

Technische Universiteit Delft  
Faculteit der Scheikundige Technologie en der Materiaalkunde  
Vakgroep: Toepassingen van Materialen in Constructies  
Sectie: Plasticiteit en Langeduur Gedrag van Materialen

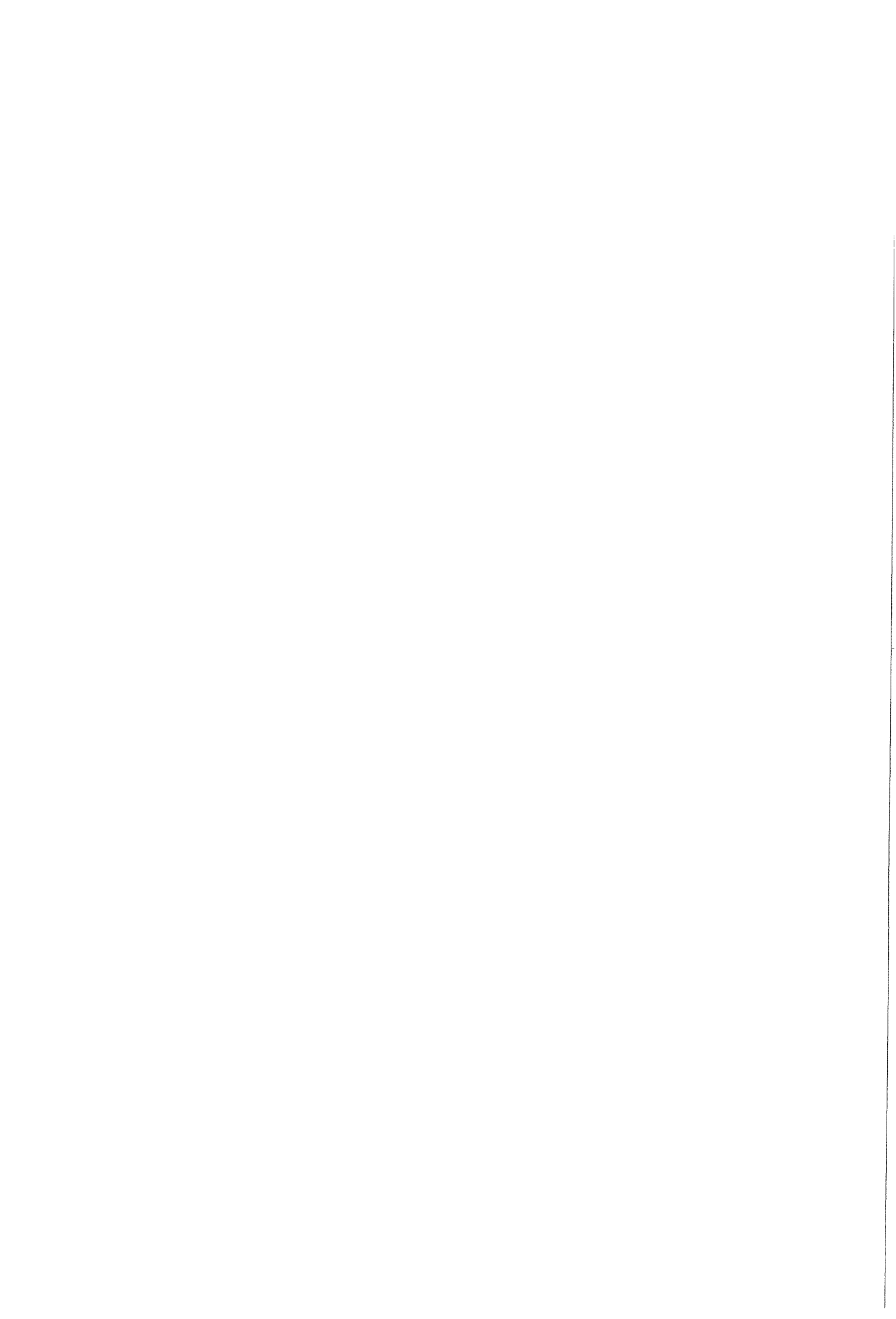
BEPALING DYNAMISCHE BREUKPARAMETERS  
VAN HOGE DICHTHEID POLYETHEEN

J.C. DEKKER

Begeleider: Prof. Dr. Ir. A. Bakker

Delft

Augustus 1993

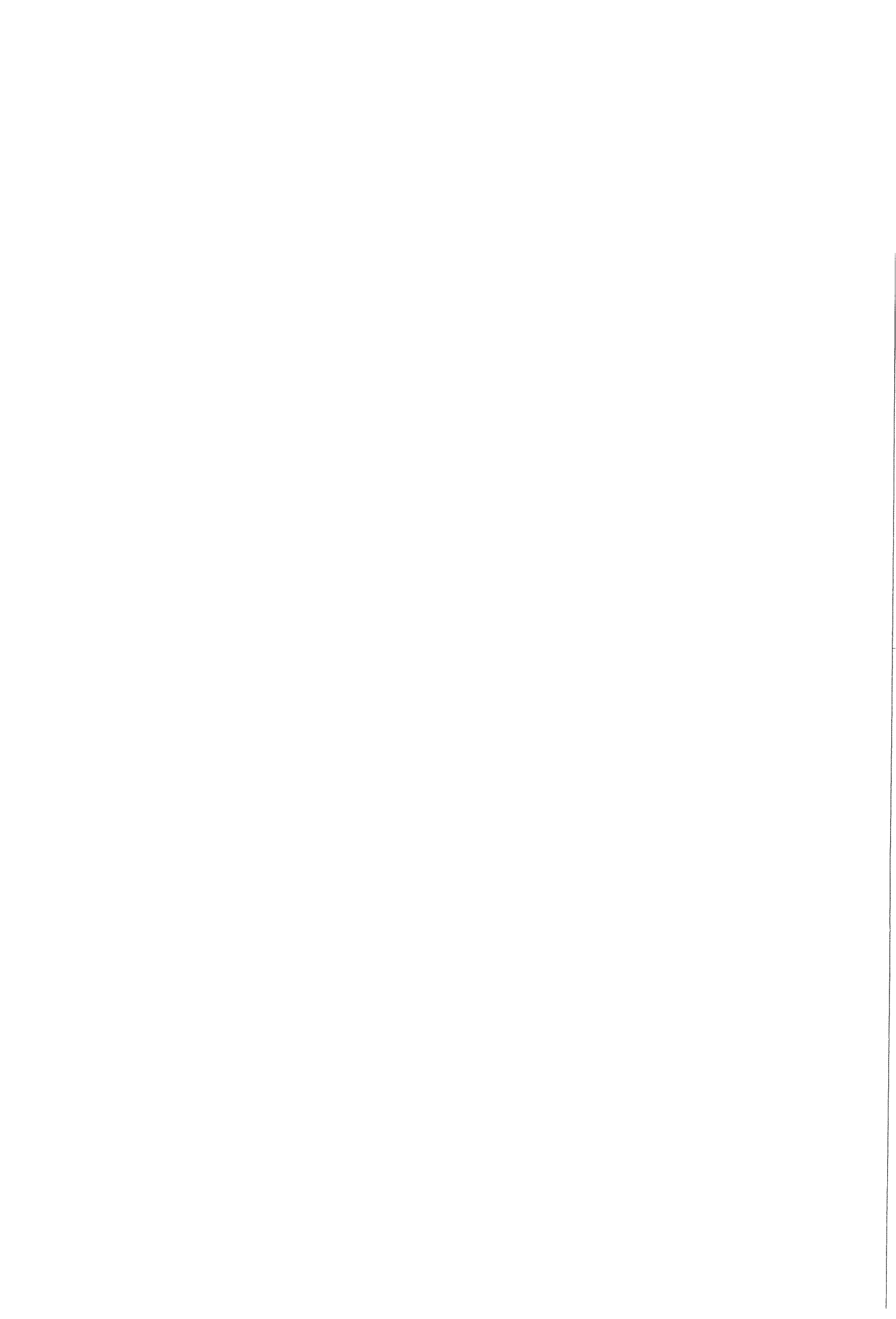


## VOORWOORD

Dit verslag is geschreven in het kader van het afstudeerwerk behorende bij de opleiding tot Materiaalkundig Ingenieur aan de Technische Universiteit Delft. Het afstudeeronderzoek is uitgevoerd bij de vakgroep Toepassingen van Materialen in Constructies, sectie Plasticiteit en Lange Duur Gedrag van Materialen (TMC II).

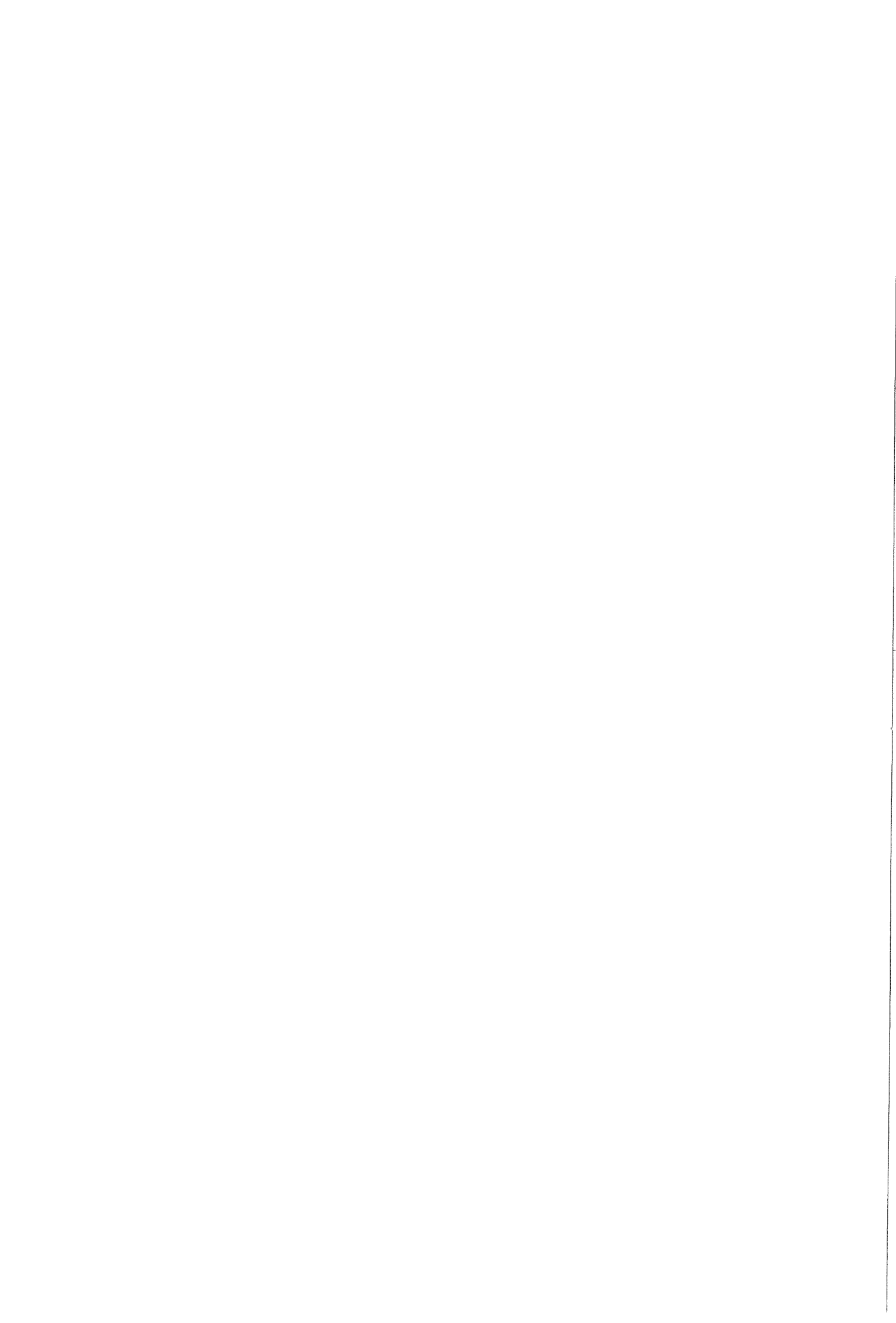
Het afstudeerwerk is mede tot stand gekomen dankzij de hulp van vele mensen. Bij deze wil ik daarom alle leden van de sectie TMC II bedanken voor hun hulp tijdens het afstudeerwerk. Met name wil ik Ton Riemsdag bedanken voor het maken van de SEM-opnamen en de vele discussies die aan dit onderzoek extra waarde hebben gegeven. Prof. Bakker wil ik bedanken voor zijn begeleiding bij het afstudeeronderzoek.

Augustus 1993, Jocco Dekker



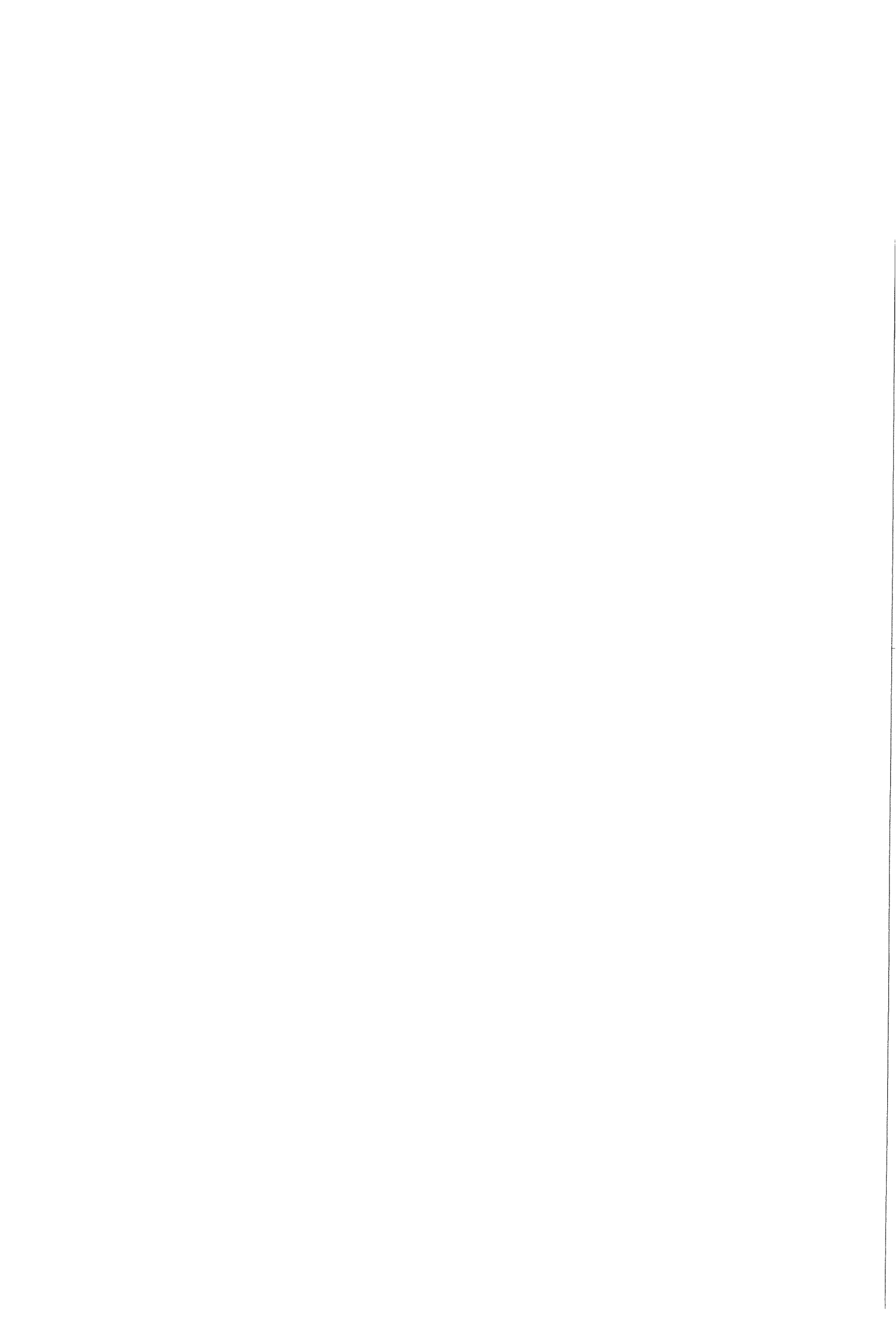
## INHOUD

VOORWOORD.....	2
SYMBOLEN.....	4
SAMENVATTING .....	5
SUMMARY .....	6
1. INLEIDING .....	7
2. THEORIE .....	8
2.1 Spanningsintensiteitsfactor K .....	8
2.2 'Energy release rate' G.....	9
3. ONDERZOCHE MATERIAAL.....	13
4. MEETOPSTELLING.....	14
4.1 Valgewichtopstelling.....	14
4.2 Data verwerking en registratie.....	15
4.3 Proefstuk geometrie .....	17
5. EXPERIMENTEN .....	18
5.1 Overzicht van de experimenten .....	18
5.2 Procedure voor Kc en Gc bepaling .....	18
5.3 Resultaten .....	20
6. BESPREKING RESULTATEN .....	29
6.1 Invloed dempingsmateriaal. ....	29
6.2 Invloed zijgroeven .....	30
6.3 Invloed van de testsnelheid .....	30
6.4 Verband tussen K en G.....	31
6.5 Lineair elastisch materiaal gedrag. ....	31
6.6 Afmetingseisen .....	32
6.7 Vergelijking met de literatuur .....	33
7. BESCHRIJVING BREUKGEDRAG.....	34
7.1 Instabiele scheuruitbreiding.....	34
7.2 Craze lengte .....	34
7.3 Breukoppervlakken .....	35
CONCLUSIE .....	38
LITERATUUR.....	39
BIJLAGE 1: ELEKTRISCH SCHEMA VAN DE VALGEWICHTOPSTELLING	
BIJLAGE 2: BLOKDIAGRAM EN LISTING VAN HET PROGRAMMA	
BIJLAGE 3: FORMULES VOOR BEREKENING $F(A/W)$ EN $\Phi$	
BIJLAGE 4: GEGEVENS EN RESULTATEN VAN DE TREKPROEVEN	
BIJLAGE 5: FOTO'S VAN DE BREUKOPPERVLAKKEN	



## SYMBOLLEN

$\Delta$	Verplaatsing
$\phi$	Compliantiefactor
$\sigma$	Opgelegde spanning
$\sigma_c$	Spanning op het moment van scheuruitbreiding
$\sigma_y$	Vloeispanning
$\tau$	Periodetijd
$\nu$	Constante van Poisson
$a$	Scheurlengte
$\delta a$	Scheuruitbreiding
$B$	Dikte van het proefstuk
$C$	Compliantie
$E$	Elasticiteitsmodulus
$F$	Arbeid
$g$	Zwaartekracht versnelling
$G$	'Energy release rate'
$G_c$	Kritische 'energy release rate'
$G_c^m$	$G_c$ bepaalt uit de energie tot maximale kracht
$G_c^t$	$G_c$ bepaalt uit de totale breukenergie
$h$	Valhoogte
$K$	Spanningsintensiteitsfactor
$K_c$	Kritische spanningsintensiteitsfactor
$m$	massa
$P$	Kracht
$R_d$	Lengte van de plastische zone volgens Dugdale
$R$	Scheurweerstand
$S$	Opspanlengte
$\Delta t$	Tijd tussen twee meetpunten (sample rate)
$t_f$	Tijd tot breuk
$U$	Energie
$v$	valsnelheid
$W$	Hoogte van het proefstuk





## SAMENVATTING

Met een geïnstrumenteerde valgewichtopstelling zijn dynamisch breukproeven met snelheden van 1 t/m 6 m/s uitgevoerd aan driepunts-buigproefstukken (met en zonder zijgroeven) van een HDPE zoals die gebruikt wordt voor gasleidingen.  $G_C$  bepalingen zijn uitgevoerd met een 'multiple specimen' procedure zoals beschreven in een voorgesteld test protocol van de ESIS Technical Committee 4 on Polymers and Composites. Zowel de totale breukenergie als de energie tot maximale kracht zijn gebruikt voor deze bepaling.  $K_C$  is uit de maximale kracht bepaald.

Bij dit onderzoek zijn de volgende punten vastgesteld:

### **Oscillaties in het kracht signaal**

Om de oscillaties te beperken zijn de afmetingen van de proefstukken zo klein mogelijk gehouden. Desondanks waren de oscillaties groter dan toegestaan door het ESIS test protocol. Door het gebruik van 0.5 mm rubber als dempingsmateriaal werden de oscillaties voldoende gereduceerd. Het gebruik van het dempingsmateriaal beïnvloedt  $G_C$  en  $K_C$  niet.

### **Effect van de zijgroeven**

Proefstukken zonder zijgroeven vertoont op het breukoppervlak shearlips en een sterk gekromde craze zone. Bij deze proefstukken is het verschil tussen de totale breuk-energie en energie tot maximale kracht groot. Dit wordt veroorzaakt door scheurstop na de maximale kracht, met als gevolg dat het sterk uitmaakte of  $G_C$  bepaald wordt uit de totale breukenergie of uit de energie tot maximale kracht. Bij de proefstukken met zijgroeven zijn er geen shearlips gevormd en is het craze front recht. Ook vindt er geen scheurstop meer plaats. Als gevolg hiervan verschillen de totale breukenergie en energie tot maximum nog maar weinig en zijn de  $G_C$  waarden gelijk.

