

## Lokalisering van rek in materiaal met softening-gedrag

**Citation for published version (APA):**

van Etten, L. P. J. (1992). *Lokalisering van rek in materiaal met softening-gedrag*. (DCT rapporten; Vol. 1992.117). Technische Universiteit Eindhoven.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/1992

**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](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

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

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

---

Lokalisering van rek  
in  
materiaal met softening-gedrag

rapport nummer: 92-117

een stageverslag van

Lejo van Etten  
(TUE idnr. 249826)

Begeleiders  
Tiny van Hout  
Henk de Vree  
Marcel Brekelmans

VAKGROEP FUNDAMENTELE WERKTUIGKUNDE  
FACULTEIT WERKTUIGBOUWKUNDE  
TECHNISCHE UNIVERSITEIT EINDHOVEN

oktober 1992

---

## Samenvatting

Uit trekproeven met voorgeschreven verplaatsing van de inklemmingen blijkt dat na het bereiken van de maximaal door het materiaal te dragen belasting, softening-gedrag op kan treden. Door het ontstaan van kleine holten in het materiaal, zogenaamde crazes, neemt de voor verder rekken benodigde kracht af. Dit fenomeen wordt beschreven in numerieke schademodelen, waarin schade homogeen over het materiaal is verdeeld.

Volgens de 'weakest link' hypothese wordt de maximaal mogelijke (trek)belasting van het materiaal bepaald door de zwakste schakel. Hierin zal ook het eerst softening-gedrag optreden en zal rek zich concentreren. Het gevolg hiervan is dat schade niet meer homogeen over het materiaal verdeeld is. Het gevolg van de lokalisering van dat andere, sterkere schakels gaan relaxeren. De rek in deze schakels gaat afnemen. In het geval echter dat visco-effecten in het materiaal aanwezig zijn, zal de rektoename in de sterkere schakel eveneens positief blijven. Ook in dat geval lokaliseert rek in een klein gebied, maar met gelijktijdige rektoename in de rest van de staaf.

Doel van deze opdracht is te onderzoeken of tijdens trekproeven rek zich concentreert in zo'n zwakste schakel. Is dit het geval dan moet worden nagegaan hoe groot het gebied is waarin rek zich concentreert. Daarnaast is het de bedoeling ook te kijken of in de andere, sterkere schakels rek gaat afnemen of eveneens blijft toenemen. In het eerste geval zullen elastische effecten de hoofdrol spelen. In het tweede geval wordt het materiaalgedrag mede bepaald door visco-effecten.

Om lokalisering van rek te kunnen onderzoeken worden op de trekstaven van het kunststofmengsel PS/EPDM op een onderlinge afstand van 5 mm markers van retro-reflecterend materiaal aangebracht. Tijdens verschillende trekproeven wordt hiervan de positie gemeten met behulp van een random-access camera en het Hentschel-meetsysteem. Uit de markerposities wordt vervolgens de rek bepaald in het materiaal tussen twee markers.

Om de nauwkeurigheid te vergroten worden naast normale continue trekproeven ook stapsgewijze proeven gedaan. Daarbij wordt de traverse telkens na een voorgeschreven verplaatsing van 0,1 mm stilgezet. Het materiaal krijgt dan de gelegenheid te relaxeren. Als na 6 minuten kruip tot ongeveer nul is gereduceerd worden de markerposities gemeten. Na 7 minuten wordt een volgende rekstap van 0,1 mm gezet.

## Samenvatting.

---

Uit twee stapsgewijze proeven kan worden geconcludeerd dat rek concentreert in een gebied ter grootte van circa 10 mm rond de plaats van breuk. Breuk was daarbij het gevolg van een oppervlakte-oneffenheid. De resultaten tonen verder dat de rektoename ook buiten het lokaliseringsgebied positief blijft. Visco-effecten spelen dus een belangrijke rol.

Uit de resultaten van de continue trekproeven kunnen helaas geen conclusies worden getrokken. De resultaten geven geen duidelijkheid over de aan- of afwezigheid van een reklokaliseringsgebied. Slechts de resultaten van één proef, die waarbij breuk niet plaats vond op een afdrukking van een uitstoterpen, wijzen op reklokalisering. De resultaten van de andere proeven laten een gelijkmatig over de staaf verdeelde rek zien. Waarschijnlijk is dat het materiaalgedrag van de staven voor de continue trekproeven sterk beïnvloed is door de wijze en duur van opslag van de staven. Gedurende anderhalve maand zijn zij op kamertemperatuur opgeslagen geweest.

---

**INHOUDSOPGAVE**

Samenvatting.	Pagina 3
Hoofdstuk 1. <b>INLEIDING.</b>	Pagina 7
1.1   Definitie van het onderzoeksgebied.	7
1.2   Klassieke Breukmechanica.	9
1.3   Continuüms Damage Mechanica.	10
1.4   Kunststoffen.	11
Hoofdstuk 2. <b>OPSTELLING.</b>	Pagina 13
2.1   Gebruikte materialen.	13
2.2   Gebruikte apparatuur.	15
Hoofdstuk 3. <b>METHODEN.</b>	Pagina 17
3.1   Vorbereiding.	17
3.2   De continue trekproef.	18
3.3   De stapsgewijze trekproef.	19
Hoofdstuk 4. <b>RESULTATEN.</b>	Pagina 21
4.1   Resultaten van de continue trekproef.	21
4.2   Resultaten van de stapsgewijze trekproef.	22
Hoofdstuk 5. <b>CONCLUSIES en DISCUSSIE.</b>	Pagina 25
5.1   Conclusies uit de continue trekproeven.	25
5.2   Conclusies uit de stapsgewijze trekproeven.	25
5.3   Discussie.	26
Referenties.	Pagina 27
Bijlage 1.   Rekverdeling bij een continue trekproef.	Pagina 29
Bijlage 2.   Rekverdeling bij een stapsgewijze trekproef.	36
Bijlage 3.   Fitten en filteren.	40
Bijlage 4.   Rekberekening bij een continue trekproef.	42
Bijlage 5.   Rekberekening bij een stapsgewijze trekproef.	44
Bijlage 6.   Instellingen Hentschel-meetsysteem.	46

## Hoofdstuk 1. INLEIDING.

### § 1.1 Definitie van het onderzoeksgebied.

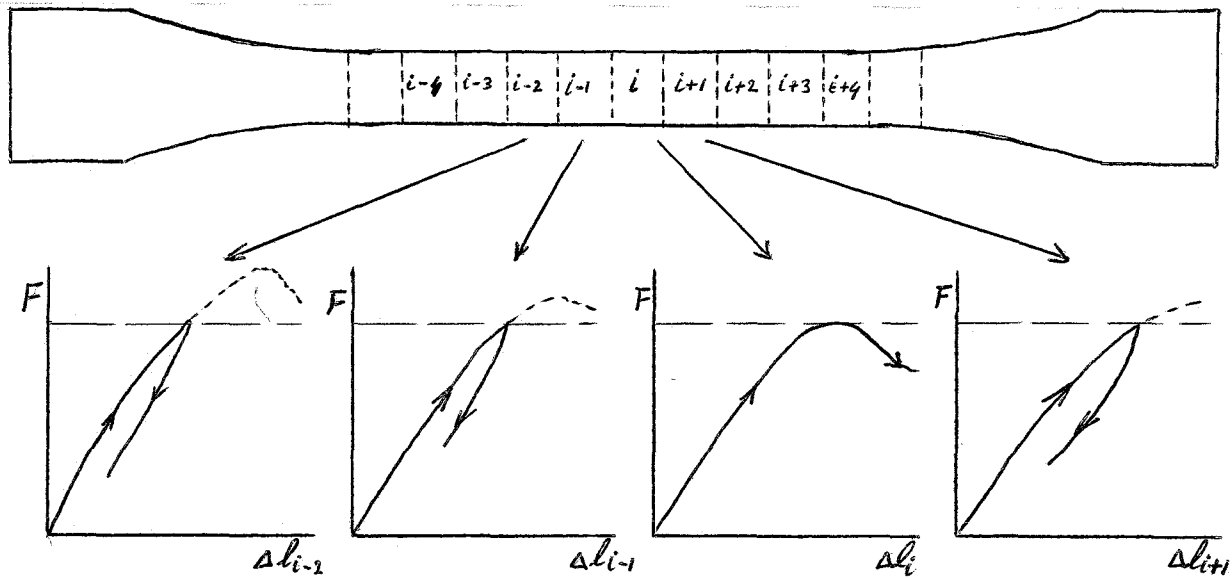
De sectie Damage binnen de vakgroep WFW van de faculteit der Werktuigbouwkunde aan de Technische Universiteit Eindhoven houdt zich bezig met onderzoek naar het bezwijken van materialen onder mechanische of thermische belasting. De globale manier van werken in de Klassieke Breukmechanica ziet er als volgt uit: Eerst wordt de positie van het begin van de scheurvorming bekend verondersteld en wordt een bijpassend type scheurinitiatie aangegeven. Dan volgen berekeningen aan het spanningsveld rond de scheurtip. Tenslotte wordt met scheurgroei-criteria en een relatie voor de scheurvoortplantingssnelheid het bezwijkproces tot de fatale breuk beschreven.

Sinds 1980 bestaat er naast de Klassieke Breukmechanica een veelbelovend alternatief voor het beschrijven van het bezwijkgedrag: de Continuüm Damage Mechanica. Het ontbreken van materiële samenhang, schade, wordt daarbinnen opgevat als een veldgrootte (continu in plaats en tijd) die van invloed is op het constitutief gedrag. In het isotrope geval kan schade worden gemodelleerd als de scalaire variabele  $D$ . In volledig onbeschadigd materiaal is  $D = 0$ . Ontbreekt elke vorm van materiële samenhang dan is  $D = 1$ . Modelleren van de schadeontwikkeling beschrijft de materiaaldegeneratie.

Modellen met plaatsafhankelijke initiële schade zijn geïmplementeerd in EEM-pakketten. Daarbij is in eerste instantie aangenomen dat schade homogeen over het materiaal is verdeeld. Later is schade gemodelleerd als een op het niveau van een elementaire cel statistisch over het materiaal verdeelde grootte. Onder een elementaire cel wordt verstaan een volumedeeltje, waarvan de mechanische eigenschappen representatief zijn voor die van het materiaal.

Uit trekproeven met voorgeschreven verplaatsing van de inklemmingen blijkt dat na het bereiken van de maximaal door het materiaal te dragen belasting, softening-gedrag op kan treden. Tengevolge van het ontstaan van kleine holten in het materiaal die de samenhang nadelig beïnvloeden, crazes, neemt daarbij de voor verder rekken benodigde kracht af.

Uitgaande van de 'weakest link' hypothese zal de maximaal mogelijke trekbelasting



Figuur 1.1 Een trekstaaf is, net als een ketting, opgebouwd uit verschillende schakels. De zwakste schakel bepaald de sterkte van de hele ketting.

van het materiaal worden bepaald door de zwakste schakel in het materiaal. Hierin zal ook het eerst softening op gaan treden. Als in een volledig elastisch materiaal de maximale trekkracht van de zwakste schakel is bereikt zullen andere, sterkere schakels als gevolg daarvan gaan ontlasten en elastisch gaan terugveren. Alleen de zwakste schakel zal verder rekken. Figuur 1.1 toont het gedrag van verscheidene schakels welke samen een trekstaaf vormen. De globale rek wordt hoofdzakelijk bepaald door de lokale rek in de zwakste schakel.

Wat er gebeurt in visco-elastisch materiaal als de maximale trekkracht in de 'weakest link' wordt bereikt, is niet bekend. Het kan zijn dat rek zich concentreert in de zwakste schakel en dat de rek in de sterkere schakels afneemt. Het kan echter ook voorkomen dat de sterkere schakels door de relatief langzaam afnemende spanning in de trekstaaf eveneens blijven rekken. Dit is dan het gevolg van visco-elastische effecten in het materiaal. Gevolg is dat de rektoename overal in de staaf positief blijft en het grootst is in de 'weakest link'. Ook in dit geval lokaliseert rek rond de 'weakest link', maar met een gelijktijdige toename van rek in de andere, sterkere schakels.

Doel van deze experimenten is het optreden van lokalisering te onderzoeken door middel van één-dimensionale trekproeven en te bekijken wat de karakteristieke grootte van de 'weakest link' is. Daarvoor worden op onderling kleine afstand markers op trekstaven geplakt. Tijdens verschillende trekproeven wordt hiervan de positie gemeten met behulp van een random-access camera en het Hentschel-meetsysteem. Uit de markerposities wordt vervolgens de rek bepaald in de 'schakel' gelegen tussen twee markers.

Om de nauwkeurigheid te vergroten worden naast normale continue trekproeven ook stapsgewijze proeven gedaan. Daarbij wordt de traverse telkens na een voorgeschreven verplaatsing van 0,1 mm stilgezet. Het materiaal krijgt dan de gelegenheid te relaxeren. Als na 6 minuten kruip tot ongeveer nul is gereduceerd worden de markerposities gemeten. Na 7 minuten wordt een volgende rekstap van 0,1 mm gezet.

## **§ 1.2 Klassieke Breukmechanica.**

Het precies voorspellen van de plaats waar en het tijdstip waarop het constructiemateriaal bezwijkt is altijd al een probleem geweest. Sinds het begin van deze eeuw is geprobeerd initiatie van een scheuren van eindige afmetingen in atomaire structuren te voorspellen. Dit onderzoeksgebied wordt de Klassieke Breukmechanica genoemd.

Bij scheurontwikkeling in atomaire structuren wordt onderscheid gemaakt tussen de scheurvoortplantingsmechanismen splijten en afschuiven. Is een materiaal plastisch deformeerbaar, dan zullen dislokaties zich onder invloed van afschuifspanningen over de roostervlakken bewegen. Aan de korrelgrenzen ontstaan op deze manier zogenaamde 'voids'. Holten die in grootte en aantal toenemen ten gevolge van toenemende en/of wisselende belasting. De materiële samenhang gaat verloren door het op elkaar afschuiven van de roostervlakken.

Is door een lage temperatuur, een hoge reksnelheid en/of een triaxiale spannings-toestand geen of slechts weinig plastische deformatie mogelijk dan zullen onder invloed van normaalspanningen atoombindingen openspringen en zal de materiële samenhang verloren gaan. Dit proces heet splijten.

Om te bekijken onder welke voorwaarden scheuren groeien, zijn scheurvoortplantingscriteria opgesteld op basis van energiebeschouwingen en op basis van spanningsconcentraties rond de scheurtip.

Het blijkt niet eenvoudig op basis van energetische beschouwingen van atomaire



structuren te zeggen wat de materiële conditie zijn voor het groeien van een scheur. Naast omzetting van de extern verrichtte arbeid en/of de intern aanwezige energie in oppervlakte-energie, worden deze vormen van energie ook gedissipeerd tijdens plastische deformatie van het materiaal.

