

Versteviging van polycarbonaat

Citation for published version (APA):

Toonssen, P. J. (1994). *Versteviging van polycarbonaat*. (DCT rapporten; Vol. 1994.037). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1994

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

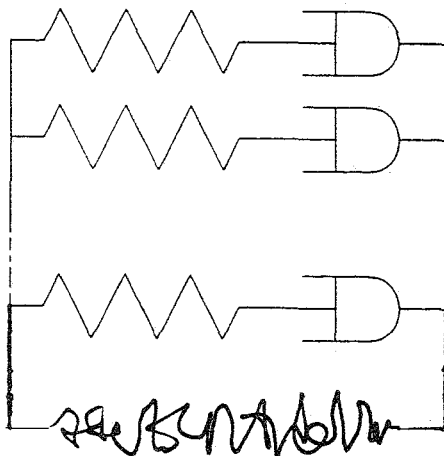
Versteving van polycarbonaat

P. J. Toonssen
WFW 94.037

Stageverslag
Technische Universiteit Eindhoven
Faculteit Werktuigbouwkunde
Vakgroep Fundamentele Werktuigkunde
Begeleider: Dr. Ir. L. E. Govaert
Eindhoven, Maart 1994

Samenvatting

Wanneer een polycarbonaat trekstaaf belast wordt met een oplopende kracht F , zal voor een bepaalde van de spanning insnoering optreden met het gevolg dat de spanning sterk daalt als functie van de rek. De oorzaak van deze insnoering is gelegen in het feit dat het materiaal inhomogeen deformeert. Om versteviging te constateren bij grote deformaties, waarbij het materiaal gemodelleerd kan worden gedacht als in figuur 1, is het nodig dat het materiaal homogeen deformeert.



Figuur 1 Model van een polymeer bij grote deformaties.

Men heeft op verschillende manieren getracht aan deze voorwaarde te voldoen, waarvan er één in de inleiding ter sprake zal komen. Een manier om een homogene deformatie te verkrijgen kan bereikt worden door het materiaal aan een trekproef te onderwerpen boven de glastemperatuur T_g (155 °C voor polycarbonaat) en het vervolgens zeer snel 'in te vriezen' bij een voldoende lage temperatuur, zodat de verkregen toestand gehandhaafd blijft. Een andere manier, welke als uitgangspunt is genomen voor dit verslag, is om het materiaal onder de glastemperatuur T_g met een trekkracht te belasten voorbij de vloeispanning σ_{vloci} en uit de gevormde nek een nieuw trekstaafje te vervaardigen, waarvan verondersteld mag worden dat het onder belasting homogeen vervormt. De resultaten van deze methode vindt u in dit verslag.

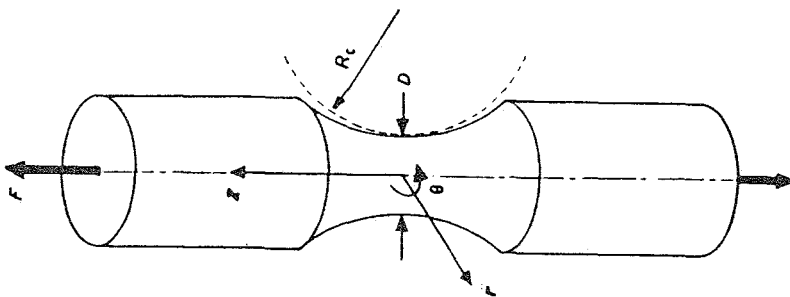
Inhoud.

1 Inleiding	3
2 Modelvorming	6
2.1 De modellerin	6
2.2 'Gaussian Theory'	7
2.3 Bepaling van σ_{nom}	8
2.4 Bepaling van $\dot{\epsilon}_{true}$	9
2.5 Homogene deformatie	10
2.6 Invloed van de voorrek λ	10
2.7 Invloed temperatuur T en reksnelheid $\dot{\epsilon}$	10
3 De experimenten	
3.1 Het materiaal	11
3.2 Voorrek als gevolg van temperatuur en banksnelheid	11
3.3 Vervaardiging van trekstaafjes	12
3.4 De opstelling	12
4 De resultaten	
4.1 Ware spanningsrek-krommen als functie van de temperatuur	14
4.2 Ware spanningsrek-krommen als functie van de opgelegde voorrek	15
4.3 Ware spanningsrek-krommen als functie van de reksnelheid	16
4.4 De tweede knik in de spanningsrek-krommen	17
5 Conclusies	19
Referenties	20

1 Inleiding.

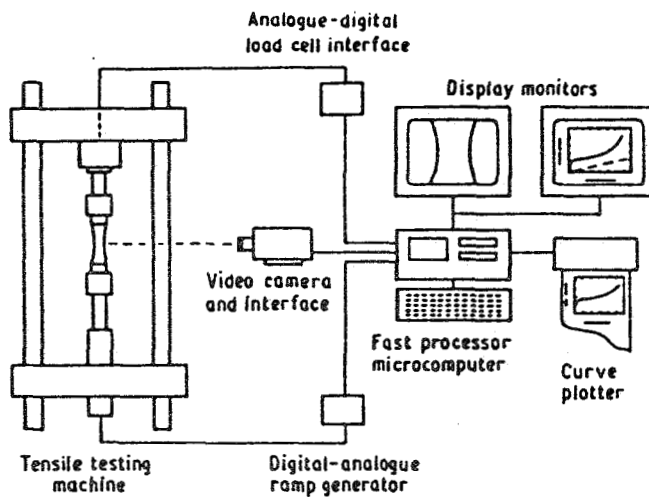
In vele industriële processen ondergaat het materiaal een multi-axiale deformatie die veel hoger is dan de corresponderende rek bij nekvorming in uni-axiale trekproeven. Ten behoeve van de optimalisatie van deze processen, is het essentieel om gebruik te maken van betrouwbare vergelijkingen, die het plastisch gedrag van een materiaal element voor grote deformaties beschrijven. Zulke vergelijkingen zijn vaak opgesteld in termen van variatie van de effectieve spanning tegen de effectieve rek, de reksnelheid en de temperatuur, $\sigma_{eff}(\epsilon_{eff}, \dot{\epsilon}_{eff}, T)$. Helaas zijn deze termen slecht gedefinieerd voor grote rekken omdat de conventionele meetprocedures inefficiënt worden zodra er nekvorming optreedt.

