

Materiaal gedrag van PUR-schuim

Citation for published version (APA):

Goijaerts, A. M. (1993). *Materiaal gedrag van PUR-schuim*. (DCT rapporten; Vol. 1993.082). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1993

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.

Materiaal gedrag van PUR-schuim[®]

WFW nr.: 93.082

Ad Goijaerts

door: Ad Goijaerts

student WMT, id.nr.:304293

vakgroep Fundamentele Werktuigbouwkunde

Technische Universiteit Eindhoven

Juni 1993

Graag wil ik de volgende mensen nog bedanken:

Monique van Lankveld en

Cees Oomens voor de algemene begeleiding.

Christien Breukink voor de informatie over en hulp bij het SVD-filteren.

Rob Petterson voor het helpen bij de Hentschel metingen.

Tiny van Hout voor de hulp bij de Zwick-metingen.

SAMENVATTING

In het onderzoek naar krachtdoorleiding in het kniegewricht wordt naast experimenten ook een numerieke studie gedaan. Voor deze numerieke studie is het nodig om de materiaaleigenschappen te kennen van een polymeerschuim dat gebruikt wordt als modelmateriaal voor kraakbeen. Er is vanuit gegaan dat het materiaal te beschrijven is met een lineair visco-elastisch model met één tijdsafhankelijke functie. Om deze materiaaleigenschappen te bepalen zijn uni-axiale relaxatieproeven uitgevoerd. Hierbij is gebruik gemaakt van een trekbank (Zwick 1434) om de kracht te meten en het Hentschel video meetsysteem is gebruikt om de rek contactloos te meten. Omdat er met het Hentschel video meetsysteem op het randje van de mogelijkheden gemeten is, is het noodzakelijk geweest om de rekdata te verwerken met het SVD-filter om bruikbare resultaten te verkrijgen. Alvorens de rek- en kracht-data ingevoerd konden worden in een parameter-schattingsprogramma moesten eerst de meetfrequenties aan elkaar gelijk gemaakt worden. Hiertoe is een matlab-programma geschreven.

Uiteindelijk blijkt dat het polymeerschuim niet goed te karakteriseren is met een 3-parameter Maxwell model maar wel met een 5-parameter Maxwell model. Ook blijkt dat het materiaal niet erg goed reproduceerbaar te maken is: er zijn verschillen in de eindstijfheid van bijna een factor 2.

INHOUDSOPGAVE

Samenvatting	3
1. Inleiding	5
2. Een 3D lineair visco-elastisch constitutief model met één tijdsafhankelijke functie	6
2.1 Inleiding	6
2.2 Constitutieve wetten voor kruip	8
2.3 Constitutieve wetten voor relaxatie	10
2.4 Relatie tussen J en G	11
3. Experimenten aan PUR-schuim[®]	13
3.1 De meetopstelling	13
3.2 De proefstaafjes	14
3.3 De werkwijze	15
3.4 Dataverwerking	16
3.5 Parameter-schatten	17
4. Resultaten en discussie	18
5. Conclusies en suggesties	24
Literatuur	25

Appendices:

Appendix A: Eigenschappen van de proefstaafjes

Appendix B: Het eerste experiment

Appendix C: Het SVD-filter

Appendix D: Het matlab-verwerkingsprogramma

Appendix E: De resultaten-figuren

HOOFDSTUK 1: Inleiding.

In het onderzoek naar krachtdoorleiding in het kniegewricht worden naast een numerieke studie ook experimenten gedaan. In deze experimenten wordt een vereenvoudigd model van het kniegewricht gemaakt, waarbij alleen de kraakbeenlagen en de meniscus zijn gemodelleerd (zie figuur 1.1). De loopvlakken van het kniegewricht zijn bedekt met zachte poreuze lagen, het kraakbeen.

Daartussen bevindt zich de meniscus, een wigvormig lichaam dat een (groot) deel van de kracht doorleidt. In het experiment worden kraakbeen en meniscus gemodelleerd met PUR¹-schuim[®], dat in vloeistof gedrenkt is.

De resultaten van de experimenten worden

gevalideerd met een numeriek

model met behulp van het eindige elementen pakket DIANA. Hiertoe moet het materiaal (het polymeerschuim gedrenkt in vloeistof) gekarakteriseerd worden.

In hoofdstuk 2 zal een theoretische afleiding gegeven worden voor een 3D lineair visco-elastisch model met één tijdsafhankelijke functie. In hoofdstuk 3 zullen de experimenten beschreven worden. In hoofdstuk 4 worden de resultaten van de experimenten gegeven met een korte discussie. In hoofdstuk 5 staan de getrokken conclusies en suggesties voor eventueel verder onderzoek.

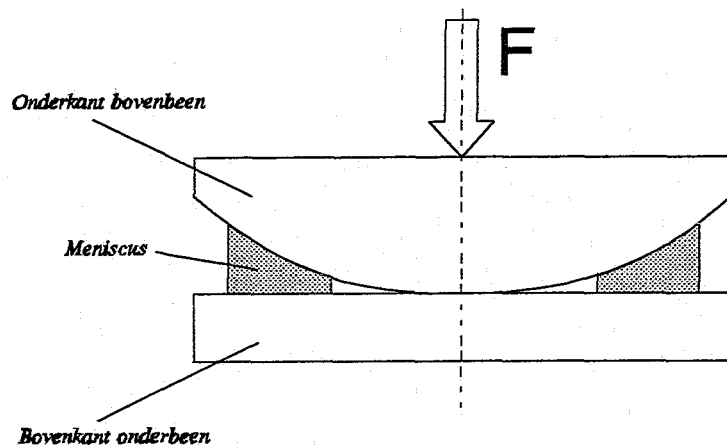


fig. 1.1: Model van de knie met krachtdoorleiding

¹ Poly-URethaan schuim[®], samengesteld door H. de Heus

HOOFDSTUK 2: Een 3D lineair visco-elastisch constitutief model met één tijdsafhankelijke functie.

2.1 Inleiding

Als uitgangspunt wordt lineair isotroop visco-elastisch gedrag verondersteld. Het gedrag van zo'n materiaal is goed te illustreren aan de hand van een kruip- en relaxatieproef.

Deze twee formuleringen zijn in elkaar over te voeren.

Beschouw voor **kruip** de responsie in de rek op een stap in de spanning.

$$\sigma(t) = H(t) \cdot \sigma_0 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon(t) = J(t) \cdot \sigma_0 \quad (2.1)$$

Waarbij $H(t)$ een eenheidsstap is ($H(t)=0$ als $t < 0$ en $H(t)=1$ als $t \geq 0$) en $J(t)$ de kruipresponsie genoemd wordt. Bij kruip hoort figuur 2.1.

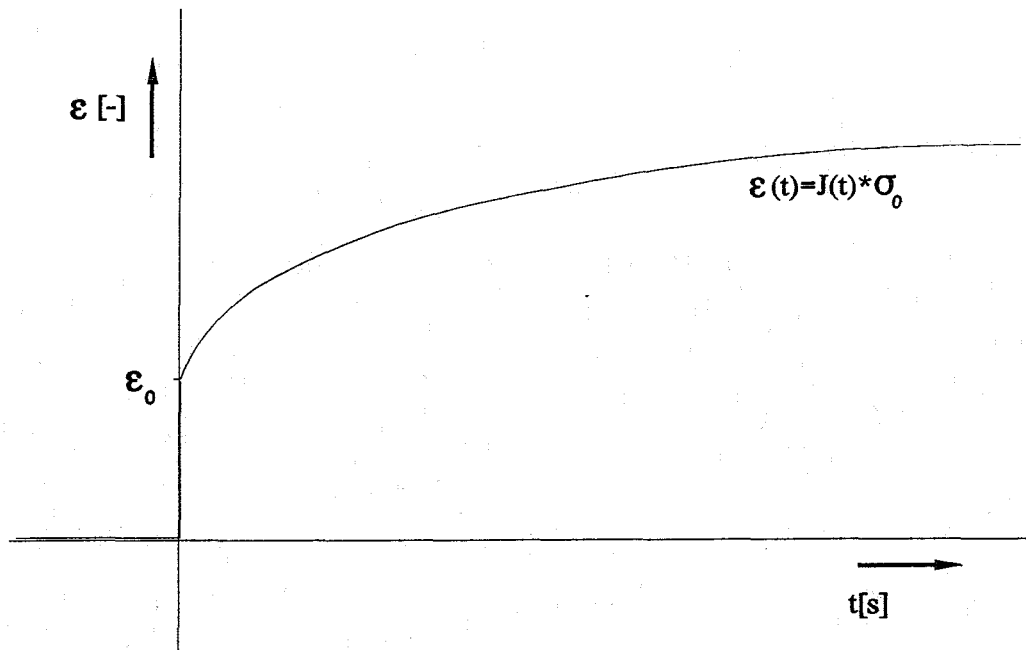


fig 2.1: Typisch voorbeeld van een responsie in de rek op een eenheidsstap in de spanning.

Bij spanningsrelaxatie of kortweg relaxatie kan gekeken worden naar de responsie van de spanning op een stap in de rek.

$$\varepsilon(t) = H(t) \cdot \varepsilon_0 \quad \Rightarrow \quad \sigma(t) = G(t) \cdot \varepsilon_0 \quad (2.2)$$

Waarbij $G(t)$ de relaxatieresponsie wordt genoemd. Bij relaxatie hoort figuur 2.2.