### **§ 1.3 De Continuüm Damage Mechanica.**

De Continuüm Damage Mechanica is een onderzoeksgebied dat pas in de jaren tachtig op gang is gekomen. Het is een aanvulling op de Continuüm Mechanica, dat zich bezig houdt met het lokaal definiëren van (stapsgewijs) continue verplaatsings-, rek- en spanningsvelden. Het constitutieve model van het lokale materiaalgedrag is hierbij van essentieel belang. Lokaal wil in dit verband zeggen op het niveau van het elementaire materiaaldeel. Dat is een volumedeeltje waarvan de fysische eigenschappen representatief zijn voor die van het materiaal. Een blokje beton met representatieve eigenschappen heeft afmetingen van 100 mm. Voor metalen, die een veel homogener structuur hebben, gelden een karakteristieke afmetingen van 0,1 mm.

Voor het onderzoeken van het bezwijkgedrag van materialen worden spanningsvelden rond scheurtippen gemodelleerd. In de buurt van zo'n scheurtip blijkt de spanning veel groter dan op ruime afstand van de scheur. Vandaar ook dat het optreden van scheurgroei het meest waarschijnlijk is in een scheurtip.

De Continuüm Damage Mechanica modelleert de invloed van schade op het constitutief gedrag van het materiaal en de schade-ontwikkeling. Daarmee kan de verandering van de materiële eigenschappen worden gemodelleerd.

De microstructurele schade (damage) is aan de buitenkant van het materiaal niet of nauwelijks waar te nemen. Daarom is een interne modelvariabele geïntroduceerd die damage modelleert als een continue veldgrootte. Bij volledig onbeschadigd materiaal geldt  $D = 0$ . Bij het volledig ontbreken van de materiële samenhang geldt  $D = 1$ . Daar tussenin heeft damage een verloop dat afhankelijk is van de wijze van belasting.

De grootte van damage is niet of nauwelijks aan het materiaal te waar te nemen. In sommige gevallen kan zij worden bepaald door het meten van de fysische materiaaleigenschappen van het beschadigd materiaal. In andere gevallen kan zij microscopisch worden gekwantificeerd.

---

## § 1.4 Kunststoffen.

Kunststoffen zijn macro-moleculaire materialen van meestal organische oorsprong. Zij worden langs geheel kunstmatige weg of door chemische veranderingen van in de natuur aanwezige stoffen verkregen. In ieder geval zijn zij in één stadium van hun verwerking plastisch. Vandaar ook de naam 'plastics'.

Macro-moleculen worden verkregen door middel van polymerisatie. De in de monomeren als etheen en propeen aanwezige dubbele atoombinding springt open en bindt de monomeren aan elkaar tot een lange keten: een polymeer.

Kunststoffen kunnen in verschillende groepen worden onderverdeeld. De thermoplasten vormen een zo'n groep. Thermoplasten zijn kunststoffen die bij hoge temperaturen plastische vervormbaar zijn.

De natuurkundige aantrekkingskracht tussen de ketens vormt de binding tussen de polymeren. De temperatuur is van grote invloed op de bindingskracht. Door verwarming neemt de bindingkracht af waardoor het materiaal overgaat naar een volgende aggregatietoestand. Sommige thermoplasten doen dit bij een bepaalde temperatuur: de smelt- of stoltemperatuur (of kook- of condensatietemperatuur). Andere thermoplasten, die geen kristallijne, maar een amorfe structuur hebben, hebben een smelttraject in plaats van een smeltpunt. Een voorbeeld van zo'n amorfe stof is glas.

Op grond van hun bouw worden thermoplasten onderverdeeld in twee groepen: de amorfe en de kristallijne thermoplasten. De amorfe thermoplasten verkeren bij lage temperaturen in de glastoestand. Door de lage temperatuur is de thermische energie zo laag dat de moleculen ingevroren zijn. Wordt het materiaal opgewarmd tot de thermische energie zo hoog is dat de interne bindingskracht overwonnen kan worden, dan is het glaspunt of de glastemperatuur bereikt. De molecuulketens kunnen nu van plaats veranderen. Het materiaal is in de rubberachtige fase. Nog verder verwarmen brengt het materiaal in de vloeistoffase. De molecuulstructuur is nu erg week. In deze fase kunnen de stoffen worden vormgegeven. Bij extreem hoge temperaturen wordt de keten afgebroken door trillingen van en botsingen tussen molecuulketens.

Het gebruiksgebied van de amorfe thermoplasten ligt onder de glastemperatuur. Boven de verwekingstemperatuur kunnen ze worden verwerkt.

Kristallijne thermoplasten zijn vanwege hun regelmatige bouw gedeeltelijk gekristalliseerd. Altijd zijn er tussen de kristallen nog amorfe gebieden aanwezig. Onder de glastemperatuur zijn de mechanische eigenschappen weinig verschillend van die van de amorfe thermoplasten. Maar met het stijgen van de temperatuur treedt een overgangstraject op waarin de amorfe bestanddelen al wel en de kristallijne

nog niet verweken. Hierdoor wordt de trekvastheid behouden en zijn kristallijne thermoplasten bruikbaar boven de glastemperatuur.

## Hoofdstuk 2. DE OPSTELLING

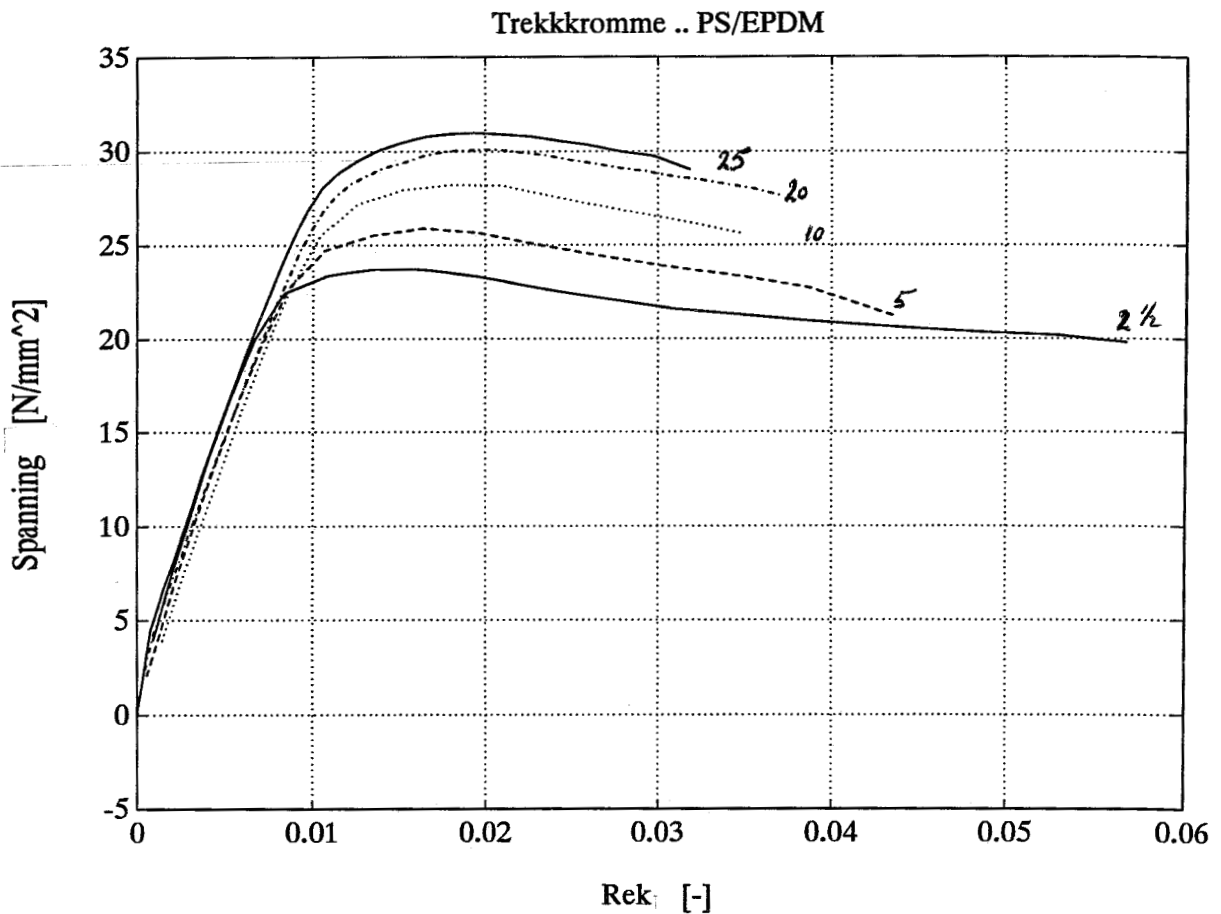
### § 2.1 Gebruikte materialen.

Voor het onderzoek naar het optreden van lokalisering worden verschillende eisen aan het onderzoeksmateriaal gesteld. Het materiaal moet softening-gedrag vertonen en dat zonder backsnap. Bovendien moet dit gedrag meetbaar zijn, dat wil zeggen dat het materiaal niet direct mag breken als de maximale trekkracht is bereikt. Verder optredende rekken klein zijn om rekdefinities eenvoudig te houden. Tenslotte mag het materiaal niet insnoeren, omdat insnoering een zichtbare vorm van lokalisering is. Iets dat we nu net moeten zien te vermijden. Er wordt gekozen om de experimenten te gaan uitvoeren met het materiaal PS/EPDM.

PS/EPDM staat voor PolyStyreen met daaraan toegevoegd het rubber Ethyleen-Propyleen-DipolyMeer in de massaverhouding 1:4. Puur PolyStyreen is een amorfe thermoplast die veel gebruikt wordt voor eenmalig gebruik in verpakkingen. Het 'gewone' PS is een ongekleurd, glashelder en hoogglanzend materiaal dat bros en makkelijk breekt en een lage slagvastheid heeft. Dit is de reden dat het weinig voor technische toepassingen wordt gebruikt.

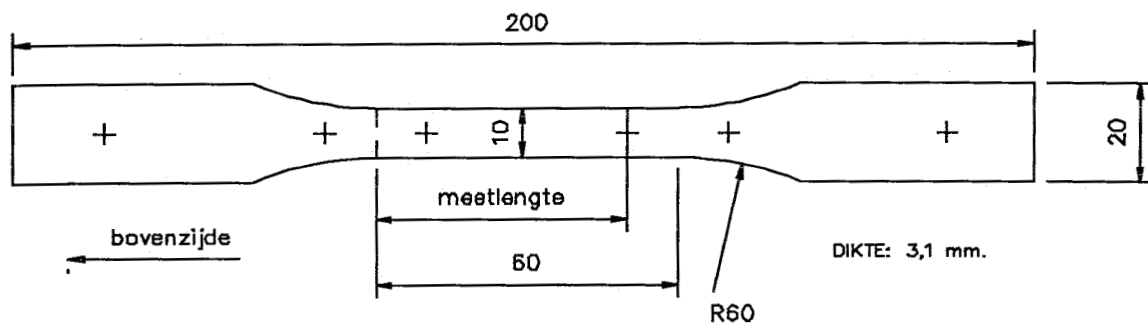
PS/EPDM heeft een lagere sterkte en stijfheid dan puur PS, maar daarbij een hogere taaiheid. Uit trekproeven blijkt dat PS/EPDM niet insnoert bij reksnelheden tussen 2 en 25 mm/min. Dat maakt het geschikt als onderzoeksmateriaal. Naar mate de reksnelheid wordt opgevoerd wordt PS/EPDM sterker en brosser. Zie figuur 2.1 op de volgende pagina. Om het verschil in materiaalgedrag bij verschillende snelheden te vermijden wordt met een vaste treksnelheid van 5 mm/min getrokken. Dit is de snelheid waarmee de klemmen van de trekbank uit elkaar bewegen. Daarmee de meetlengte van 50 mm, welke is afgetekend op de trekstaaf, een reksnelheid van 0,06 1/min. De afmetingen van de gebruikte trekstaven zijn gestandaardiseerd volgens de DIN-norm, zie figuur 2.2. De maximale trekkracht die daarmee wordt bereikt bedraagt 800 N en de globale breukrek is 2,2 mm of wel 4,4 % van de meetlengte.

Voor de experimenten worden de trekstaven met schoolbordenverf zwart gespoten. Dit gebeurt om het contrast tussen de gebruikte markers en de trekstaaf te vergro-



Figuur 2.1 Materiaalgedrag van PS/EPDM bij treksnelheden van 2 , 5, 10, 20 en 25 mm/min.

ten. De markers zijn kleine schijfjes retro-reflecterend materiaal met een doorsnede van 0,5 mm. Zij weerkaatsen opvallend licht in een smalle bundel in de richting van waar het kwam. De markers worden op een onderlinge afstand van 5 mm op de zwarte trekstaaf geplakt. Vanwege de beperkte afmetingen van de staaf kunnen slechts drie rijen van elk zeven of acht markers naast elkaar op een staaf worden geplakt. Eén rij op de midden-as en twee op de randen. Het uitsnijden en



Figuur 2.2 De afmetingen van een trekstaaf (in millimeters).

opplakken van de markers gebeurt met behulp van een injectienaald met de juiste afmeting, en een pincet. De rijen met markers zijn ten opzichte van elkaar iets verschoven omdat anders de markerposities niet met het Hentschel-meetsysteem te meten zijn. Figuur 2.3 toont de posities van de markers op de trekstaaf. Als laatste wordt een meetlengte van 50 mm op de staaf afgetekend. De rek hiervan zal tegen de belasting worden uitgezet in een trekkromme.

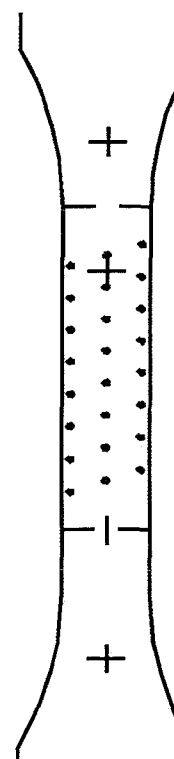
Uit ervaringen opgedaan in eerdere proeven, wordt de breuk verwacht rond een afdrukking op de trekstaaf van een van de uitstoterpenen van de spuitgietmachine. In figuren 2.2 en 2.3 zijn de afdrukkingen van de uitstoterpenen met een kruis aangegeven. Om de breuk meer centraal in het meetgebied te laten plaats hebben, is de meetlengte 5 mm uit het midden van de staaf verschoven in de richting van de betreffende afdrukking.

