling van de blijvende verlenging kan op een eenvoudiger manier gebeuren, namelijk door de schaal van de meetklok aan het begin van de proef (bij een voorbelaste bout) op nul af te stellen. Omdat de bout op dat moment alleen nog maar elastisch is vervormd, geeft de meetklok iedere keer na het ontlasten tot de voorbelasting de blijvende verlenging direct weer.

*Vraag: Waarom wordt de blijvende verlenging nu direct weergegeven?*

### De totale en de blijvende rek

De spanning in de bout is te berekenen als de belasting gedeeld door de nominale doorsnede  $A_0$ , terwijl de rek gelijk is aan de boutverlenging gedeeld door de meetlengte  $l_0$  (zie Fig. 5.6 voor  $A_0$  en  $l_0$ ). De verlenging gemeten aan de belaste resp. onbelaste (voorbelaste) bout leidt tot de totale resp. de blijvende rek. De spanning kan nu dus als functie van de totale en de blijvende rek in een grafiek worden uitgezet (Fig. 5.9).



Figuur 5.9: De totale, blijvende en elastische rek en de bepaling van de 0,2% rekgrens ( $R_{p0.2}$ )

Zoals is weergegeven, is de 0,2%-rekgrens eenvoudig uit de blijvende rek te bepalen. Verder is de elastische rek te berekenen als het verschil tussen de totale rek en de blijvende rek. Voor de onderzochte aluminiumlegering zal dit een rechtlijnig verband opleveren. De elasticiteitsmodulus  $E$ , per definitie gelijk aan de verhouding tussen de opgelegde spanning en de resulterende elastische rek, volgt uit de helling van deze rechte.

## 5.4 Terminologie

coherent:	een samenhang van de atomaire structuur van precipitaat en omliggend rooster
dispersieharding:	zie precipitatieharding
incoherent:	niet coherent
kritische dispersie:	die grootte en verdeling van precipitaten waarbij het effect op de mechanische eigenschappen maximaal is
mengkristal:	een vaste oplossing van één of meer element(en) in een ander
nagloeien:	een warmtebehandeling om precipitatie te laten optreden
oplosloeien:	een warmtebehandeling waardoor de legeringselementen in vaste oplossing gaan en een mengkristal vormen
oplosharding:	een hardheidstoename door het oplossen van atomen met een afwijkende diameter in het kristalrooster
overprecipitatie:	een te ver voortgeschreden precipitatie. De precipitaten nemen in aantal af, in grootte toe en verliezen hun coherentie met als gevolg een hardheidsafname (Engels: over-ageing).
oververoudering:	zie overprecipitatie
oververzadigde oplossing:	een oplossing van een legeringselement in een mengkristal waarbij de concentratie groter is dan de evenwichtswaarde. Deze oplossing kan gecreëerd worden in een legering met een teruglopende oplosbaarheid met dalende temperatuur door zodanig snel af te koelen, dat

	de vorming van een tweede fase wordt onderdrukt.
precipitaat:	tweede fase deeltje
precipitatie:	de uitscheiding van precipitaten in de vaste fase vanuit een oververzadigde oplossing waardoor de mechanische eigenschappen worden verbeterd (Engels: ageing)
precipitatieharding:	een hardheidstoename als gevolg van precipitatie (Engels: precipitation hardening, dispersion hardening)
veroudering:	zie precipitatie. Kunstmatige veroudering vindt plaats bij verhoogde temperatuur (nagloeien), terwijl natuurlijke veroudering al bij kamertemperatuur optreedt. Bij staal wordt met veroudering i.h.a. een ongewenste verbrossing bedoeld.

# Appendix A

## De Hardheidsmeting

Bij hardheidsmetingen wordt de weerstand gemeten die een materiaal biedt tegen de indrukking van een bepaald lichaam. Het indruklichaam is meestal een kogel, een piramidevormig lichaam of een kegel, die vervaardigd is van een materiaal dat veel harder is dan het te beproeven materiaal, bijvoorbeeld van gehard staal, gesinterd wolframcarbide of diamant. Bij de meeste standaard hardheidsmetingen wordt het indruklichaam gedurende een zekere tijd met een zekere belasting loodrecht op het oppervlak van het te beproeven materiaal gedrukt. De combinatie van de grootte van de aangebrachte belasting en de grootte of de diepte van de indrukking bepaalt de hardheid van het materiaal. Deze proeven mogen overigens niet aan de rand van een proefstaaf of binnen de afstand van driemaal de diameter van de indrukking tot een reeds bestaande indrukking worden uitgevoerd. Ook de dikte van het materiaal moet aan bepaalde eisen te voldoen. Wil men plaatselijke hardheidsverschillen meten, bijvoorbeeld bij aanwezigheid van twee fasen, dan kan men gebruik maken van micro-hardheidsmeters: indrukken van enkele microns worden met de microscoop gemeten.

Hieronder worden enkele veel gebruikte typen hardheidsmetingen beschreven.

### A.1 Hardheid volgens Brinell

De eerste breed toegepaste en gestandaardiseerde hardheidstest werd geïntroduceerd door J.A. Brinell in 1900. Bij de Brinell hardheidstest wordt een stalen kogel gebruikt met een diameter  $D$  die ligt tussen 1 en 10 mm met een belasting, die in een bepaalde verhouding staat tot de kogeldiameter. Meestal neemt men  $F = 1 - 1,25 - 2,5 - 5 - 10 - 15 - 30 D^2$ . De belasting kan dus liggen tussen 10 N bij een kogeldiameter van 1 mm en 29420 N bij een kogeldiameter van 10 mm.

Uit de grootte van de indrukking kan men de hardheid berekenen:

$$H_B = \frac{F}{\frac{\pi}{2}D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{A.1})$$

De Brinell hardheid is een belasting per oppervlakte-eenheid en wordt vaak nog in  $\text{kgf/mm}^2$  uitgedrukt i.p.v. in  $\text{N/mm}^2$ , zoals eigenlijk zou moeten. Meestal wordt het resultaat echter als een getal zonder eenheid gegeven. Bij het bepalen van de hardheid moet men er op letten dat de grootte van de indrukking ligt tussen 0,24 en  $0,6 \times$  de diameter van de gebruikte kogel. Door de meestal grote kracht en kogeldiameter is deze methode minder gevoelig voor oppervlaktefouten en inhomogeniteiten in het materiaal. De materiaaldikte bij harde materialen moet minimaal  $2 \times$  de gemaakte indrukmiddellijn zijn en bij zachte materialen  $1,5 \times$  de mid-

dellijn.

In Tabel A.1 staan de voor- en nadelen van de Brinell meetmethode genoemd. Verder geeft Tabel A.2 de mogelijke belastingen voor diverse kogeldiameter met de bijbehorende toepassingsgebieden.