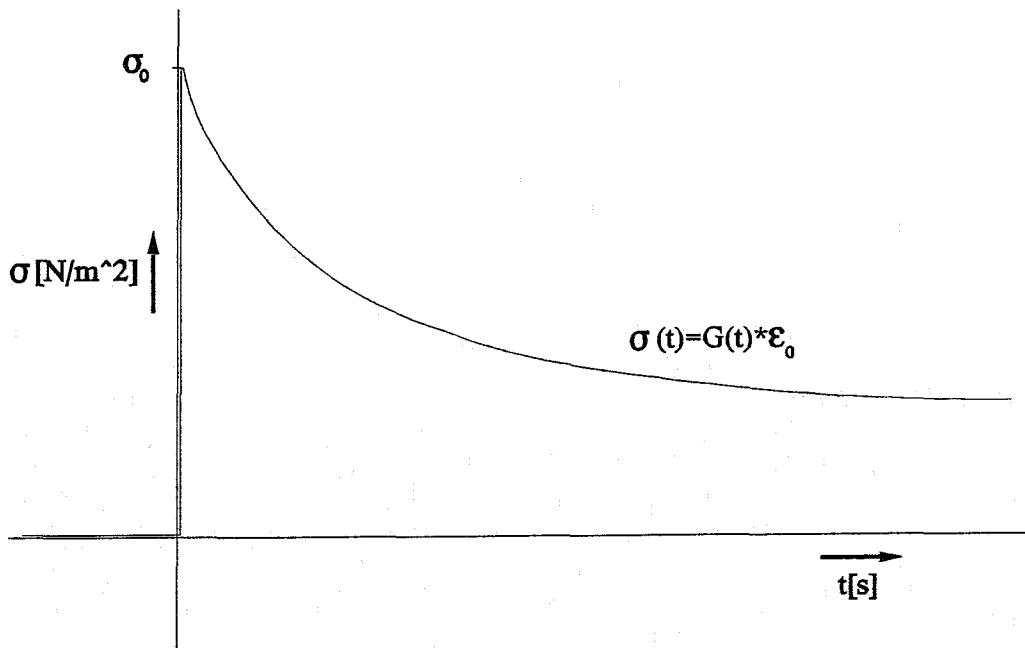


fig 2.2: Typisch voorbeeld van een responsie in de spanning op een eenheidsstap in de rek.

Lineair materiaal gedrag is aangenomen, wat betekent dat het principe van superpositie moet gelden. Hieruit zijn de integraal-formuleringen voor kruip en relaxatie af te leiden (Oomens, 1991). Ze worden ook wel de geheugen integralen genoemd (formule 2.3 en 2.4 waarbij $\sigma(t)$, $\epsilon(t)$ en hun afgeleiden tweede-orde tensoren en ${}^4G(t-\tau)$ en ${}^4J(t-\tau)$ vierde-orde tensoren zijn).

$$\epsilon(t) = \int_{-\infty}^t {}^4J(t-\tau) : \dot{\sigma}(\tau) d\tau \quad (2.3)$$

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t {}^4G(t-\tau) : \dot{\epsilon}(\tau) d\tau \quad (2.4)$$

In paragraaf 2.2 worden de afzonderlijke constitutieve wetten afgeleid voor kruip en in paragraaf 2.3 voor relaxatie. In paragraaf 2.4 zal de relatie tussen J en G worden gegeven.

2.2 Constitutieve wetten voor kruip

Na introductie van een orthonormale basis $\{\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3\}$ kan formule 2.3 opgeschreven worden voor één element van de rek (met $i,j,k,l=1,2,3$):

$$\varepsilon_{ij}(t) = \int_{-\infty}^t J_{ijkl}(t-\tau) \cdot \dot{\sigma}_{kl}(\tau) d\tau \quad (2.5)$$

Laplace-transformeren levert:

$$\varepsilon_{ij}(s) = J_{ijkl}(s) \cdot s \cdot \sigma_{kl}(s) \quad (2.6)$$

Als eerste benadering voor lineair visco-elastisch gedrag wordt verondersteld dat de vierde-orde tensor 4J te schrijven is als het product van één tijdsafhankelijke scalaire functie J en een constante vierde-orde tensor 4C . (Dit is het model dat reeds geïmplementeerd is in het eindige elementen pakket DIANA.) In formule vorm:

$$J_{ijkl}(s) = J(s) \cdot C_{ijkl} \quad (2.7)$$

De spanningstensor en de rektensor bestaan ieder uit 9 elementen. Omdat ze symmetrisch zijn blijven er nog 6 verschillende elementen over. Een veel gebruikte notatie voor de rek en de spanning is daarom

$$\underline{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{bmatrix}, \quad \underline{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{bmatrix}, \quad \text{met} \quad \begin{cases} \gamma_{12} = 2\varepsilon_{12} \\ \gamma_{23} = 2\varepsilon_{23} \\ \gamma_{31} = 2\varepsilon_{31} \end{cases} \quad (2.8)$$

Formule 2.6 is nu te schrijven als

$$\underline{\varepsilon}(s) = s \cdot J(s) \cdot \underline{C} \cdot \underline{\sigma}(s) \quad (2.9)$$

met \underline{C} een zes bij zes matrix met de coëfficiënten van de van belang zijnde elementen van de vierde-orde tensor 4C . Het is logisch om voor deze matrix de compliantiematrix te nemen die is afgeleid voor de elastische theorie, gebruik makend van symmetrie-eigenschappen in het isotrope geval (Oomens, 1991). Formule 2.9 is dan te schrijven als formule 2.10 met E de elasticiteitsmodulus en ν de contractie-coëfficiënt.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11}(s) \\ \varepsilon_{22}(s) \\ \varepsilon_{33}(s) \\ \gamma_{12}(s) \\ \gamma_{23}(s) \\ \gamma_{31}(s) \end{bmatrix} = \frac{s \cdot J(s)}{E} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{11}(s) \\ \sigma_{22}(s) \\ \sigma_{33}(s) \\ \sigma_{12}(s) \\ \sigma_{23}(s) \\ \sigma_{31}(s) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

In een uniaxiale trekproef in \vec{e}_1 -richting (zie figuur 2.3) zijn de afschuivingen nul en zijn

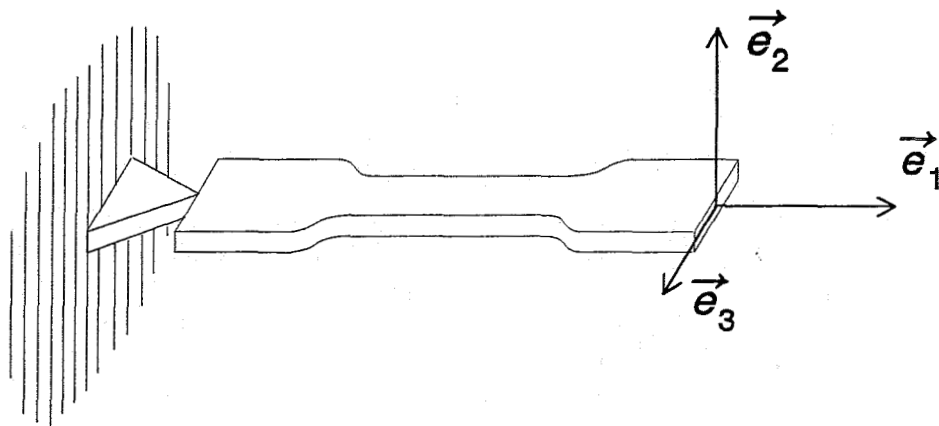


fig 2.3: Definitie van het orthonormale assenstelsel

alle spanningen behalve σ_{11} nul. Nu volgen uit de bovenste 3 vergelijkingen van matrixvergelijking 2.10 de volgende relaties tussen de hoofdrekken en de hoofdspanning in de trekrichting:

$$\sigma_{11}(s) = \frac{E}{s \cdot J(s)} \varepsilon_{11}(s) \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_{22}(s) = -\nu \cdot \varepsilon_{11}(s) \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_{33}(s) = \varepsilon_{22}(s) \quad (2.13)$$

2.3 Constitutieve wetten voor relaxatie

Formule 2.4 kan ook opgeschreven worden voor één element van de spanning:

$$\sigma_{ij}(t) = \int_{-\infty}^t G_{ijkl}(t-\tau) \cdot \dot{\varepsilon}_{kl}(\tau) d\tau \quad (2.14)$$

Laplace-transformeren geeft:

$$\sigma_{ij}(s) = G_{ijkl}(s) \cdot s \cdot \varepsilon_{kl}(s) \quad (2.15)$$

In eenzelfde benadering voor lineair visco-elastisch gedrag als in de vorige paragraaf wordt verondersteld dat de vierde-orde tensor 4G te schrijven is als één tijdsafhankelijke scalaire functie G vermenigvuldigd met een constante vierde-orde tensor 4S .

$$G_{ijkl}(s) = G(s) \cdot S_{ijkl} \quad (2.16)$$

Als formule 2.15 wordt uitgeschreven volgt

$$\underline{\sigma}(s) = s \cdot G(s) \cdot \underline{S} \cdot \underline{\varepsilon}(s) \quad (2.17)$$

met \underline{S} een zes bij zes matrix met de coëfficiënten van de van belang zijnde elementen van de vierde-orde tensor 4S . Het is logisch om, uitgaande van het isotroop veronderstelde gedrag, voor deze matrix de stijfheidsmatrix te nemen. Dit is de inverse matrix van de compliantiematrix (Oomens, 1991). Formule 2.17 is als matrix-formule dan te schrijven als formule 2.18.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11}(s) \\ \sigma_{22}(s) \\ \sigma_{33}(s) \\ \sigma_{12}(s) \\ \sigma_{23}(s) \\ \sigma_{31}(s) \end{bmatrix} = s \cdot G(s) \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1+\nu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}(s) \\ \varepsilon_{22}(s) \\ \varepsilon_{33}(s) \\ \gamma_{12}(s) \\ \gamma_{23}(s) \\ \gamma_{31}(s) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Uitgaande van de eigenschappen van een uniaxiale trekproef in \vec{e}_1 -richting (alle afschuivingen en spanningen behalve σ_{11} zijn gelijk aan nul) zijn uit de bovenste 3 vergelijkingen van matrixvergelijking 2.18 de volgende relaties tussen de hoofdrekken en de hoofdspanning in de trekrichting af te leiden

$$\sigma_{11}(s) = s \cdot G(s) \cdot E \cdot \varepsilon_{11}(s) \quad (2.19)$$

$$\varepsilon_{22}(s) = -\nu \cdot \varepsilon_{11}(s) \quad (2.20)$$

$$\varepsilon_{33}(s) = \varepsilon_{22}(s) \quad (2.21)$$

Formule 2.20 en 2.21 zijn dezelfde als formule 2.12 en 2.13. Uit deze formules volgt dat er bij dit model sprake is van een vaste verhouding tussen de axiale rek ε_{11} aan de ene kant en ε_{22} en ε_{33} aan de andere kant. Dit kan later gebruikt worden als een toets voor de aanname dat de vierde-orde tensor 4G te schrijven is als een product van één scalaire tijdsfunctie G met een constante vierde-orde tensor 4S .