## § 2.2 Gebruikte apparatuur.

De proeven zijn uitgevoerd op de trekbank van het type Zwick 1434, aanwezig in het atelier van de vakgroep WFW. De trek-snelheid waarmee de inklembekken uit elkaar bewegen wordt ingesteld op 5 mm/min. Om het materiaalgedrag tijdens de proef te kunnen controleren worden verlenging en kracht bijgehouden op een X-Y-schrijver en een computer.

De belasting wordt gemeten met een krachtopnemer van 5 kN. Deze geeft een signaal af dat wordt doorgegeven aan een display op de trekbank en een X-Y-schrijver. Op beide is de momentane belasting af te lezen als percentage van het ingestelde meetbereik. De kracht wordt gemeten met een nauwkeurigheid van 0,1 % van het ingestelde meetbereik.

Voor het meten van de verlenging van de meetlengte worden twee meetklemmen op een vaste afstand van 50 mm van elkaar op de trekstaaf geplaatst. De klemmen moeten vrije bewegingsruimte naar boven en beneden hebben om ervoor te zorgen dat het verband tussen de gemeten verlenging en het afgegeven elektrische signaal lineair is. Een gedeelte van de volle signaalspanning van 10 V wordt ook hier doorgegeven aan een op de trekbank aanwezige display en een X-Y-schrijver. Hierop kan de momentane verlenging worden afgelezen als percentage van het

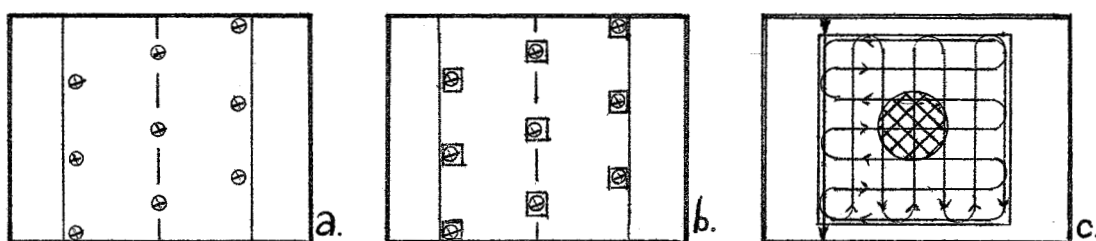


Figuur 2.3  
Plaats van de  
markers op een  
trekstaaf.

ingestelde bereik. De lengtemeting geschiedt met een nauwkeurigheid van 0,1 % van het ingestelde meetbereik.

Via een AD-converter worden beide signalen, kracht en verlenging, aan een computer doorgegeven. Met het data-acquisitie programma ADC488 kan van beide kanalen een in te stellen aantal samples worden genomen.

Om de posities van de markers op de trekstaaf te kunnen bepalen is gebruik gemaakt van het zogenoemde Hentschel-meetsysteem. Dit is een door computer aangestuurd camera-systeem. Door de markers gereflecteerd licht wordt door een random-access camera opgevangen. Daarmee ontstaat een beeld van de markers en de trekstaaf. Met behulp van bijbehorende apparatuur kan de camera worden gestuurd. Zo kunnen kleine gebieden aangegeven door markers, nauwkeurig worden bekeken zonder dat er tijd en geheugenruimte verloren gaat aan het gedetailleerd bekijken van het hele camerabeeld. Het Hentschel-systeem stuurt uiteindelijk het camerasysteem. Het systeem tast het hele beeld af op zoek naar markers, zie figuur 2.4a. Zijn deze gevonden dan worden ze in een venster



Figuur 2.4 Hentschel spoort de markers op (a) en legt er vervolgens een vensters omheen (b). Daarna worden de x- en y-coördinaat van de markers vastgelegd (c).

geplaatst (figuur 2.4b). De meest ideale grootte hiervan kan met enkele proefmetingen worden bepaald. Een venster volgt zijn marker tijdens diens beweging. Komt een marker buiten zijn venster dan is het systeem hem kwijt.

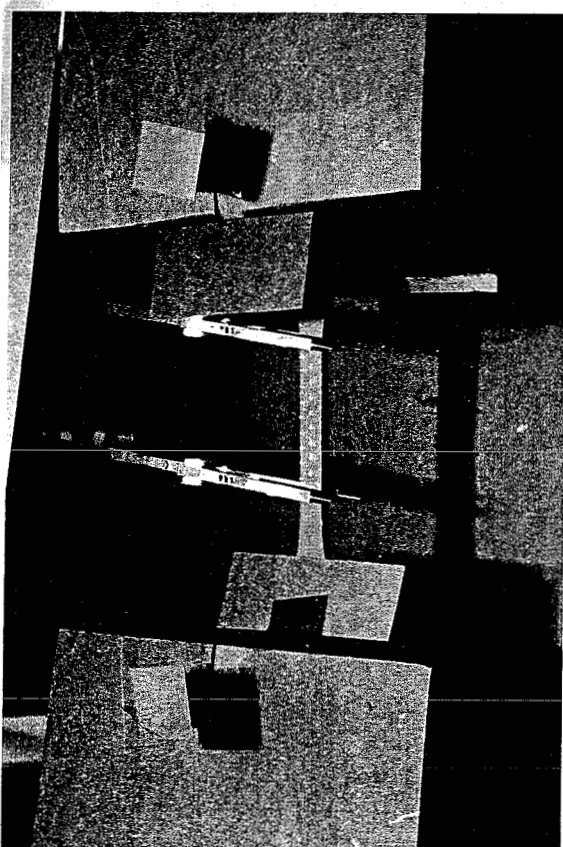
Tijdens de meting worden alle vensters een voor een afgelopen (figuur 2.4c).

Daarbij worden de x- en y-coördinaat van de markers vastgelegd. De systematische fout die daarbij wordt gemaakt is kleiner dan 0,1 % van de afmetingen van het hele beeld, ofwel ongeveer 0,1 mm. In de stapsgewijze trekproeven wordt een groot aantal positiemetingen gemiddeld. Het gevonden 95%-betrouwbaarheidsinterval van de gemeten markerpositie heeft een grootte van ongeveer 0,003 mm. De meting is ten einde als na een ingestelde meettijd een geheugenruimte van 128 kByte is gevuld.

## Hoofdstuk 3. METHODEN.

### § 3.1 Voorbereiding.

Om met de camera alleen het licht op te vangen dat teruggekaatst wordt van de markers, worden de onderdelen van de trekbank rond de inklemmingen met zwart papier afgedekt. Zie figuur 3.1. Op deze manier wordt het camerabeeld van de markers zo min mogelijk verstoord door licht dat wordt gereflecteerd door de trekbank. De camera wordt opgesteld op ongeveer één meter van de trekstaaf. De



hoogte en plaats ten opzichte van de trekstaaf is zodanig dat de optische as van de camera op het oog haaks staat op het vlak waarin de markers zich bewegen. Er wordt ervan uitgegaan dat de optische as van de camera parallel ligt aan de rechtehoekige behuizing van de camera. De markers verplaatsen dan in een vlak dat loodrecht staat op deze optische as. De tafel met de Henschel-apparatuur en de PC voor het verwerken van de kracht- en verlenging-signalen van de meetlengte worden rond de bank en de camera opgesteld.

Figuur 3.1 De afgeplakte trekbank met ingespannen trekstaaf en meetklemmen.

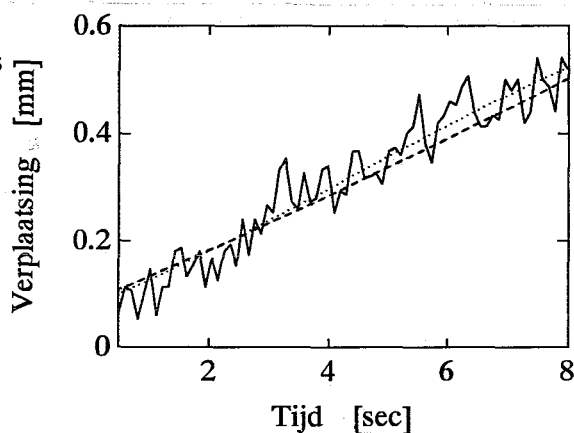


### § 3.2 De continue trekproef.

De zwartgespoten en met markers beplakte trekstaaf wordt ingespannen en langzaam ontlast. Daarna worden de meetklemmen voorzichtig zonder krassen op het oppervlak te veroorzaken op de staaf gezet. Dit gebeurt met een zodanige nauwkeurigheid dat de meetlengte altijd 50,0 mm bedraagt. Daarna wordt de trekbank ingesteld op een reksnelheid van 5 mm/min. Tijdens de meting zullen het verloop van de staafkracht en verlenging van de meetlengte op een X-Y-schrijver en een computer worden bijgehouden. De trekbank wordt ingesteld op meetbereiken van respectievelijk 1 kN en 5 mm. Het data-acquisitie programma ADC488 wordt hiermee in overeenstemming gebracht. Op de X-Y-schrijver worden beide kanalen ingesteld op 0,5 V/cm. Het Hentschel-systeem wordt ingesteld op een samplefrequentie per marker van 39,1 Hz en een meettijd van 70 seconde. Binnen deze tijd moet breuk zijn opgetreden. Een op de vier metingen zal worden geregistreerd en verwerkt. De transfer rate wordt daarom ingesteld op 4. Na enkele proefmetingen wordt een venstergrootte van 1,4 % als de meest ideale gekozen. Bijlage 6 toont een overzicht van de volledige instelling van het Hentschel-systeem.

Na het vastleggen van de referentiepositie van de markers, wordt het Hentschel-meetsysteem gestart. Pas 4 seconde later de verplaatsing van de traverse. Na breuk van de staaf wordt genoteerd tussen welke markers breuk op is getreden en worden de gegevens opgeslagen in een file.

Tijdens deze continue trekproeven wordt de positie van elke marker ongeveer tien keer per seconde gemeten. De markerverplaatsingen zijn als gevolg daarvan vele malen kleiner dan de meeton nauwkeurigheid van het meetsysteem. Daarom bevat het meetsignaal van de markerposities veel ruis. Met de MATLAB-routine *polyfit* is deze op basis van de Kleinste Kwadraten Methode weggemiddeld. (Zie bijlage 3.) Het resultaat hiervan is voor marker 9 in proef C4 hiernaast in figuur 3.2 weergegeven. Met dit resultaat wordt vervolgens voor elke marker de afstand van een marker tot de eerstvolgende daaronderliggende marker bepaald. Deze afstand wordt gerelateerd aan de afstand tussen twee markers in de referentietoestand. (Zie



Figuur 3.2 Werkelijke en benaderde verplaatsing van marker 9 in proef C4.

bijlage 4: Rekberekening in een continue trekproef.) Als referentietoestand wordt genomen de situatie van 8,2 seconde na de start van de proef. In deze tijd krijgt het materiaal de gelegenheid zich te zetten.

Bijlage 1 toont de resultaten van de rekberekeningen in de continue trekproeven. In een figuur wordt voor elke 'schakel' tussen twee markers de rekontwikkeling in de tijd weergegeven. Een tweede figuur geeft de rekverdeling in de staaf op verschillende tijdstippen tijdens de trekproef weer.

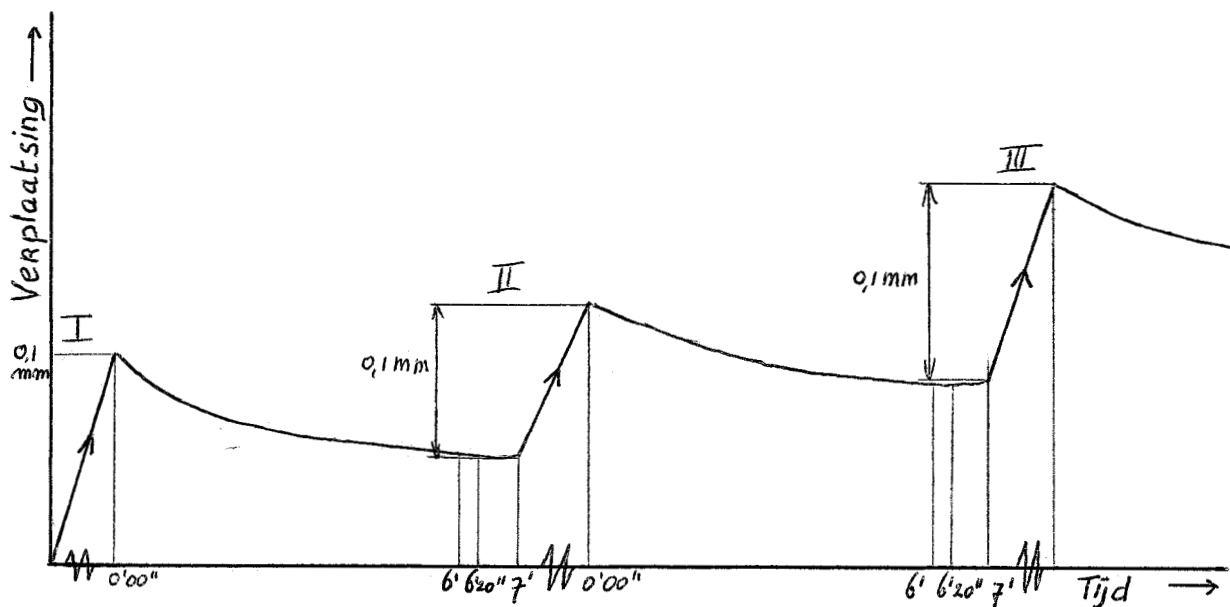
### **§ 3.3 De stapsgewijze trekproef.**

Om de markerpositie nauwkeuriger te kunnen bepalen en om de meetruis te voorkomen, moeten meerdere metingen van elke markerpositie worden gedaan. Daarvoor moet de traverse dus stilstaan en de materiële relaxatie tot nul zijn gereduceerd. Pas dan kunnen meerder metingen van één markerpositie worden gedaan. Uit de meetwaarden kan vervolgens een 95%-betrouwbaarheidsinterval voor de markerpositie worden berekend. Deze methode van meten is de stapsgewijze trekproef genoemd.

De zwartgespoten trekstaaf met daarop vierentwintig en bij proef S3 tweeëntwintig markers wordt ingespannen zoals beschreven in paragraaf 3.2. Vervolgens wordt de trekbank ingesteld op een traversesnelheid van 5 mm/min en op meetbereiken van respectievelijk 1 kN en 2 mm<sup>1</sup>. Deze meetbereiken en een meettijd van 400 seconde, waarbinnen breuk moet zijn opgetreden, worden tevens in het programma ADC488 ingesteld. Op een X-Y-schrijver worden belasting en verlenging van de meetlengte, beide verticaal, uitgezet tegen de tijd. Instelling van beide kanalen op de X-Y-schrijver is 0,5 V/cm. De papiersnelheid is 6 mm/min. Het Hentschel-systeem wordt ingesteld op een samplefrequentie per marker van 39,1 Hertz, een transfer rate van 1 (elke meting wordt geregistreerd), een venstergrootte van 1,4 % van de afmetingen van het beeld, en een meettijd van 20 seconde. Zie bijlage 6 voor volledige instelling.