Tabel A.1: Voor- en nadelen van hardheidsmetingen volgens Brinell

Voordelen	Nadelen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• ongevoelig voor oppervlaktefouten en inhomogeniteiten</li> <li>• de enige meetmethode voor grijs gietijzer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• alleen geschikt voor ongeharde materialen (tot ca. 650 HB)</li> <li>• het oppervlak moet blank geschuurd zijn om de indrukking te kunnen opmeten</li> <li>• een relatief grote indrukking</li> </ul>

Tabel A.2: Mogelijke belastingen voor verschillende kogeldiameters bij hardheidsmetingen volgens Brinell

Belasting F [kgf]	Kogeldiameter D [mm]					Hardheidsbereik	Toepassing
	10	5	2,5	1,25	1		
$F = 30 D^2$	3000	750	187,5	46,9	30,0	67 - 450	staal
$F = 10 D^2$	1000	250	62,5	15,6	10,0	22 - 315	non-ferro metalen Al veredeld
$F = 5 D^2$	500	125	31,2	7,8	5,0	11 - 158	Al gegloeid
$F = 2,5 D^2$	250	62,5	15,6	3,9	2,5	6 - 79	lagermetaal
$F = 1,25 D^2$	125	31,2	7,8	2,0	1,2	3 - 39	lood
$F = 0,5 D^2$	50	12,5	3,1	0,8	0,5	tot 20	zeer zachte metalen

### **Bediening van de hardheidsmeters volgens Brinell**

- Schuur het proefstuk zo fijn mogelijk.
- Plaats het proefstuk op de tafel van de hardheidsmeter.
- Plaats de gewenste gewichten op de hardheidsmeter.
- Draai de tafel omhoog zodat het proefstuk tegen de indruk kogel komt.
- Draai de ontlastkraan dicht.
- Begin te pompen en ga daarmee door totdat de dwarsarm waaraan de gewichten hangen vrijkomt.
- Houd de belasting 30 seconden op het proefstuk.
- Draai de ontlastkraan voorop de hardheidsmeter open.
- Verwijder het proefstuk en draai de ontlastkraan dicht.
- Plaats een blokje staal en draai dit met enige kracht tegen de kogel (om lekken tegen te gaan).
- Meet onder een meetmicroscop de diameter van de gemaakte indrukking en bereken

hieruit de hardheid.

- Noteer de hardheid als volgt:  $H_B$  10/3000/30 = ..... (kogeldiameter 10 mm, belasting 3000 kgf, tijd 30 seconden).

## A.2 Hardheid volgens Vickers

Dit is de meest nauwkeurige methode en ook de meest universele hardheidsmeting. De te gebruiken belasting kan nagenoeg willekeurig gekozen worden. Net als bij Brinell wordt de hardheid van het materiaal uit de verhouding belasting/oppervlakte van de indrukking berekend. Het indruklichaam is een piramidevormige diamant met een tophoek van  $136^\circ$ . Na het bepalen van de gemiddelde diagonaal lengte  $d$  kan de hardheid worden berekend of in een tabel worden afgelezen.

$$H_v = \frac{2F \sin \frac{136}{2}}{d^2} = 1.85 \frac{F}{d^2} \quad (\text{A.2})$$

Hierin is  $F$  de gebruikte belasting. Bij de Vickersmeting worden de lengtes van de diagonalen opgemeten. Deze zijn ongeveer  $7 \times$  de indringdiepte. Om de minimale materiaaldikte te bepalen moet men de gemeten diagonaal lengte vermenigvuldigen met 1,5.

In Tabel A.3 worden de voor- en nadelen van de Vickers hardheidsmeting genoemd.

Tabel A.3: Voor- en nadelen van de hardheidsmeting volgens Vickers

Voordelen	Nadeel
<ul style="list-style-type: none"> <li>• zeer precies</li> <li>• geringe indringdiepte, dus zeer geschikt voor dunne lagen of kleine insluitsels</li> <li>• doorlopende schaal voor hard en zacht materiaal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• precies opmeten van de indrukking is nodig; daarom moet het oppervlak zorgvuldig geprepareerd worden (fijn schuren of polijsten)</li> </ul>

### **Bediening van de hardheidsmeters volgens Vickers**

- Schuur en/of polijst het preparaat goed en ets het indien nodig.
- Plaats het preparaat onder de microscoop en bepaal de plek waar gemeten moet worden.
- Controleer of de nul-instelling van de meetmicroscoop juist is en corrigeer indien nodig met de kleine knop links aan het oculair.
- Plaats het gewenste meetgewicht op de daartoe dienende tafel achter aan de machine.
- Plaats het preparaat onder de diamant, zodanig dat de diamant nog juist vrij staat. Doe dit met het grote handwiel rechts bovenaan de machine.
- Zorg ervoor dat bij het later verplaatsen van het preparaat ook dan de diamant niet geraakt kan worden. Neem liever iets meer ruimte. Bij teveel ruimte geeft de machine een signaal als de belasting aangebracht wordt.

- Trap het voetpedaal rechts naast de machine rustig in. Hierdoor wordt een veer gespannen die dient om de programmaschijf in de machine aan te drijven.
- Druk de hefboom rechts naast de microscoop naar beneden. Hierdoor gaat de programmaschijf draaien, die de hoofdlast aanbrengt en na enige tijd weer verwijdert, merkbaar door een duidelijk hoorbare tik.
- Verplaats de meettafel zodat het proefstuk onder de microscoop komt. Zorg ervoor dat het proefstuk niet verschuift.
- Stel het beeld scherp met de knop onder het grote handwiel.
- Verplaats met de lange knop links aan het oculair de beide zwarte velden in het microscoopbeeld zodanig dat het linker veld de linkerpunt van de indrukking raakt.
- Verplaats met de knop rechts naast de teller het rechter veld totdat deze tegen de rechterpunt van de indrukking staat.
- Lees de tellerstand af.
- Zoek in de tabel de hardheid op.

### **A.3 Hardheid volgens Rockwell**

De Rockwell hardheidsmeting is de meest toegepaste methode, omdat ze snel en eenvoudig uit te voeren is. Onder invloed van een relatief geringe voorlast dringt het indruklichaam (kogel of diamant) iets in het materiaal en levert zo een nulstand op. Vervolgens wordt de hoofdlast aangebracht en na korte tijd weer verwijderd. Het indruklichaam veert terug en staat weer slechts onder invloed van de voorlast. Het verschil in positie van het indruklichaam in vergelijking met de nulstand is een maat voor de hardheid en kan direct op een micrometerklok worden afgelezen. Bij deze methode is de hardheidswaarde dus direct beschikbaar, waardoor deze methode uitermate geschikt voor grote meetseries.