2.4 Relatie tussen J en G

Omdat de formuleringen voor kruip en relaxatie in elkaar over te voeren zijn is de relatie tussen J en G (de scalaire tijdsafhankelijke functies) bekend. Uit de afgeleide formules 2.11 voor kruip en 2.19 voor relaxatie volgt de relatie tussen J en G :

$$J(s) \cdot G(s) = \frac{1}{s^2} \quad (2.22)$$

Deze relatie kan ook gevonden worden uit de formules 2.9 en 2.17.

HOOFDSTUK 3: Experimenten aan PUR-schuim^o

3.1 De meetopstelling

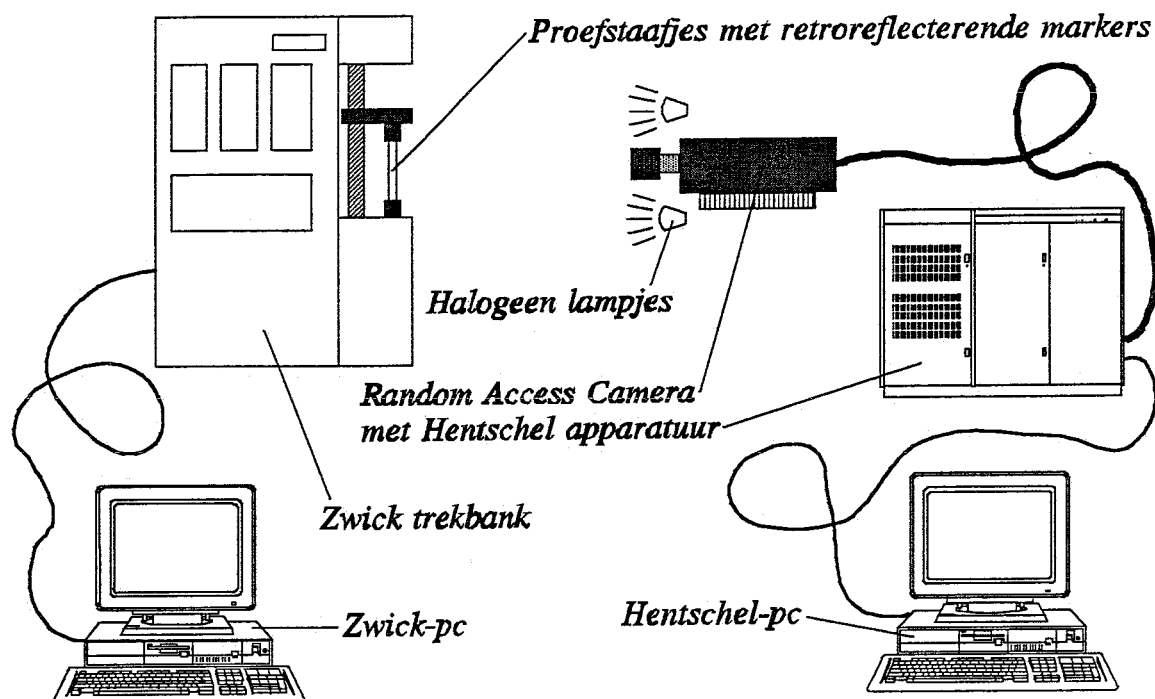


fig. 3.1: Meetopstelling met Zwick trekbank en Hentschel systeem.

Een Zwick (1434) trekbank is bij de experimenten gebruikt om de verplaatsing aan te brengen en de kracht te meten. De kracht wordt ingelezen in de computer die gekoppeld is aan de trekbank. Een contactloos video meetsysteem (Hentschel GmbH) is gebruikt om twee-dimensionaal de rek te meten. Met een Random Access Camera worden de posities van retroreflecterende markers met een diameter van 0,5 millimeter, die met halogeen lampjes belicht worden vanuit de camera-positie, vastgelegd in de tijd. De Random Access Camera zoekt een afgebakend gebied af naar markers die waargenomen worden als een fel lichtpuntje. Om elk lichtpuntje wordt een window geplaatst en er wordt vanuit gegaan dat bij de volgende 'scan' de markers nog steeds in hun window liggen. De posities van de windows worden dan na iedere 'scan' zodanig aangepast dat de markers weer in het centrum van hun window liggen. Meer specifieke informatie over het Hentschel video

meetsysteem is te vinden in "The Hentschel random access tracking system" (Zamzow, 1990). Aan dit contactloos video meetsysteem is ook een PC gekoppeld die de rekdata opslaat. De Zwick-data moet dan uiteindelijk gekoppeld worden aan de data van het Hentschel video meetsysteem.

Deze totale meetopstelling is systematisch weergegeven in figuur 3.1.

3.2 De proefstaafjes

Het materiaal, waarvan de eigenschappen bepaald worden, heeft een sponsachtige structuur. De poriën worden gevuld met een vloeistof, bijvoorbeeld olie of water. Op de volgende wijze wordt het materiaal gemaakt:

Eerst 10 gram van het polymeer Desmopan KA 8366 thermoplastische polyester urethaan afwegen. Daarna dit polymeer aanvullen tot een massa van 100 gram met het oplosmiddel Dimethylsulfoxide (DMSO). Dit moet in de zuurkast gebeuren daar dit een erg vluchtig en giftig oplosmiddel is. Daarna moet het gedurende 24 uur gemengd worden op 80°C. Het kan dan in een malletje gegoten worden wat ook 80°C moet zijn (1 à 2 uur in een oventje op 80°C). Het malletje moet wel voorbereid worden voordat het in de oven gaat: De zijkanten en vooral de onderkant moeten goed ingesmeerd worden met vet om te zorgen dat de oplossing niet door de spleetjes van het malletje heen sijpelt en de oppervlakken moeten met triflow ingespoten worden om ervoor te zorgen dat het proefstaafje goed loslaat bij openen van het malletje. Als de oplossing van 80°C in het voorbereidte malletje is gegoten, wordt het 24 uur in een diepvries gezet om de structuur 'vast te vriezen'.

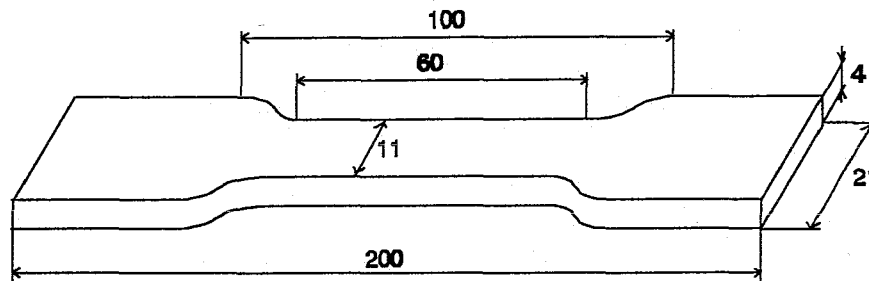


fig. 3.2: De maten van het malletje

Daarna wordt het proefstaafje uit het malletje gehaald (voor afmetingen en vorm: zie

figuur 3.2) en in ijswater gelegd zodat het oplosmiddel zich kan verwijderen; dit oplosmiddel lost dan op in het water, zodat er licht verontreinigd water over blijft. De uiteindelijke structuur is die van een spons.

Op deze manier is een oplossing van 10 massaprocenten vaste stof verkregen. Ook oplossingen met 5 en 15 massaprocenten zijn gangbare oplossingen. Er is gekozen voor deze oplossing omdat die reeds in de experimenten gebruikt werd.

In appendix A staan de eigenschappen van de 6 gemaakte proefstaafjes.

Door de spons-structuur moet het materiaal beproefd worden terwijl het bevochtigd is door water of olie. De vloeistof die in het materiaal zit draagt ook bij aan het materiaalgedrag. Deze media blijven tijdens de experimenten goed genoeg in het materiaal zitten, zodat er geen voorzieningen getroffen dienen te worden om de experimenten uit te voeren met de proefstaafjes ondergedompeld in het medium. Een punt van kritiek kan nu nog zijn dat het medium (vooral water) kan verdampen zonder onderdompeling. Echter, aangezien de tijdsduur van het uiteindelijke experiment slechts 2 minuten en 20 seconden was, mag aangenomen worden dat dit fenomeen geen al te grote rol zal spelen in het experiment. Na het pilot experiment (zie Appendix B) is gebleken dat de staafjes in het medium olie aanleiding gaven tot een paar problemen. Zowel de reflectie van de olie die op het proefstaafje naast de retroreflecterende markers zit, als de hechting van de markers zorgde voor problemen.

De metingen zijn uiteindelijk alleen met de proefstaafjes met water als medium gedaan.

3.3 De werkwijze

Bij het experiment is een rekstap aangebracht van ongeveer 5% (een verplaatsing van 5 [mm]). Vóór de rekstap is gedurende 45 seconden de rustpositie gemeten. Dit is gedaan omdat gebleken is dat er gebruik gemaakt moest worden van een filter om de data bruikbaar te maken. Het SVD-filter (zie appendix C) is gekozen om de data te filteren. Bij dit filter moet een ruisniveau bepaald worden en daarvoor is een meting nodig van een bekend signaal. Dat gebeurde in de eerste 45 seconden. De meettijd was 2 minuten en 20 seconden (zie paragraaf 3.4). Er is gekozen voor een rekstap van 15 seconden. Uit een

lange rekstap kan ook informatie gehaald worden voor een parameter-schatting. In figuur 3.3 zijn de opgelegde verplaatsing en de te verwachten te meten kracht weergegeven.