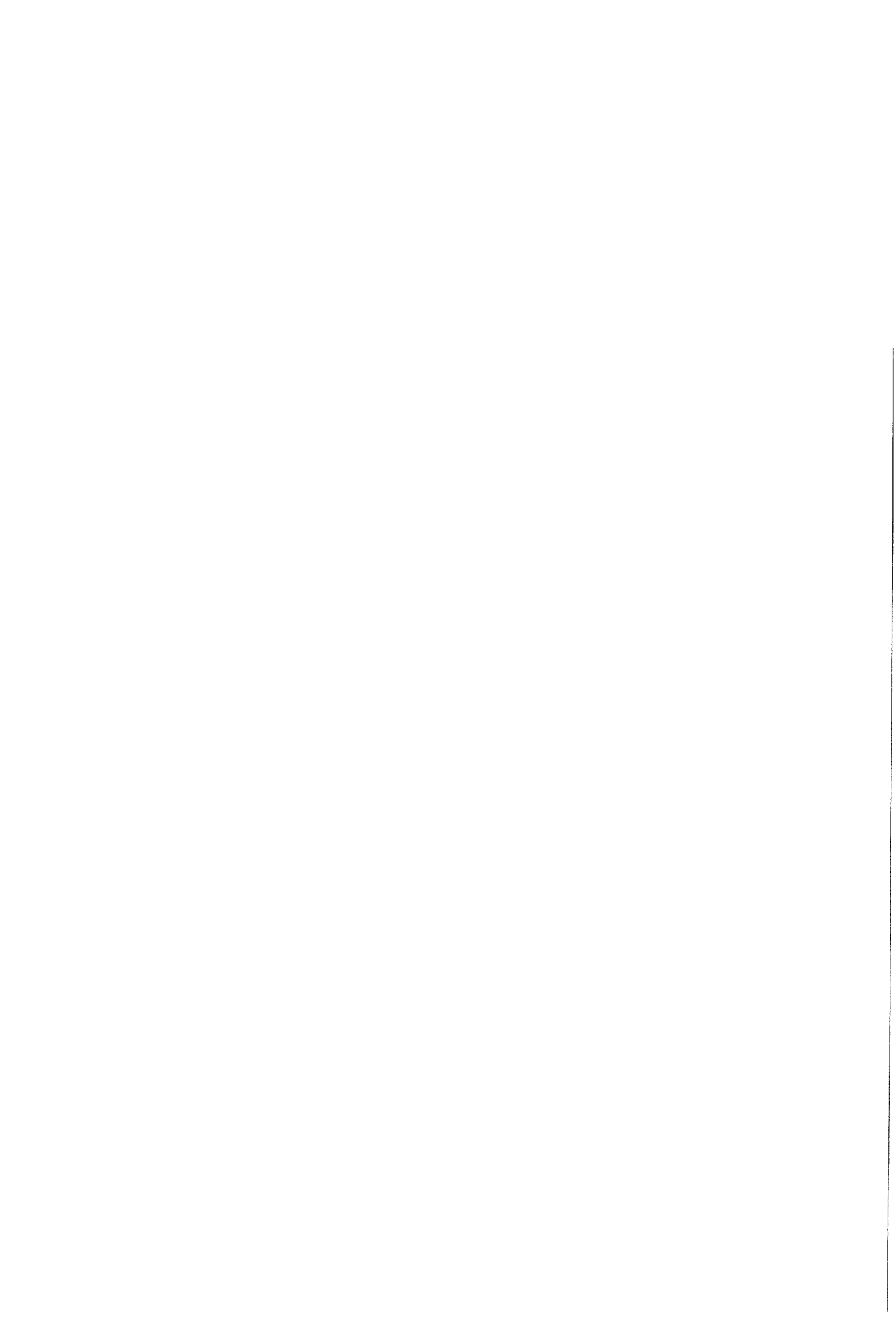
### **Snelheids effecten**

De oscillaties nemen toe met toenemende snelheid. Boven de 3 m/s was het niet meer mogelijk om  $G_C$  te bepalen. Tussen 1 en 3 m/s daalde  $G_C$  van 8.6 naar 7.2 kJ/m<sup>2</sup>.  $K_C$  daalde nauwelijks en bleef ongeveer 3.0 MPa√m. De lengte van de craze zone bleek af te nemen met toenemende testsnelheid.

### **Breukoppervlakken**

Met behulp van SEM opnamen zijn de breukoppervlakken bestudeerd. Vanaf de kerftip zijn een drietal zones waargenomen:

- een smalle gladde zone van ongeveer 0.2 mm
- een zone met steeds fijner wordende schollen die veroorzaakt wordt door craze vorming
- een zone met schilfers veroorzaakt door instabiele scheurgroei die geleidelijk overgaat in een sponsachtige structuur die ook bij langzame breuk gevonden wordt.



## **SUMMARY**

Dynamic fracture tests on three point bend specimens (with and without sidegrooves) of a HDPE as applied for gas transmission pipelines, were carried out using an instrumented drop-weight tester over a velocity range between 1 and 6 m/sec.  $G_C$  values were determined by a multiple specimen procedure, as described by a test protocol under development by ESIS Technical Committee 4 on Polymers and Composites. Both total fracture energy and fracture energy till maximum load were used in these determinations.  $K_C$  values were determined from the maximum load values.

The following observations are made:

### **Load Oscillations**

The specimen size was taken as small as possible to reduce load oscillations. Test without a damping material showed, however, still larger oscillations than permitted by the ESIS protocol. Applying 0.5 mm rubber as damping material reduced the oscillations considerably. It is noteworthy that no change in  $G_C$  was observed as the result of applying this damping material.

### **Effect of Sidegrooves**

Plane specimens, without sidegrooves show shear lips at the fracture surface, and a clearly curved craze zone that decreases in length towards the specimen surface. Also they show an appreciable difference between the total and maximum load fracture energy, which is associated to crack arrest phenomena after maximum load. By this,  $G_C$  values determined from total and maximum load energies differ considerably. By applying sidegrooves the craze zone shows no variation across the thickness, no shear lips are formed, and crack arrest after maximum load disappears. As a result, the difference between total and maximum load fracture energies become relatively small and hence also the differences in derived  $G_C$  values.

### **Velocity Effects**

Oscillations increase with increasing testing velocity. Above speeds of 3 m/sec no  $G_C$  values could be determined. Between 1 and 3 m/sec  $G_C$  drops from 8.6 to 7.2 kJ/m<sup>2</sup>.  $K_C$  remains almost constant at a level of 3.0 MPa $\sqrt{m}$ . The craze zone width decreases with increasing velocity.

### **Fracture Surfaces**

From SEM observations of the fracture surfaces it was concluded that the fracture mechanism is predominantly ductile, also for specimens which show hardly a non-linearity in the loading curve and appear to fracture brittle on a macroscopic scale. Emanating from the crack tip 3 zones in the crack surface can be distinguished:

- a small smooth zone of about 0.2 mm
- a patchwork zone with decreasing coarseness, which is associated with craze forming
- a hackle zone, representing the instable brittle fracture emanating from the craze zone at maximum load. Gradually the hackle structures disappear and the structure changes into a dimple structure also found at slow fracture.



## 1. INLEIDING

Polyetheen wordt voornamelijk gebruikt als materiaal voor gasbuizen. Gasbuizen kunnen bij graafwerkzaamheden bloot gesteld worden aan stootbelastingen. Om te kunnen bepalen in welke mate zo'n stoot belasting fataal kan zijn is een materiaal parameter nodig die de weerstand tegen stootbelastingen beschrijft. De parameter kan tevens gebruikt worden om tot een goede materiaalkeuze te komen.

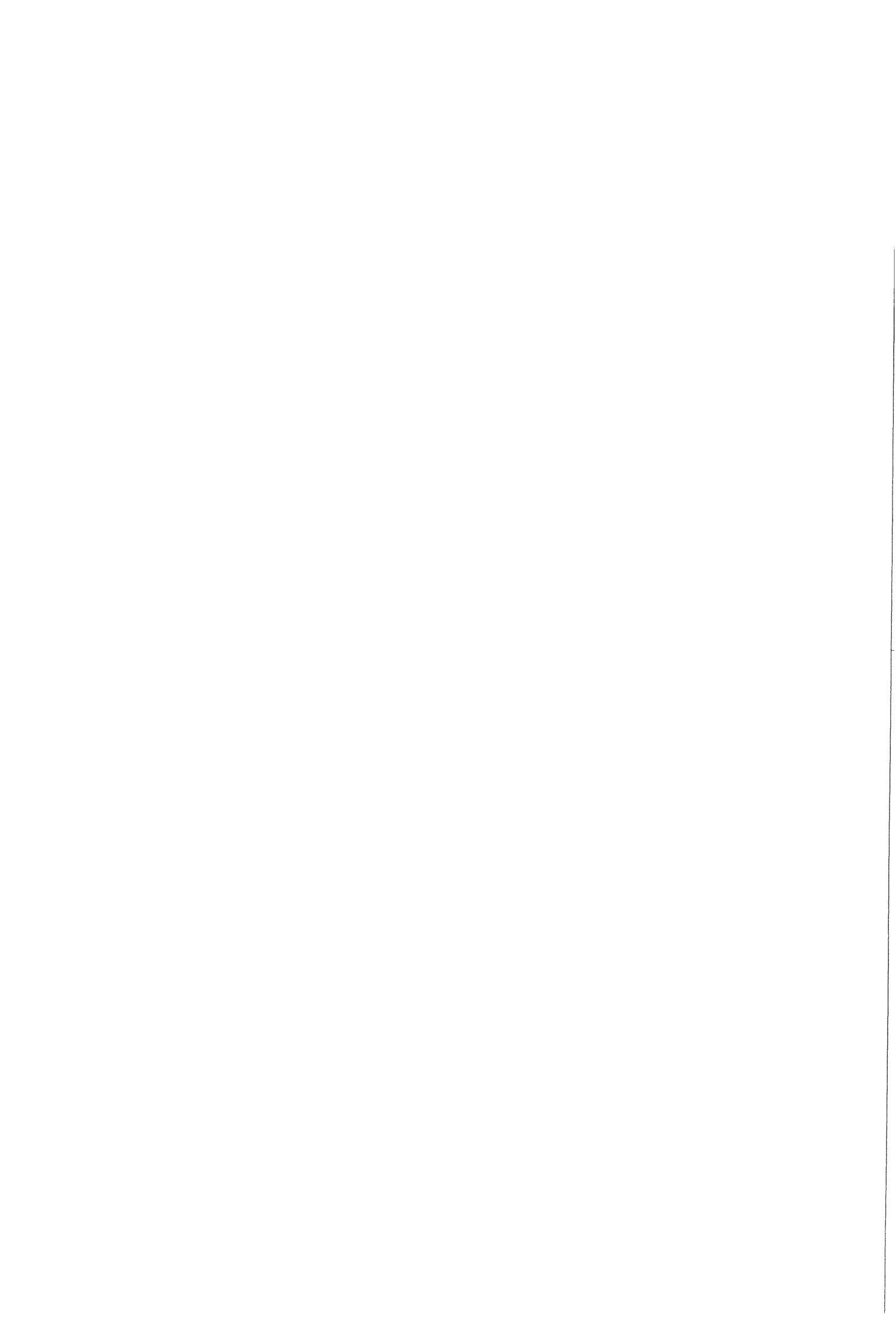
In dit onderzoek zijn de dynamische  $K_{IC}$  en  $G_{IC}$  van een hoge dichtheid polyetheen bepaald waarbij zoveel mogelijk het test protocol zoals dat is voorgesteld door de 'ESIS Technical Committee 4 on Polymers and Composites' is aangehouden.

$K_{IC}$  en  $G_{IC}$  zijn parameters uit de breukmechanica die de breuktaaiheid kwantificeren.  $K_{IC}$  is bepaald uit de maximum kracht. En  $G_C$  is met een 'multiple specimen' methode uit zowel de totale breukenergie als uit de energie tot maximale kracht bepaald. De bepalingen zijn uitgevoerd met een zogenaamde geïnstrumenteerde valgewichtopstelling aan driepunts buigproefstukken.

Bij belastingen met hoge snelheden treden oscillaties op in het proefstuk. Door het kiezen van de juiste proefstuk grootte en het gebruik van dempingsmateriaal is geprobeerd deze oscillaties zo veel mogelijk te dempen.

De invloed van de belastingssnelheid, zijgroeven en dempingsmateriaal op het breukgedrag is onderzocht.

Aan de hand van de breukoppervlakken zijn de breukmechanismen beschreven die optreden indien polyetheen met een hoge snelheid wordt belast.



## **2. THEORIE**

Het basisprincipe van de breukmechanica is dat de sterkte van een materiaal bepaald wordt door de aanwezigheid van scheuren in het materiaal. Onderdelen van de breukmechanica zijn:

1. De berekening van spannings- en verplaatsingsvelden rond een scheur.
2. De bestudering van breuk- en scheurgroeimechanismen.
3. De opstelling van criteria voor scheurgroei en breuk.
4. Bepaling van het materiaalgedrag onder aanwezigheid van een scheur.

Om tot een criterium voor scheurgroei en breuk te komen worden twee benaderingen gebruikt:

-Bepaling van het spanningsveld rond de scheurtip, deze leidt tot de spanningsintensiteitsfactor  $K$ .

-Opstelling van een energie balans, deze leidt tot de 'energy release rate'  $G$ .

Voor dynamische breukparameters wordt dezelfde theorie gebruikt als voor statische proeven.

### **2.1 Spanningsintensiteitsfactor $K$**

Irwin heeft gevonden dat het spanningsveld rond een scheurtip in een lineair elastisch materiaal gedefinieerd kan worden met een spanningsintensiteitsfactor  $K$ . Indien de  $K$ -factor de kritische waarde  $K_C$  overschrijdt zal het materiaal breken.  $K$  is dus een parameter die het spanningsveld beschrijft en onafhankelijk is van het materiaal, terwijl  $K_C$  ook aangeduid als de breuktaaiheid, een materiaalconstante is.

Voor een oneindig grote centraal gescheurde plaat onder trekbelasting geldt:

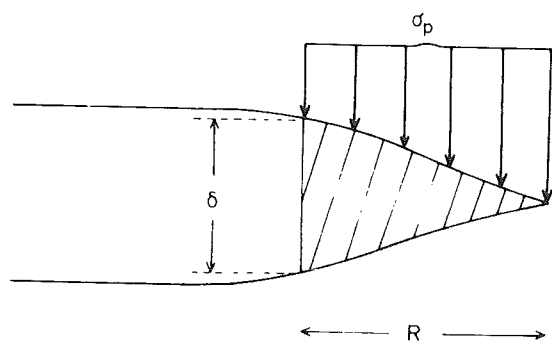
$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.1)$$

Op het moment dat de scheur gaat uitbreiden geldt:

$$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (2.2)$$

Voor andere geometrieën dienen er aan de formules 2.1 en 2.2 nog de correctiefactoren  $C$  en  $f(a/W)$  gegeven door de literatuur (bijv. Tada [1]) toegevoegd te worden.

In het gebied rond de scheurtip worden de spanningen hoger dan de vloeispanning zodat het materiaal daar lokaal gaat vervormen. Dit gebied wordt de plastische zone genoemd. In kunststoffen kan de plastische zone het best beschreven worden met het lijn model van



figuur 2.1: Plastische zone volgens Dugdale [2]



Dugdale (figuur 2.1). De lengte  $R_D$  van de plastische zone is aan de spanningsintensiteit gerelateerd volgens [3]:

$$R_D = \frac{\pi}{8} \left( \frac{K_I}{\sigma_y} \right)^2 \quad (2.3)$$

Een bepaalde  $K_c$  waarde is alleen geldig indien de afmetingen van het proefstuk groot zijn in verhouding tot de plastische zone, zodat de invloed van de plastische zone op de spanningsintensiteit verwaarloosd kan worden en er een overheersende 'plane strain' situatie is. Dit heeft na uitvoerig onderzoek geleid tot de volgende afmetingseisen:

$$a, B, (W-a) \geq 2.5 \left( \frac{K_c}{\sigma_y} \right)^2 \quad (2.4)$$

## 2.2 'Energy release rate' $G$

Griffith geeft voor de totale energie inhoud van een belaste elastische plaat met een scheur:

$$U_T = U_o + U_a + U\gamma - F \quad (2.5)$$

waarin;

$U_o$  = Elastische energie inhoud van de plaat zonder scheur (een constante)

$U_a$  = Verandering van de elastische energie veroorzaakt door de introductie van een scheur in de plaat.

$U\gamma$  = Verandering van de elastische oppervlakte energie veroorzaakt door de vorming van de scheuroppervlakken.

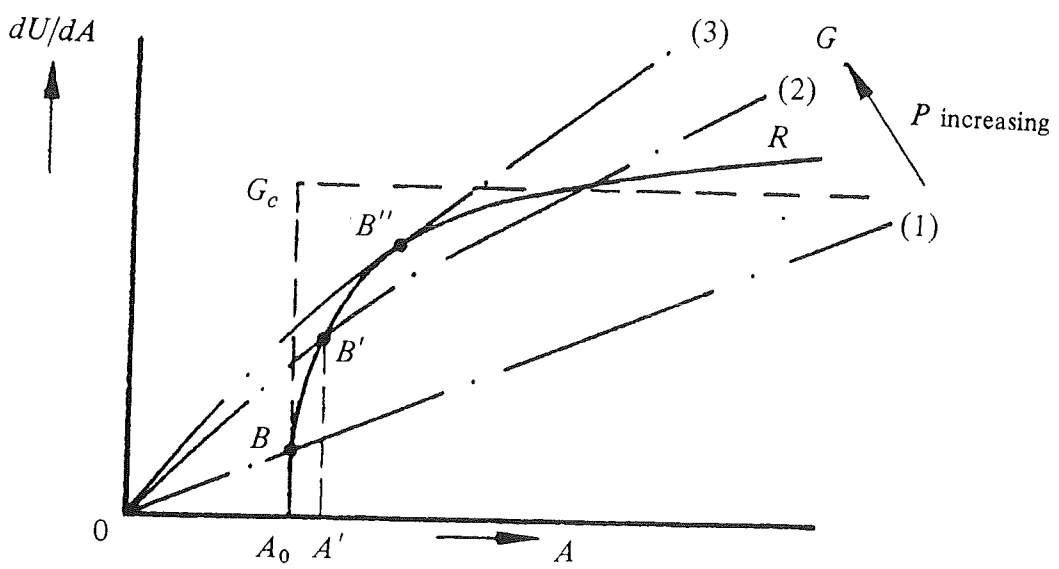
$F$  = Arbeid verricht door externe belastingen.

Indien de aanwezige scheur gaat groeien verandert de energie inhoud van de plaat. De scheur zal instabiel verder groeien als de energie inhoud afneemt bij toenemende scheurlengte. In formule vorm:

$$\frac{dU}{da} \leq 0 \quad (2.6)$$

of omdat  $U_o$  een constante is:

$$\frac{d}{da} (F - U_a) \geq \frac{dU\gamma}{da} \quad (2.7)$$



figuur 2.2: G en R curven als functie van de scheurlengte [4]

In het linker gedeelte van formule 2.7 staat  $dF/da$  voor de door de externe belasting geleverde energie per eenheid van scheuruitbreiding en  $dU_a/da$  voor de toename van de elastische energie. Dus  $dF/da - dU_a/da$  is de hoeveelheid energie die beschikbaar is voor scheuruitbreiding. Het rechter gedeelte;  $dU_\gamma/da$ , staat voor de energie die nodig is om de scheur te laten groeien.

Als we de 'energy release rate',  $G$ , per dikte eenheid definiëren als:

$$G = \frac{d}{da}(F - U_a) \quad (2.8)$$

en de scheurweerstand  $R$  per dikte eenheid als:

$$R = \frac{d}{da}(U_\gamma) \quad (2.9)$$

kunnen we stellen dat een scheur zal gaan uitbreiden als:

$$G = R \quad (2.10)$$

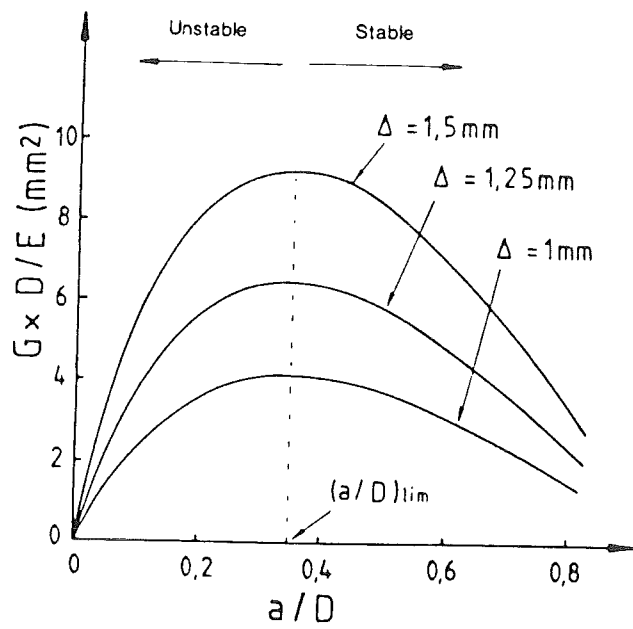
Of de scheur instabiel zal uitbreiden hangt af van de verandering van  $G$  en  $R$  bij scheuruitbreiding van  $a$  naar  $a + \delta a$ , de scheurgroei zal instabiel als:

$$G + \frac{dG}{da} \delta a > R + \frac{dR}{da} \delta a \quad (2.11)$$

omdat  $G=R$ , komen we tot het criterium voor instabiele scheuruitbreiding:

$$\frac{dG}{da} > \frac{dR}{da} \quad (2.12)$$

Dit criterium kan gepresenteerd worden in een grafiek zoals in figuur 2.2. Als er een scheur met lengte  $a_0$  aanwezig is, kan de energie die nodig is voor scheurgroei weergegeven worden door  $R$  als functie van  $a$ . Het steile verloop van  $R$  bij  $a_0$  geeft de weerstand tegen scheurgroei bij lage krachten weer. De tendens dat  $R$  constant wordt bij grote  $a$  geeft aan dat bij grote scheurlengtes eenzelfde energie voor een bepaalde scheuruitbreiding nodig is. De curven voor  $G$  zijn weergegeven voor een constante kracht als functie van  $a$  en zijn de lijnen 1,2 en 3 voor toenemende belasting  $P$ . Lijn 1 voor een lage belasting snijdt de  $R$ -curve in het steile gedeelte op plaats B en geeft geen scheuruitbreiding. Lijn 2 snijdt de  $R$ -curve op plaats B' en geeft een scheurgroei tot  $a'$ , echter  $dG/da < dR/da$  zodat de scheur niet verder zal groeien, er is dan sprake van stabiele



figuur 2.3: G als functie van de scheurlengte voor buigproefstukken [5]

scheuruitbreiding. Lijn 3 raakt de R-curve in punt B'' waar  $dG/da > dR/da$  zodat de scheur instabiel zal uitbreiden.

Een speciale en zeer belangrijke vorm van een R-curve is in de figuur weergegeven met de gebroken verticale en horizontale lijnen. Bij deze R-curve zal er geen stabiele scheurgroei zijn en bij het bereiken van een maximale G zal er instabiele scheuruitbreiding plaats vinden omdat R constant blijft. Deze constante waarde wordt de kritische 'energy release rate'  $G_c$  genoemd en is onafhankelijk van het belastingssysteem.

In figuur 2.2 is aangenomen dat G continu toeneemt als functie van a. Bij driepunts buigproeven is dit echter niet het geval. Vu-Khanh [5] heeft voor driepunts buigproefstukken het verloop van G als functie van a voor verschillende doorbuigingen berekend in figuur 2.3 is het resultaat daarvan weergegeven. Uit deze figuur blijkt dat bij een materiaal met een constante  $G_c$  er twee soorten breuk, afhankelijk van de scheurlengte, kunnen optreden. De scheurlengte  $a_{lim}$  correspondeert met de maximum waarde van G en scheidt de twee typen breuk waarbij de breuk instabiel of stabiel zal uitbreiden. Indien  $a < a_{lim}$  zal bij scheurgroei G groter worden dan  $G_c$  en de scheur zal dus instabiel uitbreiden. Als  $a > a_{lim}$  is  $dG/d(a/D)$  negatief en kan de scheur niet verder groeien tenzij de verplaatsing toeneemt. Voor driepuntsbuigproefstukken geldt dat  $a_{lim}/W = 0.36$ .