De voorlast bedraagt 10 kgf, terwijl de totale meetlast, dat wil zeggen voorlast plus hoofdlast, gelijk is aan 60, 100 of 150 kgf. Een hardheidseenheid komt bij Rockwell in principe overeen met een indringdiepte van 0,002 mm. Opdat een hoge hardheid een groot getal oplevert, wordt vanaf 100 teruggeteld (vanaf 130 bij HRB): een indringdiepte van 45 geeft bijvoorbeeld een hardheid HRC 55.

Bij het meten van harde materialen wordt een diamantkegel met een tophoek van  $120^\circ$  gebruikt, terwijl voor andere materialen kogels met een diameter van 1/8 of 1/16 inch worden gebruikt. Afhankelijk van de gekozen combinatie van indruklichaam en belasting spreken we over Rockwell A, B, C, enzovoort. Tabel A.4 geeft een beknopt overzicht van de verschillende mogelijkheden.

Bij het uitvoeren van hardheidsmetingen moet men erop letten, dat er voldoende materiaal aanwezig is voor plastische en elastische deformatie. Omdat bij Rockwell de indrukkingen relatief diep zijn, kan daarom niet aan dunne lagen gemeten worden. Uit ervaring weet men



dat de materiaal- of laagdikte minstens  $10 \times$  groter moet zijn dan de blijvende indringdiepte. Omdat bij Rockwellmetingen de hardheid direct uit de indringdiepte wordt bepaald, is ook de minimale materiaaldikte eenvoudig te berekenen (zie Tabel A.5).

Tabel A.4: Veelgebruikte typen hardheidsmetingen volgens Rockwell

Aanduiding	Indruklichaam:	Belasting [kgf]
HRA	diamant	60
HRB	kogel 1/16"	100
HRC	diamant	150
HRD	diamant	100
HRE	kogel 1/8"	100
HRF	kogel 1/16"	60
HR15T	kogel 1/16"	15
HR30N	diamant	30

Overigens is om de diktebeperking enigszins te omzeilen *superficial Rockwell* ontwikkeld. De belastingen zijn hierbij lager, namelijk 15, 30 of 45 kgf bij een voorlast van 3 kgf. De aanduiding hiervan is bijvoorbeeld 15T bij gebruik van de kogel en 15N bij de diamant en een belasting van 15 kgf. Bij superficial Rockwell komt één hardheidseenheid overeen met slechts 0,001 mm.

Tabel A.5: Minimum materiaaldikte bij hardheidsmetingen volgens Rockwell

Hardheid	Indringdiepte		Minimum dikte [mm]
	[eenheden]	[mm]	
HRC = 60	$100 - 60 = 40$	$40 \times 0,002 = 0,08$	$10 \times 0,08 = 0,8$
HRB = 80	$130 - 80 = 50$	$50 \times 0,002 = 0,10$	$10 \times 0,10 = 1,0$
HR30N = 80	$100 - 80 = 20$	$20 \times 0,001 = 0,02$	$10 \times 0,02 = 0,2$

In Tabel A.6 zijn de voor- en nadelen van de Rockwell hardheidsmeting samengevat.

Tabel A.6: Voor- en nadelen van de hardheidsmeting volgens Rockwell

Voordelen	Nadelen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• snelle metingen</li> <li>• gemakkelijk te digitaliseren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• foutieve bediening en beschadiging (afplatten van de kogel) geven foutieve resultaten die niet direct opvallen</li> <li>• geen doorlopende schaal voor hard en zacht materiaal</li> <li>• geen dunne lagen</li> </ul>

### **Bediening van de hardheidsmeters volgens Rockwell**

- Kies de juiste combinatie van indruklichaam en belasting.

- In geval van twijfel altijd die combinatie kiezen die geschikt is voor harde materialen.
- Plaats het proefstuk op de tafel. Het proefstuk moet stabiel liggen, dus eerst bramen wegslijpen.
- Breng de voorlast aan. Draai voorzichtig het proefstuk tegen het indruklichaam aan m.b.v. de schroefspindel. Zodra beide wijzers op de klok op de markering staan (stip voor de kleine wijzer en SET voor de grote) is de voorlast aangebracht. De hefboom voor het ontlasten van de hoofdlast moet naar voren wijzen.
- Breng de hoofdlast aan.
- Door even op de beugel onderaan de schroefspindel te tikken wordt de hoofdlast langzaam aangebracht. De ontlasthefboom draait nu rustig naar achteren. Let op dat het indruklichaam niet te diep in het proefstuk zakt. Bij Rockwell C is dit  $(100-20) = 80$  eenheden en voor elastische deformatie nemen we de helft, zodat de totale verplaatsing ca. 140 eenheden is.
- Zodra de hefboom tot rust komt is de hoofdlast aangebracht en kan de hefboom weer in de ontlastpositie gebracht worden.
- Lees op de klok de hardheid af.
- Draai de schroefspindel omlaag en verwijder het preparaat zonder tegen het indruklichaam te stoten.

## Appendix B

### Vergelijkingstabellen Hardheid

Tabel B.1: Vergelijkingstabel voor staal tussen Rockwell-, Brinell- en Vickershardheid en de treksterkte

Vickers HV	Brinell HB	Rockwell		Trek- sterkte [MPa]	Vickers HV	Brinell HB	Rockwell		Trek- sterkte [MPa]
		HRB	HRC				HRB	HRC	
80	76,0			255	285	271		27,8	915
85	80,7	41,0		270	290	276		28,5	930
90	85,5	48,0		285	295	280		29,2	950
95	90,2	52,0		305	300	285		29,8	965
100	95,0	56,2		320	310	295		31,0	995
105	99,8			335	320	304		32,2	1030
110	105	62,3		350	330	314		33,3	1060
115	109			370	340	323		34,4	1095
120	114	66,7		385	350	333		35,5	1125
125	119			400	360	342		36,6	1155
130	124	71,2		415	370	352		37,7	1190
135	128			430	380	361		38,8	1220
140	133	75,0		450	390	371		39,8	1255
145	138			465	400	380		40,8	1290
150	143	78,7		480	410	390		41,8	1320
155	147			495	420	399		42,7	1350
160	152	81,7		510	430	409		43,6	1385
165	156			530	440	418		44,5	1420
170	162	85,0		545	450	428		45,3	1455
175	166			560	460	437		46,1	1485
180	171	87,1		575	470	447		46,9	1520
185	176			595	480	(456)		47,7	1555
190	181	89,5		610	490	(466)		48,4	1595
195	185			625	500	(475)		49,1	1630
200	190	91,5		640	510	(485)		49,8	1665
205	195	92,5		660	520	(494)		50,5	1700
210	199	93,5		675	530	(504)		51,1	1740
215	204	94,0		690	540	(513)		51,7	1775
220	209	95,0		705	550	(523)		52,3	1810
225	214	96,0		720	560	(532)		53,0	1845
230	219	96,7		740	570	(542)		53,6	1880
235	223			755	580	(551)		54,1	1920
240	228	98,1	20,3	770	590	(561)		54,7	1955
245	233		21,3	785	600	(570)		55,2	1995
250	238	99,5	22,2	800	610	(580)		55,7	2030
255	242		23,1	820	620	(589)		56,3	2070
260	247	(101)	24,0	835	630	(599)		56,8	2105
265	252		24,8	850	640	(608)		57,3	2145
270	257	(102)	25,6	865	650	(618)		57,8	2180
275	261		26,4	880	660			58,3	
280	266	(104)	27,1	900	670			58,8	