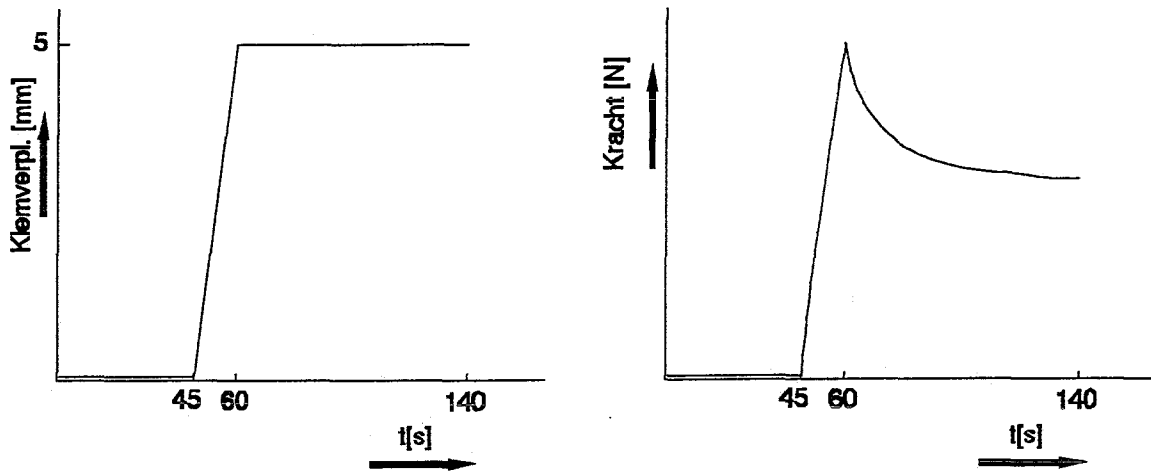
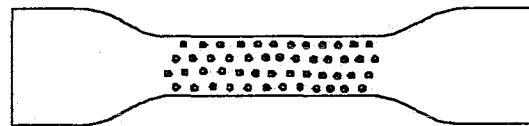


fig 3.3: De opgelegde verplaatsing en de te verwachten kracht bij het tweede experiment

3.4 dataverwerking

Het Hentschel video meetsysteem is zo opgebouwd dat voor één meting altijd 128 kb wordt weggeschreven. Bij het Hentschel video meetsysteem kunnen vier waarden ingesteld worden voor de 'sample rate'. Dit is de frequentie waarmee marker posities gemeten worden. Er is gekozen voor de laagste instelling omdat daarbij de grootste nauwkeurigheid wordt bereikt. Om toch nog een redelijke tijdsduur te krijgen is er een 'transfer rate' van 8 ingesteld. Dit wil zeggen dat er van de acht keer dat alle markerposities gemeten worden er slechts één keer alle markerposities worden weggeschreven. De proefstaafjes bevatten allemaal 50 markers volgens een bepaald patroon dat weergegeven is in figuur 3.4.



Bij een sample rate van 937,5 [Hz], een transfer rate van 8 en 50 markers wordt de wegschrijffrequentie 2,34375 [Hz] voor

fig 3.4: Het patroon van de markers op een proefstaafje

een sample van alle markers. Er is in die 128 kb voor een meting ruimte vrijgelaten voor

twee camera's. Er wordt slechts een camera gebruikt dus er wordt maar 64 kb informatie weggeschreven en ook 64 kb default getallen voor de tweede camera. Voor iedere marker moet een x- en y-coördinaat (2D) opgeslagen worden. Eén coördinaat is een integer tussen 0 en 32767 (er zijn 32768 pixels op de x- en y-as) en beslaat twee bytes. Per sample van alle markers worden er 100 coördinaten opgeslagen (200 bytes). Er is 64 kb, dat is 65536 bytes, beschikbaar voor een complete meting. Met 200 bytes per sample van alle markers kunnen er dus 327 samples worden weggeschreven. Met een frequentie van 2,34375 [Hz] is er dan een meettijd van 139,52 [s].

De Zwick trekbank heeft de kracht gemeten gedurende 140 seconden. Eenzelfde frequentie als bij het Hentschel video meetsysteem was niet instelbaar. Er is gekozen voor een frequentie van 10 Hz., omdat er dan meer samples zouden ontstaan dan bij de rek-meting, zodat er in ieder geval voldoende informatie in de kracht-data aanwezig zou zijn.

3.5 Parameter-schatten

Voor het parameter-schatten is een programma gebruikt op basis van een sequentiële minimum variantie schatter (Oomens, 1993). Het probleem dat zich nu voordeed was dat de frequentie van de rekdata en van de krachtdata niet gelijk waren en dat er voor de invoer van bovengenoemd programma een file aangemaakt moest worden met twee kolommen: de spanning en de rek op gelijke tijdstippen. Er is een matlab-programma geschreven om de krachtdata door middel van lineaire interpolatie om te zetten van een frequentie van 10 [Hz] naar een frequentie van 2,34375 [Hz]. Dit programma is bijgevoegd in appendix D en heeft als uitvoer een file met 2 kolommen: de spanning en de rek. Deze wordt ingevoerd in het eerder genoemde schattingsprogramma, de sequentiële minimum variantie schatter. Er wordt een beginschatting ingevoerd. De gemeten waarde wordt vergeleken met de waarde volgens het model met de beginschattingen. Het verschil tussen deze twee waardes wordt gebruikt om een volgende schatting te bepalen. Met goede beginschattingen zullen de te schatten parameters convergeren zodat er uiteindelijk een goede schatting is voor de modelparameters. Resultaten van het parameter-schatten zijn te vinden in hoofdstuk 4.

HOOFDSTUK 4: Resultaten en discussie

Voor het experiment waarvan hierna de resultaten beschreven zullen worden is ook een pilot experiment uitgevoerd. Voor verdere informatie over het pilot experiment wordt verwezen naar appendix B.

Voor staafje 0 zijn in fig 4.1 de hoofdrek en de dwarsrek weergegeven.

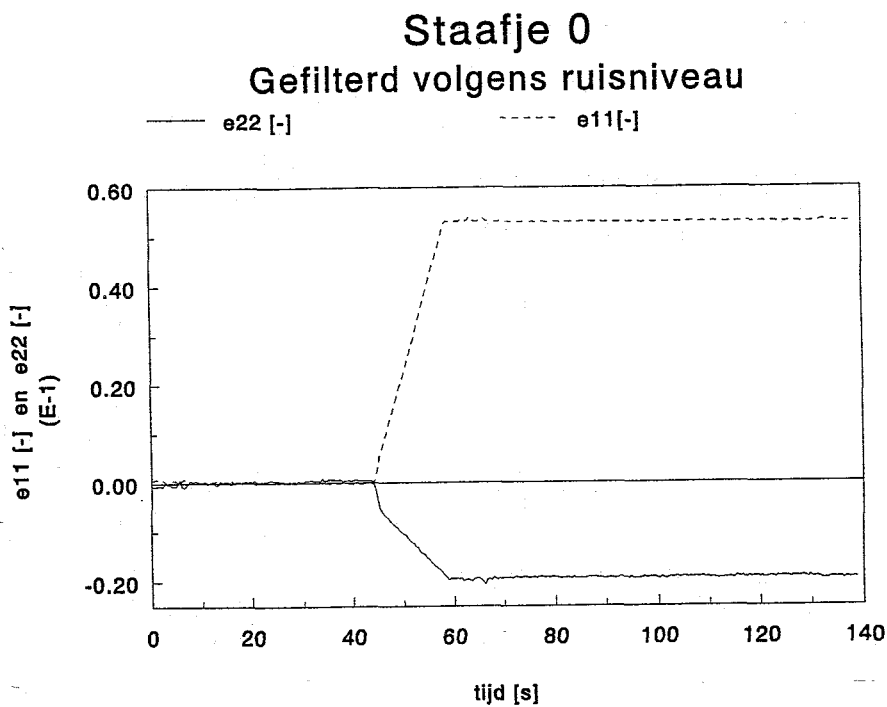


fig. 4.1: Hoofdrek en dwarsrek als functie van de tijd

Deze plaatjes van alle drie de staafjes zijn gebruikt om te kijken of voldaan wordt aan formule 2.20. Deze was immers gegeven als criterium om te kijken of het materiaal te beschrijven was volgens het beschreven model in hoofdstuk 2 met maar één tijdsafhankelijke functie.

In figuur 4.2 zijn de dwarscontracties weergegeven vanaf het moment dat de rekstap begint (na 45 seconden). Het dalende verloop van de dwarscontractie in de eerste 15 seconden heeft waarschijnlijk te maken met het twee-fasen gedrag van de lineair visco-elastische vaste stof in interactie met de vloeistof. Er is bij dit materiaal al twee-fasen

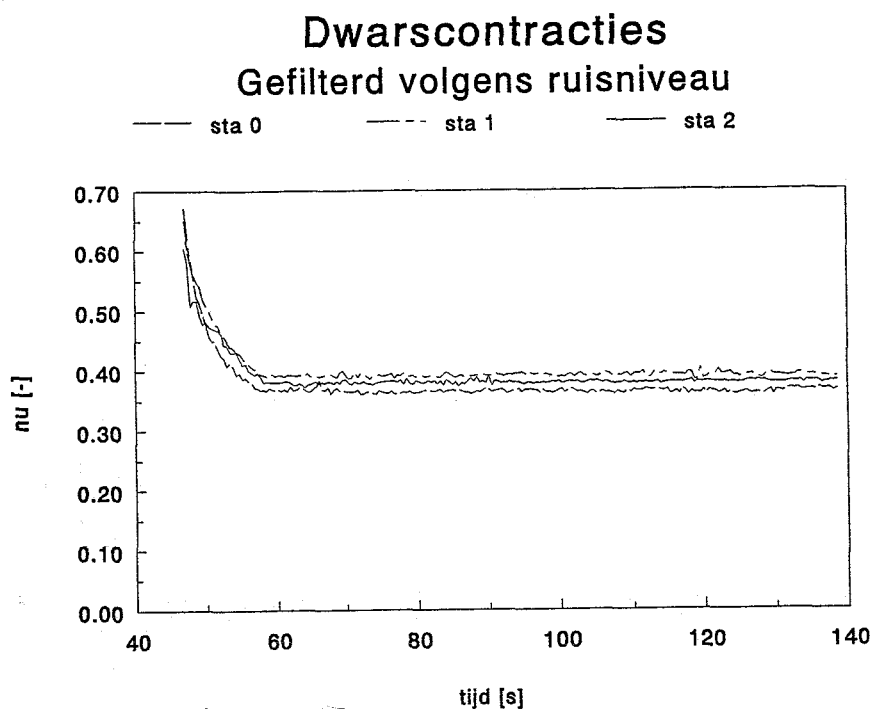


fig. 4.2: De dwarscontracties van de staafjes 0, 1 en 2

gedrag geconstateerd met een karakteristieke tijd van enkele seconden. Het is echter wel vreemd dat de dwarscontractie daalt vanaf een zo hoge beginwaarde.