Na een referentiemeting van de markerposities wordt de staaf 0,1 mm opgerekt. Als na 6 minuten de kruipsnelheid sterk is gereduceerd (dit is af te lezen op de X-

<sup>1</sup> De totale breukverlenging van de meetlengte in een continue trekproef is 2,2 mm. Maar door tussentijdse relaxatie wordt deze waarde in een stapsgewijze trekproef niet bereikt.



Figuur 3.3 Volgorde van handelingen. Zes minuten na de rekstap (I) worden gedurende 20 seconden de markerposities vastgelegd. 40 Seconden later volgt de volgende rekstap (II).

Y-schrijver), wordt gedurende 20 seconden de positie van de markers gemeten. Daarna worden de gegevens weggeschreven en een minuut na de start van de positiemeting volgt een volgende stap van 0,1 mm traverseverplaatsing<sup>1</sup>. Dit proces wordt herhaald tot breuk. Daarna wordt genoteerd op welke plaats, tussen welke markers de staaf is gebroken.

Middeling van de meetresultaten over de meettijd van 20 seconde levert een 95%-betrouwbaarheidsinterval van de markerpositie. Na elke rekstap is hieruit de lengte van het stukje materiaal gelegen tussen twee markers bepaald. Deze lengte is vervolgens gerelateerd aan de lengte van het materiaaldeel na de eerste rekstap. In de eerste rekstap krijgt het materiaal de gelegenheid zich te zetten.

In bijlage 2 zijn de resultaten van de stapsgewijze metingen weergegeven. Drie figuren tonen de rekverdeling in de linker- en rechterzijde en op de midden-as van de staaf na elke rekstap. Een vierde figuur geeft de plaats van breuk ten opzichte van de markers aan.

<sup>1</sup> In de eerste vier rekstappen van proef 1 is de kruip telkens aangevuld tot een totale verlenging van 0,1 mm is bereikt. In de verdere rekstappen is om de stappen beter vergelijkbaar te maken, onafhankelijk van de optredende kruip telkens de meetlengte 0,1 mm verlengd.

## Hoofdstuk 4. RESULTATEN

Een opmerking vooraf over de wijze van opslag van de staven. De staven voor de stapsgewijze proeven S1 en S2 zijn direct gebruikt. De stapsgewijze proef S3 en de continue trekproeven zijn pas anderhalve maand later uitgevoerd. De staven voor deze proeven hebben gedurende deze tijd in de buurt van een radiator gelegen. Dit kan de materiële eigenschappen dusdanig hebben beïnvloed dat de volgende resultaten hun betekenis hebben verloren.

### § 4.1 De resultaten van de continue trekproef.

In de figuren B1.1a tot en met B1.6a van bijlage 1 is de ontwikkeling van de rek in een materiaaldeel tussen twee opeenvolgende markers uitgezet tegen de tijd. De tijd tussen het referentietijdstip en breuk is opgedeeld in vijf gelijke perioden. In de figuren B1.1b tot en met B1.6b is de rekverdeling in de trekstaaf aan het einde van elke periode weergegeven. In de figuren B1.1c tot en met B1.6c is de plaats van de breuk, van de markers en van de afdrukkingen van de uitstoterpennen aangegeven .

De trekstaaf uit proef C5 is gebroken tussen de markers 12 en 13 in het midden van de staaf (zie figuur B1.1c). Figuur B1.1b laat zien dat de lokale rek in het lokaliseringsgebied continu groter is dan in de naburige materiaal delen. Dit wijst op rek-lokalisering rond breuk. Verder is de rektoename tijdens proef C5 overal positief. Naast elastische effecten spelen visco-effecten een belangrijke rol.

Figuur B1.2 toont de resultaten van proef C6. De figuur laat een gelijkmatig over de staaf verdeelde rektoename zien die doorgaat tot breuk. De grootste lokale rek is te zien tussen de markers 10 en 11 en 12 en 13. Breuk treedt echter op tussen markers 9 en 10. Een uitstoterpen-afdrukking is hiervan de oorzaak. In het breukgebied is de uiteindelijke lokale rek het kleinst. Uit figuur B1.2b blijkt dat deze niet significant kleiner is dan de grootste lokale rek.

Breuk in proef C7 treedt op tussen de markers 9 en 10 ter plaatse van een afdrukking van een uitstoterpen. De rek is gelijkmatig over de staaf verdeeld met een uitschieter naar beneden tussen markers 10 en 11.

In proef C8 is de afdrukking van een uitstoterpen opnieuw de oorzaak van de breuk. Deze vindt plaats tussen de markers 9 en 10. Figuur 1.4b toont van marker 8 naar 15 een geleidelijk toenemende rek. Tussen de markers 12 en 13 is de rek het grootst. De plaats van breuk en met de grootste rek komen niet met elkaar overeen.

Breuk in proef C9 treedt op tussen de markers 9 en 10 tengevolge van een afdrukking van een uitstoterpen. Figuur B1.5b toont echter een zeer gelijkmatig over de trekstaaf verdeelde rek. De toename in rek is in alle materiaaldelen even groot in elk van de vijf perioden.

Breuk in proef C10 treedt op tussen de markers 9 en 10. Initiator is opnieuw een afdrukking. Halverwege de trekproef neemt de rek tussen de markers 9 en 10 aanzienlijk langzamer toe dan elders in de staaf (zie figuur B1.6b). Daarom is de uiteindelijke lokale breukrek hier kleiner dan de grootste breukrek in de staaf, tussen de markers 12 en 14. De plaats van breuk en van de grootste rek komen niet met elkaar overeen.

#### **§ 4.2 De resultaten van de stapsgewijze trekproef**

In de figuren B2.1 tot en met B2.3 van bijlage 2 is de rekverdeling in de trekstaaf na elke rekstap uitgezet<sup>1</sup>. In de bovenste drie figuren is de rekverdeling uitgezet in de drie rijtjes van zeven of acht markers. In de onderste figuur is de plaats van de breuk ten opzichte van de markers aangegeven.

De resultaten van proef S1 laten tot en met de vierde rekstap (zie ook voetnoot onderaan pagina 20) een gelijkmatig over de staaf verdeelde rek zien. Vanaf de vijfde rekstap begint zich in een gebied ter grootte van  $\pm 10$  mm lokalisering af te tekenen. In dit gebied neemt de rek sneller toe dan daarbuiten. Buiten het lokaliseringsgebied blijft de rek echter eveneens toenemen. Dit wijst erop dat de visco-

---

<sup>1</sup> N.B.: Door de vorm van presentatie wordt de illusie gewekt dat de rek tussen twee markers constant is. Dit is echter niet juist. Voor deze presentatievorm is toch gekozen, omdat de rek in de afzonderlijke materiaaldelen niet nauwkeuriger bekend is.

effecten relatief groot zijn vergeleken met de elastische effecten.

Breuk treedt op tussen de markers 1 en 2, vlakbij marker 9, maar net buiten het meetgebied, en tussen de markers 17 en 18, vlakbij marker 17. De breuk is veroorzaakt door een afdrukking van een uitstoterpen en vindt plaats in het lokaliseringsgebied. Hier is de uiteindelijke lokale rek het grootst.

In proef S2 treedt breuk op tussen de markers 7 en 8, dicht bij 7, tussen 14 en 15 en tussen 22 en 23, dicht tegen 23. Ook hier is een afdrukking van de uitstoterpen de initiator. In figuur B2.2 is tot en met de derde rekstap een gelijkmatig verdeelde rek waar te nemen. Daarna gaat rek lokaliseren in een gebied ter grootte van  $\pm 10$  mm rond de plaats van breuk. De rektoename is zowel binnen als buiten dit gebied positief. Daarbinnen neemt de rek echter sneller toe dan daarbuiten.

Breuk in proef S3 treedt op tussen de markers 5 en 6, dichtbij 5, 12 en 13 en 19 en 20, dichtbij 20. Dit keer is breuk niet veroorzaakt door een afdrukking van een uitstoterpen. Tot en met de derde rekstap is de rek redelijk gelijkmatig over de trekstaaf verdeeld. Daarna gaat een verschil optreden tussen de drie rijtjes van markers. Op de midden-as lijkt rek zich te concentreren rond de markers 14 en 15. Dus net buiten het breukgebied. Aan de linker- en rechterzijde echter is concentratie van rek tot en met de vierde rekstap niet significant. Uiteindelijk groeit de rek het sterkst in de laatste periode tussen de markers 4 en 5 aan de linkerzijde en rond de markers 20 en 21 aan de rechterzijde van de staaf. Dit alles gebeurt in een gebied ter grootte van ongeveer 10 mm rond de plaats van breuk. Van reklokalisering kan niet echt worden gesproken.

## **Hoofdstuk 5. CONCLUSIES EN DISCUSSIE.**

### **§ 5.1 Conclusies uit de continue trekproeven.**

- \* Een eerste zeer belangrijke conclusie is dat de afdrukking van een uitstoterpen in de trekstaaf een belangrijke beschadiging van het oppervlak is die het rekpatroon sterk beïnvloedt. Vele malen is deze afdrukking de initiator van breuk.
- \* Bij breuk ter plaatse van een afdrukking treden geen duidelijke vormen van reklokalisering op. De wijze van materiaalopslag kan een belangrijke invloed hebben gehad op de rekverdeling in de staaf. Met deze continue trekproeven kan daarom geen reklokalisering of afwezigheid daarvan worden aangetoond.
- \* In proef C5 breekt de staaf niet op de afdrukking. In dit geval treedt duidelijk lokalisering van rek op. De uiteindelijke lokale rek ter plekke van de breuk is meer dan twee keer zo groot als ruim buiten het breukgebied. Het lokaliseringsgebied heeft een grootte van 10 tot 15 mm.
- \* De rektoename in deze proef C5 is ook tijdens lokalisering van rek positief. Dit betekent dat nergens in de trekstaaf relaxatie optreedt. Visco-effecten spelen in PS/EPDM een belangrijke rol spelen.

### **§ 5.2 Conclusies uit de stapsgewijze trekproeven.**

- \* Een belangrijke oorzaak van de breuk is ook hier een uitstoterpenafdrukking. Twee van de drie staven breken op deze plek. In deze staven gaat breuk gepaard met concentratie van rek in het breukgebied. Hier kan gesproken worden van reklokalisering. De grootte van dit gebied is ongeveer 10 mm.
- \* De rektoename in de staaf is overal positief. Dit betekent dat visco-effecten een belangrijke rol spelen in stapsgewijze trekproeven met PS/EPDM.
- \* Lokalisering van rek betekent blijkbaar niet dat rek zich enkel concentreert in een gebied tussen twee of drie markers en dat relaxatie optreedt buiten dit gebied. Reklokalisering betekent dat de rektoename binnen het lokaliseringsgebied sterker is dan daarbuiten.

- \* De trekstaaf van proef S3 brak niet op een afdrukking van een uitstoterpen. Tevens is de rekverdeling in de staaf niet eenduidig. Rek op de midden-as lijkt zich namelijk te concentreren rond de markers 14 en 15. Maar de rekverdeling in de beide zijden van de trekstaaf bevestigen dit niet. De rektoename is overal in de staaf positief, nergens treedt relaxatie op.

### § 5.3 Discussie.

In het algemeen is het dus moeilijk om op grond van de gedane proeven iets over lokalisering van rek te zeggen. Ten eerste omdat de resultaten niet eenduidig wijzen op reklokalisering noch op de afwezigheid daarvan. Ten tweede omdat de meeste proefstukken voor geruime tijd onder minstens verdachte omstandigheden zijn bewaard. Dit kan gevolgen hebben gehad voor de kwaliteit van het materiaal van de trekstaven en dus voor de resultaten van de proeven.

De staven van de stapsgewijze proeven S1 en S2 zijn niet zoals de andere staven anderhalve maand op kamertemperatuur bewaard. Uit de resultaten van deze proeven kan worden geconcludeerd dat rek in stapsgewijze trekproeven met PS/EPDM lokaliseert in het gebied van breuk. Een oppervlakte-oneffenheid is daarbij de oorzaak van de breuk. Het lokaliseringsgebied heeft een grootte van  $\pm 10$  mm. Omdat visco-effecten in sterke mate het materiaalgedrag bepalen betekent lokalisering van rek dat de rektoename sterker is binnen het lokaliseringsgebied dan daarbuiten.

Uitvoeren van stapsgewijze trekproeven vergt veel tijd. Daarom is het handig als lokalisering van rek kan worden aangetoond met continue proeven. Proef C5 laat zien dat rek in het geval van een min of meer 'spontane' breuk lokaliseert. Lokalisering betekent ook hier dat rek binnen het lokaliseringsgebied sterker toeneemt dan daarbuiten.

De staven van de andere continue trekproeven zijn alle gebroken op een afdrukking van een uitstoterpen. De resultaten van deze proeven laten daarbij geen duidelijke lokalisering van rek zien. Op grond van deze resultaten kunnen weinig conclusies worden getrokken.



## **Referenties**

- \* Helmons, J.M., Kunststoffen deel 1. Hogeschool Eindhoven, Studierichting Werktuigbouwkunde, Eindhoven, 1987. ISBN: 90-5284-472-0.
- \* Schreurs, P.J.G., Breukmechanica. Technische Universiteit Eindhoven, faculteit Werktuigbouwkunde, Eindhoven, dictaat 4694, december 1990.
- \* Brekelmans, W.A.M., Continuüm Damage Mechanica. Technische Universiteit Eindhoven, faculteit Werktuigbouwkunde, Eindhoven, dictaat 4693, november 1990.
- \* Van Dalen, M.W., Kunststoffen deel 5. Technische Universiteit Delft, faculteit van het Industrieel Ontwerpen, Delft, dictaat, augustus 1988.