Tabel B.2: Richtcijfers voor aluminium voor de vergelijking van Rockwellhardheid (HR15T) en Vickershardheid (HV)

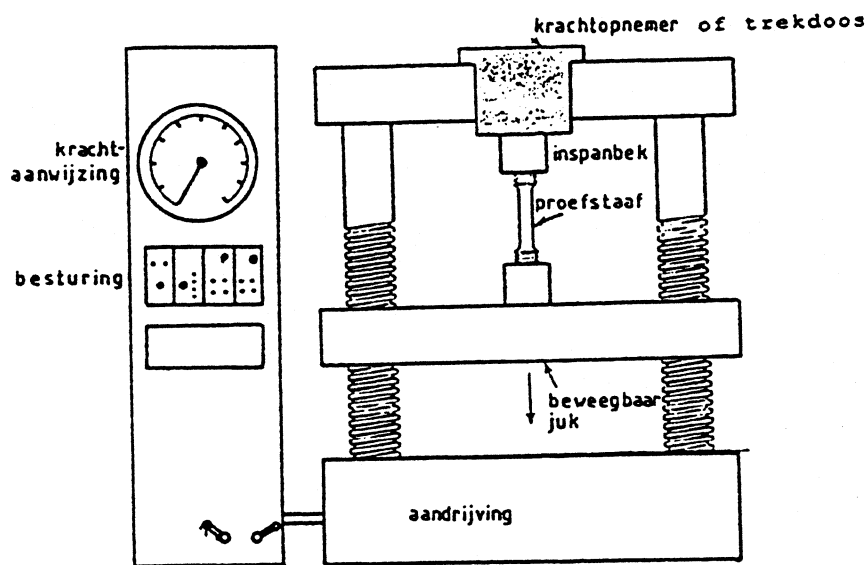
HV ( $F = 10 \text{ kgf}$ ) [kgf/mm <sup>2</sup> ]	HR15T
200	90,6
190	90,0
180	89,4
170	88,7
160	88,0
150	87,1
140	86,2
130	85,0
120	83,7
110	82,2
100	80,3
96	79,5
92	78,6
88	77,6
84	76,5
80	75,3
76	74,0
72	72,5
68	70,8
64	69,0
60	66,9
56	64,5
52	61,8
48	58,6
44	54,8
40	50,3
38	47,7
36	45,0
34	41,7
32	38,2
30	34,0
28	29,5
26	24,4
24	18,1
22	11,1
20	2,3

# Appendix C

## De Trekproef

### C.1 Achtergrond

Van alle proeven die er voor dienen om de mechanische eigenschappen van een materiaal in een getal uit te drukken, is de trekproef wellicht de belangrijkste. Bij deze proef wordt een proefstaaf (trekstaaf) met behulp van een trekbank (zie Fig. C.1) met een constante<sup>4</sup> snelheid gerekt. De voor een gegeven verlenging benodigde belasting wordt daarbij als een afhankelijke grootheid gemeten.



Figuur C.1: Schematische afbeelding van een trekbank

### Spanning-rekdiagram

Een trekproef heeft als direct resultaat een kracht-verlengingdiagram. Gewoonlijk worden echter kracht en verlenging omgerekend naar spanning en rek. In een trekstaaf is de spanning  $\sigma$  de verhouding van de kracht  $F$  die erop werkt en het oorspronkelijk oppervlak van de dwarsdoorsnede  $A_0$ :

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (\text{C.1})$$

De rek  $\varepsilon$  is gelijk aan de lengteverandering  $\Delta l$ , betrokken op een oorspronkelijke meetlengte  $l_0$ , gedeeld door deze meetlengte  $l_0$ :

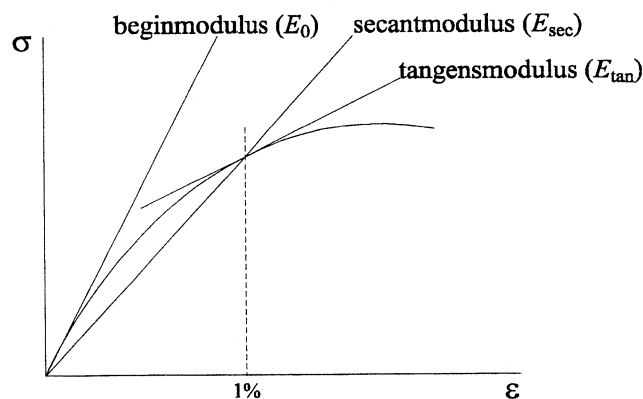
<sup>4</sup> De besturing van de oude hydraulische banken is van dien aard dat geen constante treksnelheid ingesteld kan worden.

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (\text{C.2})$$

Op deze wijze ontstaat een spanning-rekdiagram, dat in eerste benadering niet meer afhankelijk is van de proefstaafafmetingen.

In het beginstadium van de trekproef vervormen veel materialen (metaal, keramiek) uitsluitend *elastisch*; dat wil zeggen, de proefstaaf herneemt precies zijn oorspronkelijke lengte als de belasting weggenomen wordt. Op een gegeven moment treedt bij verder rekken, bij kunststoffen overigens al vanaf het begin, *plastische* vervorming op. Als dan de belasting weggenomen wordt, verdwijnt het elastisch deel van de verlenging, maar blijft een blijvende of plastische verlenging over.

Bij verdergaande plastische vervorming kan op een gegeven moment *insnoering* optreden: er treedt plaatselijk een doorsnedevermindering op, waarna verdere vervorming zich daar concentreert. Bij het begin van insnoering bereikt de spanning, die op de oorspronkelijke doorsnede  $A_0$  is gebaseerd (verg. C.1), een maximale waarde. Bij metalen wordt dit maximum de *treksterkte* genoemd en neemt de spanning daarna af totdat de proefstaaf bezwijkt. De spanning op dat moment wordt de *breuksterkte* genoemd. Bij kunststoffen kan de spanning na insnoering weer verder oplopen. Overigens is voor materialen die breken zonder in te snoeren de treksterkte gelijk aan de breuksterkte.