Hier is niet verder op in gegaan.

In ieder geval zijn de uiteindelijke dwarscontracties constant en ze variëren qua waarde nauwelijks. Hieruit kan dus geconcludeerd worden dat het lineair visco-elastische materiaal te beschrijven is met één tijdsafhankelijke functie. In figuur 4.3 is het gegeneraliseerd Maxwell model weergegeven, waarop het materiaal geprobeerd is te fitten. Hiervoor zijn in ieder geval 3 parameters nodig en het model is uit te breiden tot bijvoorbeeld een 5-parameter model.

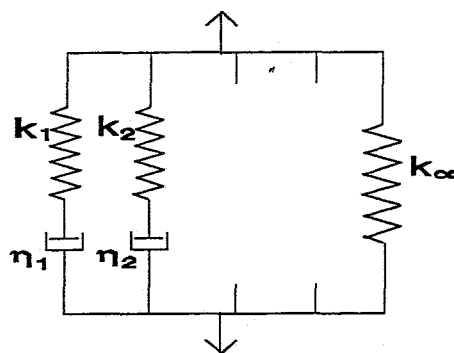


fig. 4.3: Het gegeneraliseerd Maxwell model

Er is geprobeerd om het materiaal te beschrijven met zo weinig mogelijk parameters. Er is dus begonnen met een fit op het 3-parameter model. Dit model wordt dan beschreven met formule 4.1 (deze één-dimensionale formule is gelijk aan formule 2.4 waarbij alleen het element ${}^4G_{1111}$ van de vierde-orde tensor ${}^4G(t-\tau)$ ongelijk is aan 0).

$$\sigma(t) = \int_0^t \{x_1 + x_2 \cdot e^{-x_3(t-\tau)}\} \dot{\epsilon}(\tau) d\tau \quad (4.1)$$

waarbij x_1 , x_2 en x_3 de parameters zijn die het schattingsprogramma geeft:

$$x_1 = k_\infty, \quad x_2 = k_1, \quad x_3 = \frac{1}{\tau_1}, \quad \tau_1 = \frac{\eta_1}{k_1} \quad (4.2)$$

Het materiaalgedrag is gefit op dit model en het resultaat voor staafje 0 is te zien in figuur 4.4. De gladde lijn is het gemeten spanningsverloop en de kronkelende lijn is de spanning berekend vanuit de geschatte parameters samen met de gemeten rek. De kronkeling die zich hierin voordoet vindt zijn oorzaak in de gemeten rek (appendix E, fig E.1).

Staaftje 0: gemeten en gefitte spanning Gefit volgens 3-parameter Maxwell model

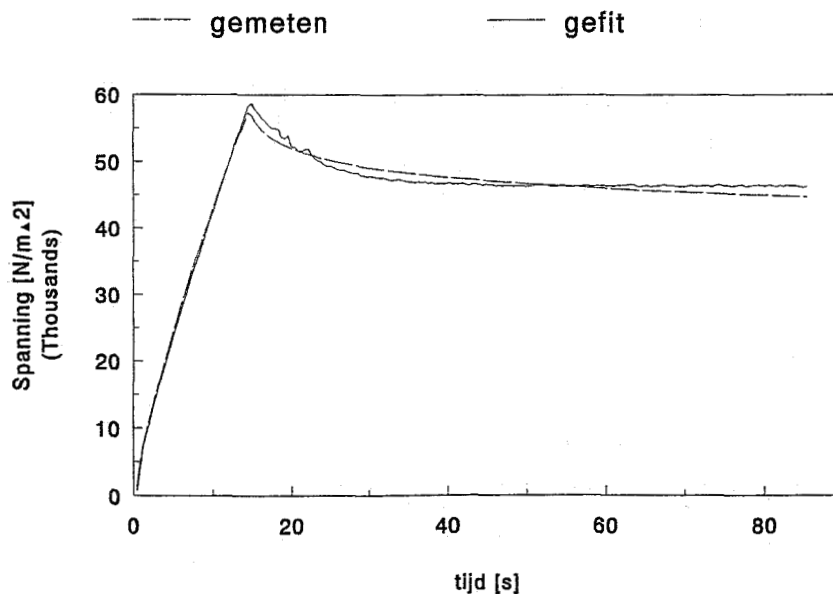


fig. 4.4

De drie-parameter-fit voor staafje 1 en 2 en de gemeten rek bij deze staafjes is weergegeven in appendix E, fig E.2 tot en met E.5. De waarden van de gevonden parameters zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Nummer proefstaafje	0	1	2
parameter x_1	$8,771 \cdot 10^5$	$5,010 \cdot 10^5$	$7,924 \cdot 10^5$
parameter x_2	$5,350 \cdot 10^5$	$2,164 \cdot 10^5$	$4,942 \cdot 10^5$
parameter x_3	$1,390 \cdot 10^{-1}$	$8,105 \cdot 10^{-2}$	$1,148 \cdot 10^{-1}$

Het is duidelijk te zien in figuur 4.4 dat een 3-parameter model dit materiaalgedrag niet echt goed kan beschrijven. De relaxatie-kromme kan niet goed gevolgd worden door het 3-parameter model. Daarom wordt hierna bekeken of een 5-parameter model betere resultaten geeft. De formule voor een 5-parameter model is formule 4.3:

$$\sigma(t) = \int_0^t \{x_1 + x_2 \cdot e^{-x_3(t-\tau)} + x_4 \cdot e^{-x_5(t-\tau)}\} \dot{\epsilon}(\tau) d\tau \quad (4.3)$$

met x_1, x_2, x_3, x_4 en x_5 de parameters die het schattings programma geeft:

$$x_1 = k_\infty, \quad x_2 = k_1, \quad x_3 = \frac{1}{\tau_1}, \quad \tau_1 = \frac{\eta_1}{k_1}, \quad x_4 = k_2, \quad x_5 = \frac{1}{\tau_2}, \quad \tau_2 = \frac{\eta_2}{k_2} \quad (4.4)$$

Het materiaalgedrag is gefit op dit model en het resultaat is te zien in figuur 4.5 (voor de staafjes 1 en 2 zijn deze resultaten weergegeven in appendix E, figuur E.6 en E.7). Het is duidelijk te zien dat het 5-parameter model het materiaalgedrag veel beter kan volgen dan het 3-parameter model. Een fit op een 7-parameter model zal geen significant beter resultaat geven. De waarden van de gevonden parameters zijn weergegeven in de tabel op de volgende pagina.

Stafje 0: gemeten en gefitte spanning

Gefit volgens 5-parameter Maxwell model

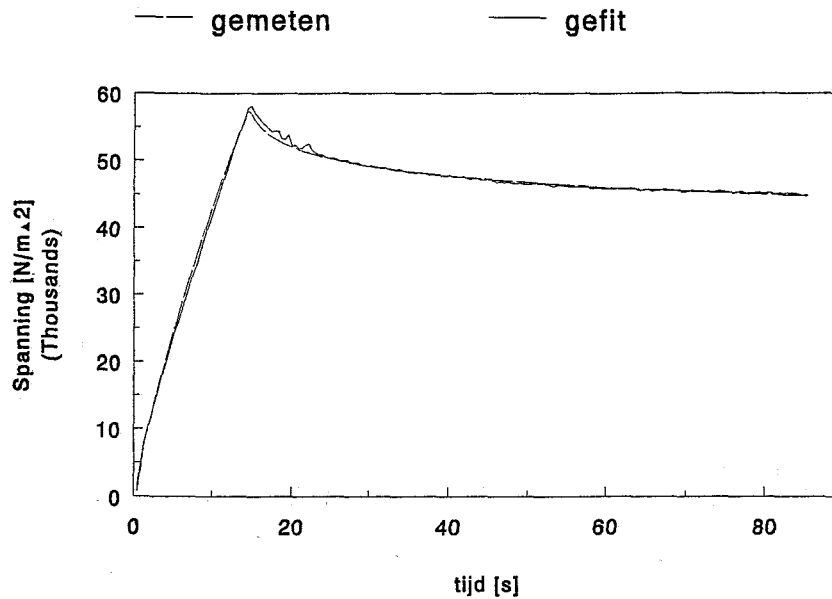


fig. 4.5

Nr. proefstaafje	0	1	2	gemiddeld
parameter x_1	$8,411 \cdot 10^5$	$4,621 \cdot 10^5$	$7,533 \cdot 10^5$	$6,855 \cdot 10^5$
parameter x_2	$2,131 \cdot 10^5$	$1,134 \cdot 10^5$	$1,808 \cdot 10^5$	$1,691 \cdot 10^5$
parameter x_3	$3,970 \cdot 10^{-2}$	$1,769 \cdot 10^{-2}$	$2,876 \cdot 10^{-2}$	$2,872 \cdot 10^{-2}$
parameter x_4	$4,707 \cdot 10^5$	$2,172 \cdot 10^5$	$4,570 \cdot 10^5$	$3,816 \cdot 10^5$
parameter x_5	$3,501 \cdot 10^{-1}$	$2,260 \cdot 10^{-1}$	$2,672 \cdot 10^{-1}$	$2,811 \cdot 10^{-1}$

Er zijn grote verschillen in de resultaten. Dit kan liggen aan de metingen of aan het materiaal. De metingen zijn netjes verlopen dus zou uit het bovenstaande geconcludeerd kunnen worden dat het materiaal niet goed reproduceerbaar te maken is. Kenmerkend hiervoor is het verschil van bijna een factor 2 in k_{∞} .

De oorzaak hiervoor is waarschijnlijk te vinden in de verschillende omstandigheden bij het

vervaardigen van de proefstaafjes. Er was maar één malletje voorhanden om alle proefstaafjes te maken. Gezien de tijdsduur voor het vervaardigen van een proefstaafje duurt het vervaardigen van 6 proefstaafjes ruim een week. Daarbij komen natuurlijk ook ruim verschillende mengtijden voor bij de verschillende staafjes (zie appendix A). Ook zijn de vriestijden niet allemaal precies gelijk en ook de positie van het malletje in de diepvries was niet identiek. Dit alles zou ondervangen kunnen worden door een mal te maken waarin een aantal staafjes tegelijk vervaardigd kunnen worden.