Indien een proefstuk van een lineair elastisch materiaal met dikte B, hoogte W en scheurlengte a wordt belast met een kracht P en de daarbij behorende verplaatsing is  $\Delta$ , dan is de extern verrichte arbeid  $F = P \cdot \Delta$  en de verandering in elastisch opgeslagen energie  $U_a = \frac{1}{2} P \cdot \Delta$ . Voor G kunnen we met 2.8 schrijven:

$$G = \frac{1}{B} \left( P \frac{dv}{da} - \frac{1}{2} \frac{dPv}{da} \right) \quad (2.13)$$

met de compliantie C:

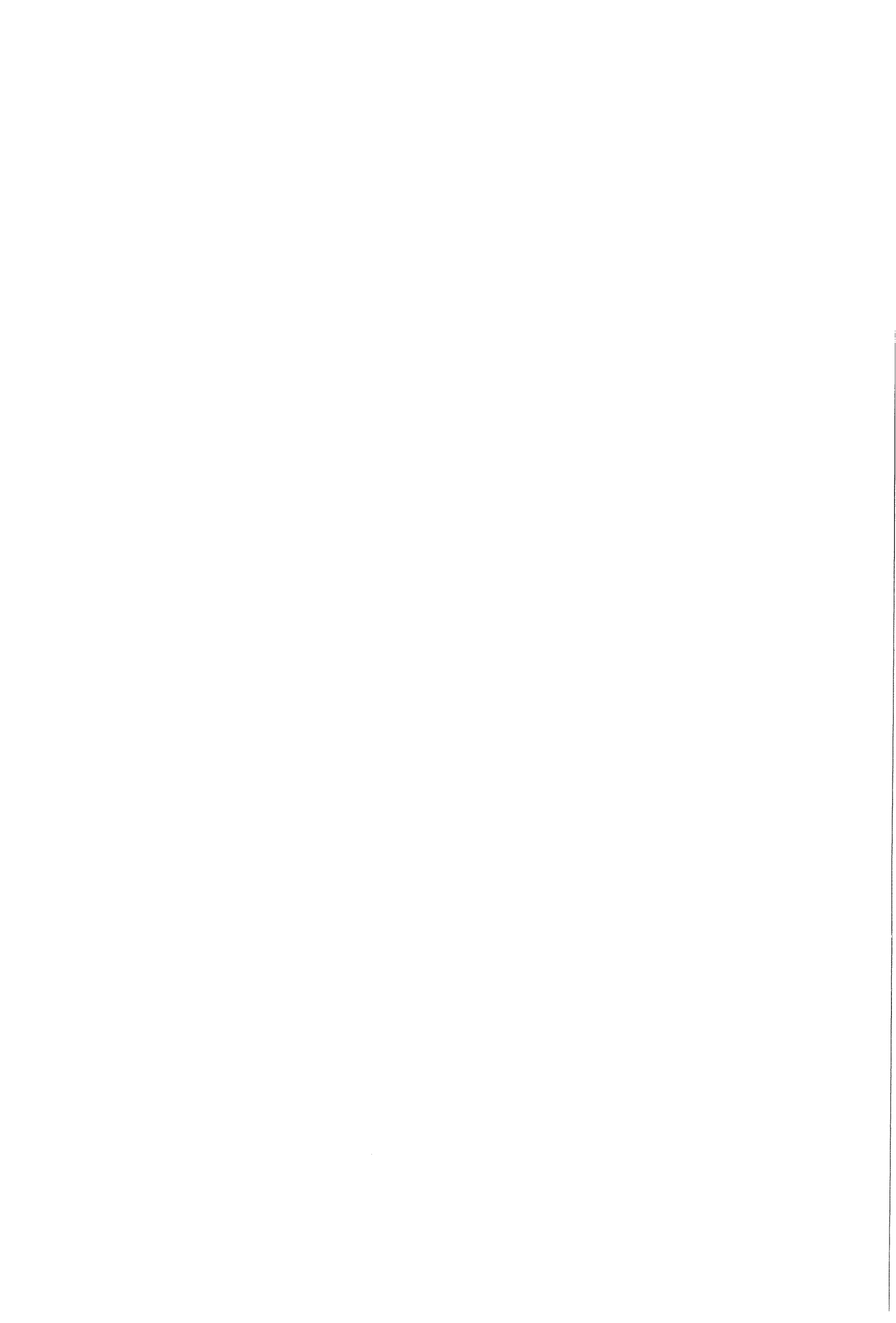
$$C = \Delta/P \quad (2.14)$$

en differentiëren naar a:

$$dC/da = (1/P)d\Delta/da - (\Delta/P^2)dP/da \quad (2.15)$$

vinden we:

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (2.16)$$



met de aanname dat scheuruitbreiding plaats vindt bij  $G=G_C$  en dat het oppervl: k onder de kracht-verplaatsingskromme gelijk is aan U, kunnen we dit ook schrijven als:

$$G_c = \frac{1}{B} U \frac{dC}{Cda} \quad (2.17)$$

of met de calibratiefactor  $\phi$

$$\phi = \frac{C}{dC / d(a / W)} \quad (2.18)$$

$$G_c = \frac{U}{BW\phi} \quad (2.19)$$

De calibratiefactor  $\phi$  wordt voor verschillende proefstukgeometrieën als functie van  $a/W$  in de literatuur gegeven zoals bijvoorbeeld in [4] waaraan tevens de formules 2.17 tot en met 2.19 ontleent zijn.

Formule 2.19 vormt de basis voor dynamische  $G_C$  bepalingen. Bij dynamische proeven is U niet nauwkeurig bekend door een extra bijdrage van de kinetische energie.  $G_C$  kan dan bepaald worden door de breukenergie bij verschillende afmetingen van de kerf te bepalen. Door de breukenergie uit te zetten tegen  $BW\phi$  volgt dan uit de helling  $G_C$ .

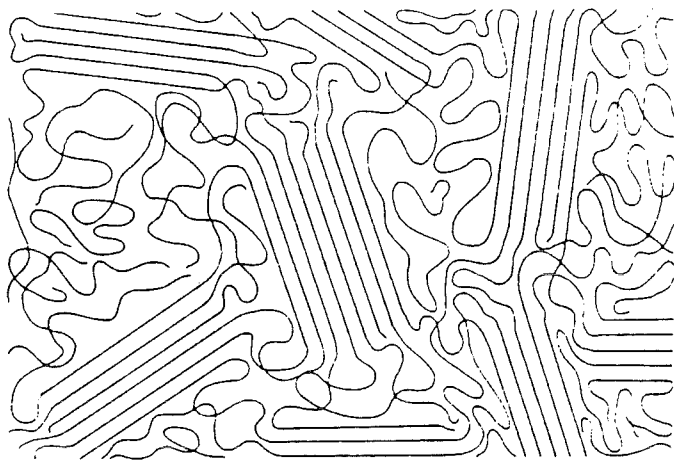
Voor G bepalingen worden geen standaard afmetingseisen gegeven om tot een geldige 'plane strain' waarde te komen. Bij een lineair elastisch materiaal geldt echter dat  $J=G$  zodat de afmetingseisen voor een geldige  $J_{IC}$  waarde gebruikt kunnen worden. We komen dan tot::

$$a, B, (W-a) \geq 25G_C/\sigma_y \quad (2.20)$$

Volgens Irwin geldt het volgende verband tussen G en K:

$$G = \frac{K^2}{E'} \quad (2.21)$$

Waarin  $E' = E$  voor 'plane stress' en  $E' = E/(1-\nu^2)$  voor 'plane strain'.

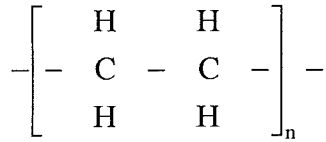


figuur 3.1: Semi-kristallijne structuur



### 3. ONDERZOCHE MATERIAAL

Het in dit onderzoek onderzochte materiaal is een hoge dichtheid polyetheen (HDPE). Polyetheen is opgebouwd uit verzadigde koolstof ketens. De structuur formule is:



De lange ketens in een hoge dichtheid polyetheen zijn weinig vertakt waardoor de ketens een geordende structuur aannemen en een dichtste pakking vertonen, Het materiaal is dan kristallijn. Het materiaal is door de aanwezigheid van onregelmatigheden in de ketens niet volledig kristallijn. Tussen de kristallijne gebieden bevinden zich amorfe gebieden die in de rubbertoestand verkeren. Deze structuur wordt semi-kristallijn genoemd en is schematisch weergegeven in figuur 3.1.

Polyetheen wordt aan de hand van de dichtheid ingedeeld in drie typen:

LDPE: lage dichtheid  $\rho < 0.92 \cdot 10^6 \text{ g/m}^3$ ,

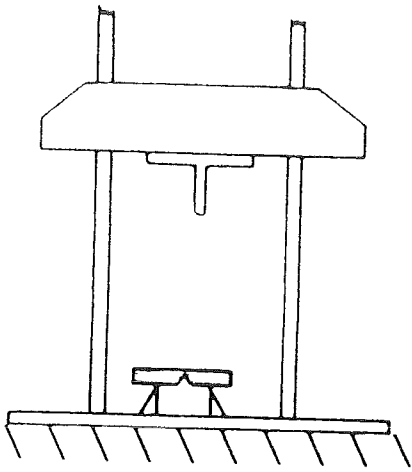
MDPE middel dichtheid  $0.930 < \rho < 0.948 \cdot 10^6 \text{ g/m}^3$ ,

HDPE: hoge dichtheid  $\rho > 0.955 \cdot 10^6 \text{ g/m}^3$ .

In polyetheen zorgt de kristallijne fase voor de stijfheid en sterkte en de amorfe fase voor de taaiheid van het materiaal. HDPE is dan ook aanzienlijk stijver dan LDPE.

Het voor dit onderzoek gebruikte materiaal is een zogenaamde 2<sup>e</sup> generatie polyetheen.

Dit polyetheen wordt gemaakt door etheen te copolymeriseren met buteen. De vertakingsgraad bedraagt 4.5 tot 8 vertakkingen per 1000 C-atomen. Het aantal vertakkingen is hoger dan bij een 1<sup>e</sup> generatie polyetheen waardoor de pakking en dus de dichtheid iets lager is. Het onderzochte materiaal heeft een dichtheid van  $0.943 \cdot 10^6 \text{ g/m}^3$  en zal gezien de gegeven indeling geïnclassificeerd moeten worden als een MDPE. De fabrikant geeft echter op dat het materiaal een HDPE is. Het materiaal is aangeleverd in de vorm van geëxtrudeerde plaat.



figuur 4.1: Schematische weergave van een valgewicht opstelling

## **4. MEETOPSTELLING**

### **4.1 Valgewichtopstelling**

Voor het uitvoeren van de dynamische proeven is gebruik gemaakt van een zogenaamde valgewichtopstelling waarmee driepunts-buigproefstukken met een hoge snelheid belast worden. In figuur 4.1 is schematisch een valgewichtopstelling weergegeven. Bij deze opstelling laat men van een bepaalde hoogte een gewicht op het proefstuk vallen. Op het moment dat het gewicht het proefstuk raakt zal het proefstuk doorbuigen. De spanningen in het proefstuk zullen snel toenemen en tenslotte zal het proefstuk breken.

De gebruikte valgewichtopstelling is een Dynatup 8000A met een valgewicht van 70.3 kg. De snelheid van het gewicht op het moment dat het proefstuk wordt geraakt kan berekend worden uit de omzetting van potentiële energie in kinetische energie met:

$$v_0 = \sqrt{2gh} \quad (4.1)$$

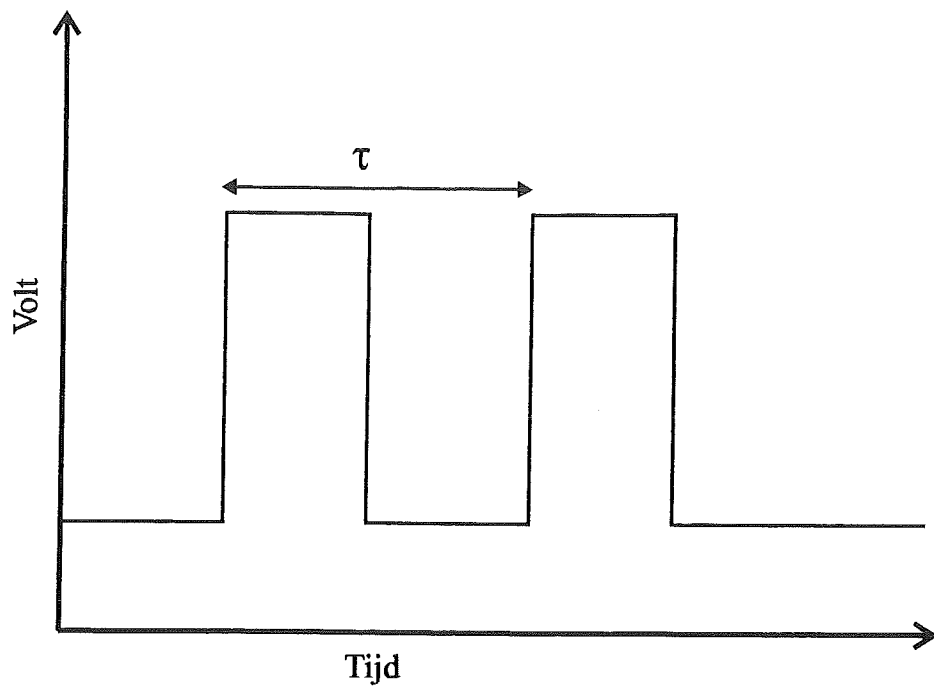
Doordat het gewicht tijdens het vallen wrijvingskrachten ondervindt is deze formule niet zo nauwkeurig. Om de snelheid nauwkeurig te meten zijn aan het valgewicht twee vlaggetjes gemaakt. Deze vlaggetjes onderbreken vlak voordat het proefstuk geraakt wordt een lichtbundel die op een fotoelektrischecel schijnt. Uit de afstand tussen de twee vlaggetjes en de tijd tussen het passeren van het eerste en tweede vlaggetje wordt de snelheid berekend.

De kracht van het gewicht op het proefstuk wordt overgedragen via een geïnstrumenteerde beitel (tup). De neus van de beitel heeft een cilindrisch oppervlak en is uitgevoerd volgens de ASTM D-256 norm. In de beitel is een volledige rekstrookbrug opgenomen waarmee de krachten die door het valgewicht op het proefstuk worden uitgeoefend gemeten worden.

In de gebruikte opstelling worden de uitgangsspanning van de rekstrookbrug en het signaal van de fotocel geregistreerd met behulp van een digitale oscilloscoop. Het signaal van de fotocel wordt tevens gebruikt om de data opname te starten. In bijlage 1 is het elektrische schema van de gebruikte opstelling weergegeven.

### **4.2 Data verwerking en registratie**

Als een proefstuk is gebroken staat op de digitale oscilloscoop de uitgangsspanning van de rekstrookbrug en het signaal van de fotocel als functie van de tijd. Uit deze signalen moet de volgende informatie gehaald worden:



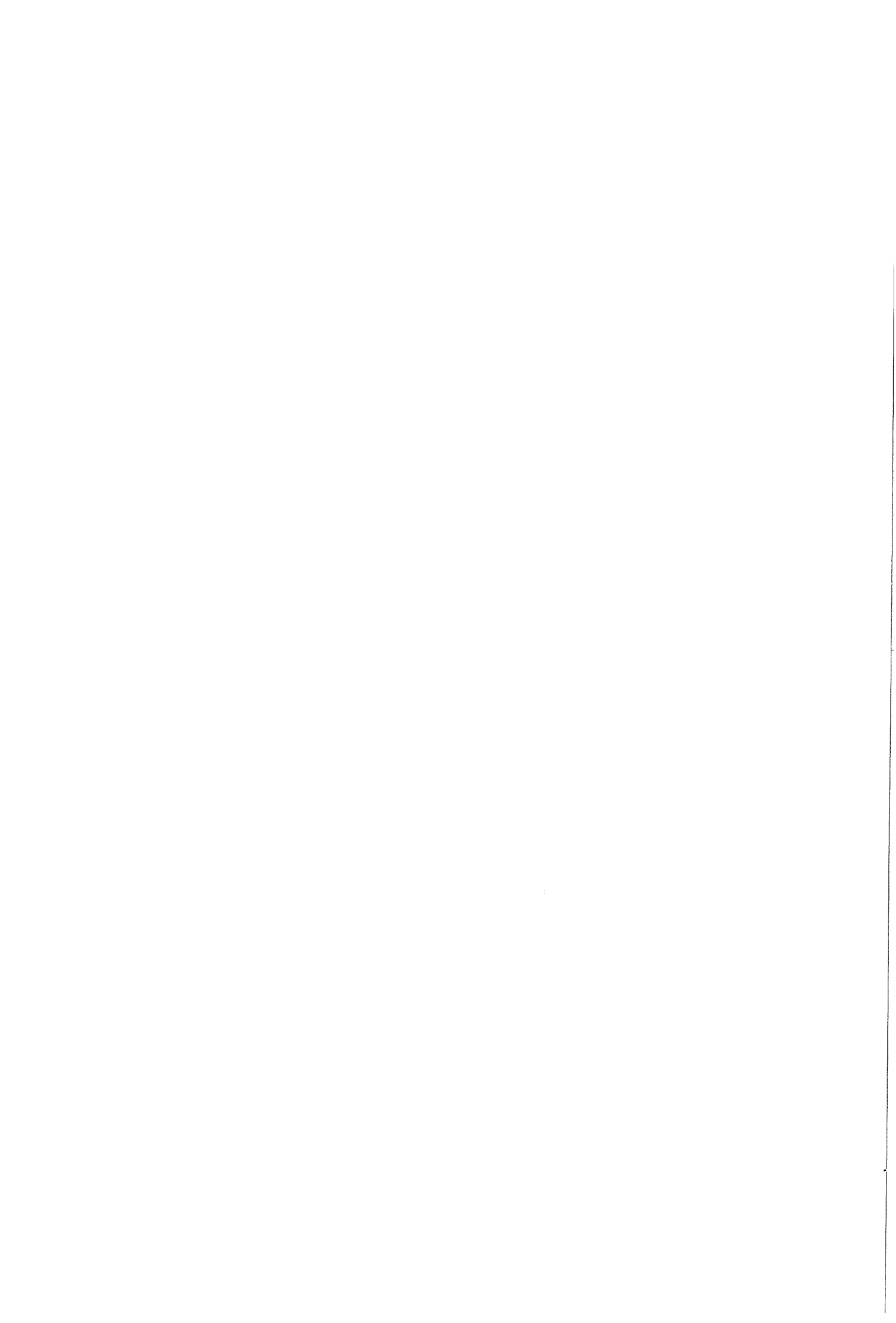
figuur 4.2: Signaal van fotocel na het passeren van de vlaggetjes.

- Snelheid van de hamer op het moment dat het proefstuk geraakt wordt,
- Kracht-verplaatsingsdiagram,
- Maximale kracht,
- Breuktijd,
- Breukenergie tot maximale kracht,
- Totale breukenergie.

Om dit zo snel mogelijk te doen is er via een zogenaamde GPIB-interface een personal computer aan de digitale oscilloscoop gekoppeld. Met behulp van het in QuickBasic geschreven programma 'Valproef' kan bovengenoemde informatie verkregen en opgeslagen worden en kan tevens de digitale oscilloscoop ingesteld worden. In bijlage 2 is het blokdiagram en de listing van het programma Valproef opgenomen. Het programma is zoveel mogelijk menugestuurd gemaakt; na belangrijke stappen kan een keuze gemaakt worden uit: verder gaan, een stap terug of stoppen. Door de menugestuurde opzet is het programma eenvoudig door andere te gebruiken en kan het ook gebruikt worden voor het testen van andere materialen. In hoofdlijnen is de structuur van het programma als volgt:

- Initialiseer de GPIB-interface voor de communicatie met de oscilloscoop,
- Stel de oscilloscoop in,
- Vraag om de verwachte breuktijd en maximale kracht en schaal hiermee de verticale en horizontale assen op de scope,
- Vraag om een proefstukcode,
- Doe de eigenlijke proef,
- Lees de data uit de scope (brugspanning en periodemeting van het lichtcel-sigitaal),
- Schrijf onbewerkte data naar disk,
- Bereken uit de verkregen data de kracht als functie van de verplaatsing, de breukenergie en andere relevante informatie,
- Stuur de verkregen informatie naar het scherm, de printer en een datafile,
- Toon het kracht-verplaatsings diagram.

Op het bepalen van de relevante informatie uit de data zal nu verder worden ingegaan. Voor het berekenen van de snelheid op het moment dat het gewicht het proefstuk raakt is de tijd nodig tussen het passeren van de twee vlaggetjes. Als de twee vlaggetjes de fotocel gepasseerd zijn, zal het signaal van de fotocel er uit zien zoals is weergegeven in figuur 4.2. De digitale oscilloscoop heeft de mogelijkheid om van zo'n signaal de periode tijd te meten. Met het programma wordt aan de scope de opdracht voor deze meting gegeven en met het resultaat en de afstand tussen de vlaggetjes wordt de snelheid berekend.



Het uitgangssignaal van de rekstrookbrug wordt omgezet in een kracht met behulp van de calibratiefactor (Newtons per volt) zoals die is opgegeven door de fabrikant. In onbelaste toestand zal de rekstrookbrug niet in evenwicht zijn zodat hiervoor gecorrigeerd moet worden. Uit de eerste twintig meetpunten wordt de gemiddelde brugspanning in onbelaste toestand berekend. Door deze offset van de gemeten brugspanning af te trekken en vervolgens met de calibratiefactor te vermenigvuldigen wordt de kracht in de beitel verkregen. Het aantal meetpunten dat door de scoop wordt opgenomen is groter dan het aantal punten waarin de breuk van het proefstuk zich afspeelt. Om het programma zo snel mogelijk te houden is het belangrijk de overtollige meetpunten bij verdere berekeningen niet mee te nemen. Alleen de punten vanaf het moment waarop de kracht begint toe te nemen tot het moment waarop de kracht nul blijft zijn van belang. Het moment waarop de kracht begint toe te nemen wordt bepaald door het gemiddelde van tien punten te nemen en vervolgens het gemiddelde een data punt op te schuiven net zo lang tot dat het signaal boven een kritische waarde uitkomt. Door in tegengestelde richting vanaf het laatste data punt te werken wordt het moment gevonden waarop de kracht nul blijft. Indien er rekening mee wordt gehouden dat het gewicht tijdens de proef wordt versneld door de zwaartekracht en afgeremd door het proefstuk, geldt voor de doorbuiging en opgenomen energie [6]:

$$x(t) = x(0) + v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 - \frac{1}{m} \int_0^t \left( \int_0^{t'} P(t') dt' \right) dt' \quad (4.2)$$

$$U(t) = \int_0^t \left( P(t') \left( v_0 + g t - \frac{1}{m} \int_0^t P(t') dt \right) \right) \quad (4.3)$$

Met de oscilloscoop wordt de kracht steeds met een tijdsinterval van  $\Delta t$  (= sample rate) gemeten. Met de trapezium regel kunnen we de formules 4.2 en 4.3 benaderen met:

$$x(k) = \sum_{i=1}^{i=k} \Delta t \left( v_0 + \sum_{n=1}^{n=i} \Delta t \left( g - \frac{P_{n-1} + P_n}{2m} \right) \right) \quad (4.4)$$

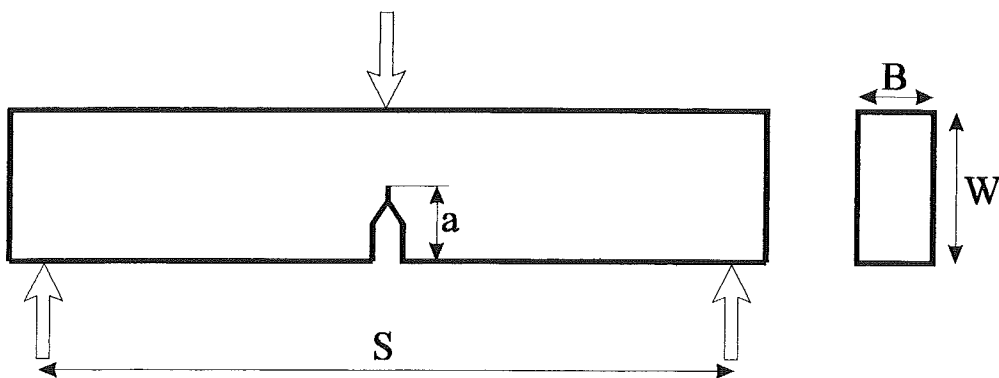
$$U(k) = \sum_{i=1}^{i=k} \Delta t \left( \frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right) \left( v_0 + \sum_{n=1}^{n=i} \Delta t \left( g - \frac{P_{n-1} + P_n}{2m} \right) \right) \quad (4.5)$$

Proefstuk: pe38c2  
3 m/s

Datum: 06-29-1993  
tijd: 11:18:57

Snelheid: [m/s]	3.01
Snelheid bij maximale kracht [m/s]	3.01
Breuktijd: [ms]	0.62
Sample interval [μs]	2
Aantal meetpunten tot maximale kracht	310
Maximale Kracht: [N]	326 ± 11
Energie tot maximale kracht: [J]	.3613726
Totale breukenergie: [J]	.508943

figuur 4.3: Resultaten van een valproef geprint door het programma



figuur 4.4: Driepunts-buigproefstuk met dikte  $B$ , hoogte  $W$ , opspanlengte  $S$  en kerflengte  $a$ .



waarin de indices  $k$ ,  $i$  en  $n$  staan voor het aantal meetpunten nadat de kracht begint toe te nemen. In een datafile wordt de breukenergie tot maximale kracht, de totale breukenergie en de kracht als functie van de verplaatsing weggeschreven.