De meeste van de gepubliceerde spannings-rek krommen voor thermoplasten zijn van een beperkt theoretisch belang omdat het proefstuk niet homogeen vervormd is. Gedurende de laatste twintig jaren zijn verscheidene methoden gebruikt om de ware spanning - rek - krommes te vinden voor verschillende thermoplasten onder belasting. Slechts bij hoge uitzondering vindt de deformatie plaats op een homogene wijze. Gewoonlijk treden er inhomogene verschijnselen op, waarvan nekvorming en holtevorming enkele voorbeelden zijn. De rekken verschillen dan in grootte in de verschillende delen van het proefstuk. Alleen in de gevallen waarbij het polymeer reageert op een belasting door homogeen te vervormen óf waarbij dit het geval is door bestudering van een voldoende klein stukje volume van het proefstuk, is het mogelijk om het ware spanning-rek verband te meten. Een methode om ware spanning - rek - krommes te vinden is gecreëerd door G'Sell [2,3], waarbij gebruik wordt gemaakt van 'getailleerde' proefstaafjes met als doel de nekvorming tegen te gaan. Zo'n proefstaafje ziet u afgebeeld in figuur 1.1.



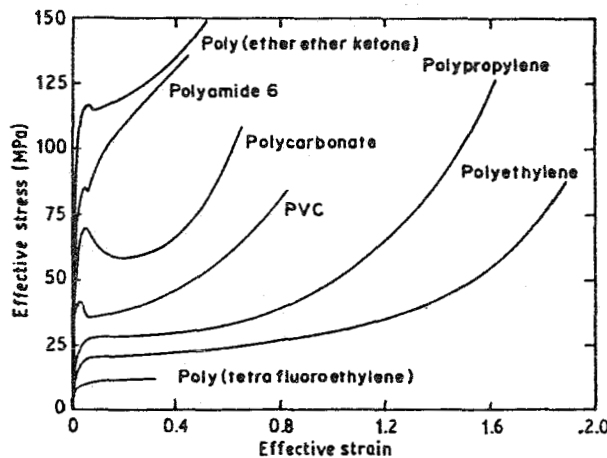
Figuur 1.1 Vorm van een G'Sell proefstaafje.

De methode maakt gebruik van een 'video-extensiemeter', die het profiel van het proefstuk in 'real-time mode' volgt in het midden van de staaf. De gegevens worden ter analyse doorgestuurd naar een computer. De effectieve rek wordt berekend uit de minimale diameter en de effectieve spanning wordt berekend uit de toegepaste belasting. Bovendien zorgt een analoog 'closed-loop' systeem ervoor dat de snelheid van de klemmen van de trekbank zodanig is dat de lokale effectieve reksnelheid constant wordt gehouden. Een schets van de gehele opstelling ziet u in figuur 1.2 [2].



Figuur 1.2 Opstelling meetapparatuur G'Sell methode.

Een voordeel van deze methode is dat er geen mechanische interactie is tussen de rekopnemer en het proefstuk. De resultaten van deze proef voor verschillende polymeren ziet u in figuur 1.3 [2].



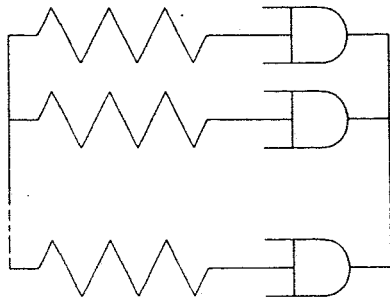
Figuur 1.3 Resultaten G'Sell metingen.

In het geval van polycarbonaat (PC), treedt er aan het begin van het plastische gebied een spanningsval op. Men schrijft dit verschijnsel toe aan 'strain-softening'. De aanname dat er bij de G'Sell-methode een homogene deformatie bestudeerd wordt, blijkt echter niet terecht. Ter controle zijn er plakjes materiaal uit gebruikte G'Sell-staafjes gezaagd, die verschillende rekken ondergaan hebben. Na het polijsten van deze plakjes om ze toegankelijk te maken voor gepolariseerde filters, bleek bij nadere beschouwing dat er wel degelijk spanningen in het bestudeerde deel van de staven aanwezig zijn geweest. Aangezien er ook bij deze methode dus geen homogene deformatie gemeten wordt is er verder gezocht naar een andere manier van meten, waarbij dit wél het geval is. H2 behandelt de van belang zijnde theorie, waarna in H3 de experimentele uitvoering aan de orde komt. H4 bevat de resultaten en H5 is gewijd aan de conclusies van het onderzoek.

2 Modelvorming.

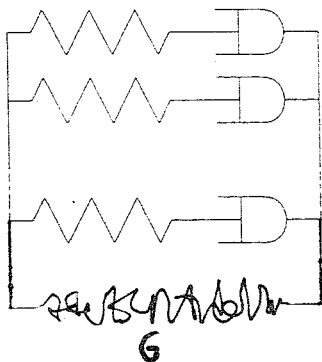
2.1 De modellering

Een polymeer is in het geval van kleine deformaties te modelleren als in figuur 2.1.



Figuur 2.1 Model van een polymeer bij kleine deformaties.

Echter, in het geval dat zich grote deformaties voordoen gaat deze beschrijvingswijze niet meer op. Er treedt dan een verzet tegen oriëntatie op, hetgeen zich uit in versteviging van het (thermoplastisch) polymeer. Deze extra bijdrage brengen we in rekening op de manier zoals die te zien is in het onderstaande model (figuur 2.2).