HOOFDSTUK 5: Conclusies en suggesties

Conclusies

- * De aanname dat het PUR-schuim[®] te beschrijven zou zijn met een lineair visco-elastisch model met maar een tijdsafhankelijke functie was terecht.
- * Het PUR-schuim[®] gedrenkt in water is goed te beschrijven met een gegeneraliseerd 5-parameter Maxwell model.
- * Het PUR-schuim[®] is op de gevolgde wijze niet goed reproduceerbaar te maken.
- * Het gebruik van het Hentschel video meetsysteem bij het contactloos meten van de rek bij een proefstaafje gedrenkt in olie geeft problemen met de detectie van de markers in verband met de reflectie van de olie die in de buurt van de markers op het proefstaafje zit.

Suggesties voor verder onderzoek

- * Er zou onderzocht moeten worden of het compressie-gedrag voor dit materiaal wezenlijk verschilt van het trek-gedrag.
- * Een mogelijkheid tot verder onderzoek is het bekijken in hoeverre het 2-fasen-gedrag een rol speelt bij het verschijnsel van de grote, dalende v tijdens de rekstap.
- * Er zou een onderzoek plaats moeten vinden naar de precieze werking van het SVD-filter.

LITERATUUR

Muijtjens, A.M.M., 1990, J.M.A. Roos, T.T. Prinzen, A. Hasman, R.S. Reneman en T. Arts, "Noise reduction in estimating cardiac deformation from marker tracks.", The American Physiological Society, pp H599-H605.

Oomens, C.W.J., 1991, "Constitutieve modellen", college-diktaat nummer: 4687, Technische Universiteit Eindhoven, Nederland.

Oomens, C.W.J., 1993, M.R. v. Ratingen, J.D. Janssen, J.J. Kok en M.A.N. Hendriks, "A numerical method for a mechanical characterization of biological materials.", Journal of Biomechanics, Vol. 26, No 4/5, pp 617-621.

Zamzow, H., 1990, "The Henschel random access tracking system HSG 84.30", in "Proceedings of the symposium on image based motion measurement", La Jolla, California, USA, ed. J.S. Walton, SPIE, Vol. 1356, pp130-133.

Appendix A: Eigenschappen van de proefstaafjes

Proefstaafnr.	mengtijd [uur]	vriestijd [uur]	percentage	A ₀ [mm ²]	medium
Staafe 0	24	24	9,95% ± 0,1%	34,73	water
Staafe 1	50	23½	9,95% ± 0,1%	35,53	water
Staafe 2	75½	22	9,95% ± 0,1%	35,32	water
Staafe 3	54	23	9,92% ± 0,1%	33,30	olie
Staafe 4	79	90	9,92% ± 0,1%	34,10	olie
Staafe 5	99½	66	9,95% ± 0,1%	35,67	olie

Appendix B: Het pilot experiment

Het pilot experiment is uitgevoerd met zes staafjes, waarvan drie staafjes met water als medium en drie staafjes met olie als medium. Er is een verplaatsing aangebracht in tien stappen van 1 [mm] die in totaal dus een verplaatsing van 10 [mm] tot gevolg hebben. Deze 10 [mm] zou ongeveer overeen moeten komen met 10% rek en dus zijn er dan rekstappen van ongeveer 1%. Een rekstap duurde 1 seconde. Na iedere rekstap is er 3 minuten gerelaxeerd. De opgelegde verplaatsing en de te verwachten te meten kracht zijn weergegeven in figuur B.1.

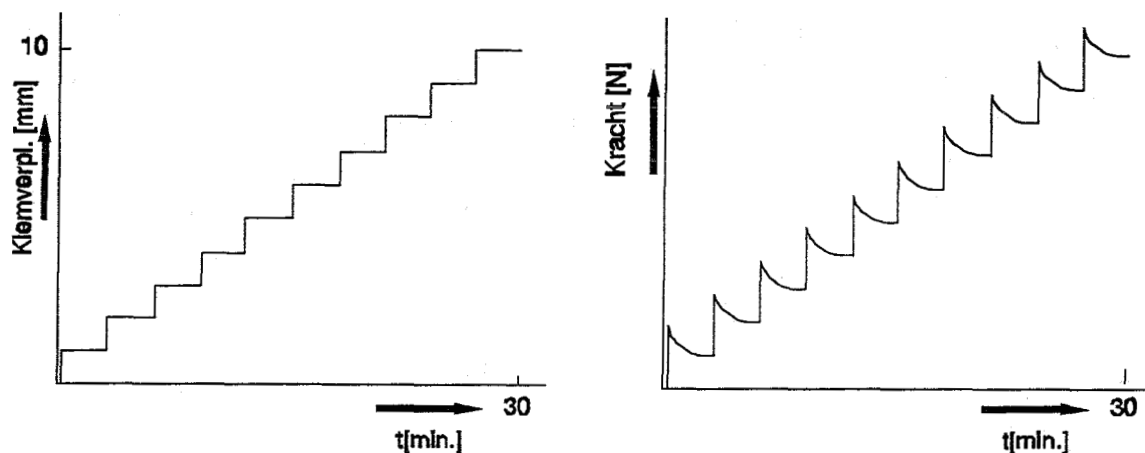


fig B.1: De opgelegde verplaatsing en de te verwachten kracht bij het eerste experiment

Ook vóór de rekstap is gedurende 5 seconden gemeten om de uitgangspositie goed te kunnen bepalen. Een meting voor een rekstap duurde 2 minuten en 20 seconden. Dit heeft dus tot gevolg dat het totale experiment voor een proefstaafje van 30 minuten (10 rekstappen van 3 minuten) niet helemaal gemeten wordt. Tussen 2 rekstappen is er gedurende 40 seconden niet gemeten. Dit bleek later de reden te zijn voor het niet kunnen uitvoeren van de parameter-schatting gedurende de hele meting. Voor het parameter-schatten zou dan alleen de meting van de eerste rekstap gebruikt kunnen worden en dit was een rekstap van slechts 1%.

Bij het parameter-schattings programma werd er vanuit gegaan dat het materiaal lineair visco-elastisch zou zijn met één tijdsafhankelijke functie en te beschrijven zou zijn met een 3- of 5-parameter model van Maxwell. Om te controleren of het materiaal ook

werkelijk dit gedrag vertoont moet gekeken worden of formule 2.20 geldt. Hierin staat eigenlijk dat de dwarscontractie constant moet blijven. Zie nu figuur B.2.

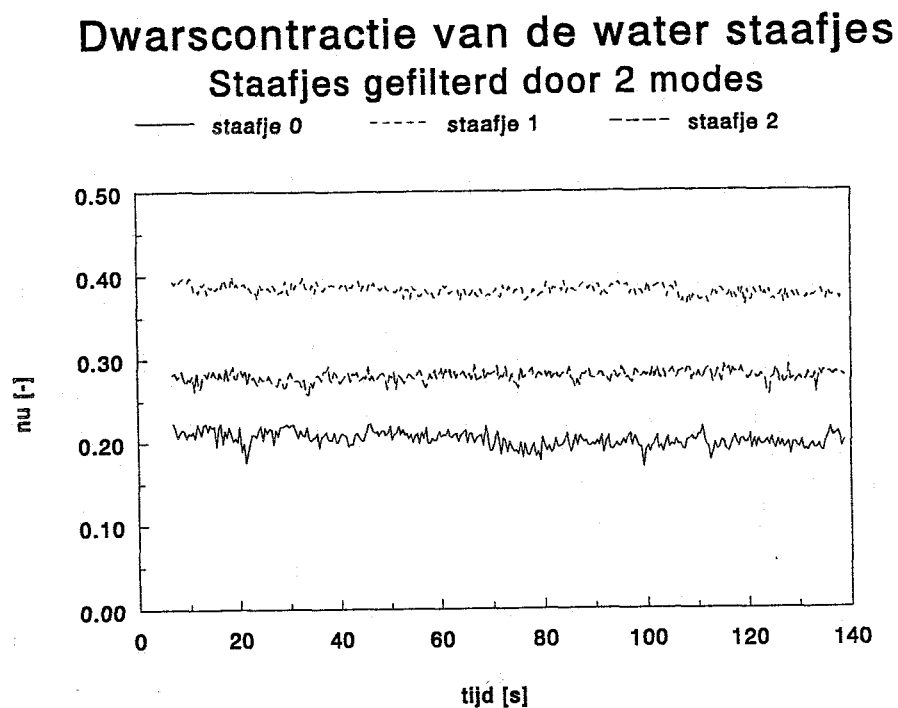


fig B.2

Hieruit blijkt dat de dwarscontracties wel redelijk constant zijn maar zoveel in de waarden variëren dat geconcludeerd moet worden dat de rekmetingen niet voldoende goed zouden zijn geweest om er een parameter-schatting mee uit te voeren.

Dit zou kunnen liggen aan de kleine rekstap.

Appendix C: Het SVD-filter

Met het video meetsysteem is er gemeten op het randje van de mogelijkheden. Dit in verband met de witte achtergrond van het proefstaafje en de kleinst mogelijke markers met een diameter van 0,5 mm. Het ruisniveau was daarom vrij groot zoals blijkt uit figuur C.1.