De resultaten met uitzondering van de meetpunten worden tevens op het beeldscherm getoond en kunnen ook geprint worden. In figuur 4.3 staat een voorbeeld van de resultaten van een valproef zoals die door het programma geprint worden.

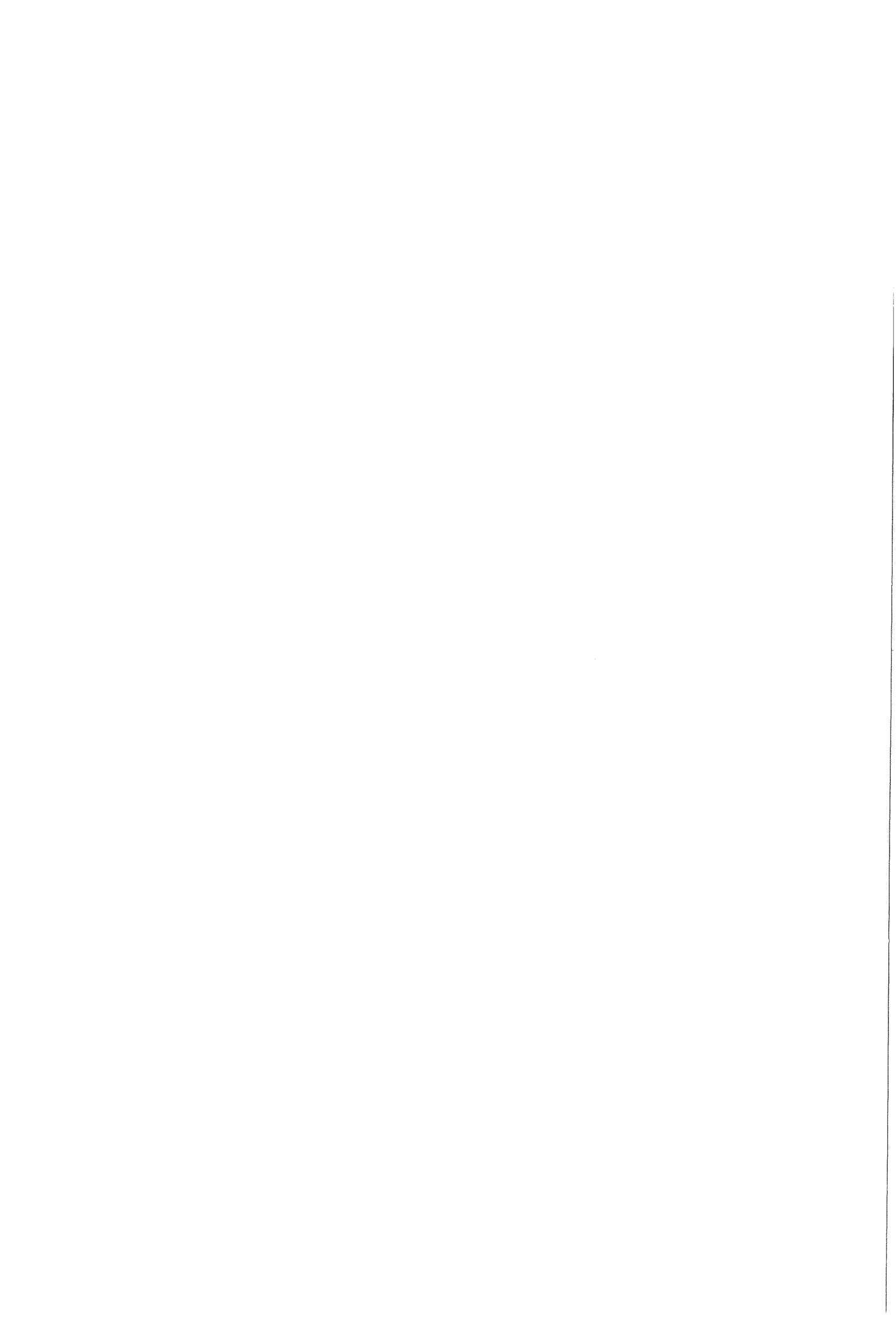
### **4.3 Proefstuk geometrie**

Met de valgewichtopstelling worden gekerfde driepunts-buigproefstukken (engels: single edged notched bend, SENB) beproefd. De gebruikte SENB proefstukken zijn zo uit de geëxtrudeerde platen genomen dat de scheurgroeirichting haaks op de extrusie richting en het scheuroppervlak haaks op het plaat oppervlak staat.

In figuur 4.4 is schematisch een SENB weergegeven. Voor de opspanlengte  $S$  wordt viermaal de hoogte  $W$  genomen. De dikte  $B$  is gelijk aan de helft van de hoogte. De kerflengte  $a$  varieert van 0.2 tot 0.7 maal de hoogte van het proefstuk.

Om een zo'n laag mogelijke breuktaaiheid te meten moet de kerf zeer scherp zijn. Hiertoe wordt steeds een nieuw scheermesje met een afrondingsstraal kleiner dan  $15 \mu\text{m}$  met een snelheid van  $50 \mu\text{m}/\text{min}$ . in de gefreesde kerf gedrukt. Er is voor zo'n lage snelheid gekozen om het materiaal voor de kerftip zo min mogelijk te beschadigen. Om eventuele ontstane spanningen te laten relaxeren worden de proefstukken pas na minimaal 48 uur beproefd. Het met het scheermesje gemaakte deel van de kerf is altijd langer dan 1.5 mm.

Om een overheersende plane strain situatie bij de scheurtip te verkrijgen zijn in de proefstukken zijgroeven aangebracht. De zijgroeven zijn zo gekozen dat de dikte van het proefstuk met 20% wordt gereduceerd. De afrondingsstraal van de groeven is  $0.4 \pm 0.2 \text{ mm}$ . Als de zijgroeven scherper zouden zijn kan een scheur vanuit een zijgroef initiëren wat niet de bedoeling is. Om het effect van de zijgroeven aan te tonen zijn ook een aantal proefstukken zonder zijgroeven getest.



## **5. EXPERIMENTEN**

### **5.1 Overzicht van de experimenten**

1. Uit een aantal inleidende valproeven bleek uit het kracht signaal dat het proefstuk tijdens de proef gaat oscilleren. Er is onderzocht wat de invloed van de belastingssnelheid en proefstuk grootte op deze oscillaties is. Er is ook onderzocht of het mogelijk is om met zachte materialen tussen het proefstuk en de hamer deze oscillaties te doen verdwijnen. Aan de hand van deze resultaten is de uiteindelijke proefstuk geometrie vastgesteld.
2. Bij verschillende snelheden zijn een aantal trekproeven gedaan om de vloeispanning bij hoge snelheid met behulp van extrapolatie te kunnen bepalen.
3. Er zijn een aantal series proefstukken getest, waarbij de invloed van de volgende punten is onderzocht:
  - Het gebruik van een zacht materiaal om de oscillaties uit te dempen,
  - Zijgroeven in het proefstuk,
  - Belastingssnelheid.Uit de verkregen meetgegevens zijn  $K_C$  en  $G_C$  bepaald.  
Met behulp van een meet microscoop zijn de afmetingen van de craze aan het breukoppervlak van de geteste proefstukken gemeten.
4. Een aantal proefstukken zijn bij verschillende hoge snelheden getest waarbij alleen het verband tussen de testsnelheid en de grootte van de craze is onderzocht.

### **5.2 Procedure voor $K_C$ en $G_C$ bepaling**

Bij de  $K_C$  en  $G_C$  bepalingen is zoveel mogelijk het door de ESIS Technical Committee 4 on Polymers and Composites voorgestelde protocol voor dynamisch proeven aan kunststoffen aangehouden.

#### *5.2.1 $K_C$ bepaling*

Voor een driepunts-buigproefstuk kan uit de kracht op het moment van scheurinitiatie direct  $K_C$  berekend worden met [7]:



$$K_c = \frac{P_{\max} S}{BW^{\frac{3}{2}}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (5.1)$$

De functie  $f(a/W)$  staat in bijlage 3. Bij de berekening van  $K_c$  is er vanuit gegaan dat er scheurinitiatie optreedt op het moment dat de kracht maximaal is. De kerflengte  $a$  wordt als het proefstuk is doorgebroken met behulp van een meetmicroscop gemeten.

### 5.2.2 $G_c$ bepaling

De basis formule voor  $G_c$  bij instabiele scheuruitbreiding is:

$$G_c = \frac{U}{BW\phi} \quad (5.2)$$

In bijlage 3 zijn de formules gegeven voor de berekening van  $\phi$  uit de kerflengte  $a$  en de afmetingen van het proefstuk.

De in het proefstuk opgeslagen elastische energie  $U$  is bij dynamische proeven niet gelijk aan de door het valgewicht afgegeven energie. De energie die door het valgewicht wordt afgestaan zoals die wordt bepaald door integratie onder het kracht-verplaatsings diagram is gelijk aan:

$$U_{\text{valgewicht}} = U_{\text{proefstuk}} + U_{\text{kinetisch}} + U_{\text{vervormingen}} + U_{\text{verliezen}}$$

$U_{\text{proefstuk}}$ : De door het proefstuk opgenomen energie

$U_{\text{kinetisch}}$ : Kinetische energie die nodig is om het proefstuk vanuit rust dezelfde snelheid als het valgewicht te geven.

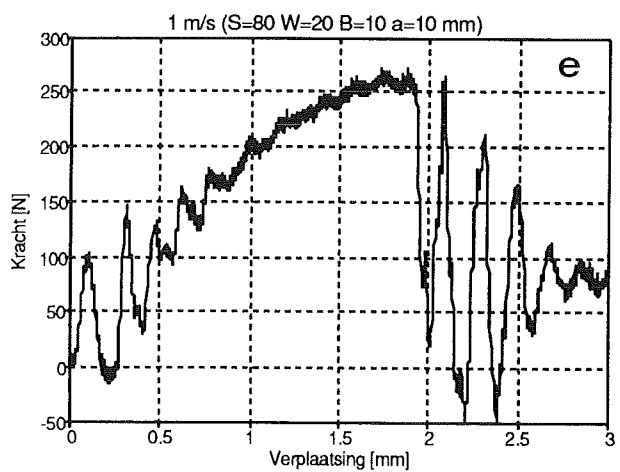
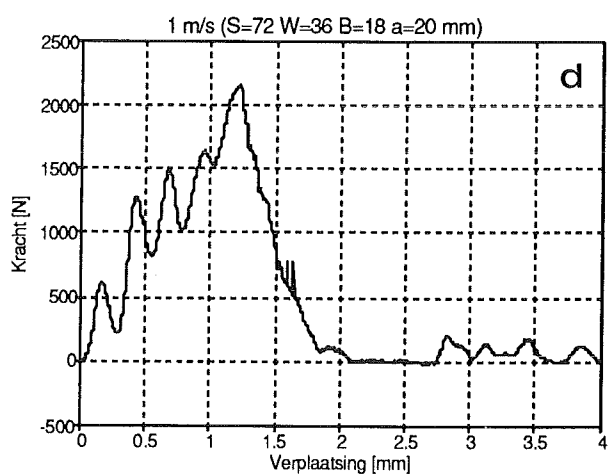
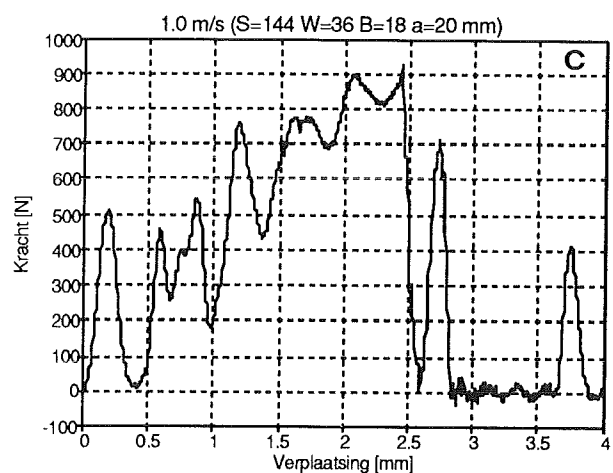
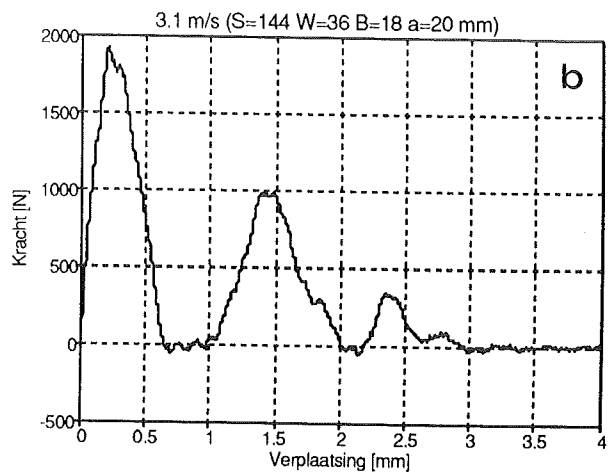
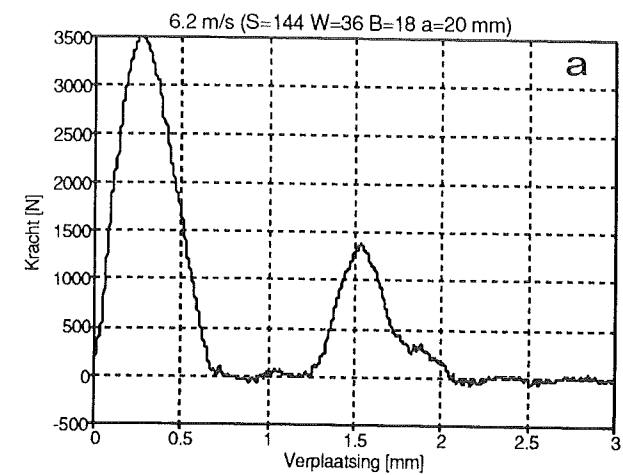
$U_{\text{vervorming}}$ : Energie opgenomen door vervormingen van het proefstuk bij de oplegpunten.

$U_{\text{verliezen}}$ : Energie opgenomen door de test machine in de vorm van wrijving en trillingen

Voor de bepaling van  $G_c$  is alleen de door het proefstuk opgenomen energie van belang, zodat de gemeten energie niet direct gebruikt kan worden voor de berekening van  $G_c$ .

Door nu de breukenergie van een aantal proefstukken met verschillende kerfdiepten (andere  $\phi$ ) te meten en de breukenergie tegen  $BW\phi$  uit te zetten kan door de meetpunten een rechte met helling  $G_c$  getrokken worden. De afsnijding met de energie-as geeft dan de extra energie opname. Voor elke  $G_c$  bepaling worden minimaal 15 proefstukken getest waarbij de verschillende aangebrachte kerven zo worden gekozen dat  $a/W$  varieert van 0.2 tot 0.7.

Indien de breukenergie wordt bepaald door integratie tot aan de maximale kracht, dan is de door het proefstuk opgenomen energie gelijk aan de opgeslagen energie op het moment



figuur 5.1: Kracht-verplaatsings diagrammen, invloed van de snelheid en proefstuk grootte.

van instabiele scheuruitbreiding zoals die nodig is voor een  $G_c$  bepaling. Indien echter de totale breukenergie wordt gebruikt is het mogelijk dat er een fout wordt gemaakt bij de  $G_c$  bepaling als er extra energie wordt opgenomen door scheurpropagatie, scheurstop en opnieuw initiatie, vorming van shearlips en restbreuk. Om te bepalen of bij het onderzochte materiaal deze extra energie opname invloed heeft, is  $G_c$  uit de energie tot maximale kracht ( $G_c^m$ ) en uit de totale breukenergie ( $G_c^t$ ) bepaald.

## 5.3 Resultaten

### 5.3.1 Inleidende proeven

Als eerste zijn een aantal valproeven uitgevoerd aan proefstukken met de volgende geometrie:

$$S = 144 \text{ mm}$$

$$W = 36 \text{ mm}$$

$$B = 18 \text{ mm}$$

$$a = 20 \text{ mm}$$

Zijgroeven: 20% reductie van de dikte

De eerste proef is gedaan met een snelheid van 6.2 m/s. Het opgenomen kracht-verplaatsings diagram staat weergegeven in figuur 5.1a. Het kracht diagram vertoont twee pieken en tussen die pieken is de kracht nul. Dit kan als volgt verklaard worden: Het proefstuk dat eerst in rust is wordt plotseling met een grote snelheid door de hamer geraakt en zal hierdoor doorbuigen. Als we uitgaan van een elastische botsing en wetende dat de massa van het valgewicht vele malen groter is dan die van het proefstuk zal de snelheid van het proefstuk groter worden dan die van het valgewicht. Hierdoor zal er verlies in contact tussen de beitel en het proefstuk ontstaan. De stijfheid van het proefstuk zal de doorbuiging tegen werken en daardoor neemt de snelheid van het proefstuk snel af en zal de beitel het proefstuk opnieuw raken. Aangezien na de tweede piek de kracht nul blijft is kennelijk tijdens de tweede piek het proefstuk doorgebroken. In de literatuur [4] wordt dit oscillerende karakter van het proefstuk met diverse modellen beschreven. Deze modellen geven aan dat door een verlaging van de testsnelheid de amplitude van de oscillaties zal afnemen en dat bij het testen van kleinere proefstukken zowel de amplitude als de periodetijd kleiner zullen zijn. Het voordeel van een kleine periodetijd is dat de oscillaties meer tijd hebben om uit te dempen. Door Böhme [8] is aangetoond dat tijdens de oscillaties de krachten in de hamer niet meer gelijk zijn aan de krachten in het proefstuk. De breukparameter kan dan ook niet bepaald worden indien scheurinitiatie



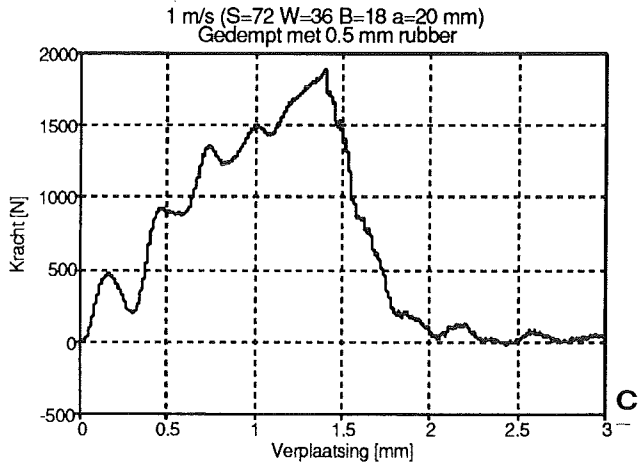
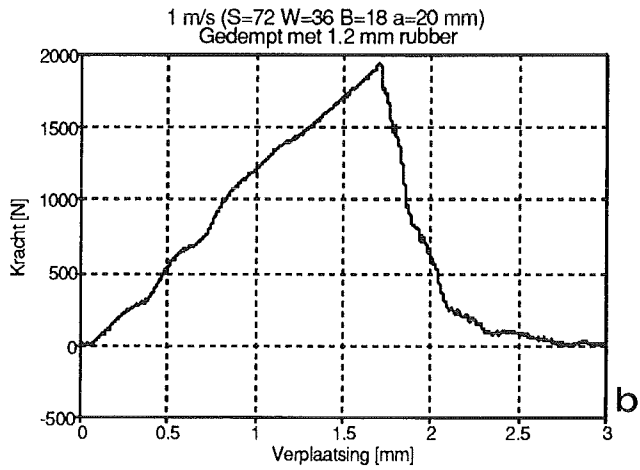
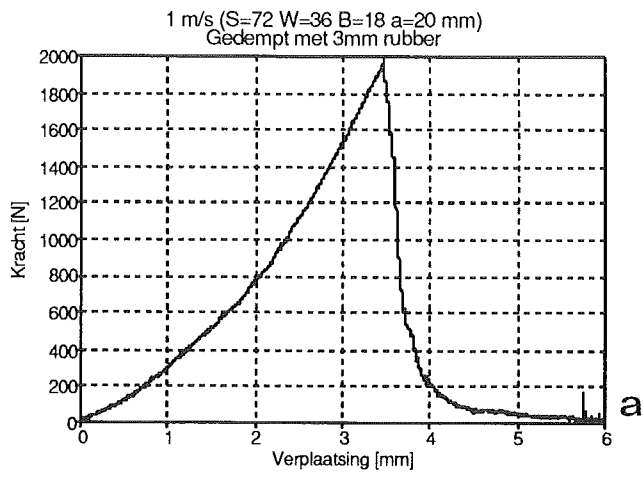


optreedt tijdens de oscillatie. In het voorstel voor dynamische proeven [7] worden ten aanzien van de oscillaties de volgende eisen gesteld:

- De tijd tot breuk moet minimaal drie maal de periodetijd van de oscillatie zijn ( $t_f > 3\tau$ )
- De amplitude van de eerste oscillatiepiek mag niet groter zijn dan 50% van de maximale kracht.
- Nadat de kracht is opgelopen tot 50% van de maximale kracht mag de amplitude van de oscillatie niet meer zijn dan 5% van de maximale kracht.