Figuur C.2: Definitie van de verschillende elasticiteitsmoduli voor kunststoffen

### Elasticiteitsmodulus

Het verband tussen spanning en rek in het elastische gebied is voor metalen en keramische materialen lineair volgens de wet van Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{C.3})$$

Hierin is  $E$ , de *elasticiteitsmodulus*, een materiaalconstante. In rubber en veel kunststoffen is het verband tussen spanning en rek niet lineair. Om dan toch het materiaal te kunnen karakteriseren worden de *beginmodulus*  $E_0$ , de *secantmodulus*  $E_{sec}$  en/of de *tangensmodulus*  $E_{tan}$  ge-

bruikt. Deze laatste twee moduli zijn gedefinieerd bij een afgesproken vervorming, bijvoorbeeld 1% (zie Fig. C.2 en [1], § 4.5.2.1).

### **Rekgrens, vloeigrens**

Plastische vervorming is veelal ongewenst. Daarom is het van belang te weten tot welk spanningsniveau het materiaal belast kan worden zonder dat dit optreedt. Bij metalen ligt deze spanning op het punt in het spanning-rekdiagram waar afgeweken wordt van de moduluslijn (dit is de lijn gedefinieerd door de wet van Hooke). Omdat het moeilijk is dit punt exact te bepalen wordt veelvuldig gebruikgemaakt van een benadering, de *0,2%-rekgrens* ( $R_{p0,2}$ ). Dit is de spanning waarbij een plastische (blijvende) rek van 0,2% optreedt.

In staal met een laag koolstofgehalte en in een aantal andere metaallegeringen treedt het zogenaamde *vloeien* op; plastische vervorming begint bij de *bovenste vloeigrens* ( $R_{eH}$ ), waarna de spanning tot de *onderste vloeigrens* ( $R_{eL}$ ) afneemt. Dit gedrag is een gevolg van plotseling beginnende plastische vervorming die begint bij een punt waar een spanningsconcentratie optreedt, meestal één van de inspanbekken, waarna deze vervorming zich in de vorm van waarneembare banden (Lüders-banden) over de hele proefstaaf uitbreidt. Gedurende dit proces blijft de spanning een tijdje min of meer constant.

### **Ware spanning en ware rek**

Wanneer een trekstaaf langer wordt, zal het oppervlak van de dwarsdoorsnede kleiner worden. Tijdens elastische vervorming is deze verandering verwaarloosbaar, maar bij plastische vervorming kan de oppervlakteafname aanzienlijk zijn. Het is daarom handig om, zodra grotere (plastische) vervormingen optreden, de begrippen spanning en rek opnieuw te definiëren. Hiervoor worden de *ware spanning* en de *ware rek* gebruikt. De ware spanning is de verhouding van de kracht op de proefstaaf en de momentane waarde van het oppervlak  $A_m$  van de dwarsdoorsnede dat deze spanning draagt.

$$\sigma_w = \frac{F}{A_m} \quad (\text{C.4})$$

De ware rek van een proefstaaf met een oorspronkelijke meetlengte  $l_0$  die gerekt is tot de momentane meetlengte  $l_m$  wordt:

$$\epsilon_w = \ln \frac{l_m}{l_0} \quad (\text{C.5})$$

De ware spanning bereikt, in tegenstelling tot de praktische spanning (verg. C.1), niet zijn grootste waarde bij het begin van de insnoering, maar neemt in plaats daarvan bij toenemende rek verder toe en bereikt zijn maximum bij het breekpunt.

Omdat insnoeren een niet-homogene vervorming is, kan na het begin hiervan niet langer de

totale meetlengte van de proefstaaf gebruikt worden voor de bepaling van de rek. Echter, als veronderstelt wordt dat bij plastische vervorming geen volumeverandering optreedt, wat voor veel materialen een reële veronderstelling is, is het volgende verband geldig:

$$A_0 l_0 = A_m l_m \quad (\text{C.6})$$

Tijdens insnoeren kan daarom met de momentane waarde van het kleinste oppervlak ( $A_m$ ) de ware rek berekend worden:

$$\epsilon_w = \ln \frac{A_0}{A_m} \quad (\text{C.7})$$

### Verstevinging

In veel materialen gaat plastische vervorming gepaard met *verstevinging*, dat wil zeggen de spanning moet steeds hoger worden om een verdere verlenging te bewerkstelligen. Met behulp van de ware spanning en de ware rek kan dit verschijnsel algebraïsch worden uitgedrukt in de vorm van de relatie van Lüdwick:

$$\sigma_w = a \epsilon_w^n \quad (\text{C.8})$$

Hierin is  $a$  een constante en  $n$  de zogenaamde *verstevingingscoëfficiënt*. Deze coëfficiënt is altijd kleiner dan 1.

## C.2 Bediening van de trekbanken

Bij het practicum zijn een aantal hydraulische en twee elektronisch gestuurde elektro-mechanische trekbanken aanwezig. De hydraulische banken hebben, behalve het meetbereik, geen instelmogelijkheid. De elektro-mechanische banken (Instron- en Tiratest-trekbank) kunnen volledig gestuurd worden. Voor deze banken volgt een korte beschrijving van de bediening<sup>5</sup>.

### C.2.1 De INSTRON-trekbank

De Instron-trekbank bezit twee aan/uit schakelaars. Een voor de aandrijving, gesitueerd onder het schrijfbld op het voorpaneel en een voor de computer achter de monitor binnen in de kast. Na het inschakelen van de computer verschijnt na enige tijd een keuzemenu met twee meetprogramma's en een evaluatieprogramma:

1. een *manual control* meetprogramma voor het meten met of zonder rekmeter (trekproef/drukproef)
2. een *tensile Mod. Yld.* meetprogramma voor meten met of zonder rekmeter (trekproef)

---

<sup>5</sup> Wat tussen < > is geplaatst zijn toetsen die ingedrukt moeten worden.