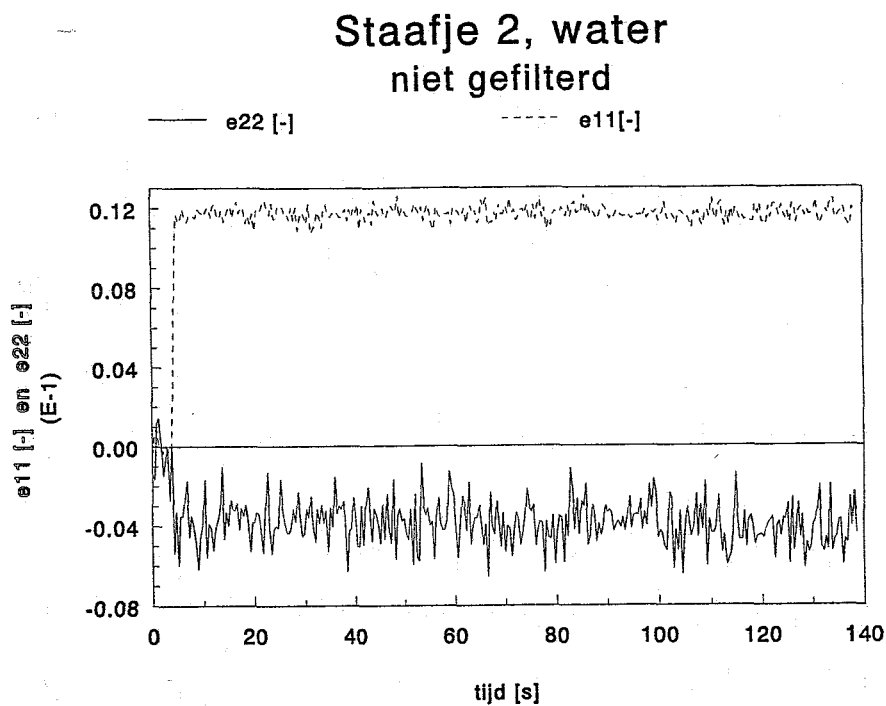


fig C.1

Er is daarom gezocht naar een manier van filteren. Eén optie was om een lopend gemiddelde te nemen, mede omdat dit een mogelijkheid was in de postprocessor REKDYN, een programma dat de dynamische data van het video meetsysteem verwerkt. Een lopend gemiddelde kan gezien worden als een laag-doorlaat-filter. Het probleem hierbij was dat de rekstap helemaal werd uitgerekt. Dit zou een verkeerde uitwerking hebben bij de parameter-schatting.

Er is echter al een goede filter-methode hiervoor ontwikkeld. De Singular Value Decomposition, vandaar de naam SVD-filter. De markeringen op het continuum herbergen

een gezamenlijke bewegingsinformatie die eruit gehaald kan worden. Hiervoor wordt het signaal opgesplitst in een aantal modes met bijbehorende singuliere waarden. Als het ruisniveau bekend is kan bepaald worden hoeveel modes het signaal voorstellen. De overige modes kunnen gezien worden als ruis en worden dus weggelaten. Het ruisniveau kan bepaald worden uit een bekend stukje signaal. Hiervoor is het eerste stuk van de meting, vóór de rekstap, gebruikt, waarvan bekend is dat het een constant signaal is. Bij alle filtering acties van het uiteindelijke experiment werden er 2 modes meegenomen die het signaal voorstelden. De eerste mode was een constante waarde en de tweede mode was een stapfunctie. Volgens het bepaalde ruisniveau zaten er niet meer modes in (dit is ook vrij vanzelfsprekend). Het resultaat na filtering is dat van figuur C.2.

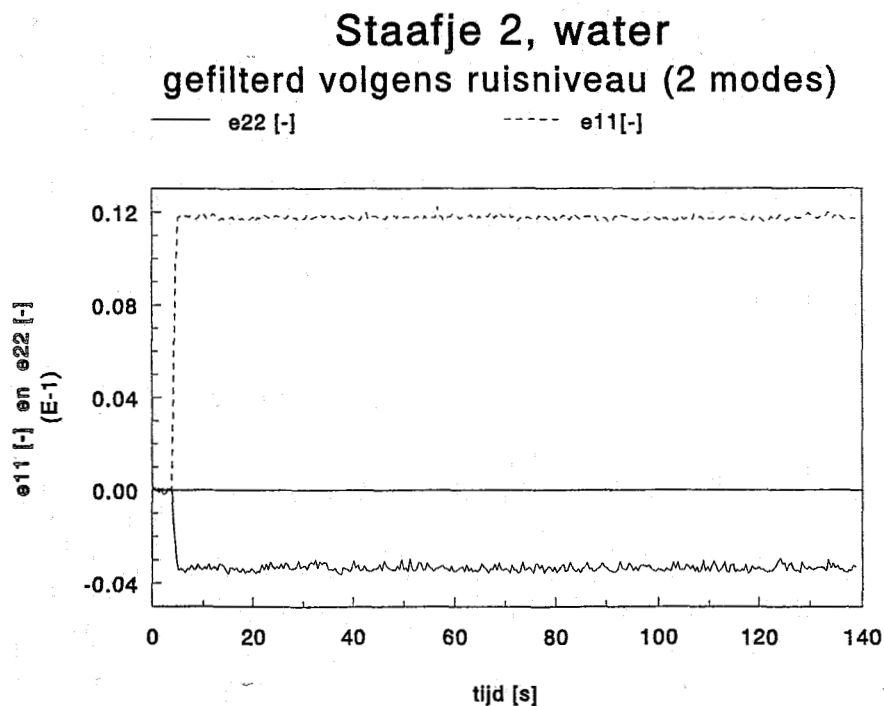


fig C.2

Deze methode van filtering is uiteindelijk gebruikt.

Meer informatie over SVD-filtering is te vinden in "Noise reduction in estimating cardiac deformation from marker tracks" (Muijtjens, 1990).

Appendix D: Het matlab-verwerkingsprogramma

```

%*****
%
%       Geschreven door Ad Goijaerts
%
%       Programma om de Zwick meetfrequentie gelijk te maken aan
%       meetfrequentie van het Hentschel meet systeem
%
%       Invoeren/veranderen in het programma alvorens
%       het te runnen: verschuiving
%               invoerfile Zwick
%               invoerfile Hentschel
%               gemiddelde dwarsrek
%               begindoorsnede
%               factor waarmee de zwick array vermenigvuldigd
%               moet worden
%*****

% frequentie Zwick meting is 10 Hz: tijd tussen twee metingen: 0.1 [s]
% frequentie Hentschel meting is 2.34375 precies: tijd tussen twee
% metingen is 1.28/3 seconden is ongeveer 0.426666667

% In dit programma wordt de Zwick data omgezet naar een frequentie, gelijk
% aan die van de Hentschel data

%*****
% invoer zwick data: ado?0 (?=0,1,2) of adw?0 (?=3,4)
% met uitvoervariabele: data488 (1400 bij 1)
%*****

format long e
adw20

% Je moet eerst van tevoren de verschuiving bepalen tussen de Hentschel
% data en de Zwick data. Hierbij moet je de Hentschel-hoofdrek plotten
% t.o.v. th=[0:800/1875:138.7] en data488 plotten t.o.v. tz=[0:.1:139.9]

%*****
% Indien de Hentschel data voorloopt (eerder stijgt): een positieve
% verschuiving invullen in secondes
%*****

verschuiving=0.8;

tzwhe=[verschuiving+0:800/1875:verschuiving+138.7];
for i=1:326,
    vlakvoor=fix(tzwhe(i)*10)+1;
    vlakna=ceil(tzwhe(i)*10)+1;

```



```
% interpolatie van zwick meetpunten
helling=(data488(vlakna)-data488(vlakvoor))/0.1;
zwickdat(i)=data488(vlakvoor)+(tzwhe(i)-((vlakvoor-1)/10))*helling;
% zwickdat is het array met 326 geïnterpoleerde zwick-data punten
end
thent=[0:800/1875:138.7]';

%*****
%           Hentschel filenaam invullen (2x)
%*****

load ak2filt2.dat
hoofdrek=ak2filt2(:,3);

%*****
%           Gemiddelde dwarsrek invullen en de begin doorsnede in m^2
%           en de factor voor de Zwick array
%*****

dwarsrek=0.0032;
begindoorsnede=3.4e-5;
factorzw=2.5/30000;
spanning=zwickdat'*factorzw/(begindoorsnede*((1-dwarsrek)^2));

% uitvoer in een data file met de eerste kolom de tijd, in de tweede kolom
% de Hentschel hoofdrek en in de derde kolom de spanning

uitvoer=[thent,hoofdrek,spanning];
save fitinput.dat uitvoer /ascii
```