Om de oscillaties te verminderen is als eerste de testsnelheid verlaagd. Bij een snelheid van 3.1 m/s is er nog steeds verlies van contact tussen hamer en proefstuk maar de amplitude van de oscillaties zijn sterk afgenomen (figuur 5.1b). Bij een snelheid van 1 m/s (figuur 5.1c) is er net geen verlies van contact meer maar de eerste oscillatie is wel groter dan 50% van de maximale kracht. Het moment van instabiele scheuruitbreiding volgt nu duidelijk uit de plotselinge daling van de kracht. Echter op het moment van instabiele scheuruitbreiding zijn de oscillaties nog steeds niet uitgedempt. Bij een testsnelheid van 1 m/s wordt nog steeds niet voldaan aan de gestelde voorwaarden en omdat we de belastingssnelheid niet verder willen verlagen moeten de oscillaties op een andere manier verminderd worden. De oscillaties kunnen ook verminderd worden door kleinere proefstukken te testen. In figuur 5.1d is het resultaat te zien van een test met 1m/s aan een proefstuk met dezelfde hoogte en dikte als bij de vorige proeven maar nu met een gehalveerde opspanlengte. De amplitude van de eerste oscillatie is nu voldoende afgenomen maar nadat de kracht 50% is van de maximale kracht is de amplitude nog steeds groter dan 5% van de maximale kracht. Om de oscillaties verder te verminderen is een proefstuk getest waarvan de dikte en hoogte ten opzichte van de vorige proefstukken verkleint is tot:  $S=80$ ,  $W=20$  en  $B=10$  mm. In figuur 5.1e is het opgenomen kracht-verplaatsings diagram weergegeven. Het aantal oscillaties tot breuk is nu toegenomen en oscillaties blijken nu voor een groot gedeelte uit te dempen. Op het moment dat de kracht is toegenomen tot 50% van de maximale kracht is de amplitude nog  $\pm 10\%$  van de maximale kracht maar daarna wordt hij al snel minder. De gemeten krachten zijn nu een stuk lager dan bij de vorige testen met als gevolg dat de ruis in het signaal een storende factor is geworden. Bij nog kleinere proefstukken zullen de krachten nog lager worden zodat ze niet meer nauwkeurig gemeten kunnen worden. Tevens zal bij de bepaling van de breukparameters aan kleinere proefstukken niet meer aan de plane strain eisen voldaan kunnen worden.

De literatuur geeft voor de dynamische  $G_C$  van HDPE een waarde van  $3.4 \text{ kJ/m}^2$ . De opgegeven vloeispanning van het materiaal is gelijk aan  $25 \text{ N/mm}^2$ . Met behulp van de afmetingseisen voor een geldige  $G_{IC}$  zoals gegeven door (2.20) vinden we:



figuur 5.2: Kracht-verplaatsings diagrammen, invloed van dempingsmateriaal

a, B, W-a > 3.4 mm

Voor  $K_C$  van HDPE geeft de literatuur een waarde van  $1.6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Met behulp van (2.6) vinden we voor de minimale afmetingen om tot een geldige  $K_{IC}$  te komen:

a, B, W-a > 10.2 mm

Bij de bepaling van de minimale afmetingen is gebruik gemaakt van de vloeispanning bij een statische belasting, bij een dynamische belasting zal deze hoger zijn waardoor de bepaalde afmetingseisen conservatief zijn.

Aan de hand van deze resultaten is beslist om de uiteindelijke proeven te doen met een testsnelheid van 1 m/s aan proefstukken met de volgende afmetingen:

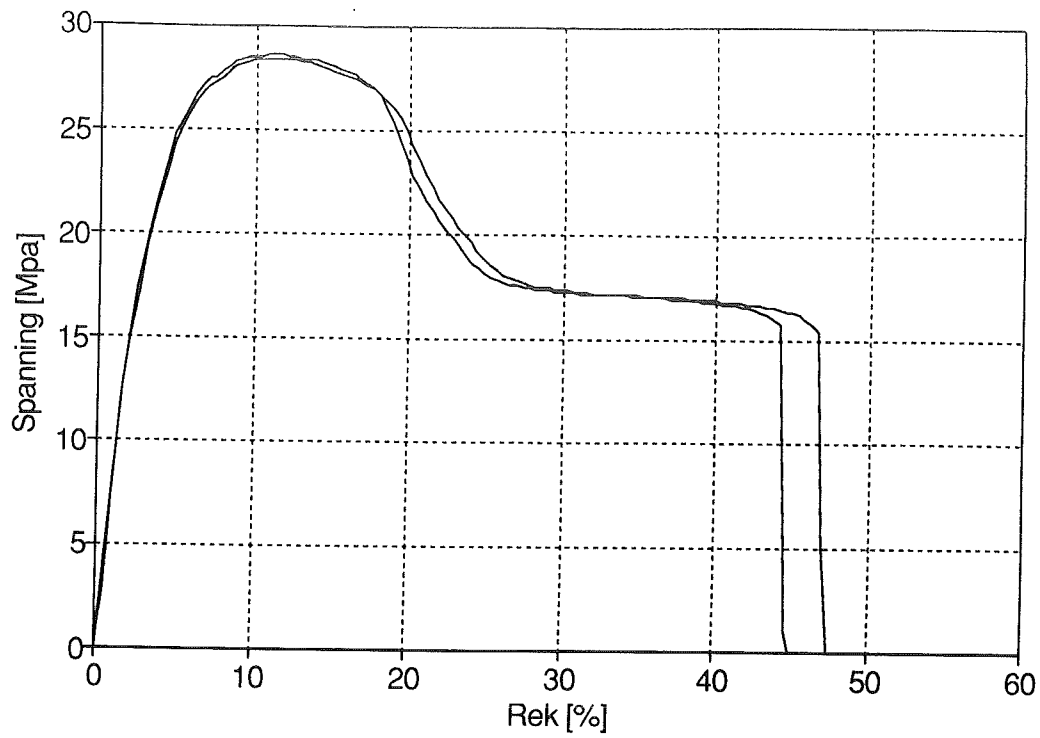
S = 80 mm, W = 20 mm en B = 10 mm.

Tevens is een gevoeligere krachtopnemer met een maximale belasting van 15 kN in plaats van 45 kN aan het valgewicht gemonteerd om de ruis te verminderen. Bij de 45 kN krachtopnemer is het ruisniveau 18 N en bij de 15 kN krachtopnemer 6 N. Indien een ruisniveau van 5% van de gemeten maximale kracht nog acceptabel wordt geacht zijn de laagste maximale krachten die gemeten kunnen worden respectievelijk 360 en 120 N.

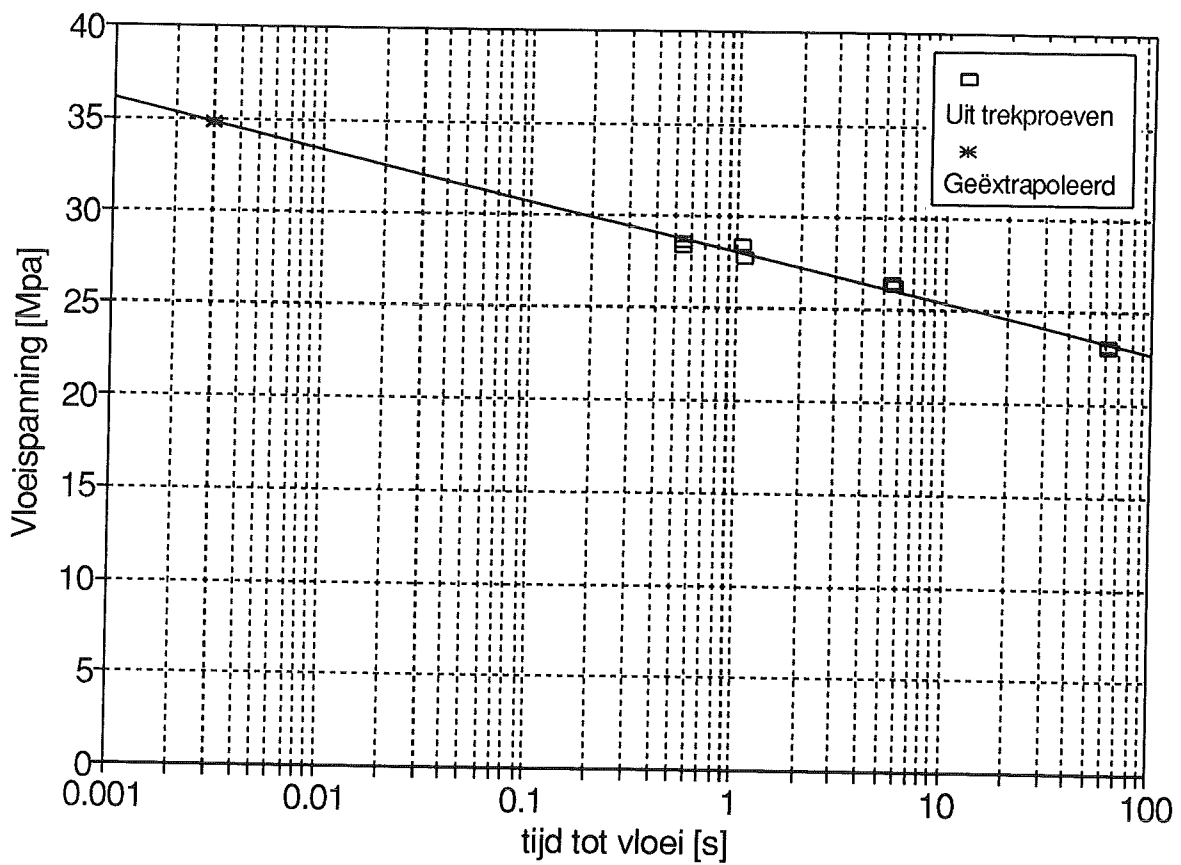
De door Williams [3] gegeven modellen die de oscillaties beschrijven geven aan dat de oscillaties ook verminderd kunnen worden door het verlagen van de contactstijfheid tussen de hamer en het proefstuk. Dit kan gerealiseerd worden door het plaatsen van een zacht materiaal op het proefstuk op de plaats waar het door de beitel wordt geraakt. Er zijn proeven gedaan met als dempingsmateriaal stukjes rubber van 3, 1.2 en 0.5 mm dik aan proefstukken met de afmetingen: S=72, W=36 en B=18 mm en met een snelheid van 1m/s. In figuur 5.2 zijn de kracht-verplaatsings diagrammen weergegeven bij het gebruik van verschillende diktes rubber. Bij het gebruik van 3 mm rubber (figuur 5.2a) zijn de oscillaties geheel verdwenen. Na vergelijking met het resultaat van een identiek proefstuk getest zonder gebruik van een dempend materiaal vallen de volgende punten op:

- De verplaatsing op het moment dat de kracht maximaal is, is veel groter dan wanneer er geen dempingsmateriaal wordt gebruikt. Dat komt door de indrukking van het rubber.
- De helling is in het begin laag en wordt geleidelijk hoger en blijft daarna constant. Dit komt doordat eerst het rubber, met een lagere stijfheid dan het proefstuk, wordt ingedrukt. Pas als het rubber is samengeperst buigt het proefstuk door.
- De maximale kracht is ongeveer gelijk.

Bij het gebruik van 1.2 mm rubber (zie figuur 5.2b) zijn de oscillaties niet meer volledig uitgedempt maar de amplitude is minimaal. De verplaatsing op het moment van breuk is nog steeds groter dan bij het ongedempte proefstuk. Het verschil is echter niet zo groot als bij het gebruik van 3 mm rubber. De helling is nu, afgezien van de oscillaties, constant.



figuur 5.3: Trek-rek kromme van HDPE bij een snelheid van 1 m/min



figuur 5.4: Vloeispanning als functie van de tijd tot vloeï

Rubber van 0.5 mm (figuur 5.3c) heeft nauwelijks invloed op de eerste oscillatie piek maar zorgt er wel voor dat de amplitude daarna ongeveer gehalveerd wordt. De verplaatsing op het moment van breuk is iets groter als bij de test zonder demping.

Concluderend moet met de volgende punten rekening gehouden worden:

- Rubber van 3mm dik is niet geschikt als dempingsmateriaal doordat het kracht-verplaatsings diagram hierdoor te veel verandert.
- Indien de oscillaties groot zijn, dan is rubber van 1.2 mm dik geschikt als dempingsmateriaal.
- Indien een geringe mate van demping nodig is kan 0.5 mm rubber als dempingsmateriaal gebruikt worden.
- Bij het gebruik van een dempingsmateriaal wordt de gemeten verplaatsing op het moment van breuk groter waardoor de gemeten breukenergie ook groter zal zijn.
- De kracht op het moment van instabiele scheuruitbreiding wordt nauwelijks beïnvloed door het gebruik van een dempingsmateriaal.

### 5.3.2 $\sigma_y$ bepaling

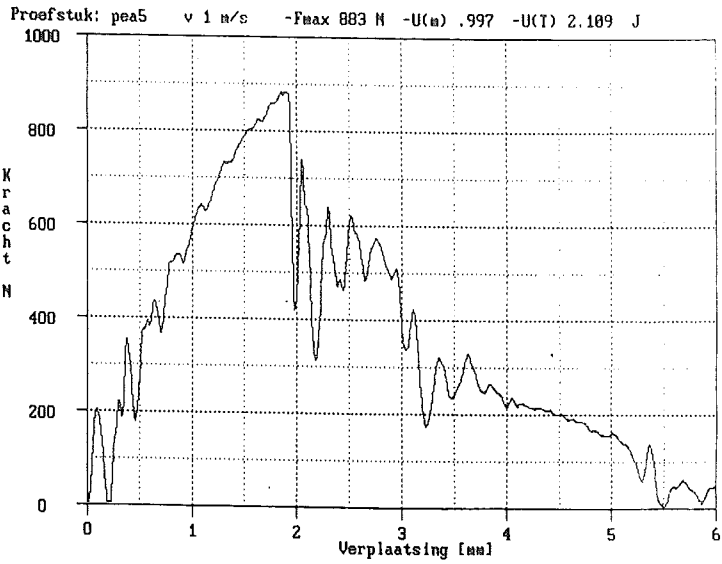
Voor de bepaling van de afmetingseisen voor plane strain moet de vloeispanning bepaald worden. Bij kunststoffen is deze sterk afhankelijk van de reksnelheid. Het is niet mogelijk om de vloeispanning met trekproeven te bepalen waarbij de reksnelheid even groot is als bij de valgewicht proeven. Om de afhankelijkheid van de vloeispanning met de reksnelheid van HDPE aan te tonen zijn bij verschillende snelheden trekproeven uitgevoerd.

De gebruikte snelheden zijn: 10, 100, 500 en 1000 mm/min. Per snelheid zijn twee proefstukken getest. De resultaten en verdere gegevens van de trekproeven staan in bijlage 4. In figuur 5.3 zijn de opgenomen trek-tek-krommen bij een snelheid van 1000 mm/min weergegeven. In figuur 5.4 zijn de gemeten vloeispanningen uitgezet tegen de logaritme van de tijd tot vloeï. Door de meetpunten kan een rechte worden getrokken, met een 95% betrouwbaarheidsinterval komen we dan tot:

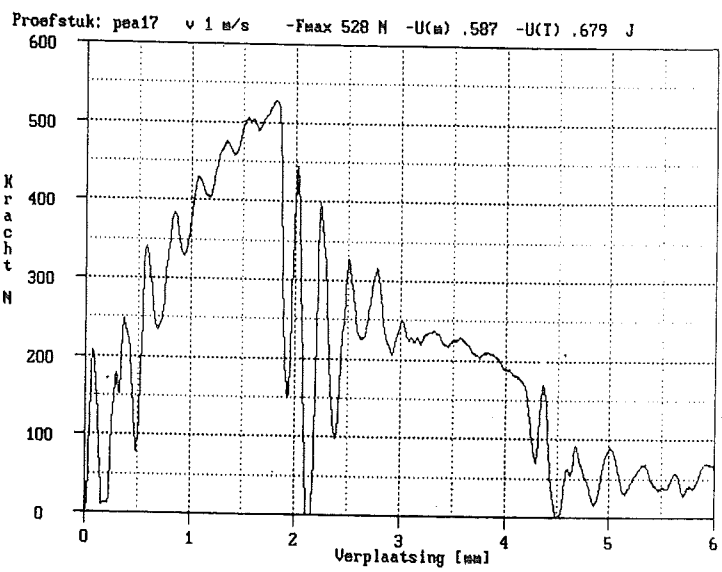
$$\sigma_y(t) = (28.0 \pm 0.4) - (2.7 \pm 0.4) \cdot \log(t) \text{ [MPa]}$$

Het proefstuk met dezelfde afmetingen als gebruikt bij de uiteindelijke testen heeft een breuktijd van ongeveer 2 ms. Indien we er van uitgaan dat de breuktijd vergeleken kan worden met de tijd tot vloeï vinden we voor de vloeispanning:

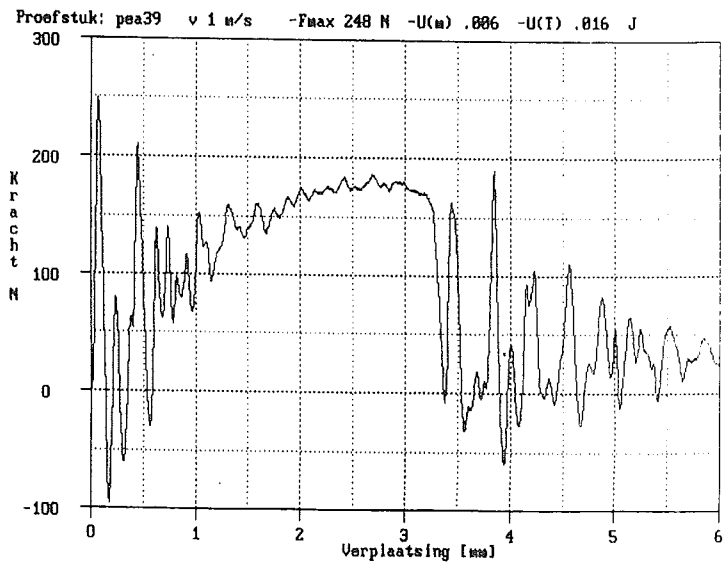
$$\sigma_y(2 \cdot 10^{-3}) = 35.2 \pm 1.4 \text{ MPa.}$$



a:  $a/W=0.2$



b:  $a/W=0.4$



c:  $a/W=0.7$

figuur 5.5: Kracht-verplaatsings diagrammen van serie A1:

### 5.3.2 Resultaten van de proefseries

In totaal zijn er 6 series van 16 proefstukken met a/w variërend van 0.2 tot en met 0.7 getest. In onderstaande tabel staan per proefserie de test condities weergegeven.

Tabel 5.1: Aanwezigheid van zijgroeven, belastingssnelheid en gebruikte dempingsmateriaal per proefserie.

Serie	Zijgroeven	Snelheid [m/s]	Demping
A1	-	1	-
A2	-	1	0.5 mm rubber
B1	+	1	0.5 mm rubber
B2	+	2	1.2 mm rubber
C1	+	1.5	1,2 mm rubber
C2	+	3	1.2 mm rubber

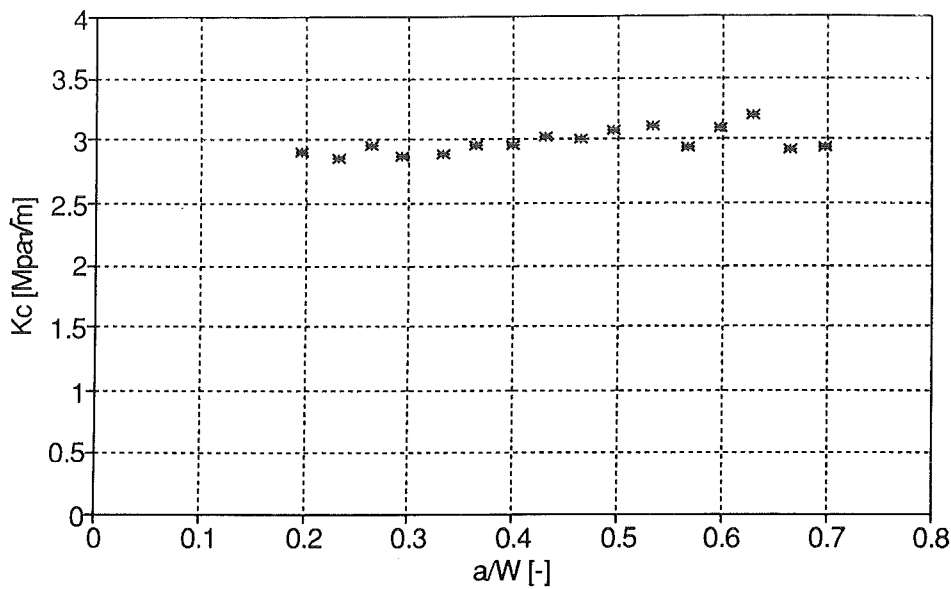
Alle proeven zijn uitgevoerd bij een temperatuur van  $21 \pm 2$  °C.

#### Serie A1

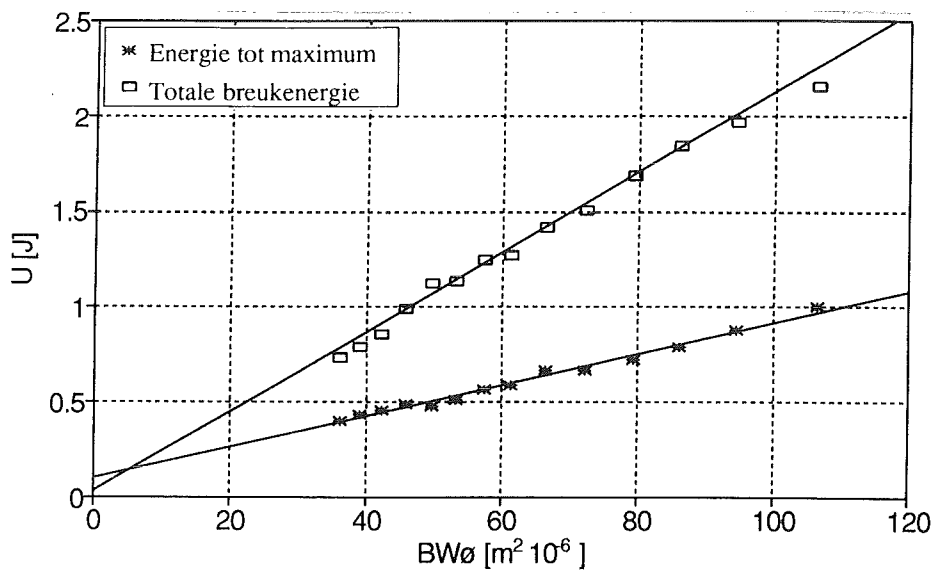
In figuur 5.5 zijn de opgenomen kracht-verplaatsings diagrammen weergegeven van de proefstukken met a/W van 0.2, 0.4 en 0.7.

De oscillaties bij het proefstuk met de ondiepste kerf (a/W=0.2) voldoen nog net aan de in paragraaf 5.3.1 gestelde eisen. Bij de proefstukken met de diepere kerven wordt niet meer voldaan aan de eis dat de amplitude van de oscillaties niet meer dan 5% van de maximale kracht mag zijn als de kracht is opgelopen tot de helft van de maximale kracht. Als a/W groter wordt dan 0.5 wordt niet meer voldaan aan de eis dat de eerste piek kleiner moet zijn aan 50% van de maximale kracht. Bij de diep gekerfde proefstukken is de eerste piek zelfs groter dan de maximale kracht.