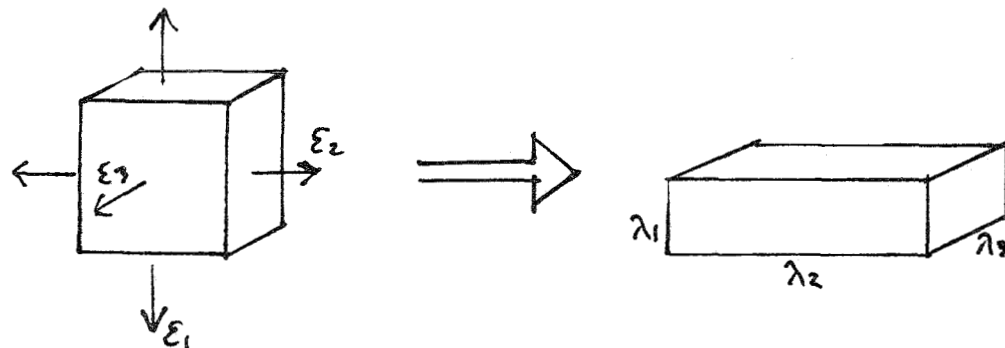


Figuur 2.2 Model van een thermoplastisch polymeer bij grote defromaties.

Hierin is G een extra element dat de weerstand tegen oriëntatie in rekening brengt, met verstevigingsmodulus G .

2.2 'Gaussian theory'

In het geval van rubbers is een statistische theorie ontwikkeld, welke bekend staat als de 'Gaussian theory'[4]. De theorie is gebaseerd op de aanname dat een rubber is opgebouwd uit een samenstelsel van lange-keten moleculen, welke verbonden zijn in een relatief klein aantal punten. Deze theorie is ook toepasbaar in het geval van pure homogene rek. In het driedimensionale geval is een pure homogene rek weer te geven als in figuur 2.3 [4].



Figuur 2.3 Pure homogene rek op eenheidskubus.

Als gevolg van zo'n rek wordt een eenheidskubus getransformeerd in een rechthoekig blokje met drie ongelijke zijden. De lengtes van de zijden zijn gelijk aan λ_1 , λ_2 en λ_3 , welke de rek-verhoudingen representeren. Door deze drie parameters wordt de staat van de pure homogene rek in een initiëel isotroop materiaal volledig bepaald. Deze rek-verhoudingen kunnen groter zijn dan 1 in het geval van een verlenging en kleiner dan 1 in het geval van een compressie. Een verdere aanname is dat de deformatie plaatsvindt zonder dat het volume verandert, hetgeen betekent dat $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$. In het geval van rubbers onder normale belastingscondities blijkt deze aanname de werkelijkheid goed te benaderen. In het vervolg bekijken we alleen het uni-axiale geval en dan geldt [3]:

$$\sigma_{\text{true}} = Y + G_p \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right) \quad (2.1)$$

waarin: $B = \lambda^2 - \frac{1}{\lambda}$

G = 'Strain hardening modulus'

λ = rekverhouding in belastingsrichting = l/l_0

Y = geëxtrapoleerde vloeispanning

De meeste kristallijne polymeren voldoen aan deze relatie voor temperaturen significant lager dan het smeltpunt. Voor glasachtige polymeren, zoals polycarbonaat, kunnen zich problemen voordoen als gevolg van het 'strain-softening'-effect aan het begin van het extensieproces. Het is dus belangrijk dit effect te elimineren omdat hierdoor de spanning-rek relatie verstoord wordt. Om ware spanning-rek curves te vinden is het noodzakelijk de ware reksnelheid $\frac{d \ln \lambda}{dt}$ constant te houden [3]. Indien bijvoorbeeld de snelheid van de verpaatsing van de klemmen constant is, neemt de ware reksnelheid steeds verder af.

2.3 Bepaling van σ_{nominaal}

Wanneer er aan een trekstaaf getrokken wordt en er homogene deformatie optreedt, kunnen we stellen dat:

$$\sigma_n = \frac{F}{A_o}$$

waarin: A_o = de oorspronkelijke dwarsdoorsnede [mm^2]
 F = momentane trekkracht [N]

Aangezien er geldt dat $l \cdot A = l_o \cdot A_o$, omdat we aannemen dat het volume constant is, geldt er dat $A = \frac{A_o}{\lambda}$. Voor de ware spanning geldt dan:

$$\sigma_{\text{true}} = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{A_o}{\lambda}} = \frac{F}{A_o} \lambda = \sigma_n \lambda \quad (2.2)$$

waarin: A = momentane dwarsdoorsnede [mm^2]

Wanneer we aannemen dat $\sigma_{\text{true}} = G B$ [3], dan geldt er dat:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_{\text{true}}}{\lambda} = \frac{G B}{\lambda} = G \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad (2.3)$$

Als we dus σ_{true} weergeven als functie van $\frac{B}{\lambda} = \lambda - \frac{1}{\lambda^2}$, voor een bepaalde reksnelheid en temperatuur, moet dit een rechte lijn zijn voor het homogeen deformerende materiaal [3].

2.4 Bepaling van de ware reksnelheid

Voor de definitie van ware rek geldt dat $\epsilon_{true} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \lambda$ zodat $\lambda = e^{\epsilon_{true}}$.

Hieruit volgt dat:

$$\dot{\epsilon}_{true} = \frac{\dot{\lambda}}{\lambda} = \frac{\dot{x}}{l_0 + x} \quad (2.4)$$

, welke constant dient te worden gehouden.

Er geldt dus:

$$\dot{x} = \dot{\epsilon} (l_0 + x) \quad (2.5)$$

Hieruit volgt:

$$\dot{x} - \dot{\epsilon} x - \dot{\epsilon} l_0 = 0 \quad (2.6)$$

zodat:

$$x = e^{\dot{\epsilon} t} x_0 - l_0 \quad (2.7)$$

Bij bekende inspanlengte l_0 en verlangde ware reksnelheid $\dot{\epsilon}_{true}$ dient $x(t)$ een zodanige functie te zijn dat de ware reksnelheid constant is en aan de verlangde waarde voldoet.

2.5 Homogene deformatie

We meten alleen versterking indien de proefstaaf bij een gekozen temperatuur en ware reksnelheid homogeen vervormt. Dit kunnen we bereiken door voorverstrekt materiaal te hanteren. Voorverstrekt materiaal is verkregen door trekstaven van bepaalde afmetingen tot ver voorbij het vloeipunt te rekken. Uit de als gevolg van deze rek ontstane nek is vervolgens per staaf een nieuwe kleinere proefstaaf vervaardigd. De nieuwe kleinere proefstaaf bestaat nu uit georiënteerd materiaal dat zich onder belasting homogeen zal gedragen.