### 3. evaluatieprogramma voor databestanden op diskettes.

Kies met <↑> of <↓> het programma MANUAL CONTROL. Na <Enter> volgt:

#### **Options**

<T>/<C>	Trekproef/drukproef
<H>/<L>	Hoge/lage snelheid. Plaats ook de hefboom rechts naast het frame in de goede stand: naar achter is hoog, naar voren is laag.
<+>/<->	Treksnelheid verhogen/verlagen
<1>..<4>	Keuze meetcel (1 = 50000, 2 = 5000, 3 = 500, 4 = 50 N). Let op, dit is niet de keuze voor het meetbereik!
<X>	Verplaatsing traverse 50/500 mm. <X> herhaald indrukken voor keuze.
<E>	Extensometerbereik 1 - 500 mm. <E> herhaald indrukken voor keuze.
<B>	Naamgeving van de test
<F9>	Meetscherm

#### **Meetscherm**

Aanpassen van de schalen gaat als volgt:

- Met <+> en <-> is de treksnelheid te veranderen. Zie aflezing rechts boven in het scherm  $S = \dots\dots\text{mm/min}$ .
- met <←> de X-schaal voor de verlenging zo klein mogelijk instellen
- met <↓> de Y-schaal voor de kracht zo klein mogelijk instellen
- krachtaanwijzing op 0 stellen met loadcell-versterker links op voorpaneel (C is grof- en F is fijninstelling)
- als een extensometer wordt gebruikt, de verplaatsing op 0 stellen op voorpaneel (paneel met blauwe aansluitplug); linker knop is grof, rechter knop is fijn.
- proefstaaf inspannen

#### **Gage length instellen**

Rechts bovenaan het frame:

G.L. op 0

RETURN op 7,8

Als de machine stopt tijdens een trekproef waarbij een grote verlenging optreedt, dan deze twee knoppen opnieuw verdraaien.

#### **Starten van de proef**

<F3>/<F1>      Trekproef/drukproef starten

Door tijdens de proef op de spatiebalk te drukken kan de momentele waarde van F en S worden opgeslagen (max. 5 meetpunten).

### Stoppen van de proef

- <ESC> stopt de trek- of drukproef (moet na een proef altijd worden ingedrukt, want het manual programma kent geen breukdetectie)
- Proefstuk verwijderen
- Met <F4> traverse terugbrengen naar uitgangspositie (gage length)

### Evaluatie grafiek

<F5>	Review graph
<F9>	Evaluate curve
<^PgUp/^PgDn>	Plaatsen datapunten in de grafiek (kracht en verplaatsing)
<END>	Stoppen

### Uitvoer gegevens

<F6>	Print data
<^F7>	Print grafiek
<^F8>	Save grafiek op 360Kb diskette met <i>subdirectory</i> "TESTCURV"
<F10>	Volgende proef

## C.2.2 De TIRATEST-trekbank

### Bediening

- Schakel de trekbank aan met de schakelaar onder het schrijfblad.
- Zet de schakelaar TEST POSITION (rechts boven) in stand RAPID.
- Breng met <↑> of <↓> de traverse in de juiste positie.
- Zet de schakelaar in de stand STOP (de machine stopt nu na breuk van de proefstaaf, in de stand RETURN loopt de machine direct terug naar de beginwaarde).
- Plaats de proefstaaf in de bekken.
- Controleer of de drukschakelaar boven <↑> uitstaat (ingedrukt is voor gebruik van re-kopnemers).
- Voer de gewenste gegevens in met behulp van het toetsenbord. De groene lampjes zijn voor gegevensinvoer, de rode voor uitlezen van meetgegevens. Bevestig elke invoer met <\*>.
- Stel de treksnelheid in. De hefboom achter op het frame is voor grofinstelling, de draai-knop SPEED is voor de fijninstelling. Zie de grafiek bij de machine voor de juiste instellingen.
- Druk <D> en <P> in (de lampjes ernaast gaan branden) voor een print van de meetgrafiek en meetwaarden.
- Start de trekproef door <↓> te drukken (lamp gaat branden).
- Nadat de staaf gebroken is, deze verwijderen en <↑> indrukken. De traverse loopt nu te-

rug. Is de traverse ca. 0,2 mm van de beginpositie, dan geeft de machine een pieptoon en uitvoer op de printer. Na het printen kan een volgende staaf getrokken worden.

### **Instellingen invoeren**

Met behulp van <I> alle instelpunten op kaart AM3 aflopen. Indien al waarden ingevoerd zijn bij een bepaald punt, dan deze wissen met <C> en vervolgens de nieuwe waarde invoeren en bevestigen met <\*> (de printer drukt de ingevulde waarde af). De in te vullen waarden zijn:

DAT1,

DAT2,

DAT3: hier kunnen bijvoorbeeld de datum of een proefstuknummer ingevoerd worden, (mogen overgeslagen worden)

DIV oppervlakte van de doorsnede invoeren om bij de uitvoer  $N/mm^2$  te krijgen. Voor uitvoer in [N] een "1" invoeren. Bij het afdrukken van de meetwaarden zal de waarde van de  $E$ -modulus nu echter niet meer kloppen.

LØ de meetlengte invoeren

FS, FE twee waarden invoeren die in het lineaire deel van de trekkromme liggen. Tussen deze waarden trekt de machine een lijn en voor de bepaling van de rekgrens  $R_{p0,2}$  berekent de bank op welk moment de meetwaarde hier 0,2% van afwijkt. Indien nodig eerst met een proefstaaf de grenswaarden van het lineaire deel van de trek-kromme bepalen.

A1 hier kan een rekpercentage ingevoerd worden, bijv. 0,2%. De bijbehorende kracht is F1.

A2 ook hier een rekpercentage invoeren, bijv. 1% (moet groter zijn dan A1)

Δ2 hier een waarde invullen voor breukdetectie. Neemt de gemeten kracht met Δ2 af, dan beschouwt de machine dit als staafbreek en stopt. De waarde voor Δ2 moet kleiner zijn dan FH (de maximale kracht) om de machine na staafbreek te laten stoppen.



## Appendix D

### Determinatie van Kunststoffen

Tabel D.1: Systematische determinatie van kunststoffen

Stap	Kenmerk	Waarneming	Opmerkingen	Conclusie
1	a	<b>uiterlijk</b>	Schuimvormig	cellulair: zie 2
	b		Niet schuimvormig	massief: zie 3
	c		Niet schuimvormig	Het materiaal is een folie. massief: zie 3
2	a	<b>aanvoelen</b>	Zacht	Na kortstondig indrukken herneemt het schuim de oorspronkelijke vorm. zacht schuim: zie 4
	b		Star	Als het indrukbaar is, wordt de oorspronkelijke vorm vernietigd. hard schuim: zie 5
3	a	<b>uiterlijk</b>	Homogene structuur	Materiaal is niet met vezels versterkt (controleer dit door breken). niet-gewapende kunststof of rubber: zie 6
	b		Geen homogene structuur	Materiaal is met vezels versterkt (controleer dit door breken; soms zijn de vezels zo kort dat een microscoop nodig is om dit aan te tonen). gewapend kunststof: zie 7
4	a	<b>gedrag bij verwarming</b>	Bij sterke verwarming buiten de vlam treedt geen smelten op.	Enkele thermohardende kunststoffen kunnen verweken, o.a. polyurethaan. Na afkoeling blijft het materiaal kleverig. zie 8c thermoharder: zie 8
	b		Bij sterke verwarming buiten de vlam verweekt of smelt het materiaal.	In zeldzame gevallen is de verweking moeilijk te constateren, o.a. bij PTFE. PTFE zonder vulstoffen wordt doorzichtig bij sterke verwarming. thermoplast: zie 9
5	a	<b>gedrag bij verwarming</b>	Bij sterke verwarming buiten de vlam treedt geen verweking op.	thermoharder: zie 8
	b		Bij sterke verwarming buiten de vlam verweekt of smelt het materiaal.	Soms verweekt het schuim bij verwarming en blijft na afkoeling kleverig vloeibaar. Dit is een gevolg van ontleding. zie 8c vermoedelijk thermoplast: zie 9
6	a	<b>mechanisch gedrag</b>	Veerkrachtig	rekbaar rubber
	b		Kan hard zijn of soepel, maar niet veerkrachtig of rekbaar.	geen rubber