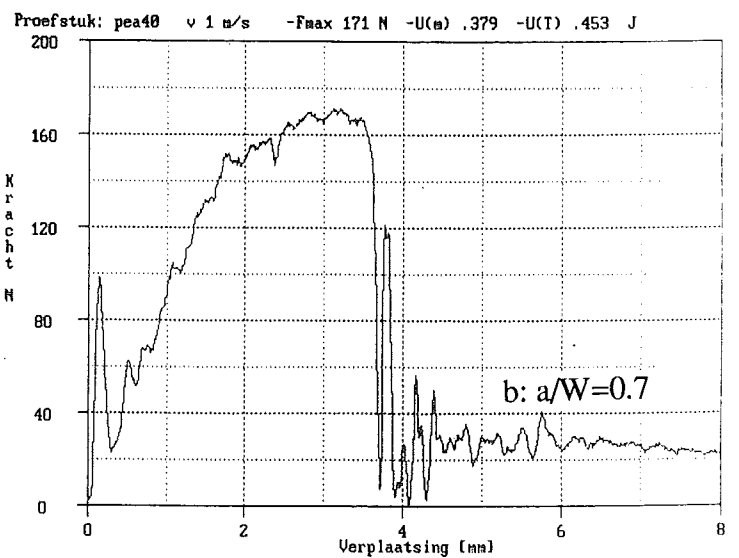
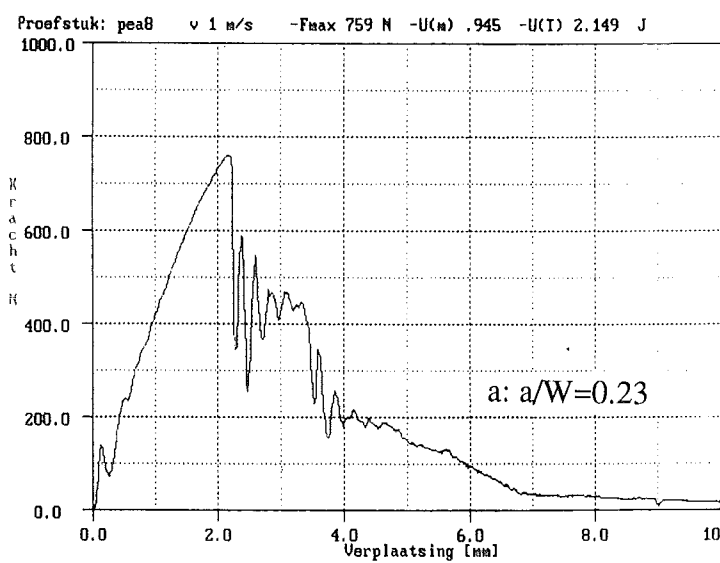
Aan de opgenomen diagrammen valt tevens op dat na het bereiken van het maximum de kracht niet daalt tot nul maar dat het signaal opnieuw begint te oscilleren en vervolgens geleidelijk daalt tot nul. Het moment waarop de kracht plotseling daalt komt overeen met de initiatie van een scheur. Daar de kracht niet daalt tot nul is er kennelijk voor de propagatie van de scheur nog extra energie nodig. Aan het breukoppervlak (zie foto 1 bijlage 5) is te zien dat deze extra energieopname onder andere wordt veroorzaakt door de vorming van shearlips. Bij dit proefstuk wordt door de shearlips zoveel energie opgenomen dat de instabiele scheur wordt gestopt en er opnieuw een scheur moet worden geïnitieerd. Dat kost ook weer extra energie. De nieuwe scheur wordt ook weer gestopt



figuur 5.6:  $K_C$  als functie van  $a/W$  voor serie A1



figuur 5.7: Breukenergie als functie van  $BW\phi$  voor serie A1



figuur 5.8: Kracht-verplaatsings diagrammen van serie A2:



waarna het proefstuk taai breekt. Dit komt waarschijnlijk doordat er door de beitel een drukzone in het materiaal wordt gecreëerd die de scheurgroei tegenwerkt.

Op de foto zien we na de kerf een zone met schollen die we de craze noemen. Het front van de craze loopt gebogen, in het midden van het proefstuk is de lengte van de craze maximaal. Van alle proefstukken is met behulp van een meetmicroscop de lengte van de craze in het midden van het proefstuk gemeten. De lengte van de craze varieerde van 2.2 mm bij de proefstukken met de ondiepste kerf tot 2.6 mm bij de diepst gekerfde proefstukken. De gemiddelde craze lengte was 2.4 mm.

In figuur 5.6 is de uit de maximale kracht en de opgemeten kerflengte berekende  $K_C$  uitgezet als functie van  $a/W$ . Voor de gemiddelde waarde vinden we:

$$K_C = 3.0 \pm 0.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

Bij  $a/W < 0.4$  is  $K_C$  iets lager dan de gemiddelde waarde en is de variatie zeer klein. Als  $a/W > 0.5$  neemt de variatie toe. De oscillaties in het kracht signaal zijn dan ook groot.

In figuur 5.7 zijn zowel de totale breukenergie als de energie tot maximale kracht uitgezet als functie van  $BW\phi$ . (lage waarden van  $BW\phi$  komen overeen met hoge  $a$ ). Ondanks de grote oscillaties is de spreiding van de punten ten opzichte van de getrokken rechten klein. Deze spreiding wordt in de statistiek aangeduid met  $R^2$ . Des te dichter  $R$  bij nul ligt des te kleiner is de spreiding. Met een 95% betrouwbaarheidsinterval vinden we uit de hellingen van de rechten:

$$G_C^t = 20.5 \pm 1.1 \text{ kJ/m}^2 \text{ (} R^2 = 0.9931 \text{)}$$

$$G_C^m = 8.8 \pm 0.8 \text{ kJ/m}^2 \text{ (} R^2 = 0.9897 \text{)}$$

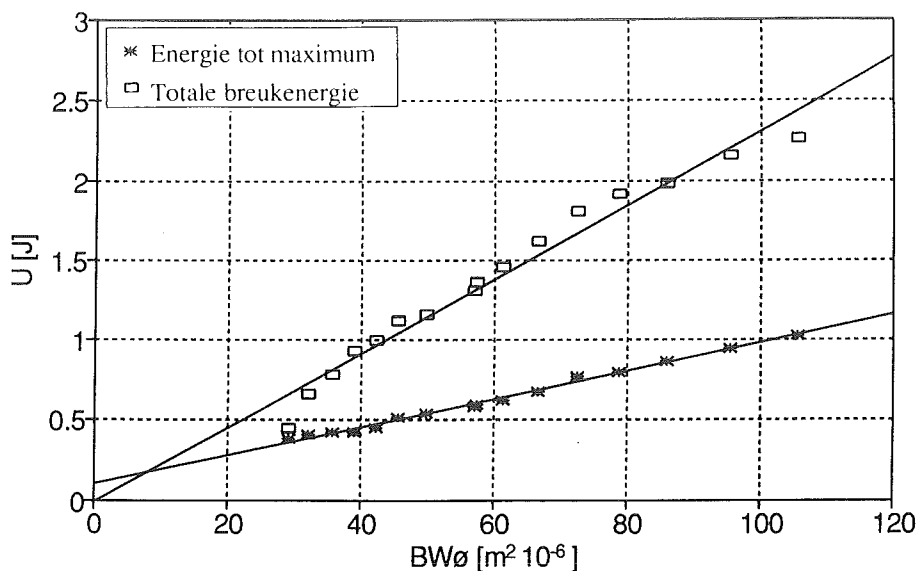
### Serie A2

Bij deze serie is steeds een stukje rubber van 0.5 mm dik op het proefstuk geplaatst om de oscillaties te dempen. De testcondities zijn gelijk aan die bij de vorige serie. In figuur 5.8 zijn de opgenomen kracht-verplaatsings diagrammen weergegeven van de proefstukken met  $a/W$  van 0.23 en 0.7. De oscillaties dempen na de eerste piek snel uit. Bij de diep gekerfde proefstukken, vanaf  $a/W > 0.63$ , is de eerste piek groter dan 50% van de maximale kracht maar niet meer groter dan de maximale kracht zoals bij serie A1.

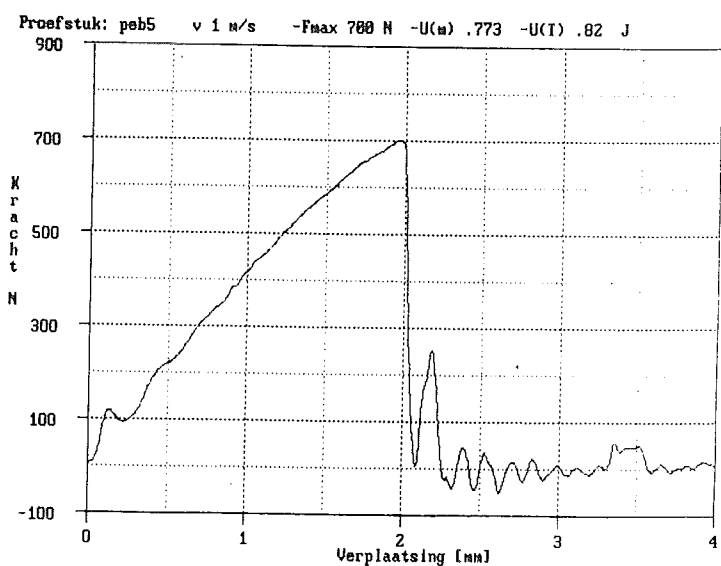
Uit de maximale krachten zijn de kritische spanningsintensiteiten berekend. De spreiding hierin is nu klein. Het gemiddelde is:

$$K_C = 2.8 \pm 0.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

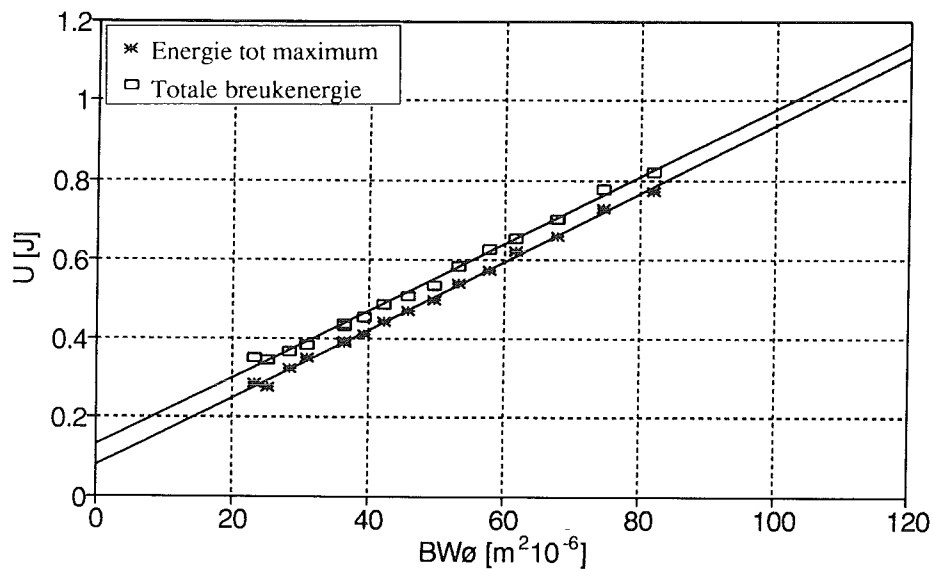
De gemiddelde craze lengte is 2.5 mm.



figuur 5.9: Breukenergie als functie van  $BW\phi$  voor serie A2



figuur 5.10: Kracht-verplaatsings diagram van serie B1,  $a/W=0.2$



figuur 5.11: Breukenergie als functie van  $BW\phi$  voor serie B1

In figuur 5.9 zijn de totale breukenergie en de energie tot maximale kracht uitgezet als functie van  $BW\phi$ , uit de hellingen volgt:

$$G_c^t = 23.2 \pm 2.4 \text{ kJ/m}^2 \text{ (} R^2 = 0.9685 \text{)}$$

$$G_c^m = 8.8 \pm 0.4 \text{ kJ/m}^2 \text{ (} R^2 = 0.9935 \text{)}$$

De spreiding in de totale energie is vrij groot terwijl de punten van de energie tot maximale kracht nauwelijks van de rechte afwijken.

### Serie B1

Bij deze serie zijn proefstukken met zijgroeven getest. De overige testcondities zijn gelijk aan die bij serie A2.

In figuur 5.10 is een kracht-verplaatsingsdiagram weergegeven van een proefstuk met  $a/W=0.2$ . Bij vergelijking met het resultaat van een proefstuk zonder zijgroeven (figuur 5.8a) valt op dat de kracht na het bereiken van het maximum nu wel daalt tot nul. Daarna volgt nog een piek waarna de kracht rond de nul blijft oscilleren. Na de scheurinitiatie wordt nu nauwelijks nog extra energie opgenomen. Aan het breukoppervlak (foto 2 bijlage 5) is te zien dat er in vergelijking met een proefstuk zonder zijgroeven, nauwelijks shearlips worden gevormd. De scheur propageert nu ook zonder opnieuw geïnitieerd te worden. Tevens is te zien dat het front van de craze recht is. De gemiddelde lengte van de craze is 2.3 mm.

Voor de gemiddelde kritische spanningsintensiteit is gevonden:

$$K_c = 3.1 \pm 0.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

In figuur 5.11 zijn de totale breukenergie en de energie tot maximale kracht uitgezet tegen  $BW\phi$ . Uit de hellingen volgt:

$$G_c^t = 8.5 \pm 0.3 \text{ kJ/m}^2 \text{ (} R^2 = 0.9959 \text{)}$$

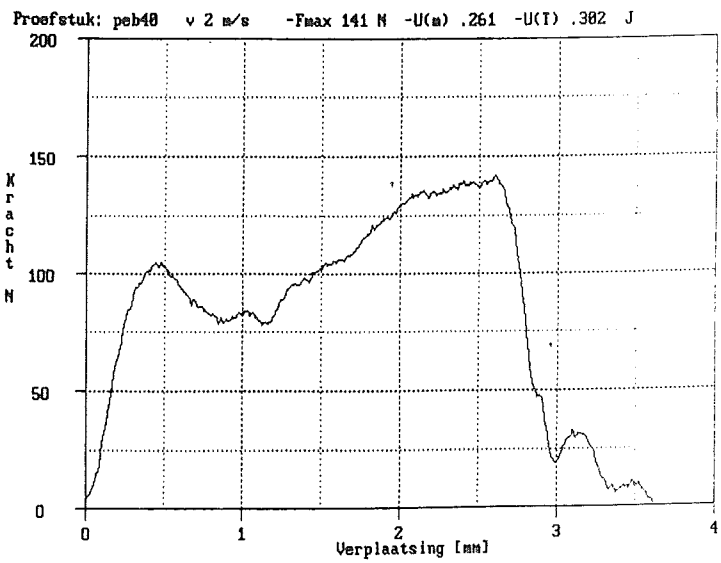
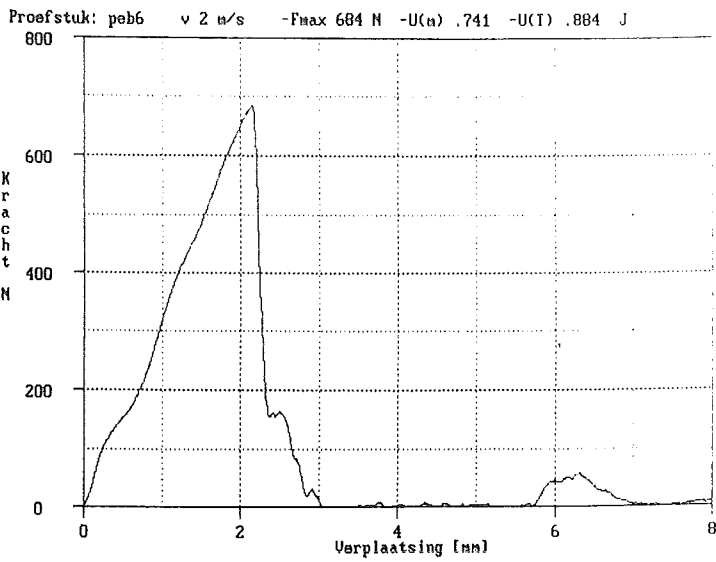
$$G_c^m = 8.6 \pm 0.3 \text{ kJ/m}^2 \text{ (} R^2 = 0.9973 \text{)}$$

Het maakt nu geen verschil meer of  $G_c$  bepaald wordt uit de totale energie of uit de energie tot maximale kracht.

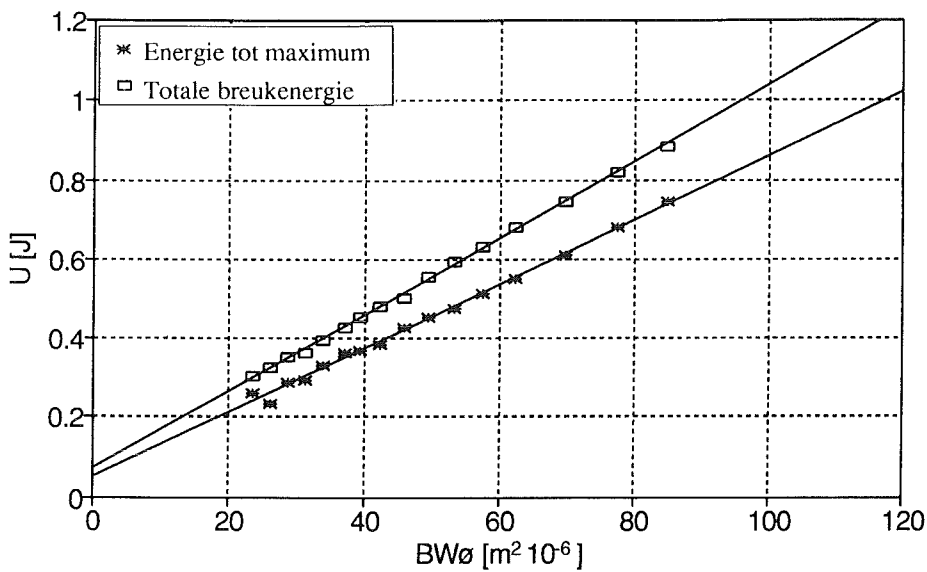
### Serie B2

Deze serie is getest met een snelheid van 2 m/s. Omdat de oscillaties toenemen met de snelheid is nu 1.2 mm dik rubber gebruikt als dempingsmateriaal.

In figuur 5.12 zijn de kracht-verplaatsingsdiagrammen voor  $a/w$  van 0.2 en 0.7 weergegeven. Bij deze snelheid wordt niet meer voldaan aan de eis dat de breuktijd minimaal drie keer de periodetijd van de oscillatie moet zijn. De periodetijd van de oscillatie is ongeveer 0.35 ms terwijl de breuktijd ongeveer 1 ms is. Vanaf  $a/W>0.6$  wordt



figuur 5.12: Kracht-verplaatsings diagrammen van serie B2:



figuur 5.13: Breukenergie als functie van  $BW\phi$  voor serie B2

niet meer voldaan aan de eis dat de eerste piek niet groter dan 50% van de maximale kracht mag zijn.

De gemiddelde lengte van de craze zone is gelijk aan 1.6 mm.

De gemiddelde  $K_C$  is gelijk aan  $2.9 \pm 0.1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .

In figuur 5.13 zijn de totale breukenergie en de energie tot maximale kracht uitgezet als functie van  $BW\phi$ . Vanwege de grote oscillaties in het kracht signaal zijn de eerste twee punten niet meegenomen voor de bepaling van  $G_C$ . Uit de hellingen volgt:

$$G_C^t = 9.7 \pm 0.3 \text{ kJ/m}^2 \quad (R^2 = 0.9985)$$

$$G_C^m = 8.1 \pm 0.2 \text{ kJ/m}^2 \quad (R^2 = 0.9981)$$

### Serie C1

Deze serie is getest met een snelheid van 1.5 m/s. De overige condities zijn gelijk aan die bij serie B2. Een verschil met de proefstukken van de series A en B is dat deze proefstukken in een andere werkplaats zijn vervaardigd.

De opgenomen kracht-verplaatsingsdiagrammen vertonen hetzelfde verloop als bij serie B2. Nu wordt echter wel voldaan aan de eis dat de breuktijd langer moet zijn dan drie maal de periode tijd van de oscillaties.

Gemiddelde craze lengte is 1.9 mm

$$K_C = 2.9 \pm 0.1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

In figuur 5.14 is de totale breukenergie en energie tot maximale kracht uitgezet als functie van  $BW\phi$ . Hieruit volgt:

$$G_C^t = 9.8 \pm 0.3 \text{ kJ/m}^2 \quad (R^2 = 0.9988)$$

$$G_C^m = 8.9 \pm 0.3 \text{ kJ/m}^2 \quad (R^2 = 0.9963)$$

### Serie C2

Deze serie is getest met een snelheid van 3 m/s. De kracht-verplaatsingsdiagrammen vertonen hetzelfde verloop als bij serie B2. Ook nu wordt niet voldaan aan de eis ten aanzien van de breuktijd; periodetijd van 0.27 ms bij een breuktijd van 0.6 ms. Bij de proefstukken met  $a/W > 0.4$  is de eerste piek hoger dan 50% van de maximale kracht. Bij het proefstuk met  $a/W = 0.48$  waren de oscillaties al zo groot dat de proefstukken met grotere  $a/W$  niet getest zijn.

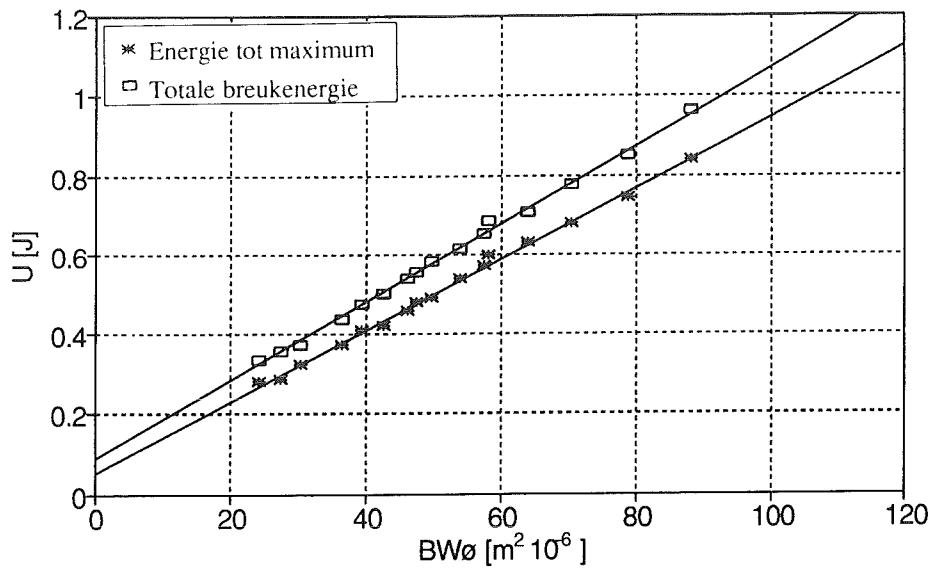
De gemiddelde craze lengte is gelijk aan 1.2 mm.

De variatie in  $K_C$  is vrij groot, 2.5-3.0  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , gemiddeld 2.8  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ .

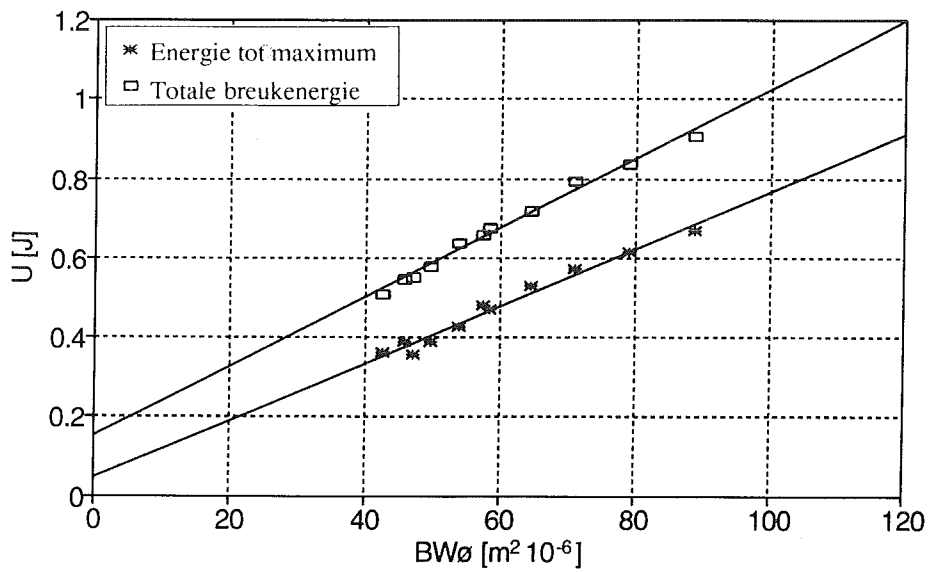
In figuur 5.15 zijn de breukenergieën uitgezet als functie van  $BW\phi$ . Hieruit volgt:

$$G_C^t = 8.7 \pm 0.6 \text{ kJ/m}^2 \quad (R^2 = 0.9905)$$

$$G_C^m = 7.2 \pm 0.9 \text{ kJ/m}^2 \quad (R^2 = 0.9751)$$



figuur 5.14: Breukenergie als functie van  $BW\phi$  voor serie C1



figuur 5.15: Breukenergie als functie van  $BW\phi$  voor serie C2

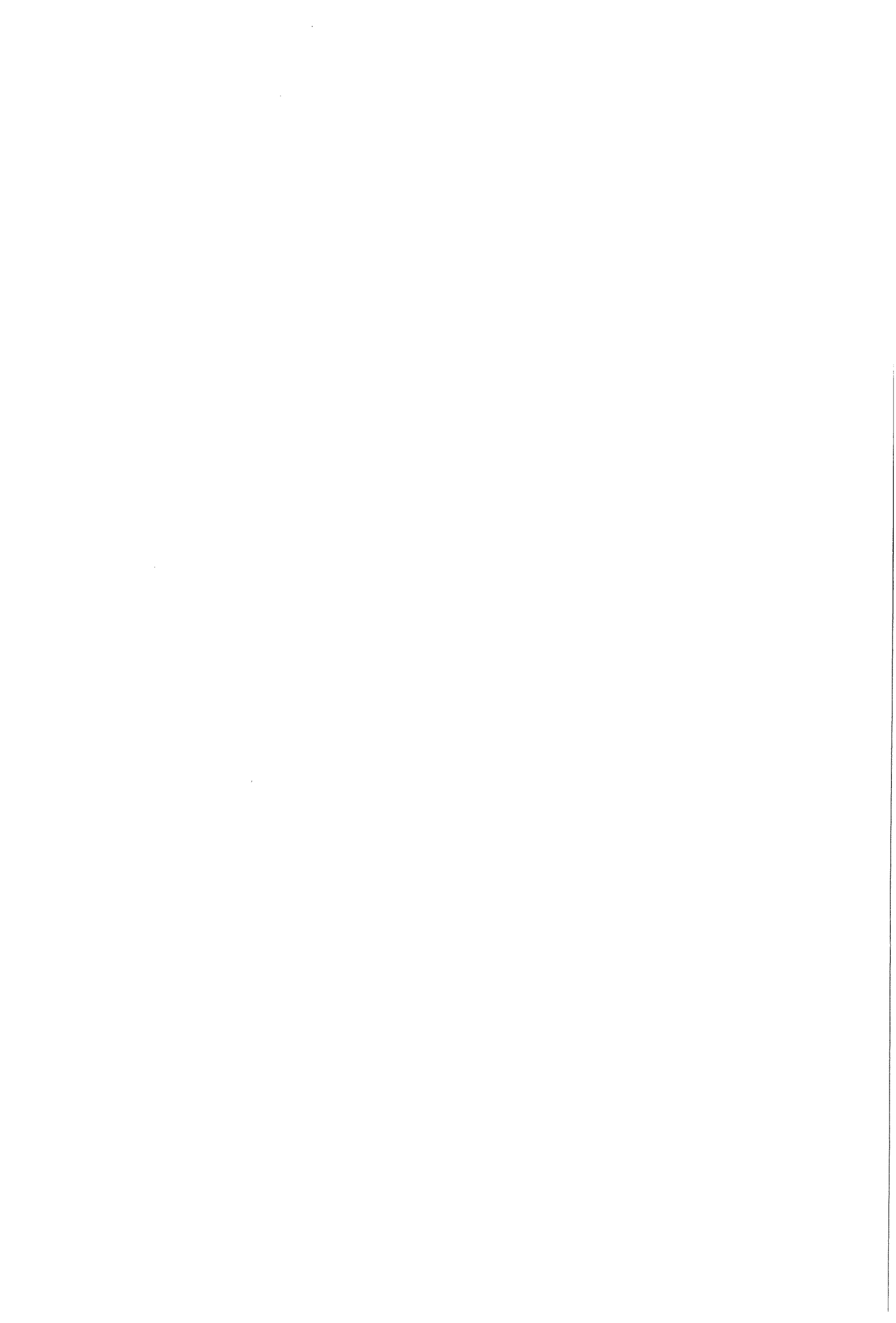
### 5.3.3 Craze grootte als functie van de snelheid

Bij snelheden boven de 3m/s is het vanwege de oscillaties niet meer mogelijk om  $K_C$  of  $G_C$  te bepalen. Om het verband tussen de snelheid en de grootte van de craze aan te tonen zijn een aantal proefstukken met een hoge snelheid getest en is de grootte van de gevormde craze met een meetmicroscopie gemeten.

Drie proefstukken met zijgroeven en  $a/W=0.2$  zijn getest met snelheden van 4, 5 en 6 m/s. De resultaten staan in onderstaande tabel.

Tabel 5.2 Lengte van de craze als functie van de snelheid

Snelheid	Craze lengte
m/s	mm
4	1.01
5	0.87
6	0.75





## 6. BESPREKING RESULTATEN

In onderstaande tabel zijn de resultaten van de proefseries kort samen gevat.

Tabel 6.1: Samenvatting van de resultaten.

Serie	v	Zij-groef	Damping	Oscillaties			Craze	$K_C$	$G_C^t$	$G_C^m$
				mm Rub.	$1^e > 50\%$	$t_f > 3\tau$				
A1	1	-	-	a/W > 0.5	+	-	2.4	3.0±0.3	20.5±1.1	8.8±0.8
A2	1	-	0.5	a/W > 0.63	+	+	2.5	2.8±0.2	23.2±2.4	8.8±0.4
B1	1	+	0.5	a/W > 0.6	+	+	2.3	3.1±0.2	8.5±0.3	8.6±0.3
B2	2	+	1.2	a/W > 0.6	-	+	1.6	2.9±0.1	9.7±0.3	8.1±0.2
C1	1.5	+	1.2	a/W > 0.6	+	+	1.9	2.9±0.1	9.8±0.3	8.9±0.3
C2	3	+	1.2	a/W > 0.4	-	+	1.2	2.8±0.3	8.7±0.6	7.2±0.9

\* 5% eis houdt in dat indien de kracht is opgelopen tot 50% van de maximale kracht de amplitude nog maar 5% van de maximale kracht mag zijn.

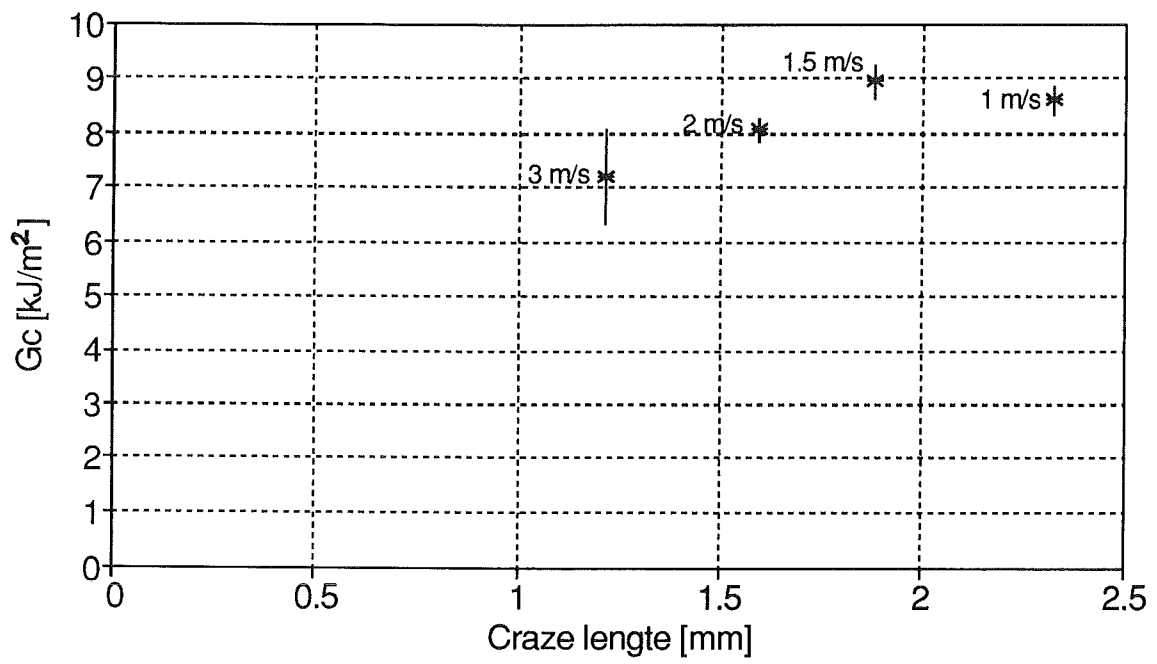
Een + bij de oscillaties geeft aan dat aan de eis voldaan is.

### 6.1 Invloed dempingsmateriaal.

Na vergelijking van de resultaten van een serie proefstukken getest zonder dempingsmateriaal en een serie met dempingsmateriaal (respectievelijk serie A1 en A2) blijkt het volgende: bij een testsnelheid van 1 m/s voldoet 0.5 mm rubber als dempingsmateriaal. De eerste piek wordt wel kleiner maar is nog steeds aanwezig en is zelfs bij de diep gekerfde proefstukken groter dan 50% van de maximale kracht. Echter niet meer groter dan de maximale kracht zoals bij de ongedempte proeven. De oscillaties na de eerste piek worden bij de proefstukken met ondiepe kerven volledig uitgedempt en hebben bij de diep gekerfde proefstukken een kleine amplitude.

Door het gebruik van het dempingsmateriaal wordt de spreiding in  $K_C$  kleiner de gemiddelde waarde van  $K_C$  wordt mede gezien de nauwkeurigheid niet door het dempingsmateriaal beïnvloedt.

Indien we de figuren 5.7 en 5.8, waarin de breukenergieën staan uitgezet, vergelijken blijkt dat bij de gedempte proeven er steeds iets meer energie door de proefstukken wordt opgenomen. Dit komt door de extra energie opname van het dempingsmateriaal. De helling van de lijn door de meetpunten is gelijk aan die bij de ongedempte proeven.  $G_C$  wordt dus niet beïnvloed door het dempingsmateriaal.



figuur 6.1:  $G_c$  als functie van de craze lengte.

## 6.2 Invloed zijgroeven

De zijgroeven zorgen ervoor dat er na scheurinitiatie weinig energie wordt opgenomen bij de scheurpropagatie. In de kracht-verplaatsingsdiagrammen is te zien dat bij de proefstukken met zijgroeven de kracht eerder gelijk aan nul wordt. Uit vergelijking van de breukoppervlakken (foto's 1 en 2 in bijlage 5) volgt dat de shearlips veel kleiner zijn en dat de craze niet meer gebogen loopt bij de proefstukken met zijgroeven. Dit komt doordat de zijgroeven er voor zorgen dat de mate van vervormingsverhindering in de dikte richting gelijk blijft. Bij de proefstukken met zijgroeven propageert de scheur nu zonder gestopt te worden in één keer door het ligament.

Doordat er na het optreden van de maximale kracht nauwelijks energie wordt opgenomen, is er geen verschil meer of  $G_C$  wordt bepaald uit de totale breukenergie of uit de breukenergie tot maximale kracht. De waarden van  $G_C$  van de serie met zijgroeven zijn iets lager dan  $G_C^m$  bepaald aan de proefstukken zonder zijgroeven echter gezien de nauwkeurigheid is het verschil minimaal. De waarden voor  $K_C$  en de craze lengte verschillen nauwelijks met die voor de proefseries zonder zijgroeven.

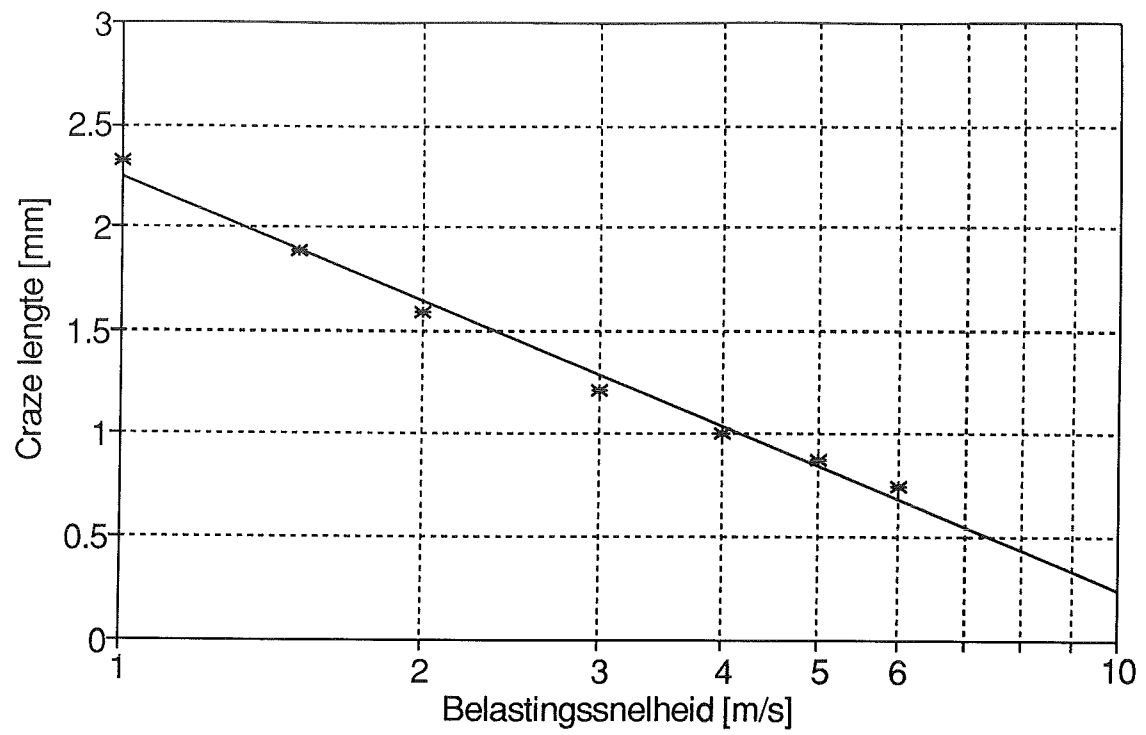
## 6.3 Invloed van de testsnelheid

Er zijn proefseries getest met snelheden van: 1, 1.5, 2 en 3 m/s. Bij de testsnelheden van 2 en 3 m/s wordt niet meer voldaan aan de eis dat de breuktijd minimaal drie maal de periodetijd van de oscillaties moet zijn. Bij een snelheid van 3 m/s zijn alleen de proefstukken tot en met  $a/W=0.48$  getest vanwege de toenemende oscillaties in het kracht signaal.

Bij de snelheden boven 1 m/s zijn  $G_C^m$  en  $G_C^t$  niet meer aan elkaar gelijk.  $G_C$  bepaald uit de totale energie is steeds iets hoger dan  $G_C$  bepaald uit de energie tot maximale kracht. Bij de vergelijking van de resultaten wordt alleen gebruik gemaakt van  $G_C^m$ . Bij 1.5 m/s is  $G_C$  iets hoger dan bij 1 m/s. De betrouwbaarheidsintervallen overlappen elkaar echter nog. Bij de snelheden 2 en 3 m/s wordt  $G_C$  duidelijk lager.

De craze lengte wordt kleiner als de belastingssnelheid toeneemt.

De literatuur [9] geeft aan dat er een verband bestaat tussen de craze lengte en  $G_C$ . In figuur 6.1 is de bepaalde  $G_C$  met betrouwbaarheidsintervallen uitgezet als functie van de craze lengte. Gezien het kleine aantal punten en de grote betrouwbaarheidsintervallen is geen eenduidig verband tussen  $G_C$  en de craze lengte aan te geven. Er is echter wel een trend waarneembaar dat  $G_C$  afneemt met afnemende craze lengte. Het is vanwege de oscillaties niet mogelijk om  $G_C$  bij hogere snelheden en dus kleinere craze lengtes te



figuur 6.2: Craze lengte als functie van de snelheid

bepalen. Als we toch  $G_C$  willen bepalen bij kleinere craze lengtes kunnen mogelijk proefstukken met andere afmetingen worden getest waarbij de reksnelheid hoger is. In figuur 6.2 is de craze lengte uitgezet als functie van de logaritme van de testsnelheid.

Voor de door de meetpunten getrokken rechte geldt:

$$\text{Craze} = (2.25 \pm 0.11) - (2.07 \pm 0.22)\log(v)$$

Indien we extrapoleren naar de snelheid waarbij de craze lengte nul is vinden we dat bij een snelheid van 12 m/s (met 95% betrouwbaarheidsinterval [9-19] m/s) er geen craze meer gevormd zal worden.

De gemiddelde waarde van  $K_C$  neemt iets af als de testsnelheid wordt verhoogd. Gezien de spreiding in de bepaalde  $K_C$  waarden is het echter niet mogelijk een relatie tussen  $K_C$  en de snelheid te geven.

#### 6.4 Verband tussen K en G

K en G zijn volgens (2.21) via de elasticiteitsmodulus aan elkaar gerelateerd. Met  $v=0.35$  volgt voor de elasticiteitsmodulus bij 1 m/s ( $K_C=3.1\pm 0.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ,  $G_C=8.6\pm 0.2 \text{ kJ/m}^2$ ):

$$E(1 \text{ m/s}) = 981 \pm 160 \text{ MPa}$$

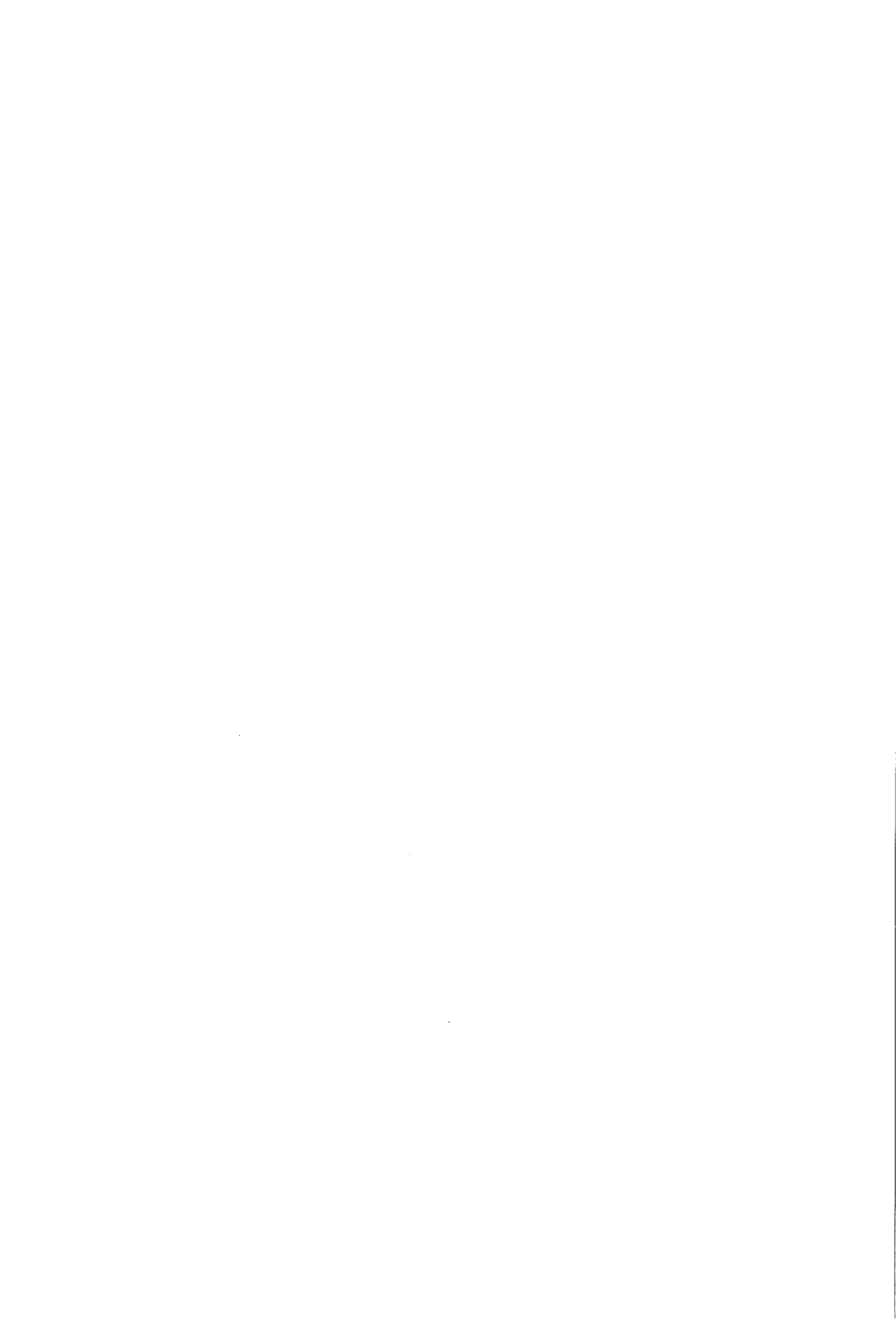
Uit de opgenomen trekkromme bij een snelheid van 1000 mm/min (figuur 5.3) volgt dat:  
 $E(10^3 \text{ mm/min}) = 850 \pm 20 \text{ MPa}$ .

De twee waarden komen goed met elkaar overeen. De elasticiteitsmodulus berekend uit de resultaten van de dynamische proeven is hoger dan die bepaald uit de trekkromme. Dit komt overeen met het gedrag van kunststoffen dat de elasticiteitsmodulus toeneemt met de belastingssnelheid.

#### 6.5 Lineair elastisch materiaal gedrag.

Zowel de theorie voor  $K_C$ - als voor  $G_C$  bepaling is gebaseerd op lineair elastisch materiaal gedrag. Indien we de opgenomen kracht-verplaatsings krommen bekijken zien we dat bij de ondiep gekerfde proefstukken de kracht, afgezien van de oscillaties, bijna tot aan de maximale kracht lineair toeneemt met de verplaatsing.

Bij 1m/s neemt bij de ondiep gekerfde proefstukken de kracht, afgezien van de oscillaties, lineair toe met de verplaatsing tot aan ongeveer 80% van de maximale kracht. Daarna buigt de kracht iets af. Bij 2 en 3 m/s neemt de kracht bijna tot aan de maximale kracht lineair toe. Bij de diep gekerfde proefstukken getest met 1 m/s verloopt de kracht weer tot ongeveer 80% van de maximale kracht lineair maar daarna buigt de kracht sterk af en zien we een kleine daling waarna de kracht weer toeneemt en vervolgens plotseling daalt tot



nul. Er is waarschijnlijk eerst een stabiele scheur geïnitieerd die daarna instabiel is geworden. Bij de hogere testsnelheden is door de overheersende oscillaties geen lineair gebied aan te geven bij de diep gekerfde proefstukken.