2.6 Invloed voorrek

Naarmate de opgelegde voorrek groter is, verwachten we dat de vloeispanning hoger zal zijn.

2.7 Invloed temperatuur en reksnelheid

Aangezien $G = G(N_a, T)$ [4], waarin N_a = aantal actieve ketens en T = temperatuur, verwachten we dat de temperatuur een belangrijke invloed zal hebben op het spanning-rek verloop. De invloed van de ware reksnelheid $\dot{\epsilon}_{true}$ kunnen we bekijken door materiaal met gelijke voorrek λ en bij gelijke temperaturen bij verschillende ware reksnelheden te belasten.

H3 gaat in op de experimentele uitvoering van de geschetste methode.

3 De experimenten.

3.1 Het materiaal

Het onderzochte polymeer is polycarbonaat, waarvan u de mechanische eigenschappen hieronder aantreft [1]:

Elasticiteitsmodulus E	= 2300	N/mm ² ,
Vloeispanning σ_{vloei}	= 67 - 70	N/mm ² ,
Rek na breuk	= > 100	%

3.2 Voorrek als gevolg van temperatuur en opgelegde banksnelheid

De proeven zijn uitgevoerd op een FRANK-trekbank met een maximaal toegestane belasting van 10 kN. In combinatie met de trekbank is een oven gebruikt. Met het doel het verband tussen λ (rekverhouding) en de temperatuur T, respectievelijk de banksnelheid v te bepalen, zijn trekstaven met een gemiddelde dwarsdoorsnede van $A = 25 \text{ mm}^2$ en een inklemlengte van $l_0 = 140 \text{ mm}$, belast bij verschillende banksnelheden en temperaturen. Voor de banksnelheden zijn de waarden $v = 84 \text{ mm/min}$, $v = 252 \text{ mm/min}$ en $v = 504 \text{ mm/min}$ gebruikt, hetgeen bij genoemde inklemlengte overeenkomt met (fictieve) rekken van 0.01 s^{-1} , 0.03 s^{-1} en 0.06 s^{-1} . De gebruikte temperaturen zijn 20, 40, 50, 60, 70 en 80 °C. Uit de gevormde nek is daarna een recht stukje gezaagd waarvan de lengte nauwkeurig gemeten is met behulp van een schuifmaat. Daarna is zo'n stukje vier minuten in een oven gelegd op een teflon plaatje bij een temperatuur > glastemperatuur ($\approx 155 \text{ °C}$). De gekozen temperatuur bedraagt $T = 185 \text{ °C}$. Omdat het als gevolg van de aangelegde trekbelasting georiënteerde stukje polycarbonaat nu op een temperatuur voldoende ver boven de glastemperatuur is gebracht, zijn de moleculen in staat hun oude roosterposities terug te vinden, zodat het rechthoekig stukje zijn oorspronkelijke uitgangsvorm weer aanneemt. We kunnen nu de opgelegde voorrek λ bepalen door de lengte van het stukje vóór het krimpen te delen door de lengte van het stukje ná het krimpen. Deze werkwijze is herhaald voor verschillende temperaturen en banksnelheden. In tabel 3.1 vindt u de gemeten λ 's bij de gebruikte combinaties van de temperatuur en de banksnelheid.

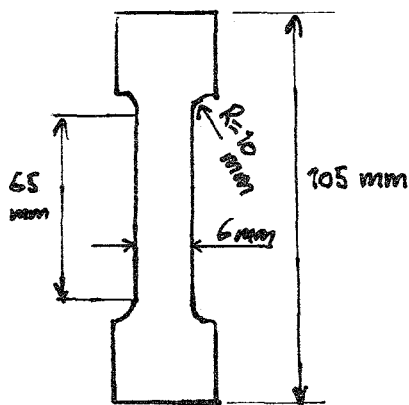
$\dot{\epsilon} \backslash T$	20	40	50	60	70	80	[°C]
0.01 s ⁻¹	1.81				1.94		
0.03 s ⁻¹	1.88	1.88	1.91	1.94	1.96	1.99	
0.06 s ⁻¹	1.91	1.94	1.96	1.97	1.99		

Tabel 3.1 λ als functie van de banksnelheid (rek) en de temperatuur.

Aangezien deze metingen een groot aantal keren zijn herhaald en de resultaten reproduceerbaar bleken, kan geconstateerd worden dat λ evenredig is met zowel de temperatuur als de banksnelheid.

3.3 Vervaardiging van trekstaafjes uit de nekken van belast materiaal

Nu bekend is welke combinatie van factoren een bepaalde voorrek λ oplevert, is het mogelijk proefstaafjes met verschillende 'bekende' λ 's te vervaardigen. De uiteindelijke proefstukjes hebben een vorm zoals weergegeven in figuur 3.1.

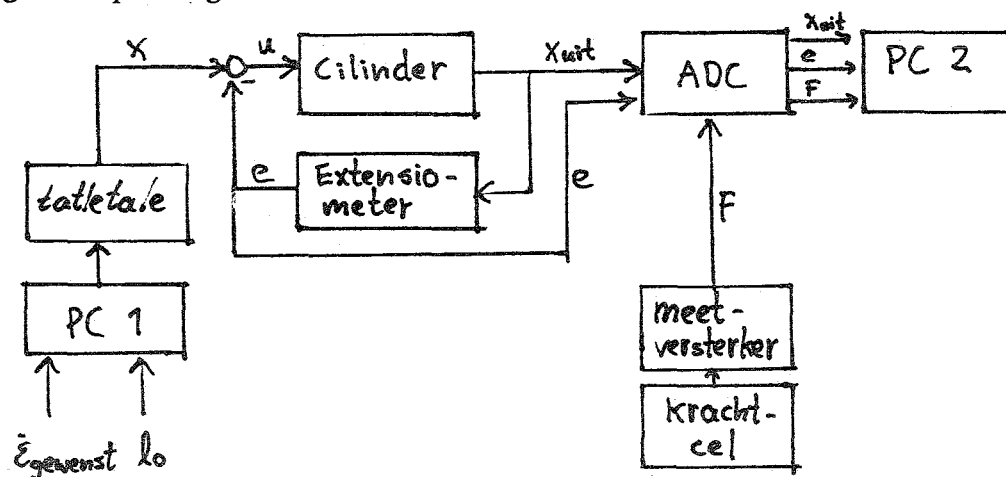


Figuur 3.1 Afmetingen proefstaafje.