Vervolg Tabel D.1: Systematische determinatie van kunststoffen

Stap	Kenmerk	Waarneming	Opmerkingen	Conclusie	
7	<b>brand- gedrag</b>	a	Brandt moeilijk en dooft meestal na weghalen van de vlam. Na doven treedt een lysollucht op. Het is een plaatmateriaal, meestal bruin, zeer taai met vezelig breukvlak en ruikt naar lysol.		<b>PF</b> (fenolhars-hardweefsel)
		b	Brandt met sterk roetende vlam; ruikt na uitblazen naar hyacinten en karamel. Het is zeer sterk en het breukvlak zeer vezelig.	Aan GUP worden vaak chloor- of broomhoudende stoffen toegevoegd om ze zelfdovend te maken. In dit geval doven ze na weghalen van de vlam. M.b.v. de koperdraadtest kan chloor of broom aangetoond worden.	<b>GUP</b> (gewapend onverzadigd polyester)
		c	Brandt met oranje-gele roetende vlam.; de geur na uitblazen is scherp. Sterk en stijf materiaal.	Aan EP worden vaak chloor- of broomhoudende stoffen toegevoegd om ze zelfdovend te maken. In dit geval doven ze na weghalen van de vlam. M.b.v. de koperdraadtest kan chloor of broom aangetoond worden.	<b>EP</b> (epoxyhars)
8	<b>brand- gedrag</b>	a	Na het weghalen van de vlam dooft het materiaal; het vechte gedeelte ruikt naar maggi.		<b>UF</b> (ureumformaldehydeschuim)
		b	Na het weghalen van de vlam dooft het materiaal; het vechte gedeelte ruikt naar lysol.		<b>PF</b> (fenolhars-schuim)
		c	Brandt gemakkelijk, met een roetende vlam. Na uitblazen treedt een scherpe geur op. Na afkoeling blijft het materiaal kleverig door chemische ontleding.		<b>PUR</b> (polyurethaanschuim)
9	<b>brand- gedrag</b>	a	Brandt met een sterk roetende vlam. Na weghalen van de vlam blijft het materiaal branden. Na uitdoven treedt een geur van hyacinten op.	Aan PS worden vaak chloor- of broomhoudende stoffen toegevoegd om ze zelfdovend te maken. In dit geval doven ze na weghalen van de vlam. M.b.v. de koperdraadtest kan chloor of broom aangetoond worden.	<b>PS</b> (polystyreenschuim)
		b	Verweekt en verkoolt in de vlam. Tijdens en na het branden treedt een scherpe geur op (zoutzuur).		<b>PVC</b> (polyvinylchloride)

Vervolg Tabel D.1: Systematische determinatie van kunststoffen

Stap	Kenmerk	Waarneming	Opmerkingen	Conclusie
10 a	<b>brand- gedrag</b>	Is moeilijk tot ontbranding te krijgen. Brandt met een zwak roetende vlam en heeft een droog brandfront. Na het uitblazen treedt een scherpe geur op (zoutzuur).		<b>CR</b> (chloropreenrubber)
b		Brandt rustig met een heldere, enigszins roetende vlam. Na uitblazen treedt een zoete geur op; het brandfront is kleverig; het materiaal druipt.		<b>IIR</b> (butylrubber)
c		Brandt met een gele, sterk roetende vlam; na uitblazen ruikt het naar hyacinten.		<b>SBR</b> (styreenbutadieenrubber)
d		Brandt fel met een droog brandfront; veel witte rook; resterende witte as blijft nagloeien.		siliconenrubber
e		Brandt heftig en sterk roetend met kleverig brandfront. Na het uitblazen treedt een karakteristieke geur op.		<b>NR</b> (natuurrubber)
f		Vlam spettert en knettert met een sterke roet-ontwikkeling.		<b>NBR</b> (butadieenacrylnitrilrubber)
11 a	<b>gedrag bij verwarming</b>	Een afgesneden spaan wordt week en smelt bij sterke verwarming (buiten de vlam).		thermoplast: zie 12
b		Bij sterke verwarming buiten de vlam verweekt of smelt het materiaal niet. Er kan geen spaan worden afgesneden, het materiaal brokkelt af.		thermoharder: zie 13
c		Men kan wel een spaan afsnijden, maar deze smelt niet zichtbaar. Wordt eerst doorzichtig. Bij verwarming in de vlam verdamppt het langzaam met rode gloed en wasachtige geur.		<b>PTFE</b> (polytetrafluoretheen)
12 a	<b>dichtheid</b>	Na onderdompeling in water zinkt het (aanhangende luchtbellen verwijderen).	Relatieve dichtheid is groter dan 1.	zie 14
b		Na onderdompeling in water komt het bovendrijven.	Relatieve dichtheid is kleiner dan 1.	zie 15

Vervolg Tabel D.1: Systematische determinatie van kunststoffen

Stap	Kenmerk	Waarneming	Opmerkingen	Conclusie
13 a	<b>brand- gedrag</b>	Bij verhitting in de vlam brandt het, na wegnemen van de vlam dooft het materiaal. Prikkelende lysolgeur. Donkere kleur (zwart, bruin of donker groen). Stijf, hard en bros. Breukvlak ruikt naar lysol.		<b>PF (fenolhars)</b>
b		Bij sterke verhitting treedt na het uit de vlam nemen een sterk prikkelende formalinegeur op, die aan "maggi" doet denken. De stof brandt buiten de vlam niet door. Het materiaal is zeer stijf en heeft meestal een lichte kleur.		zie 16
14 a	<b>brand- gedrag</b>	Dooft of brandt moeizaam door na weghalen van de vlam.		zie 18
b		Brandt gemakkelijk, met sterk roetende vlam.		zie 17
c		Brandt gemakkelijk, met lichtgevende, weinig of niet roetende en "ruisende" vlam. Na het uitblazen is een sinaasappelucht waarneembaar.		<b>PMMA (poly-methylmethacrylaat)</b>
d		Brandt gemakkelijk, met gele vlam. Na uitblazen een geur van ranzige boter.		<b>CAB (celluloseacetaatbutyraat)</b>
e		Bijna onzichtbare, bleekblauwe vlam. Niet roetend, ruikt naar formaldehyde na het uitblazen.		<b>POM (polyoxyetheen)</b>
f		Brandt met geelbruine vonken en druppelt; ruikt naar smeulend papier en azijn.		<b>CA (celluloseacetaat)</b>