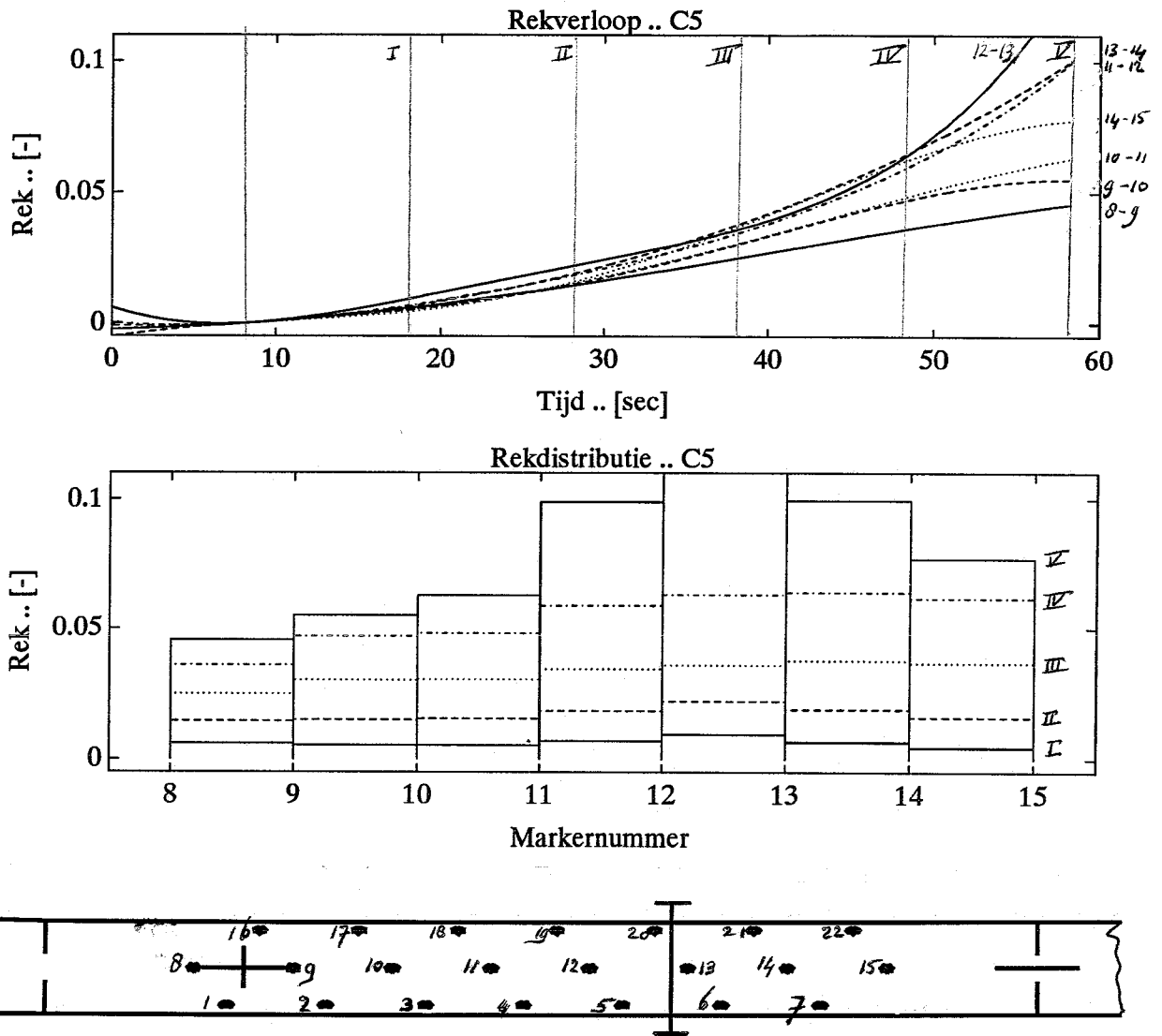
**Bijlage 1. Rekverdeling bij een continue trekproef.**

De rek bij een continue trekproef is op twee manieren weergegeven. In de figuren B1.1a tot en met B1.6a is voor elk materiaaldeel tussen twee markers de rek uitgezet in de tijd. De nummers bij de krommen geven aan tussen welke marker het rekverloop optrad.

Vervolgens is de tijdsduur tussen het referentietijdstip en het tijdstip van breuk opgedeeld in vijf gelijke perioden en is in de figuren B1.1b tot en met B1.6b voor het einde van elke periode de rekverdeling over de midden-as weergegeven.

(\_\_\_\_ voor perioden I en V, ----- voor II, ..... voor III en -.-.-.- voor IV.)

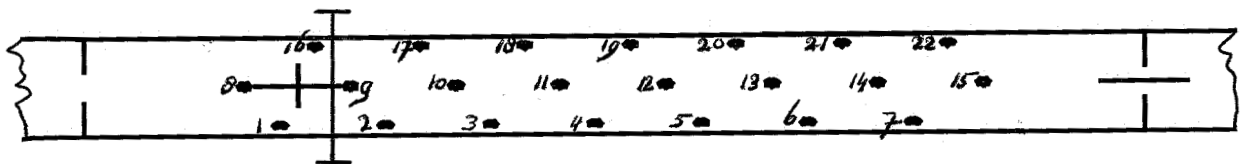
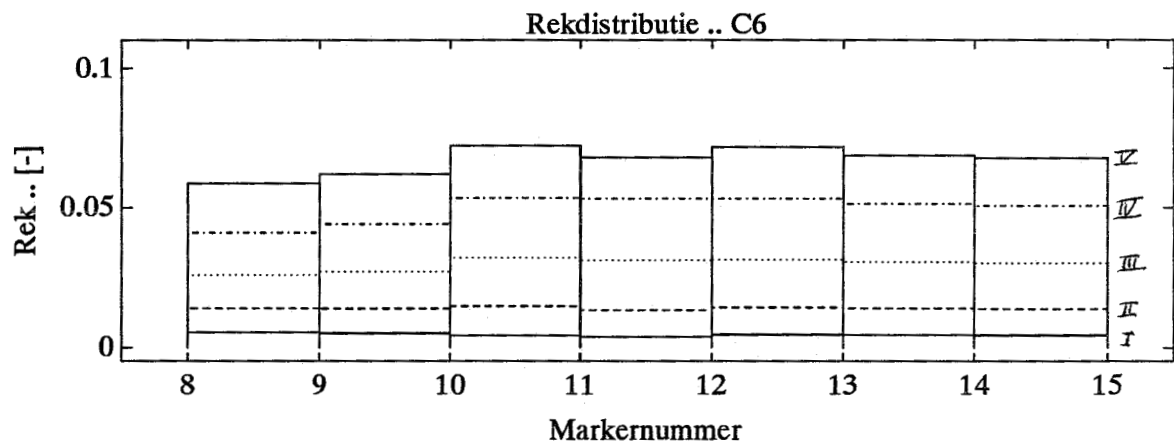
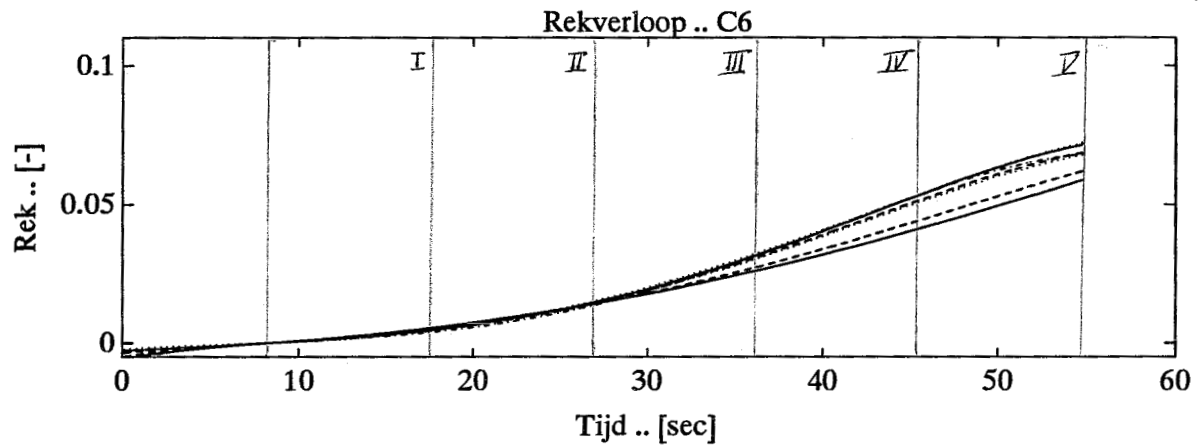
Tenslotte is in de figuren B1.1c tot en met B1.6c de plaats van de breuk (verticale lijn), van de markers (punt met nummer) en van de afdrukkingen van de uitstoterpennen (kruis) weergegeven.



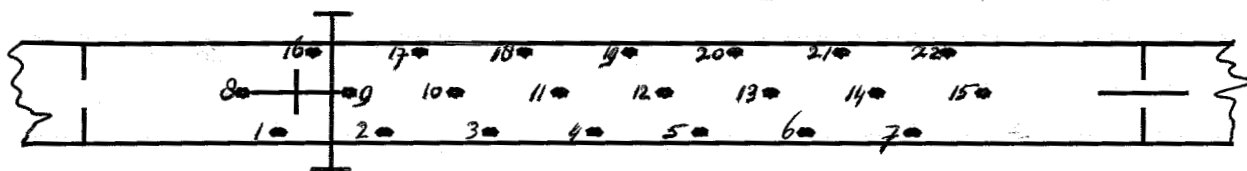
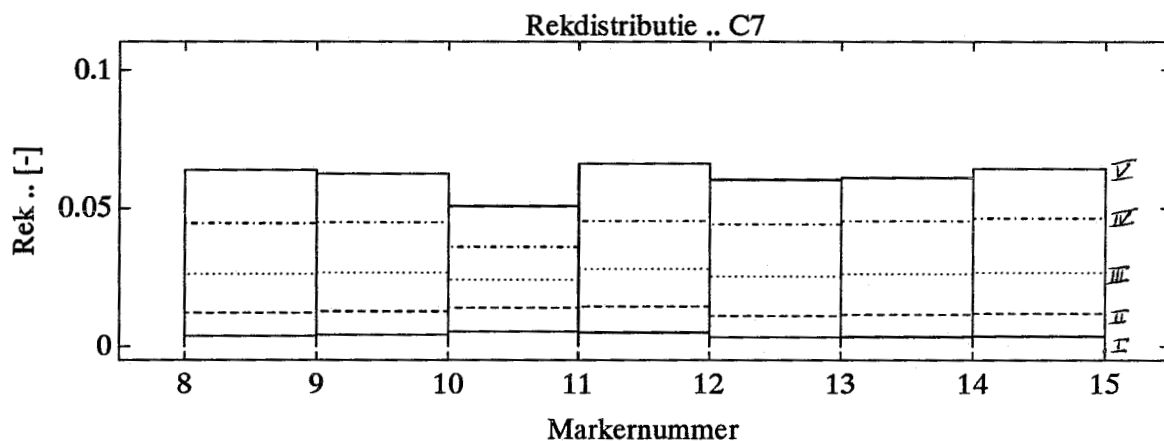
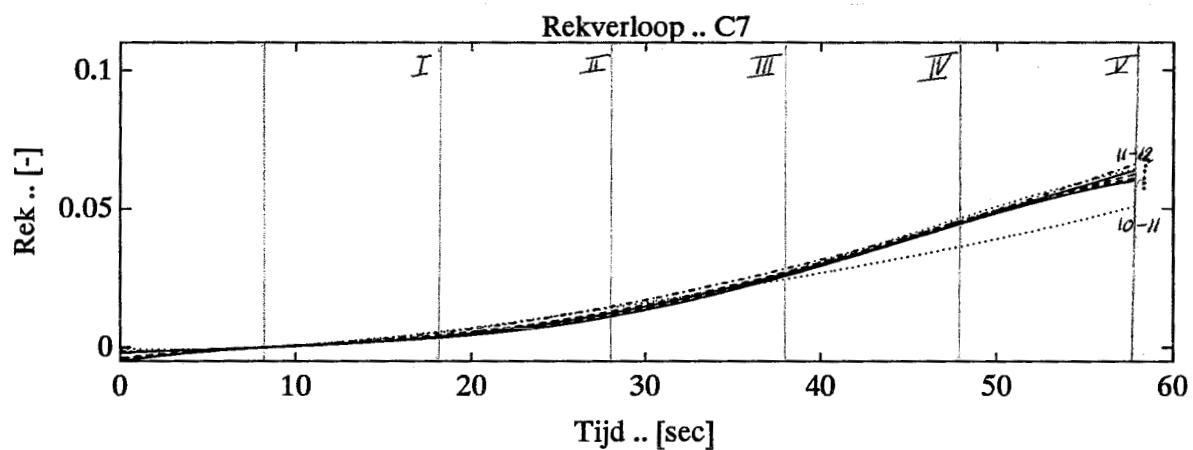
Figuur B1.1 a Rektoename in de tijd voor elk materiaaldeel op de midden-as van de trekstaaf in proef C5.

Figuur B1.1 b Rekverdeling in de trekstaaf in proef C5 aan het einde van vijf gelijke perioden, welke zijn aangegeven in figuur B1.1a.

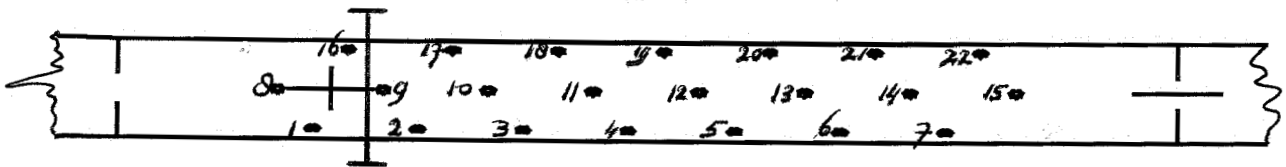
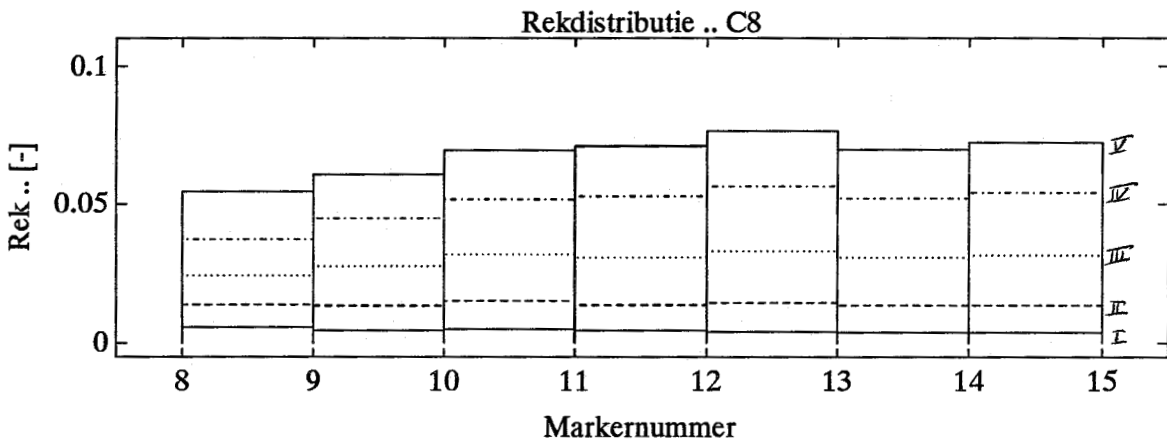
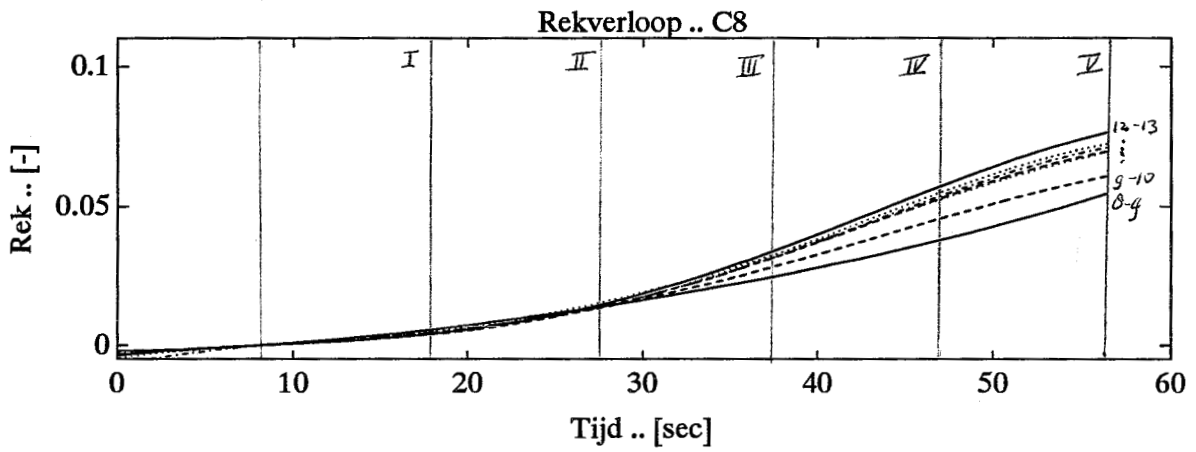
Figuur B1.1 c Plaats van de markers, van de afdrukkingen van de uitstoterpennen en van de breuk in proef C5.