3.4 De experimentele opstelling

De metingen zijn uitgevoerd op een ZWICK-trekbank met een maximaal toegestane belasting van 20 kN. De reden voor deze keuze is geweest dat deze trekbank aangestuurd kan worden door een signaalgenerator. In eerste instantie is de verplaatsing van de cilinder $x(t)$ van de trekbank aangestuurd door middel van een PC en een signaalgenerator, Tatletale genaamd. Binnen het TX-tools pakket, is een speciaal voor de hierboven vermelde Tatletale, programma geschreven. Het programma vraagt als inputgegevens om de inklemlengte l_0 en de verlangde reksnelheid $\dot{\epsilon}$. Met behulp van deze gegevens berekent het programma de verplaatsingsfunctie $x(t)$ en de tijd die de verplaatsing in beslag neemt. Na afloop van de berekening stuurt de PC de berekende punten naar de Tatletale, die vervolgens op zijn beurt de cilinder van de ZWICK-trekbank bestuurt. Tijdens de trekproeven zijn de verplaatsing van de cilinder en de op de krachtcel werkende kracht als functie van de tijd gemeten. De verplaatsing $x(t)$ van de cilinder is rechtstreeks van de trekbank naar de ADC-verwerkingseenheid gestuurd, die op zijn beurt gekoppeld is aan een PC, gebruik makend van bijbehorende ADC488-software.

De kracht $F(t)$ is via een krachtcel en een aparte meetversterker eveneens op deze manier gemeten. Uit het verloop van $x(t)$ en $F(t)$ zijn met behulp van MATLAB-software de benodigde grootheden zoals de spanning $\sigma(t)$ en de rek $\varepsilon(t)$ bepaald. Het nadeel van deze werkwijze is echter dat er geen zekerheid bestaat omtrent het feit of de trekstaaf werkelijk met een constante reksnelheid deformeert. Om dit probleem het hoofd te bieden is vervolgens een aan de besturingseenheid van de trekbank gekoppelde extensiometer (afstand klemmen = 50 mm) gebruikt, waarvan het gemeten signaal binnen een 'closed-loop'-besturing vergeleken wordt met het gewenste signaal $x(t)$. Op deze manier weten we zeker dat de punten, waar de twee punten van de extensiometer zich bevinden, de juiste verplaatsing ondergaan. Vanwege een reden die in het volgende hoofdstuk toegelicht zal worden, is nadien ook nog een tweede, kleinere extensiometer gebruikt, die geplaatst is binnen de klemmen van de grote extensiometer. In figuur 3.2 vindt u een schema van de gehele opstelling.



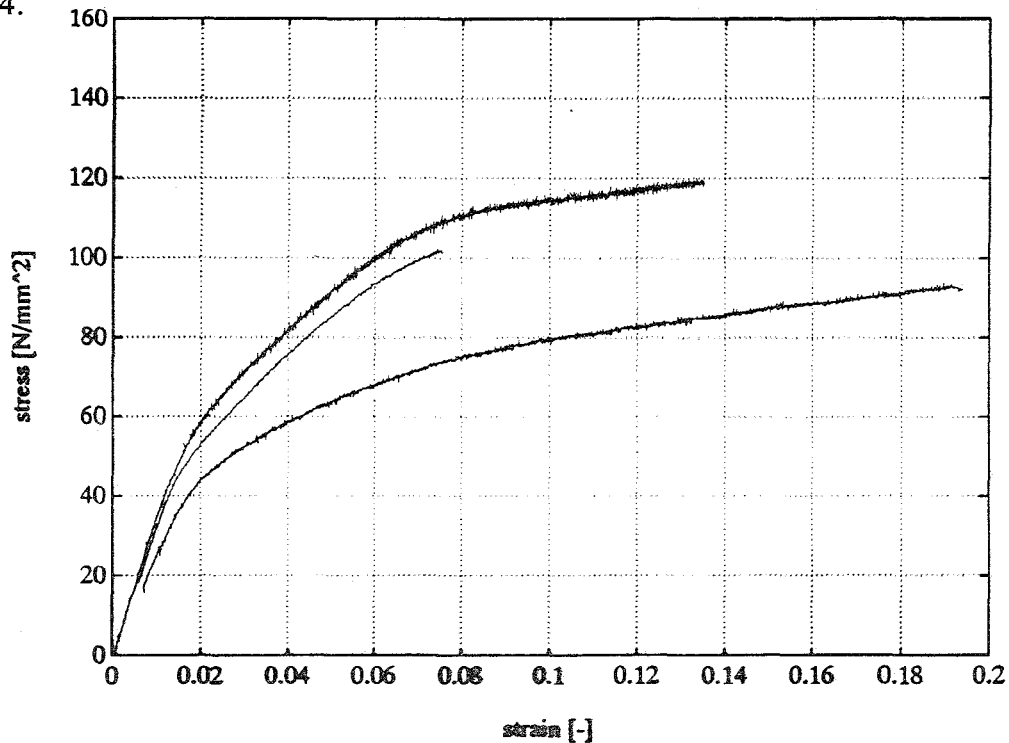
Figuur 3.2 Schema opstelling.

Het feit dat gebruik is gemaakt van een 'losse' meetversterker in combinatie met de krachtcel, is een gevolg van het feit dat de bij de trekbank behorende krachtcel, ten tijde van de proeven opnieuw geijkt diende te worden.