Vervolg Tabel D.1: Systematische determinatie van kunststoffen

Stap	Kenmerk	Waarneming	Opmerkingen	Conclusie
15 a	<b>brand- gedrag/ aanvoelen</b>	Brandt met lichtgevende, enigszins roetende vlam. Na uitblazen een zoete geur. Is rubberachtig aanvoelend.		<b>PIB</b> (polyisobuteen)
b		Brandt met lichtgevende, enigszins roetende vlam, terwijl brandende druppels vallen. Na uitblazen een kaarslucht. Voelt vettig aan en is gemakkelijk buigbaar.		<b>LDPE</b> (lage dichtheid polyetheen)
c		Brandt met lichtgevende, enigszins roetende vlam, terwijl brandende druppels vallen. Na het uitblazen heeft het de geur van een brandende kaars, soms met een scherpe bijgeur. De stof voelt niet of weinig vettig aan en is vrij stijf tot stijf.		andere polyolefine dan PIB of LDPE: zie 19
16 a	<b>aantasting</b>	Bij kortstondig koken (5 minuten) met 2% zoutzuur slaat oppervlak na afdrogen meestal niet wit uit.		<b>MF</b> (melamineformaldehyde-hars)
b		Bij kortstondig koken (5 minuten) met 2% zoutzuur slaat oppervlak na afdrogen wit uit. Materiaal is vaak iets doorschijnend en heeft soms een niet geheel glad oppervlak (sinaasappelhuid).		<b>UF</b> (ureumformaldehyde-hars)
17 a	<b>mechanisch gedrag</b>	Materiaal is hard en stijf; het is enigszins bros tot uitgesproken bros. Voordat breuk optreedt wordt het buigvlak niet wit.		zie 20
b		Materiaal is vrij stijf, enigszins verend. Het breekt slechts na sterk buigen of zelfs pas na herhaald sterk buigen. Voordat breuk optreedt wordt het buigvlak enigszins of zelfs uitgesproken wit.		zie 21

Vervolg Tabel D.1: Systematische determinatie van kunststoffen

Stap	Kenmerk	Waarneming	Opmerkingen	Conclusie
18 a	<b>brand- gedrag</b>	Vlam roet niet. Bij weghalen van de vlam dooft het materiaal vanzelf; er treedt een geur op van net aan de kook komende groene erwten of van verbrand haar. Het materiaal is hoornachtig en nagenoeg onbreekbaar.		<b>PA 6 of PA 6.6</b> (polyamide; ook wel nylon)
b		Vlam roet niet. Na weghalen van de vlam brand het materiaal door. Na uitblazen treedt een geur van net aan de kook komende grauwe erwten of verbrand haar op.		<b>PA 11 of PA 12</b> (polyamide; ook wel nylon)
c		Brandt met roetende vlam;en dooft bij weghalen van de vlam. Materiaal verkoolt met bobbel en blaren, er treedt een ly-solachtige geur op.		<b>PC</b> (polycarbonaat)
d		Brandt met sterk roetende vlam; het materiaal dooft na het weghalen van de vlam. Zowel in de vlam als na het doven treedt een scherp prikkelende geur op (zoutzuur).		zie 22
19 a	<b>mechanisch gedrag</b>	Men kan vrij gemakkelijk met de nagel in het materiaal krassen.		<b>HDPE</b> (hoge dichtheid polyetheen)
b		Met de nagel kan men niet of moeilijk in het materiaal krassen		<b>PP</b> (polypropreen)
20 a	<b>aantasting</b>	Barst na onderdompeling in petroleum, meestal binnen 2 minuten, soms pas na 15 minuten. Hard, bros materiaal, klinkt bij het vallen duidelijk metaalachtig. Kan glashelder, transparant gekleurd of ondoorzichtig zijn.		<b>PS</b> (polystyreen)
b		Barst niet na onderdompeling in petroleum, ook niet na langere tijd. Vrij hard, iets bros materiaal. Klinkt bij het vallen enigszins metaalachtig. Is, bij dikkere doorsneden gezien, zwak geelachtig of zwak blauwachtig.	In gekleurde vorm kan het echter ook transparant gekleurd of ondoorzichtig wit of gekleurd zijn.	<b>SAN</b> (styreen-acrylnitril copolymeer)

Vervolg Tabel D.1: Systematische determinatie van kunststoffen

Stap	Kenmerk	Waarneming	Opmerkingen	Conclusie	
21	<b>mechanisch gedrag</b>	a	Bij sterk buigen slaat buigvlak duidelijk wit uit. Dof of eiglanzend oppervlak.	Het oppervlak is zelden sterk glanzend.	<b>PS/SBR</b> (slagvast polystyreen; ook wel <b>IPS</b> of <b>HIPS</b> (high impact polystyreen))
		b	Bij sterk buigen wordt buigvlak wel witachtig, maar niet uitgesproken wit. Het oppervlak is meestal sterk glanzend.		<b>ABS</b> (acrylnitrilbutadiëenstyreen copolymeer)
22	<b>mechanisch gedrag</b>	a	Hard materiaal; breekt door een snelle slag meestal bros.		<b>PVC</b> (hard polyvinylchloride)
		b	Hard materiaal; is niet bros	Met rubber gemodificeerd.	<b>PVC</b> (slagvast polyvinylchloride)
		c	Soepel, leerachtig tot rubberachtig aanvoelend	Niet als rubber rekbaar.	<b>PVC</b> (weekgemaakt of "geplastificeerd")
		d	Zacht schuim		<b>PVC</b> (weekgemaakt of "geplastificeerd" schuim)



## Referenties

1. P. van Mourik en J. van Dam, *Materiaalkunde voor Ontwerpers*, Delftse Universitaire Pers, Delft, 1996
2. H. Hermans, *Duntrekken*, De Constructeur, 1981, no. 5, pp. 56 - 62 — Practicum informatiemap 4.05
3. P.B. Mellor, *Deep-Drawing and Redrawing of Thin Sheet Materials*, Sheet Metal Industries, 1977, no. 12, pp. 1180 - 1188 — Practicum informatiemap 4.05
4. ASTM D 648 - 82, *Deflection Temperature of Plastics Under Flexural Load*, 1990 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 08.01, ASTM, 1990
5. G. den Ouden en B.M. Korevaar, *Metaalkunde deel 1*, Delftse Uitgevers Maatschappij, Delft, 1994