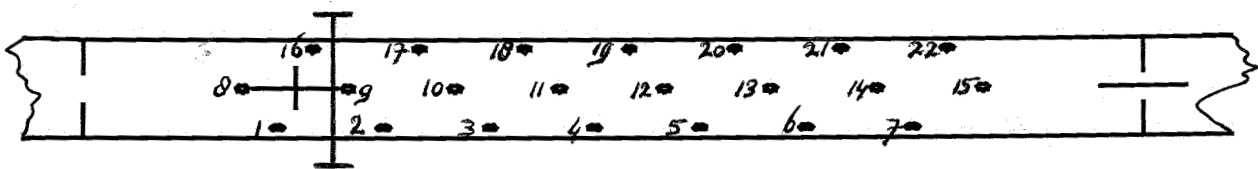
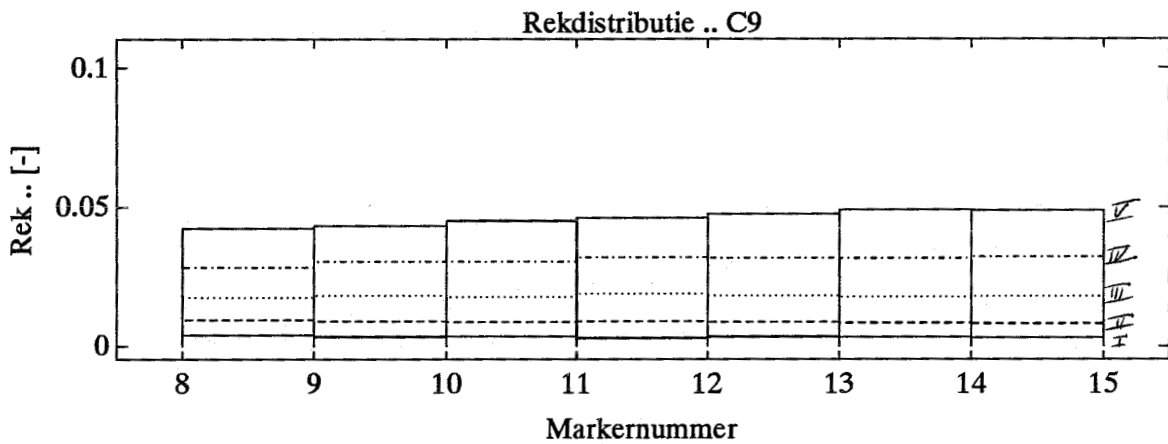
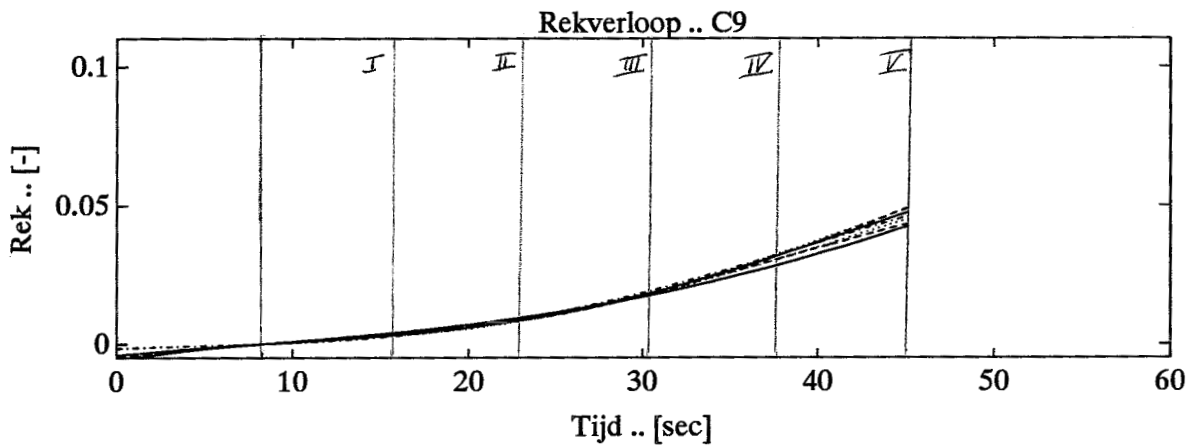
- Figuur B1.2 a Rektoename in de tijd voor elk materiaaldeel op de midden-as van de trekstaaf in proef C6.
- Figuur B1.2 b Rekverdeling in de trekstaaf in proef C6 aan het einde van vijf evenlange perioden.
- Figuur B1.2 c Plaats van de markers, van de afdrukkingen van de uitstoterpennen en van de breuk in proef C6.



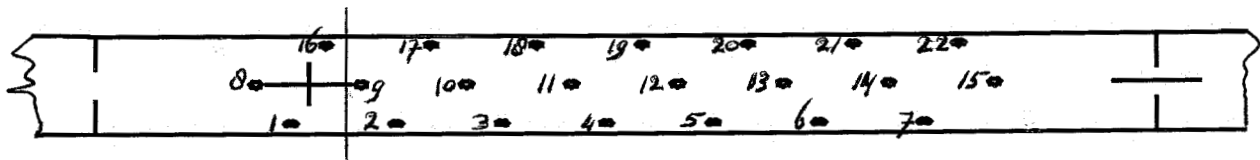
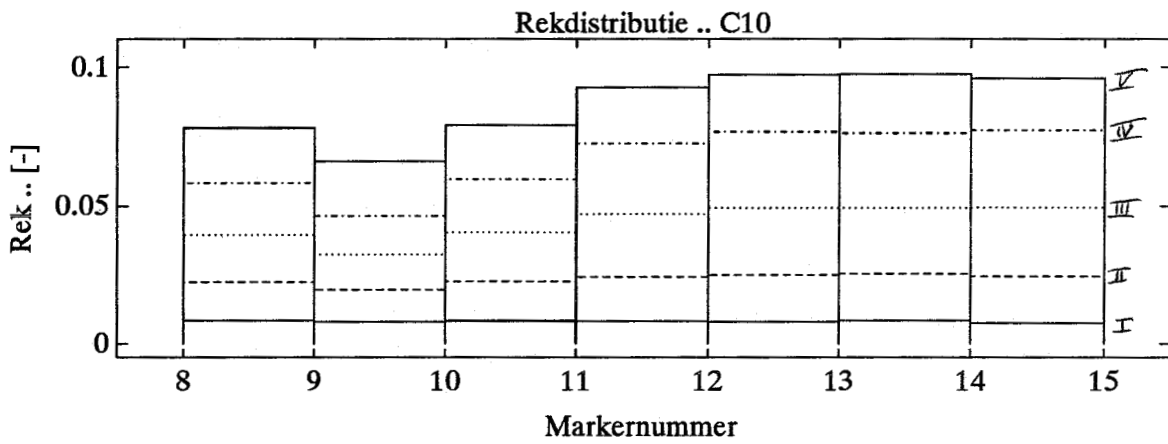
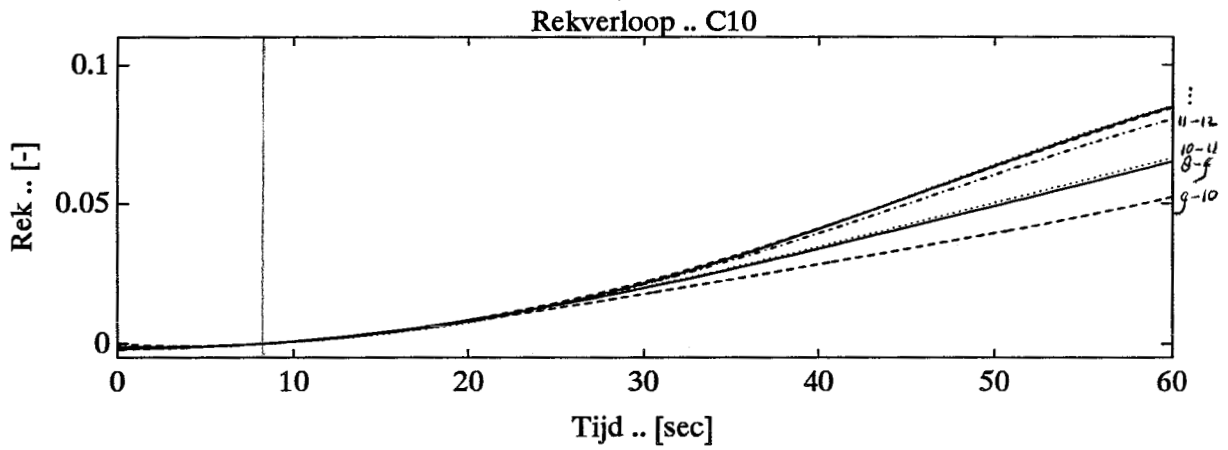
- Figuur B1.3 a Rektoename in de tijd voor elk materiaaldeel op de midden-as van de trekstaaf in proef C7.
- Figuur B1.3 b Rekverdeling in de trekstaaf in proef C7 aan het einde van vijf evenlange perioden.
- Figuur B1.3 c Plaats van de markers, van de afdrukkingen van de uitstoterpennen en van de breuk in proef C7.



- Figuur B1.4 a Rektoename in de tijd voor elk materiaaldeel op de midden-as van de trekstaaf in proef C8.
- Figuur B1.4 b Rekverdeling in de trekstaaf in proef C8 aan het einde van vijf evenlange perioden.
- Figuur B1.4 c Plaats van de markers, van de afdrukkingen van de uitstoterpennen en van de breuk in proef C8.



- Figuur B1.5 a Rektoename in de tijd voor elk materiaaldeel op de midden-as van de trekstaaf in proef C9.
- Figuur B1.5 b Rekverdeling in de trekstaaf in proef C9 aan het einde van vijf evenlange perioden.
- Figuur B1.5 c Plaats van de markers, van de afdrinkingen van de uitstoterpenen en van de breuk in proef C9.



- Figuur B1.6 a Rektoename in de tijd voor elk materiaaldeel op de midden-as van de trekstaaf in proef C10.
- Figuur B1.6 b Rekverdeling in de trekstaaf in proef C10 aan het einde van vijf evenlange perioden.
- Figuur B1.6 c Plaats van de markers, van de afdrukkingen van de uitstoterpen en van de breuk in proef C10.



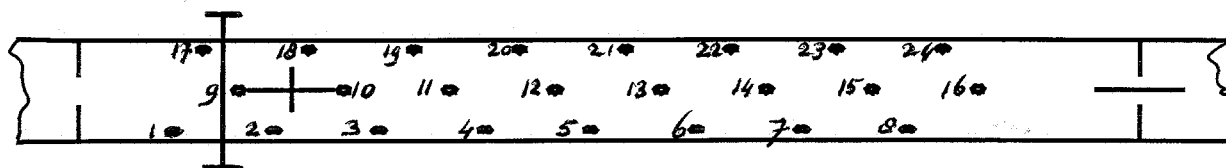
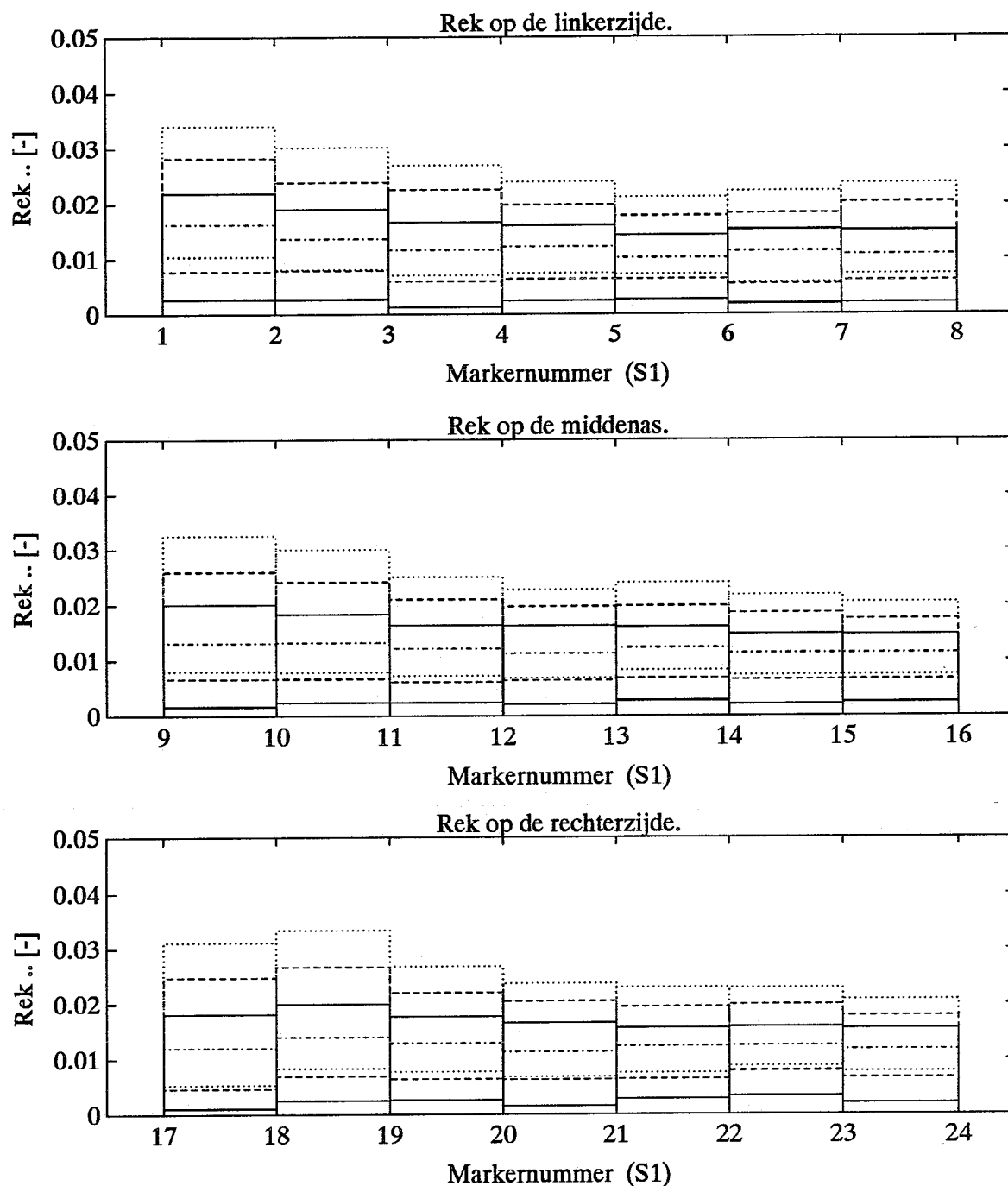
**Bijlage 2. Rekverdeling bij een stapsgewijze trekproef.**