4 De resultaten.

4.1 Ware spanning - rek - krommen als functie van de temperatuur T

In de onderstaande grafiek ziet u het verloop van de ware spanning - rek - krommes als functie van de temperatuur. De gebruikte temperaturen zijn 20, 60 en 90 °C. De reksnelheid bedraagt 10 E-3 s^{-1} en de veronderstelde voorrek λ bedraagt 1.94.



Figuur 4.1 Spanning - rek - relatie als functie van de temperatuur.

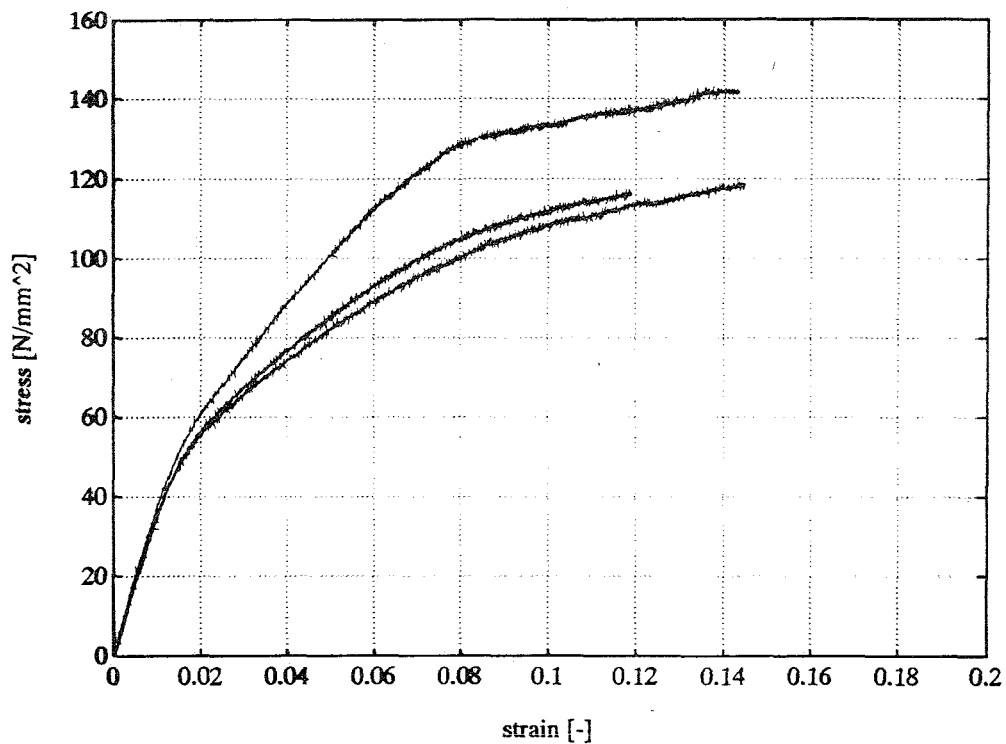
Het is duidelijk dat er hogere spanningswaarden gevonden zijn (bij gelijke rek) naarmate de temperatuur lager is. We nemen aan dat de duidelijk aanwezige eerste 'knik' in alledrie de krommen, gelegen is ter plekke van het vloeipunt. Dit impliceert dat het materiaal ná deze knik aan versterking onderhevig is. Het valt op dat de versterking groter is bij lagere temperatuur, immers het gedeelte tussen de eerste knik en de tweede knik loopt voor de temperaturen van 20 en 40 °C steiler dan voor de temperatuur van 90 °C. Waarom het verstergingsgedeelte voor een temperatuur van 20 °C niet zichtbaar steiler loopt dan voor een temperatuur van 60 °C, is onduidelijk. De tweede knik is in eerste instantie onverklaarbaar. Aan het einde van dit hoofdstuk wordt hier aandacht aan besteed. Het dalen van de vloeispanning voor hogere temperaturen kan verklaard worden. In een materiaal moet een bepaalde hoeveelheid energie gestopt worden om het plastisch te laten vervormen. Wanneer er sprake is van een hogere temperatuur is er dus al een

bepaalde hoeveelheid thermische energie beschikbaar. Dit is er de oorzaak van dat het materiaal minder 'mechanische' energie nodig heeft om te gaan vloeien, hetgeen verklaart dat het polymeer reeds bij een lagere spanning gaat vloeien.

Het feit dat polycarbonaat volgens de resultaten minder snel verstevt bij hoge temperaturen is niet in overeenstemming met het rubber - model. Immers, volgens de Gaussian - relatie $G = G(N_s, T)$ is de versterkingsmodulus G rechtevenredig met de temperatuur. Blijkbaar voldoet de deformatie van polycarbonaat niet aan het rubber - model. Binnen dit model wordt er geen rekening gehouden met optredende slip tussen knooppunten van molecuulketens. Dit is er waarschijnlijk de oorzaak van dat de versterkingsmodulus afneemt in plaats van toeneemt voor hogere temperaturen.

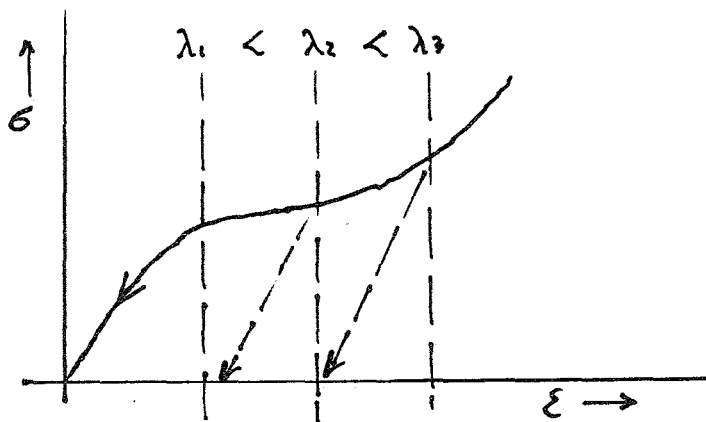
4.2 Ware spanning - rek - krommen als functie van de voorrek λ

Onderstaande grafiek toont het verloop van de spanning - rek - krommen als gevolg van de voorrek λ , bij een temperatuur van 20 °C en een reksnelheid van 10 E-4 s^{-1} .