Appendix E: De resultaten-figuren

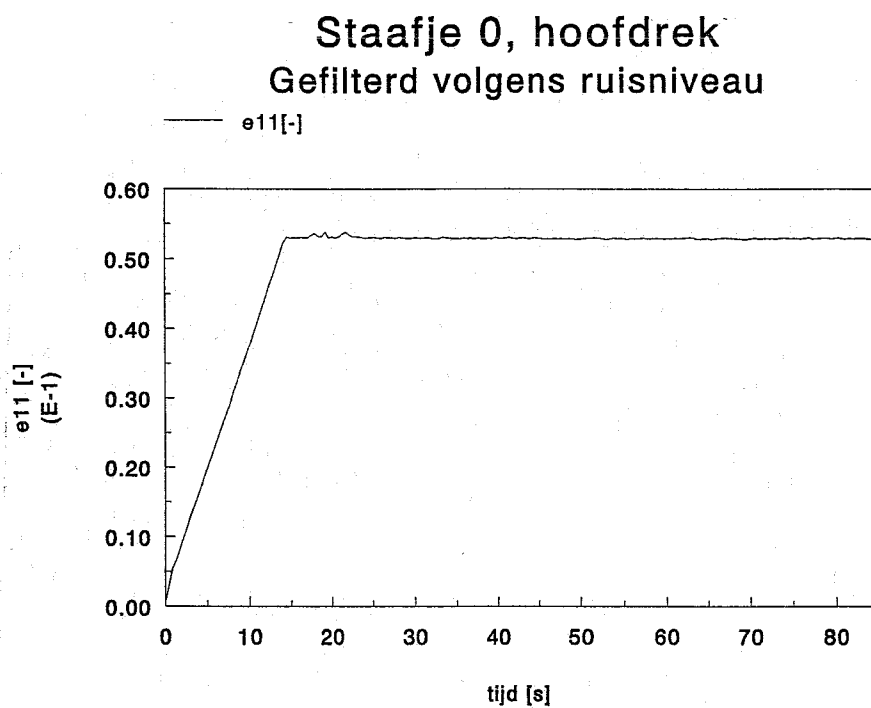


fig. E.1

Stafje 1: gemeten en gefitte spanning Gefit volgens 3-parameter Maxwell model

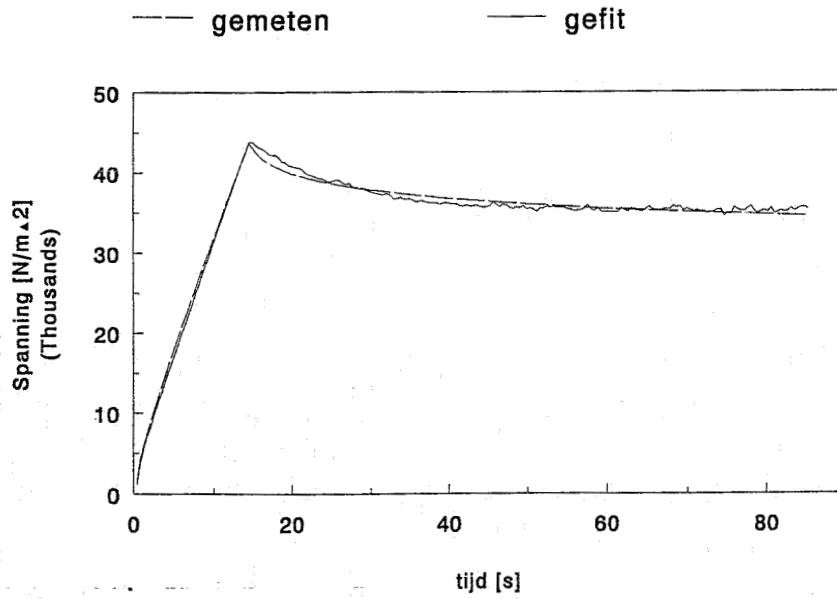


fig. E.2

Stafje 1, hoofdrek Gefilterd volgens ruisniveau

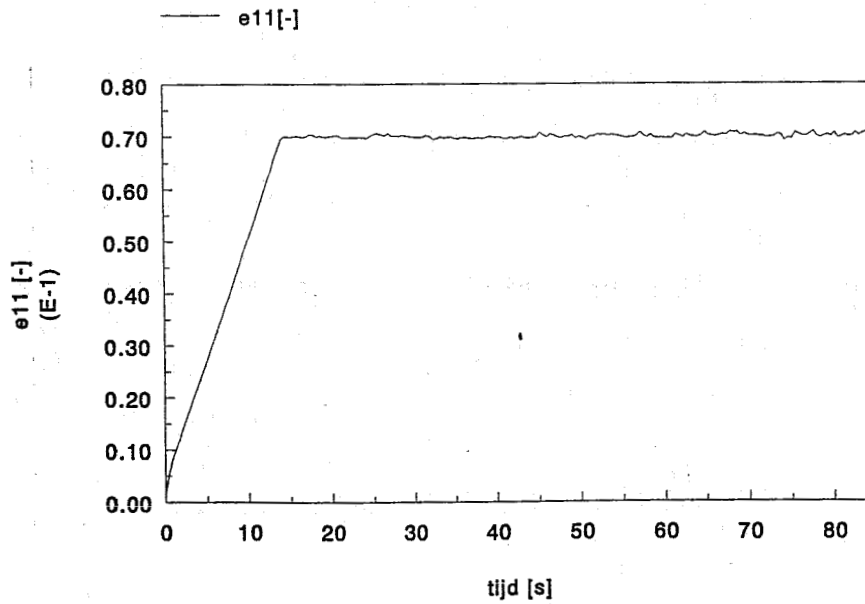


fig. E.3

Staafe 2: gemeten en gefitte spanning

Gefit volgens 3-parameter Maxwell model

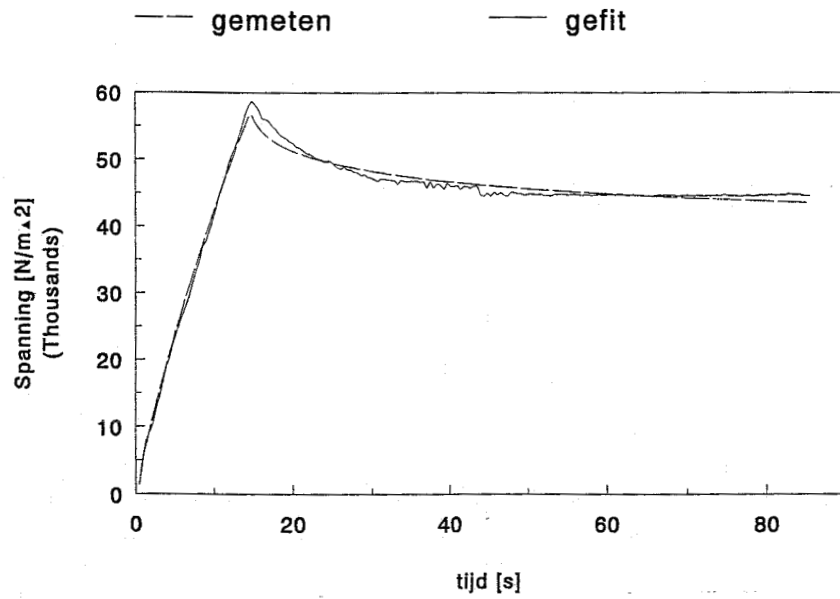


fig. E.4

Staafe 2, hoofdrek

Gefilterd volgens ruisniveau

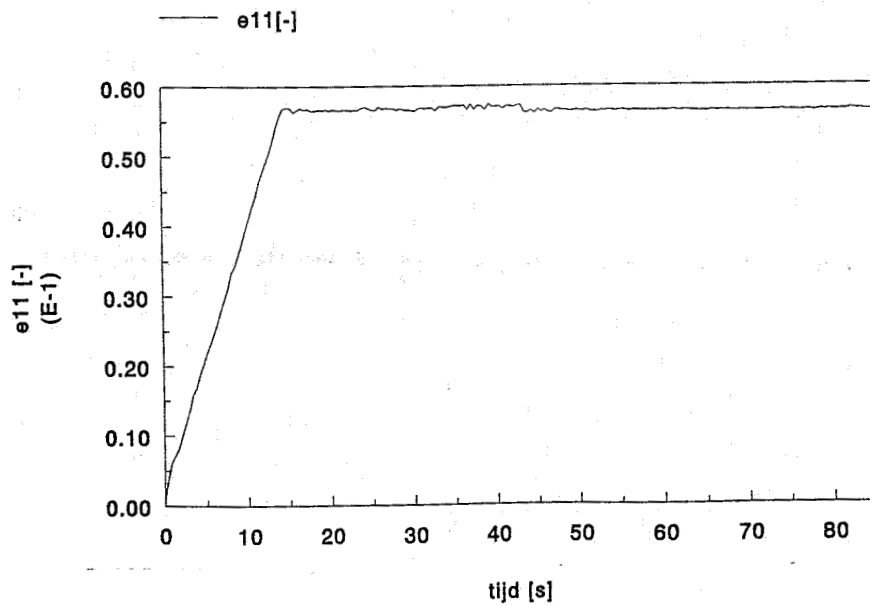


fig. E.5

Staafe 1: gemeten en gefitte spanning
Gefit volgens 5-parameter Maxwell model

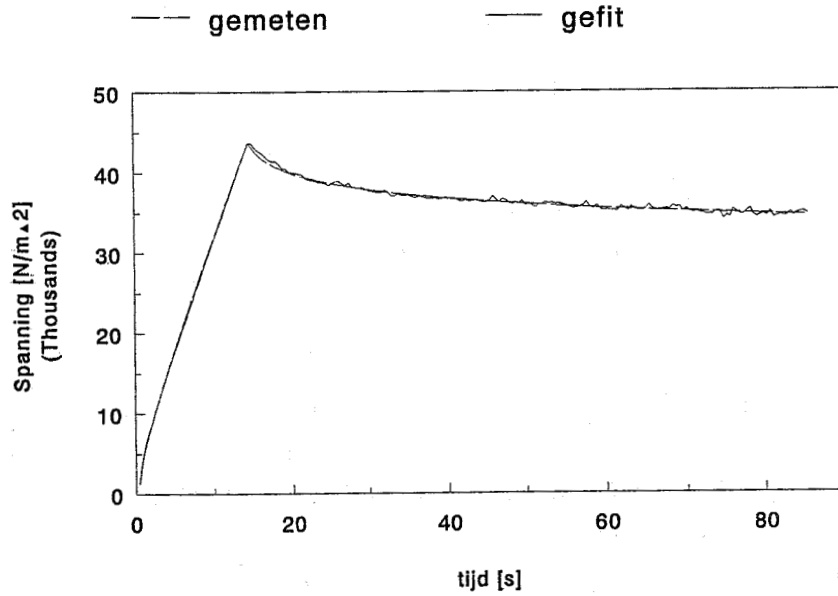


fig. E.6

Staafe 2: gemeten en gefitte spanning
Gefit volgens 5-parameter Maxwell model

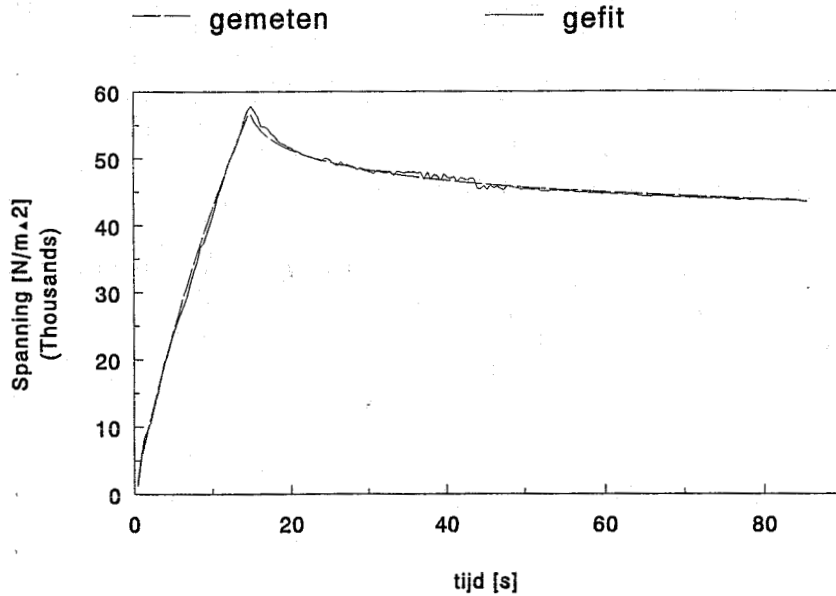


fig. E.7