Op de volgende pagina's in de rekverdeling in de drie stapsgewijze trekproeven weergegeven. In zes of zeven stappen bouwt de rek zich op waarna breuk volgt. De verschillende lijntypen hebben de volgende betekenis:

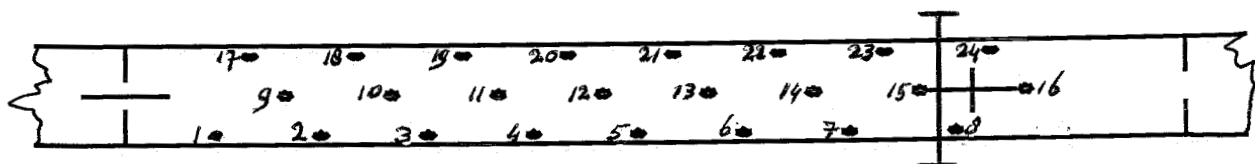
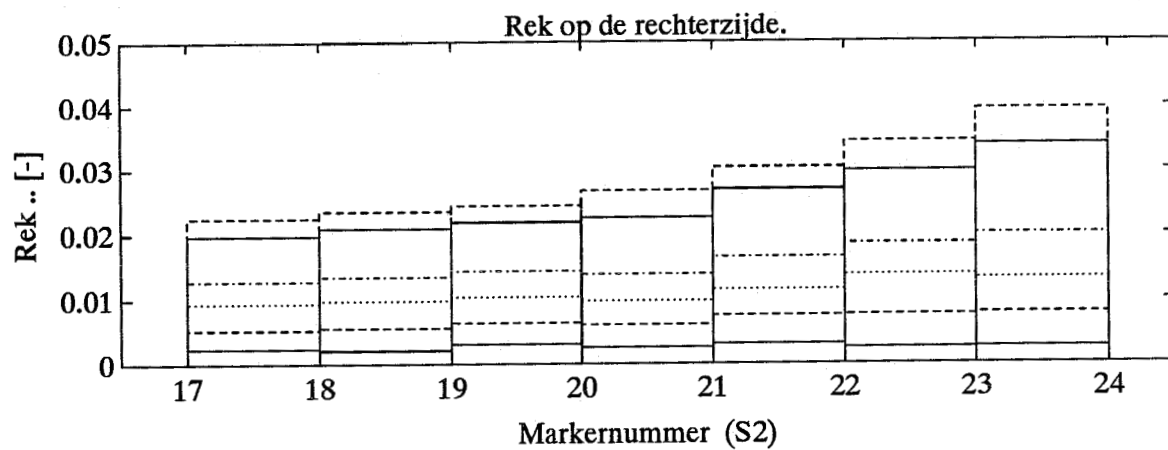
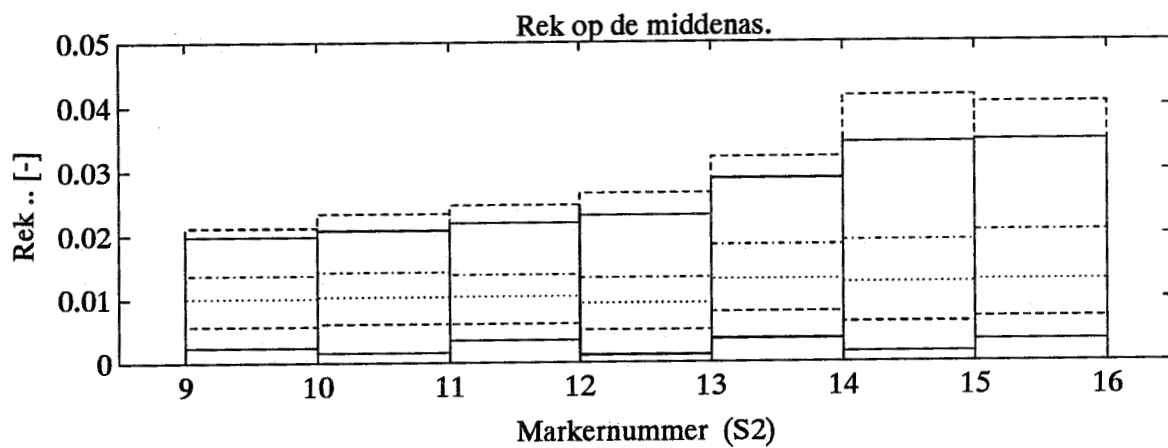
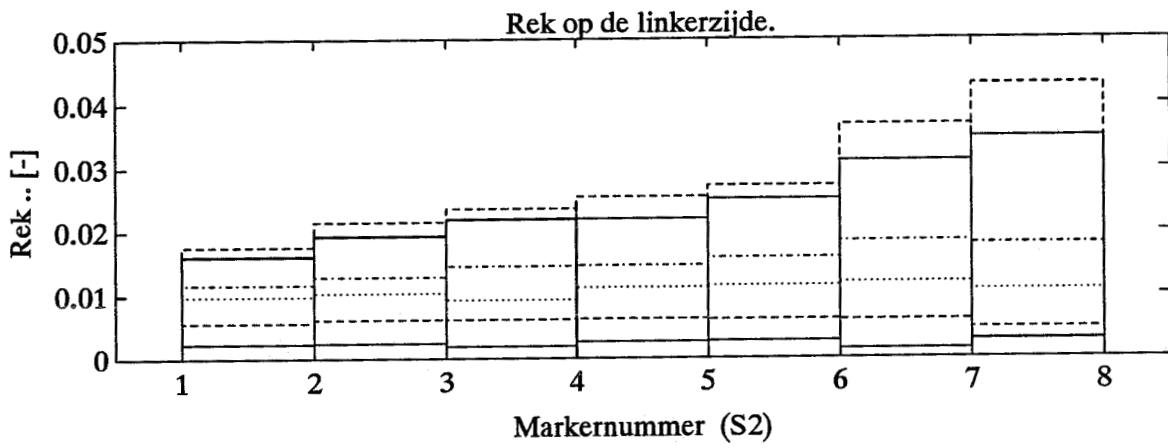
- \_\_\_\_\_ geeft de rek aan na de tweede en de zesde rekstap,
- geeft de rek aan na de derde en de zevende rekstap,
- ..... geeft de rek aan na de vierde en de achtste rekstap en
- .-.-.-. geeft de rek aan na de vijfde rekstap.

Nota bene: De figuren suggereren dat de rek een constante waarde heeft in het gebied tussen twee markers. Informatie ontbreekt echter om een meer continu rekverloop te kunnen weergeven. Aangenomen mag worden dat de rek continu over de staaf is verdeeld.

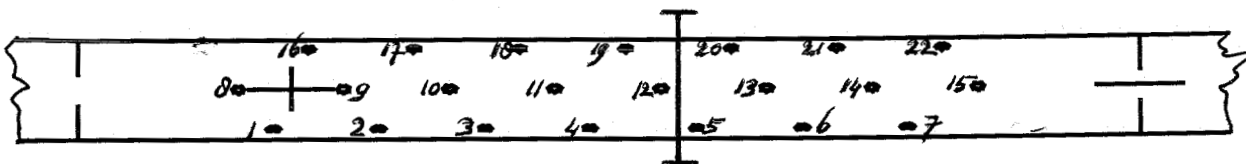
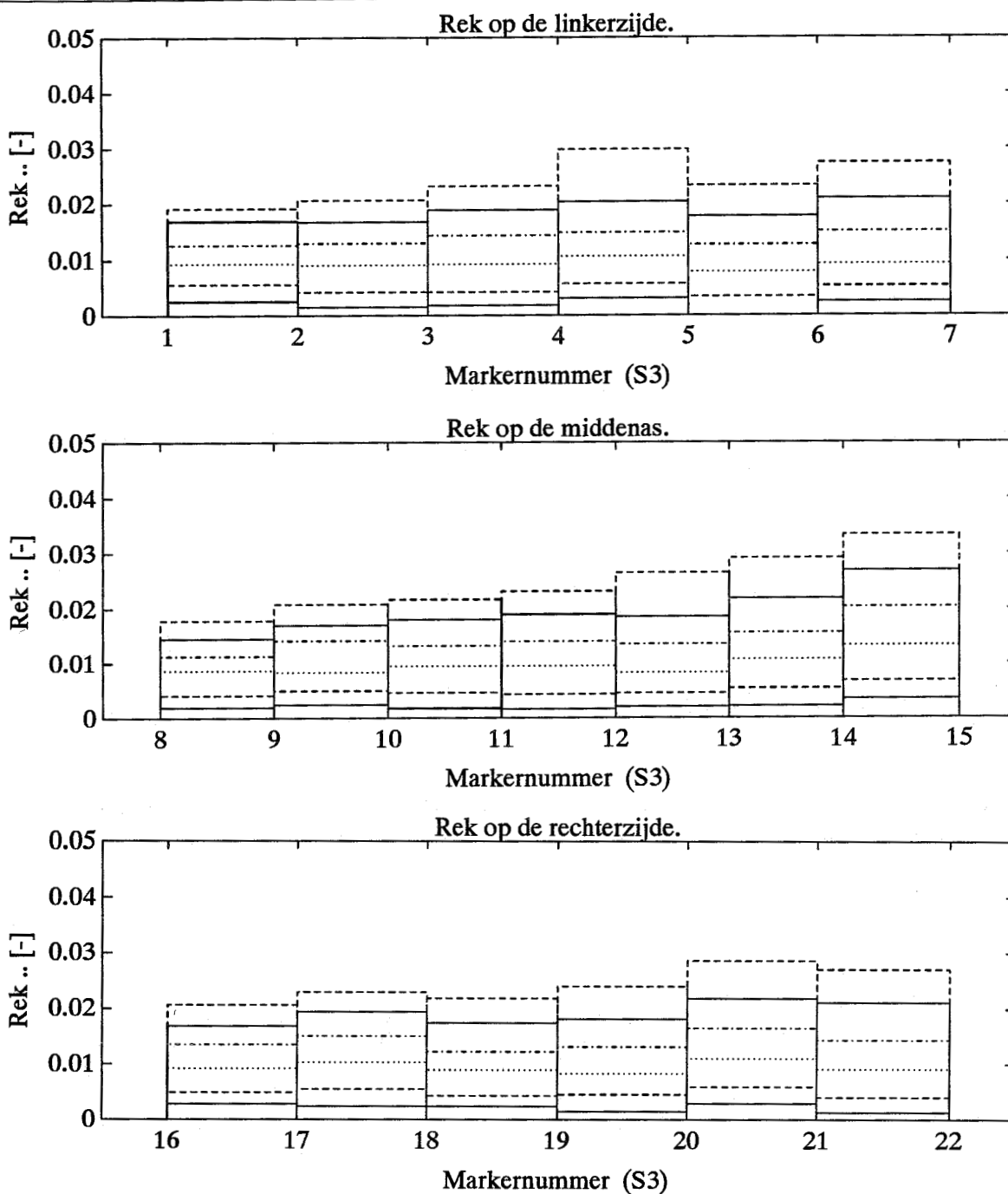
Onderaan elke pagina is een figuur opgenomen met daarin de plaats van de markers, de afdrukkingen van de uitstoterpen en de breuk in de trekstaaf.



Figuur B2.1 toont de rekverdeling in de linkerzijde (boven), op de midden-as (midden) en in de rechterzijde (onder) van de trekstaaf na de rekstappen twee tot en met acht in proef S.1. Helemaal onderaan is de plaats van breuk ten opzichte van de markers en de afdrukkingen van de uitstoter-pennen aangegeven.



Figuur B2.2 toont de rekverdeling in de linkerzijde (boven), op de midden-as (midden) en in de rechterzijde (onder) van de trekstaaf na de rekstappen twee tot en met zeven in proef S.2. Helemaal onderaan is de plaats van breuk ten opzichte van de markers en de afdrukkingen van de uitstoterpenen aangegeven.

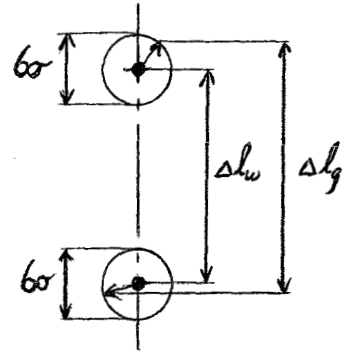


Figuur B2.3 toont de rekverdeling in de linkerzijde (boven), op de midden-as (midden) en in de rechterzijde (onder) van de trekstaaf na de rekstappen twee tot en met zeven in proef S.3. Helemaal onderaan is de plaats van breuk ten opzichte van de markers en de afdrukkingen van de uitstoterpenen aangegeven.