Figuur 4.2 Spanning - rek - relatie als functie van de voorrek λ .

We zien hier dat er voor een hogere voorrek λ , bij gelijke rek, een hogere waarde voor de spanning wordt gemeten. Het materiaal met een hogere voorrek λ versterkt sneller dan hetzelfde materiaal met een lagere voorrek λ . Dit is de reden dat de helling behorende het verstergingsgebied van de kromme met $\lambda = 1.99$, steiler loopt dan die van de andere twee krommen. Blijkbaar wordt hier niet voldaan aan het 'Gaussian model'. Immers, volgens dit model geldt dat $G \neq G(\lambda)$. Het feit dat de vloeispanning oploopt voor hogere voorrekken is met onderstaand plaatje duidelijk gemaakt (figuur 4.3).

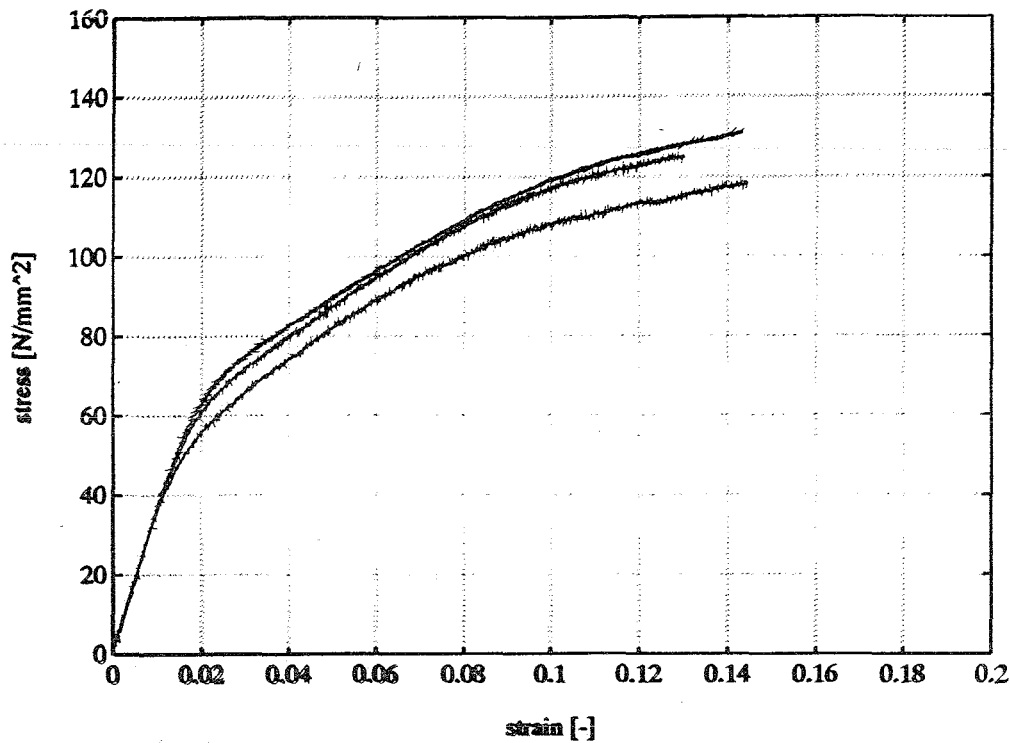


Figuur 4.3 Invloed voorrek λ op vloeispanning σ_{vloe} .

Wanneer een materiaal voorbij de vloeigrens belast is, zal bij hernieuwde belasting het materiaal later gaan vloeien, naarmate het materiaal verder gedeformeerd is na de vloeigrens, dus naarmate de voorrek groter is. Ook in dit plaatje zien we een duidelijke tweede knik, welke in de afsluiting van dit hoofdstuk ter sprake komt.

4.3 Ware spanning - rek - krommen als functie van de reksnelheid $\dot{\epsilon}$

In onderstaande grafiek ziet u de spanning - rek - krommen afgebeeld als functie van de reksnelheid $\dot{\epsilon}$, voor een temperatuur $T = 20^\circ\text{C}$ en een voorrek $\lambda = 1.88$. Bij de kromme behorende bij een reksnelheid $\dot{\epsilon} = 10 \text{ E-}2$, hoort echter een voorrek $\lambda = 1.91$. De reden hiervoor is dat er ten tijde van de test geen proefstaafjes met een voorrek $\lambda = 1.88$ voorradig meer waren. Hier dient dus rekening mee gehouden te worden bij het vergelijken van de krommen. Bij benadering geldt dat de krommen evenwijdig verschoven zijn ten opzichte van elkaar voor zover het het verstergingsgedeelte betreft. We zien dat de verstergingsmodulus gelijk is voor de verschillende reksnelheden en we zien ook dat de vloeispanning hoger is voor grotere reksnelheden.



Figuur 4.4 Spanning - rek - relatie als functie van de reksnelheid $\dot{\epsilon}$.

Een en ander is te verklaren met behulp van het model van een polymeer in het geval van kleine deformaties. De bewegingsvergelijking voor zo'n model, een parallel geschakelde lineaire veer en een niet - lineaire demper, luidt als volgt:

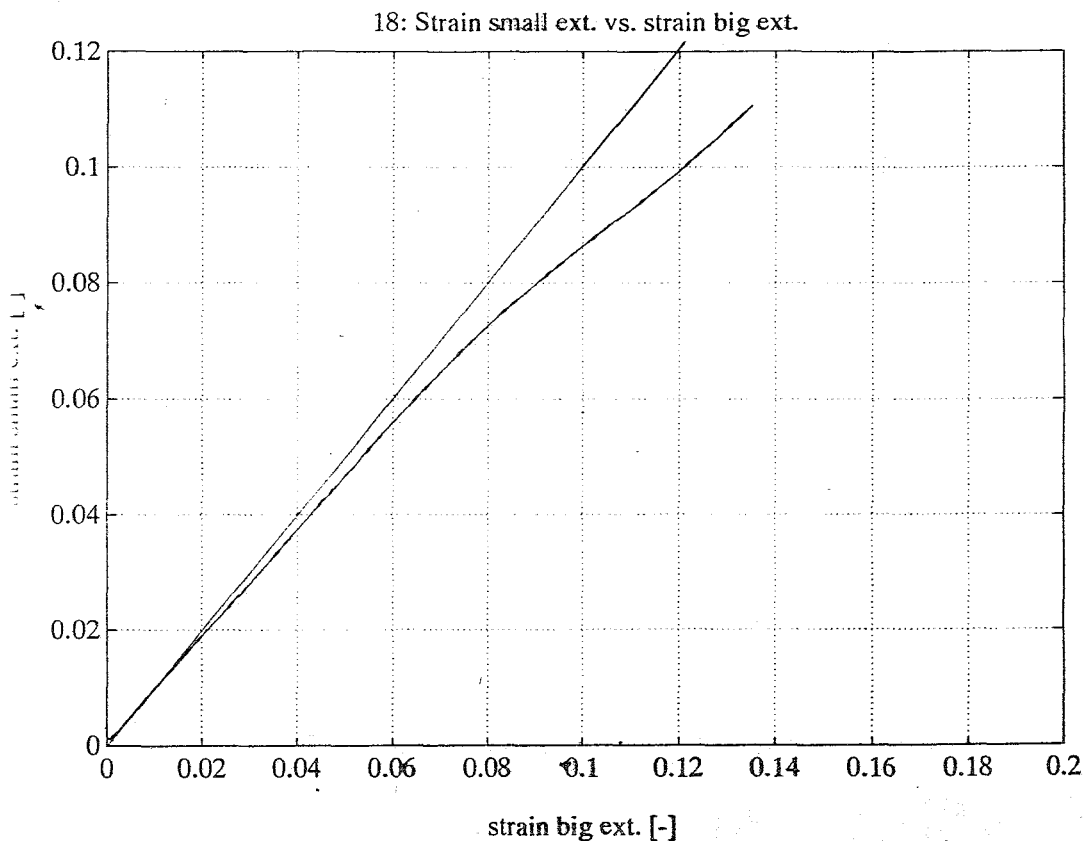
$$\dot{\sigma} + \frac{1}{\tau} \sigma = E \dot{\epsilon} \quad \text{met : } \tau = \frac{\eta}{E} \quad (4.1)$$

Wanneer de reksnelheid $\dot{\epsilon}$ groter is en de viscositeit η omgekeerd evenredig is met de reksnelheid, hetgeen voor polycarbonaat het geval is, volgt dat de bijbehorende spanning σ groter is. De ligging van de vloeispanning wordt dus bepaald door de demper. In het verstevigingsgedeelte speelt de demper geen rol meer, hetgeen verklaart dat de krommen evenwijdig lopen.

4.4 De tweede knik in de spanning - rek - krommen

In alle plaatjes treffen we na de eerste knik nog een tweede knik aan in de spanningsrek-relatie, waarna de krommen verder lopen met een afgenomen helling. We verwachten echter vanaf het vloeipunt dat de helling van de kromme steeds groter zal worden omdat de versteviging continu toe zal nemen bij pure homogene deformatie. Dit is echter niet het geval. De tweede knik is dan ook hoogst waarschijnlijk het gevolg van optredende inhomogene verschijnselen. Om dit punt nader

te onderzoeken is een tweede, kleinere extensiemeter aangebracht tussen de klemmen van de grotere extensiemeter. Na afloop van de proef is in een plaatje de gemeten rek door de kleine extensiemeter tegen de gemeten rek door de grote extensiemeter uitgezet. We verwachten dan in principe een rechte lijn met een hellingshoek van 45° . Ter verduidelijking is in het plaatje (figuur 4.5) ook een rechte lijn met een hellingshoek van 45° aangebracht. De figuur toont echter een niet rechte lijn die een knik vertoont in de buurt van een rek $\epsilon = 8\%$, hetgeen overeenkomt met de ligging van de tweede knik in de spanningsrek-plaatjes. Het vermoeden dat er inhomogene deformatie opgetreden is, is dus juist gebleken. Vanaf het knikmoment geeft de kleinere extensiemeter namelijk een kleinere gemeten rek aan dan de grotere extensiemeter. Dit kan alleen verklaard worden wanneer er sprake is van een inhomogene deformatie tussen de klemmen van de grote extensiemeter en de kleine extensiemeter. Immers wanneer de inhomogeniteit op zou treden tussen de klemmen van de kleine extensiemeter, zou de kleine extensiemeter een grotere rek meten.



Figuur 4.5 Afwijking van de rekmeting van de kleine en de grote extensiemeter.

5 Conclusies.

Er kan geconcludeerd worden dat ook met de behandelde methode geen homogene deformatie bewerkstelligd is. Wegens nog onbekende redenen treden er toch inhomogene verschijnselen op. Men zou door het meten van de 'birefringance', dit is een maat voor het brekingsindex-verschil in twee loodrechte vlakken dat ontstaat in het materiaal door orientatie van de moleculen na voorverstrekken, kunnen aantonen of het voorverstrekte materiaal werkelijk homogeen is. Wel kunnen er enkele conclusies getrokken worden met betrekking tot het spanningsrek-verloop tot aan de tweede knik. Temperatuurverhoging heeft daling van het vloeipunt en daling van de 'strain-hardening'-modulus tot gevolg, hetgeen niet in overeenstemming is met de gehanteerde theorie. Een hogere voorrek λ bewerkstelligt een hogere versterkingsmodulus en een opschuiving van het vloeipunt in opwaartse richting. De reksnelheid heeft alleen invloed op de ligging van het vloeipunt en niet op de grootte van de versterkingsmodulus.

Referenties.

1. van der Vegt, A. K., Polymeren van keten tot kunststof, Delftse Uitgevers Maatschappij, Delft (1991).
2. G'Sell, C., Video-controlled tensile testing of polymers and metals beyond the necking point, *Journal of materials science* 27 (1992).
3. Haward, R. N., Strain hardening of thermoplastics, *Macromolecules*, Vol. 26, No. 22, 1993.
4. Treloar, L. R. G., *The physics of rubber elasticity*, 3e editie, Clarendon Press, Oxford (1975).