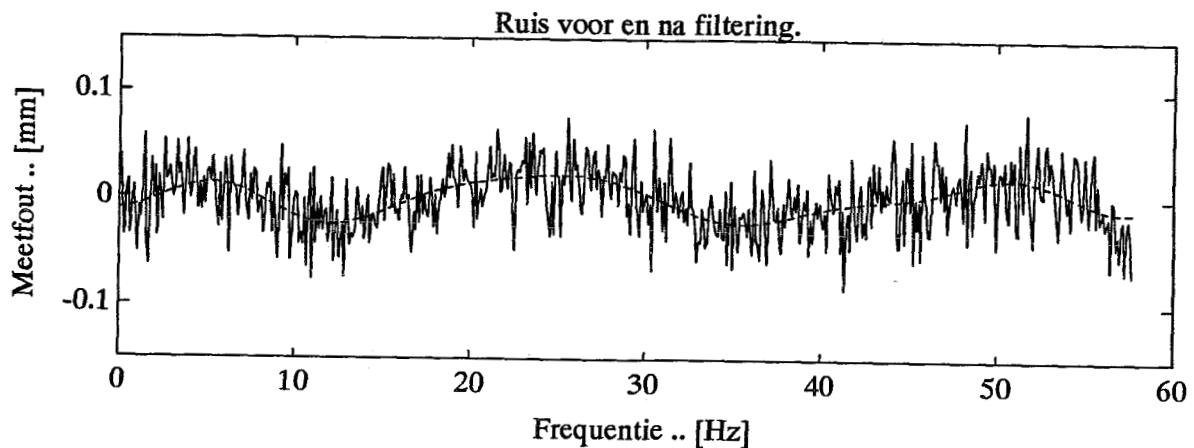
### Bijlage 3. Fitten en filteren van een ruw signaal

Het meten van de markerverplaatsing bij een continue proef levert een signaal dat erg veel ruis bevat. De oorzaak hiervan is de markerverplaatsing in 0,1 seconde zeer veel kleiner is dan de meetonauwkeurigheid van 0,1 mm. Deze relatief grote onnauwkeurigheid (zie figuur B3.1.) bepaald tevens de onnauwkeurigheid in de berekening van de rek.

In eerste instantie is daarom met behulp van de Matlab-routine polyfit op basis van de kleinste kwadraten methode de ruis weggemiddeld. Grenzen aan de beschikbare reken-capaciteit lieten daarbij slechts een vierde orde polynoom toe als benadering van de werkelijke markerverplaatsing. Een hogere orde benadering lijkt vereist, omdat de polynoom een erg rechte benadering is van de werkelijkheid. Met Fast Fourier Transformatie wordt daarom vervolgens het frequentiespectrum bekeken van het verschil tussen de gemeten en de gefitte markerverplaatsing. Alle frequenties tot de halve samplefrequentie (4,89 Hz) blijken daarin in evengrote mate aanwezig. Omdat alleen lage frequentie van belang worden geacht, worden met trial-and-error frequenties hoger dan 0,05 Hz uit de ruis verwijderd. Op deze manier blijft een sinusvormig signaal met een amplitude van 0,03 mm over. Zie figuur B3.2. Dit gefilterde signaal wordt weer bij de fit opgeteld. Theoretisch is de rek nu 2 % nauwkeuriger te bepalen.

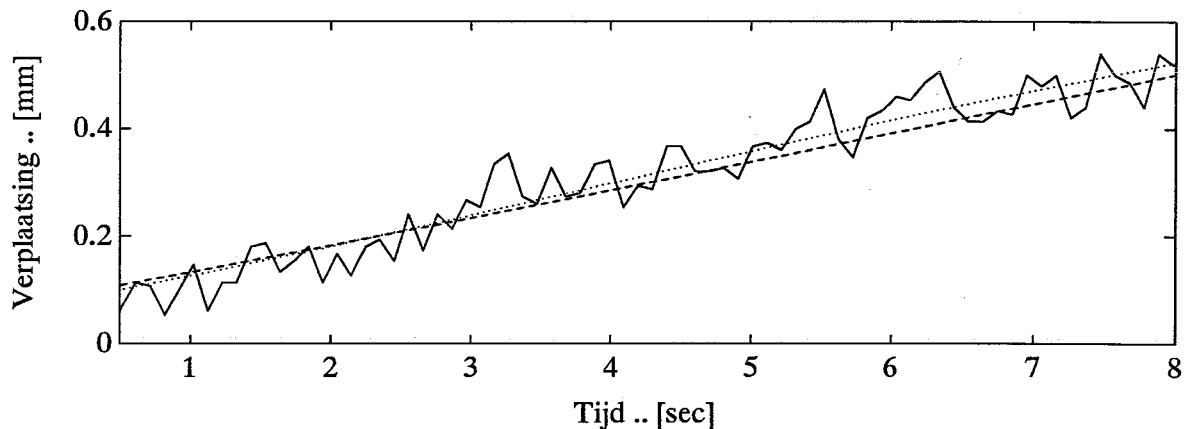


Figuur B3.1 De fout in de markerafstand wordt bepaald door de meetfout.  $3\sigma \sim 0,1\text{mm}$



Figuur B3.2 Het originele ruissignaal en de daaruit gefilterde informatie.

Met het signaal van de gemiddelde markerverplaatsing (----- in figuur B3.3) en het signaal van de gemiddelde verplaatsing aangevuld met de teruggewonnen informatie (..... in figuur B3.3) wordt de rekverdeling opnieuw bepaald. Het



Figuur B3.3 Het gemeten en benaderde signaal van de markerverplaatsing.  
(\_\_\_\_\_ gemeten, ----- gefit, ..... fit én gefilterd signaal.)

eerste, gefitte signaal geeft een continue geleidelijke toename van de rek voor alle materiaal delen op de midden-as van de staaf. Het tweede signaal laat een variërende rektoename in de tijd te zien. Dit is het gevolg van het gefilterde ruissignaal.

Wordt de rek aan het einde van vijf gelijke perioden uitgezet tegen het betreffende materiaaldeel, dan blijkt dat vlak voor breuk de rek voor beide gevallen gelijk is. Filteren heeft dus geen invloed op het berekenen van de lokale breukrek. En omdat vooral naar een trend in de reklokalisering wordt gezocht, wordt daarom verder van het filteren van de ruis afgezien.

Hieronder is het programma voor het fitten en het filteren bijgevoegd.

```
% *** Fitten van een ruw signaal.
clear,cig
load m4
N      = length(M4);
t      = (0:(N-1))';
for i = 1:8
    Cfit      = polyfit(t,M4(:,i),4);
    Mfit      = polyval(Cfit,t);
    MFit4     = [MFit4 Mfit];
end
save mfit4 Mfit4
```

```

% *** Filteren van de ruis op het positie-signaal M4; Ruis = M4 - Mfit4. Boven
% *** de afbreekfrequentie  $Ond/(n-1)*(fs/Tr)$  [Hz] worden alle frequenties
% *** verwijderd.
clear, clg
load M4
load Mfit4

fs      = 39.1;
Tr      = 4;
N       = length(M4);
Ond     = 7;
Bov     = N + 1 - Ond;
f       = (0:1/(N-1):1)*fs/2/Tr;
t       = (0:(N-1))/(fs/Tr);

d       = (M4(:,1) - Mfit4(:,1))/300;
doud    = d;
D       = fft(d);
Doud    = D;
D(Ond:Bov) = zeros(Bov-Ond+1,1);
clear d
d       = real(ifft(D));

% *** Plotten van de oude en de nieuwe verschilvector.
axis([0 60 -0.15 0.15])
plot(t,doud,t,d), title('Ruis voor en na filtering.')
xlabel('Frequentie .. [Hz]'), ylabel('Meetfout .. [mm]')

```

#### **Bijlage 4. Rekberekening bij een continue trekproef.**

Uit de gefitte gegevens wordt na elke afzonderlijke meting de afstand tussen twee opeenvolgende markers bepaald. Deze afstand wordt gerelateerd aan een referentie-afstand. Dat is de afstand tussen dezelfde twee markers na 8,2 seconde. Het materiaal heeft zich in die tijd kunnen zetten.

In twee figuren wordt vervolgens de rek weergegeven. In een eerste figuur wordt voor elk materiaaldeel de toename van rek in de tijd tussen het referentie-tijdstip en het tijdstip van breuk weergegeven. Deze tijdsduur wordt vervolgens opgedeeld in vijf gelijke perioden. Een tweede figuur laat vervolgens de rekverdeling in het materiaal aan het einde van elke periode zien.

```
% *** Berekening van de rekverloop tijdens de CONTINUE TREKPROEF.
% *** De gebruikte gegevens zijn de gefitte positiemetingen van de markers
% *** op de middenas van de trekstaaf van proef C4.
```

```
clear, clg
load Mfit4
Y      = Mfit4;

Tref   = 80;
Te     = length(Y);
fs     = 39.1;
Tr     = 4;
t      = (1:Te)/(fs/Tr);
T      = Tref + [0.2 0.4 0.6 0.8 1]*(Te-Tref);

for Matdeel = 1:7
    YRef = Y(Tref,Matdeel) - Y(Tref,Matdeel+1);
    for i = 1:Te
        DeltaY(i,Matdeel) = Y(i,Matdeel) - Y(i,Matdeel+1);
        Rek(i,Matdeel)    = DeltaY(i,Matdeel)/YRef - 1;
    end
end

Ma      = [9.5:15.5];
for i = 1:5
    [ma REK] = bar(Ma,Rek(T(i),:));
    [REK]    = [REK REK];
end

% *** Plotten van de rekverloop van elk materiaaldeel tegen de tijd
% *** en van de rek versus de markerpositie op vijf tijdstippen.
subplot(211)
axis([0 60 -0.005 0.11])
plot(t,Rek),title('Rekverloop .. C4')
xlabel('Tijd .. [sec]'),ylabel('Rek .. [-]')
subplot(212)
axis([8.5 16.5 -0.005 0.11])
plot(ma,REK),title('Rekverloop .. C4')
xlabel('Markernummer'),ylabel('Rek .. [-]')
meta dyndis4
```



**Bijlage 5.      Rekberekening bij een stapsgewijze trekproef.**

Na een traverseverplaatsing van 0,1 mm wordt de traverse stilgezet. Zes minuten hierna worden de x- en de y-coördinaat van elke marker gedurende 20 seconden gemeten. Vervolgens wordt het gemiddelde positie van elke marker over de meet-tijd bepaald en worden de coördinaten samen met hun standaarddeviatie en hun 95%-betrouwbaarheids-interval opgeslagen. Het betrouwbaarheidsinterval heeft een grootte van ongeveer 1 pixel. De systematische afwijking waarmee wordt gemeten is echter ongeveer 0,1 mm ( $\pm 30$  pixels) groot.

Voor elke rekstap wordt vervolgens de afstand tussen twee onderelkaar liggende markers bepaald. Deze wordt gerelateerd aan de afstand ná de eerste rekstap.

---

```
% *** Programma voor het berekenen van de lokale rek tussen twee markers op
% *** een trekstaaf aan de hand van de posities van de markers.
% *** DERDE STAPSGEWIJZE TREKPROEF (S3)
clear, clg
load lestat30
load lestat31
load lestat32
load lestat33
load lestat34
load lestat35
load lestat36
load lestat37

Y30 = lestat30(:,4)/300;
Y31 = lestat31(:,4)/300;
Y32 = lestat32(:,4)/300;
Y33 = lestat33(:,4)/300;
Y34 = lestat34(:,4)/300;
Y35 = lestat35(:,4)/300;
Y36 = lestat36(:,4)/300;
Y37 = lestat37(:,4)/300;
Y3 = [Y30 Y31 Y32 Y33 Y34 Y35 Y36 Y37];

% *** Berekenen van de rek tussen markers ma en ma+1 in de afzonderlijke
% *** stappen. In de eerste rekstap (Y31-Y30) zet het materiaal zich. De
% *** rek is gerelateerd aan de toestand beschreven in Y31 (stap = 2).
```

```

for stap = 1:8
  for ma = 1:6
    if stap <= 2
      DeltaY(ma,stap) = Y3(ma,stap) - Y3(ma+1,stap);
      DeltaY(ma+7,stap) = Y3(ma+7,stap) - Y3(ma+8,stap);
      DeltaY(14,stap) = Y3(14,stap) - Y3(15,stap);
      DeltaY(ma+15,stap) = Y3(ma+15,stap) - Y3(ma+16,stap);
    else
      DeltaY(ma,stap) = Y3(ma,stap) - Y3(ma+1,stap);
      DeltaY(ma+7,stap) = Y3(ma+7,stap) - Y3(ma+8,stap);
      DeltaY(14,stap) = Y3(14,stap) - Y3(15,stap);
      DeltaY(ma+15,stap) = Y3(ma+15,stap) - Y3(ma+16,stap);
      Rek(ma,stap) = DeltaY(ma,stap) / DeltaY(ma,2) - 1;
      Rek(ma+7,stap) = DeltaY(ma+7,stap) / DeltaY(ma+7,2) - 1;
      Rek(14,stap) = DeltaY(14,stap) / DeltaY(14,2) - 1;
      Rek(ma+15,stap) = DeltaY(ma+15,stap) / DeltaY(ma+15,2) - 1;
    end
  end
end

% *** Plotten van het rekverloop en de rekdistributie.
mali = (1.5:6.5)';
mami = (8.5:14.5)';
mare = (16.5:21.5)';

for stap = 3:8
  [Mali REKli] = bar(mali,Rek(1:6,stap));
  [Mami REKmi] = bar(mami,Rek(8:14,stap));
  [Mare REKre] = bar(mare,Rek(16:21,stap));
  [REKli] = [REKli REKli];
  [REKmi] = [REKmi REKmi];
  [REKre] = [REKre REKre];
end

```

```

subplot(211)
axis([0.5 7.5 0 0.05])
plot(Mali,REKli(:,[1:6])),title(['Rek op de linkerzijde.'])
xlabel('Markernummer (S3)'),ylabel('Rek .. [-]')
meta statdis3
pause(5)
subplot(212)
axis([7.5 15.5 0 0.05])
plot(Mami,REKmi(:,[1:6])),title(['Rek op de middenas.'])
xlabel('Markernummer (S3)'),ylabel('Rek .. [-]')
meta statdis3
pause(5)
clg,subplot(211)
axis([15.5 22.5 0 0.05])
plot(Mare,REKre(:,[1:6])),title(['Rek op de rechterzijde.'])
xlabel('Markernummer (S3)'),ylabel('Rek .. [-]')
meta statdis3

```

---

## Bijlage 6. Instellingen van het Hentschel-meetsysteem.

	<u>Continue trekproef</u>	<u>Stapsgewijze trekproef</u>
Camera nummer	2	2
Window size	1,4 %	1,4 %
Number of targets	22	24 <sup>1</sup>
Sample rate	937,5 Hz	937,5 Hz
Transfer Rate	4	1
Left/Right limit	0-4095	0-4095
Step	5	5
Number of measurements	1	1
Acquisition Rate	234,4 Hz	937,5 Hz
Sample Rate per target	10,7 Hz	39,1 Hz
Number of samples per target	744,7	682,7
Acquisition time	72,4 s	20 s
Maximum resolution	16384	16384

---

<sup>1</sup> 22 in proef S3.