Aangezien bij de meeste proefstukken het grootste gedeelte van de kracht-verplaatsings kromme lineair verloopt kan het materiaal als lineair elastisch beschouwt worden.

## 6.6 Afmetingseisen

De afmetingseisen voor een geldige  $K_{IC}$  zijn:

$$a, B, (W - a) \geq 2.5 \left( \frac{K_c}{\sigma_y} \right)^2$$

Met de geëxtrapoleerde vloeispanning bij een breuktijd van 2 ms en de bepaalde  $K_C$  bij 1 m/s vinden we ( $\sigma_y=35.2 \pm 1.4$  MPa,  $K_C=3.1 \pm 0.2$  MPa $\sqrt{m}$ ):

$$a, B, (W-a) \geq 7.8 \pm 1.6 \text{ [mm]}$$

Met de afmetingen van de proefstukken ( $B=10$ ,  $W=20$  mm) volgt hieruit dat alleen  $K_C$  waarden bepaald voor de proefstukken waarvoor geldt:

$$(0.39 \pm 0.08) \leq a/W \leq (0.61 \pm 0.08)$$

geldige  $K_{IC}$  waarden zijn.

De  $K_C$  waarden binnen het aangegeven gebied verschillen bij geen van de series van het bepaalde gemiddelde. De gemiddelde waarden kunnen dan ook beschouwt worden als geldige  $K_{IC}$  waarden.

Voor een geldige  $G_{IC}$  zijn de afmetingseisen:

$$a, B, (W-a) \geq 25G_C/\sigma_y$$

Bij 1 m/s komen we dan tot de volgende afmetingseisen ( $G_C=8.6 \pm 0.3$ ):

$$a, B, (W-a) \geq 6.1 \pm 0.4 \text{ [mm]}$$

Met de afmetingen van de proefstukken geeft dit:

$$(0.31 \pm 0.02) \leq a/W \leq (0.69 \pm 0.02)$$

De ondiep en diep gekerfde proefstukken van de series voldoen net niet aan deze eis. Het grootste deel van de proefstukken voldoet echter wel aan deze eis, zodat we de bepaalde  $G_C$  kunnen beschouwen als een geldige  $G_{IC}$ .





## 6.7 Vergelijking met de literatuur

Bij een belastingssnelheid van 1 m/s is voor het onderzochte HDPE gevonden:

$$G_{IC} = 8.6 \text{ kJ/m}^2 \text{ en } K_{IC} = 3.1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}.$$

In de literatuur vinden we voor HDPE:

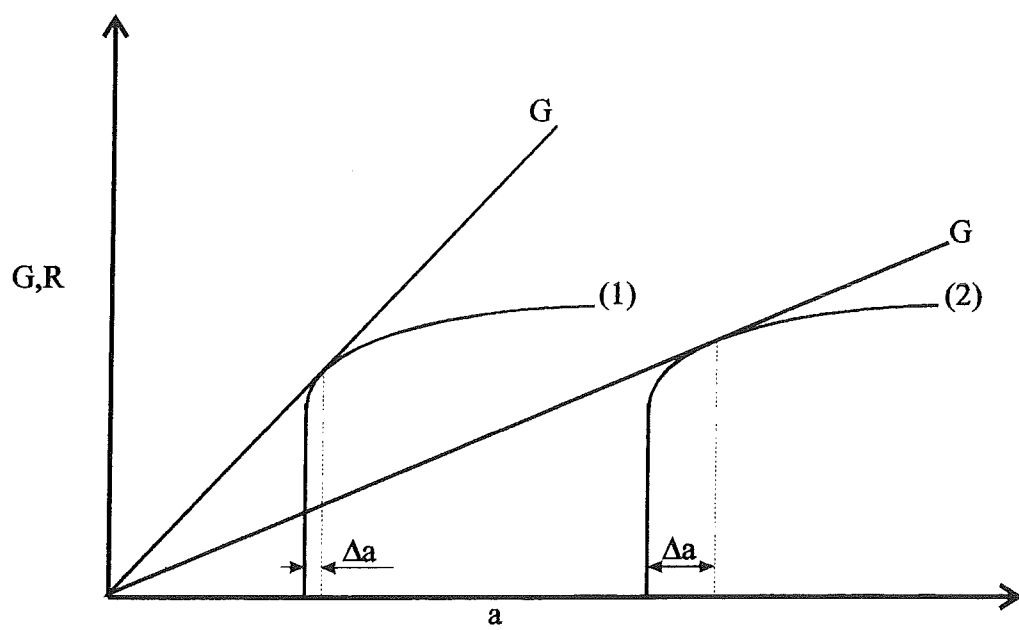
$$G_{IC} = 3.4 \text{ kJ/m}^2 \text{ [9] en } K_{IC} = 1.6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \text{ [10].}$$

en voor MDPE [11]:

$$G_{IC} = 11 \text{ kJ/m}^2 \text{ en } K_{IC} = 3.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}.$$

De gemeten waarden komen het beste overeen met de literatuur waarden voor MDPE.

Ook de dichtheid (zie hoofdstuk 3) gaf aan dat het materiaal een MDPE is.



figuur 7.1: G en R curven bij twee verschillende scheurlengtes

## 7. BESCHRIJVING BREUKGEDRAG

### 7.1 Instabiele scheuruitbreiding

Bij alle proefstukken daalt de kracht na het maximum zeer sterk. Dit wordt veroorzaakt door instabiele scheuruitbreiding. Er is dan geen kracht meer nodig om de scheur uit te laten breiden. Uit de theorie bleek dat als  $a/W$  groter is dan 0.36 er geen instabiele scheuruitbreiding meer mogelijk is, omdat dan  $G$  afneemt met toenemende scheurlengte. Uit de proeven is gebleken dat zelfs bij  $a/W=0.7$  nog instabiele scheuruitbreiding optreedt. Dit komt doordat de hoeveelheid energie die nodig is voor een bepaalde scheuruitbreiding bij scheurinitiatie groter is dan voor de scheurpropagatie. Op het moment dat er een scheur geïnitieerd is daalt  $R$ , zodat  $G$  bij scheuruitbreiding groter blijft dan  $R$  en de scheur instabiel zal uitbreiden.

Bij de proeven bleek de instabiele scheurgroei te stoppen vlak voordat het volledige ligament was doorgebroken. De twee helften zaten meestal nog net aan elkaar vast. Op de foto's 1 en 2 (bijlage 5) is dan ook nog een restbreuk zone te zien. De stop van de instabiele scheur komt waarschijnlijk doordat er een extra drukzone ontstaat op de plaats waar het proefstuk door de beitel wordt ingedrukt. Deze extra drukzone werkt de scheurgroei tegen.

### 7.2 Craze lengte

Bij 1 m/s vonden we een gemiddelde craze lengte van 2.3 mm. Uit de literatuur blijkt dat de grootte van de craze beschreven kan worden met het lijn model voor de plastische zone van Dugdale (2.3). Met de bepaalde waarden voor  $K_{IC}$  en  $\sigma_y$  bij 1 m/s vinden we:

$$R_d = 3.0 \pm 0.5 \text{ mm.}$$

Deze waarde is niet exact gelijk aan de gemeten waarde maar de orde van grootte komt zeer goed overeen. Het verschil kan mogelijk verklaard worden door een hoger vloeigrens dan de hier uit extrapolatie gehanteerde waarde.

Bij alle proefseries bleek de craze lengte nog iets te variëren met de diepte van de kerf. Bij 1 m/s was de craze lengte 2.21 mm bij  $a/W=0.2$  en 2.52 bij  $a/W=0.7$ . Door Hemingway [12] is aangetoond dat de craze wordt gevormd voordat er instabiele scheurgroei optreedt. De vorming van de craze kan dus beschouwd worden als stabiele scheurgroei. In figuur 7.1 zijn de  $R$ -curven voor een proefstuk met kleine begin-scheurlengte (1) en met grote begin-scheurlengte (2) weergegeven. Ter vereenvoudiging gaan we nu uit van een systeem waarin  $G$  continu toeneemt met  $a$ . In de figuur zijn de  $G$ -curven getekend die de  $R$ -curven



raken en het moment van instabiel scheuruitbreiding geven. Uit de figuur blijkt nu dat bij een kleine begin-scheurlengte de stabiele scheuruitbreiding (of craze vorming) kleiner is dan bij een grote begin-scheurlengte. Wat overeen komt met de gevonden meetwaarden.

### 7.3 Breukoppervlakken

Met een 'Scanning Electron Microscoop' (SEM) zijn een aantal breukoppervlakken onderzocht om meer informatie over het breukproces op microscopische schaal te verkrijgen. De gebruikte SEM is een JEOL type JSM 840A met een versnelspanning van 10 kV en een 'working distance' van 39 mm. De foto's die gemaakt zijn van de breukoppervlakken staan in bijlage 5. Alle breukoppervlakken van de proefstukken vertonen dezelfde structuren. Daarom zijn alleen de breukoppervlakken onderzocht van de proefstukken getest met 1 m/s.

Foto 4 geeft een overzicht van de craze zone. Geheel links is nog net het einde van de kerf te zien. Na de kerf zien we een smalle gladde zone, daarna een zone met steeds fijner wordende schollen en rechts zien we een zone met schilfers. De verschillende zones zullen kort besproken worden waarna een mogelijk mechanisme die deze verschillende zones heeft doen ontstaan wordt besproken.

*-Gladde zone:*

Foto 5 geeft een vergroting van de gladde zone. Op deze foto is links de zijgroef, boven het einde van de kerf aangebracht door het scheermesje en onder het begin van de schollen structuur. Aan de rand van de gladde zone is insnoering te zien. Hierbij is er materiaal naar binnen getrokken en heeft er zich een holte gevormd. De insnoering is waarschijnlijk veroorzaakt door plastische deformatie tengevolge van een plane stress situatie. De insnoering sluit de mogelijkheid uit dat de gladde zone gemaakt is door het scheermesje. Foto 6 geeft een sterke vergroting van het midden van de gladde zone. De gladde zone blijkt te bestaan uit een banen-structuur in de scheurgroeirichting en rechthoekige plaatjes in de orde grootte van enkele micro meters. In de literatuur is een dergelijke structuur niet terug te vinden. Op zowel macroscopische als microscopische schaal zijn met uitzondering van de insnoering aan de randen geen vervormingen waarneembaar en vertoont het oppervalk geen hoogte verschillen. Het is aannemelijk dat er hier sprake is van een soort interkristallijne splijtbreuk. De structuur op foto 6 is dan niet veroorzaakt door de breuk maar was al aanwezig in het materiaal. Mogelijke verklaringen voor het ontstaan van deze structuur zijn dat ze het gevolg is van het semikristallijne karakter van het materiaal of dat ze veroorzaakt is bij de extrusie van het materiaal.



### *-Schollen:*

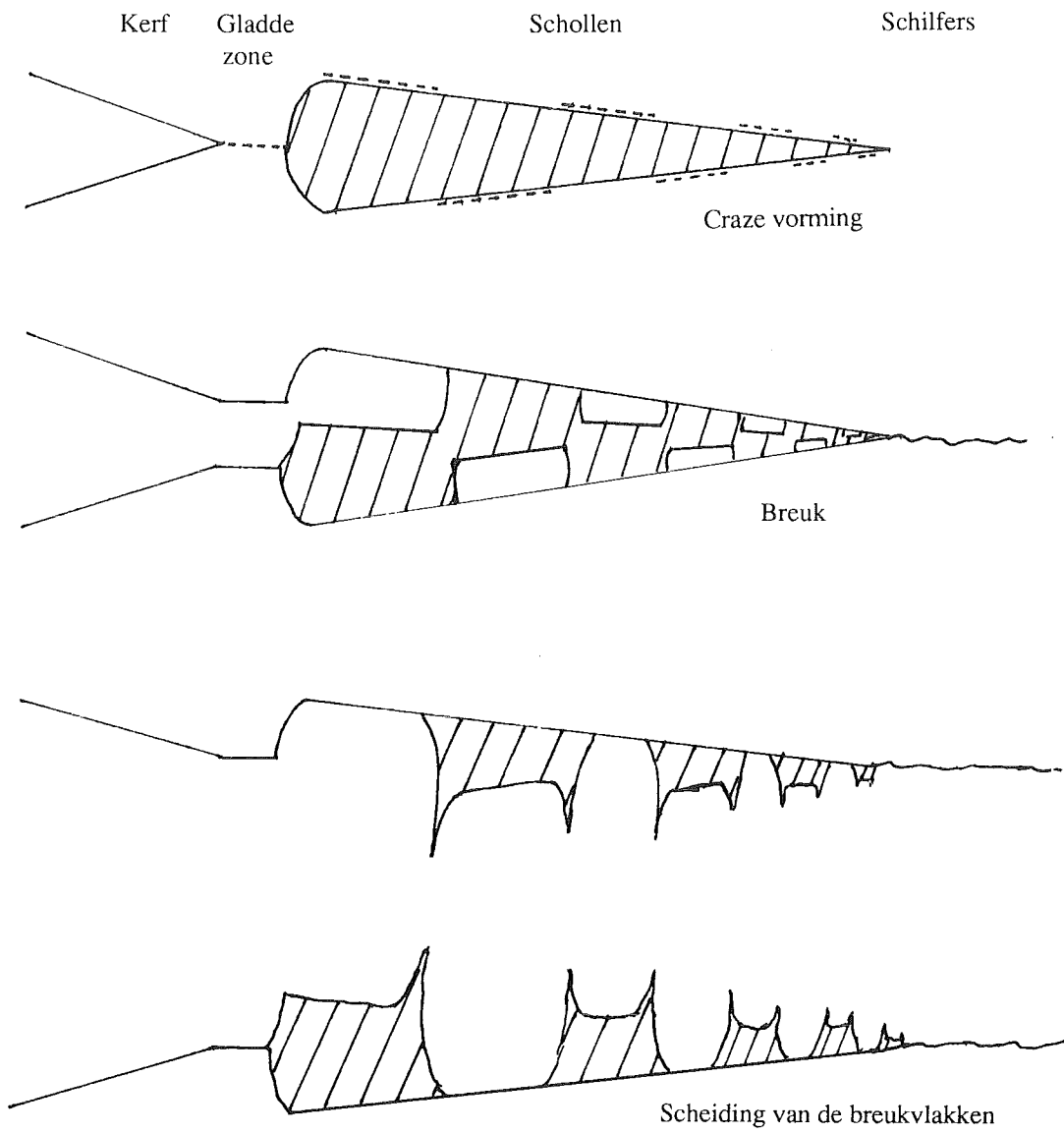
In de literatuur wordt een gebied met schollen 'patch work zone' genoemd en wordt veelvuldig bij snelle breuk in amorfe en semikristallijne thermoplasten gevonden [10, 13]. De structuur met steeds kleiner wordende schollen wordt als volgt verklaard: tijdens de krachtopbouw ontstaat in het materiaal voor de scheurtip een craze. Indien er vanaf de kerf een scheur met hoge snelheid begint, zal deze niet door het midden van de craze gaan maar juist langs een scheidingsvlak tussen craze- en matrixmateriaal. De scheur verspringt hierbij steeds van het ene naar het andere scheidingsvlak. Zo ontstaan er op het breukoppervlak eilandjes van crazemateriaal (de schollen). Uit dit mechanisme volgt dat de schollen-structuren van de twee breukoppervlakken in elkaar moeten passen. Op foto 3 is dit duidelijk zichtbaar.

De craze-eilandjes zullen steeds fijner verdeeld worden naarmate de scheur de crazetip nadert aangezien de craze over het algemeen taps het materiaal inloopt en dus in een zeer dun gedeelte eindigt. Op de foto's 4 en 9 is duidelijk te zien dat de schollen-structuur steeds fijner wordt.

Om de schollen-structuur nader te kunnen bestuderen is met behulp van een scheermesje een breukoppervlak in het midden doorgesneden. Het vlak van de doorsnijding loopt parallel aan de scheurgroeirichting en staat haaks op het breukoppervlak. Foto 7 toont de doorsnijding op de plaats van de schollen-structuur. De foto is gemaakt met een hoek van 40° op het breukoppervlak. In het midden van de foto zien we een doorgesneden schol. Foto 8 geeft een vergroting van deze schol waarbij we van de zijkant tegen de schol aankijken. Hieruit blijkt dat de schol op het breukoppervlak ligt en in het midden een dikte heeft van ongeveer 8 µm. De randen van de schollen staan omhoog en steken veel verder boven het oppervlak uit dan het midden van de schol. Tevens zien we dat aan de randen lange draden zitten. De randen van de schollen zijn kennelijk taai uit elkaar getrokken. Een mogelijke oorzaak hiervoor is dat bij het overspringen van de scheur van de ene crazewand naar de andere het materiaal in de craze nog niet wordt gescheiden. De schollen blijven dan met de randen aan elkaar zitten. Pas als de scheur een stuk verder is en de breukoppervlakken van elkaar worden getrokken, wordt de verbinding tussen de schollen taai uit elkaar getrokken. In de zone met schollen zijn de vervormingen op macroscopische schaal klein maar op microscopische schaal groot. Deze breuk moet gekwalificeerd worden als macroscopisch bros en microscopisch taai.

### *-Schilfers:*

Foto 10 geeft een vergroting van de schilfer-structuur. In de literatuur [14] wordt deze structuur waargenomen bij instabiele scheuruitbreiding. Een zone met deze structuur wordt 'hackle-zone' genoemd. Deze structuur ontstaat als de scheurgroeisnelheid zo hoog



figuur 7.2: Overzicht van het breukmechanisme



is dat er geen tijd meer is om crazes te vormen. Zowel op macroscopische- als op microscopische schaal is dan sprake van brose breuk. Uit foto 10 blijkt ook dat er nauwelijks plastische vervorming heeft plaatsgevonden.

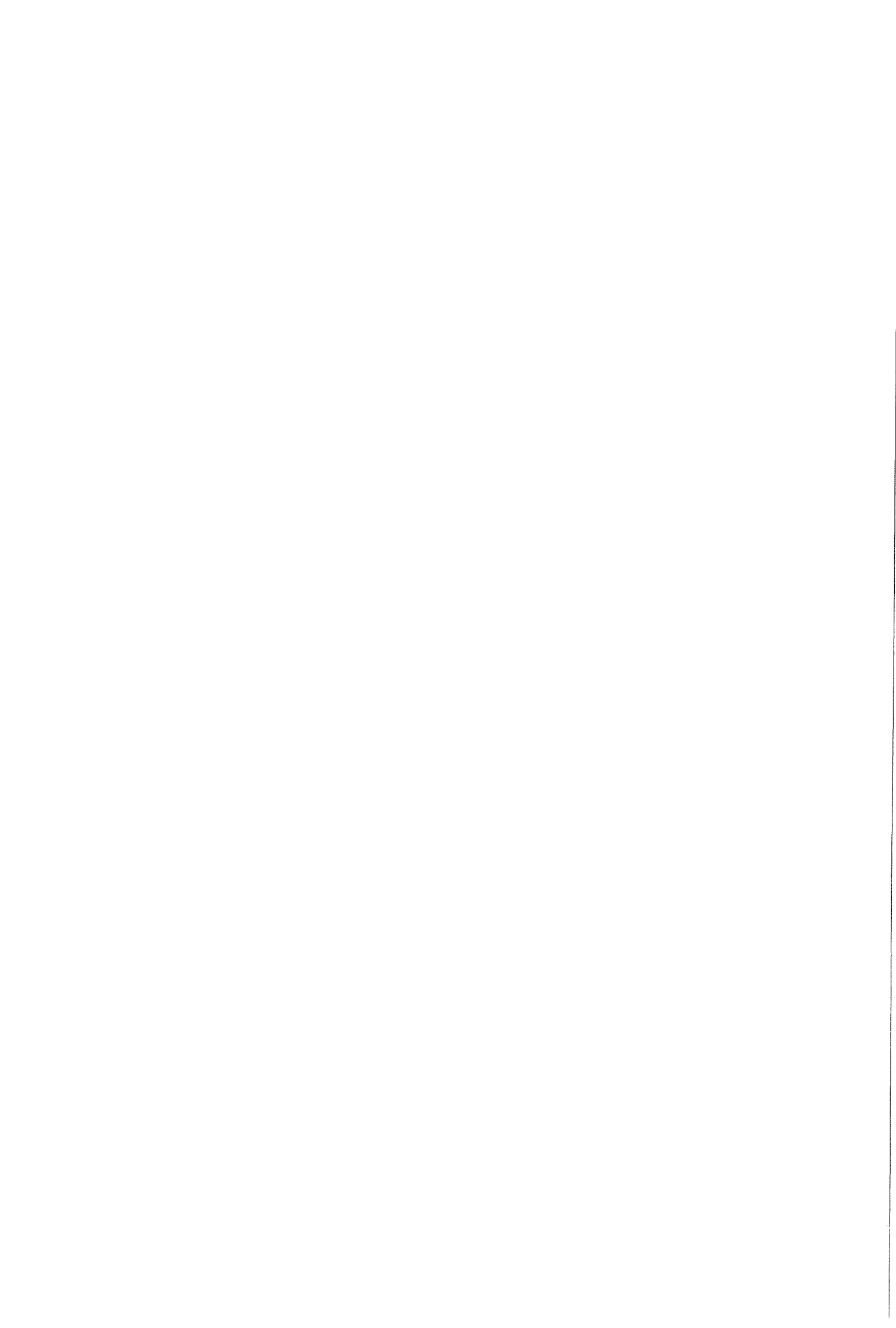
De schilfer zone gaat geleidelijk over in een sponsachtige structuur (zie foto's 11 en 12). De sponsachtige structuur, die bestaat uit een oppervlak met allemaal kleine vezeltjes, is door een groot aantal onderzoekers al eerder aangetoond bij vermoeiing [15], langzame scheurgroei [16] en bij J-integraal testen [17] en wordt aangeduid als een 'dimple' structuur. Deze structuur ontstaat doordat eerst een craze wordt gevormd, waarvan de fibrillen aan het begin van de craze in het midden breken, waarna de craze weer verder in het materiaal groeit. De overgang van de schilfer-structuur -die ontstaat bij hoge scheurgroeisnelheden- naar de sponsachtige structuur -die hoort bij lage snelheden- duidt er op dat de scheurgroeisnelheid bij het doorbreken van het ligament steeds lager wordt.

In figuur 7.2 is het breukgedrag nog eens samengevat. Tijdens het oplopen van de kracht wordt in het materiaal voor de kerftip een craze gevormd. De craze ontstaat niet direct aan de kerftip. Dit komt doordat voor crazevorming de hydrostatische spanning van belang is en deze is maximaal op een zekere afstand van de kerftip. Als de kracht hoger wordt worden de spanningen in het materiaal zo hoog dat er een scheur initieert. Het is niet zeker of de scheur vanuit de kerftip of de craze initieert. Het materiaal tussen de craze en de kerf wordt door slijtbreuk van elkaar gescheiden. In de craze springt de scheur van de ene crazewand naar de andere en als de scheur door de craze is geschoten schiet hij instabiel door de rest van het materiaal. Bij de scheiding van de breukvlakken worden de verbindingen tussen de schollen taai uit elkaar getrokken.



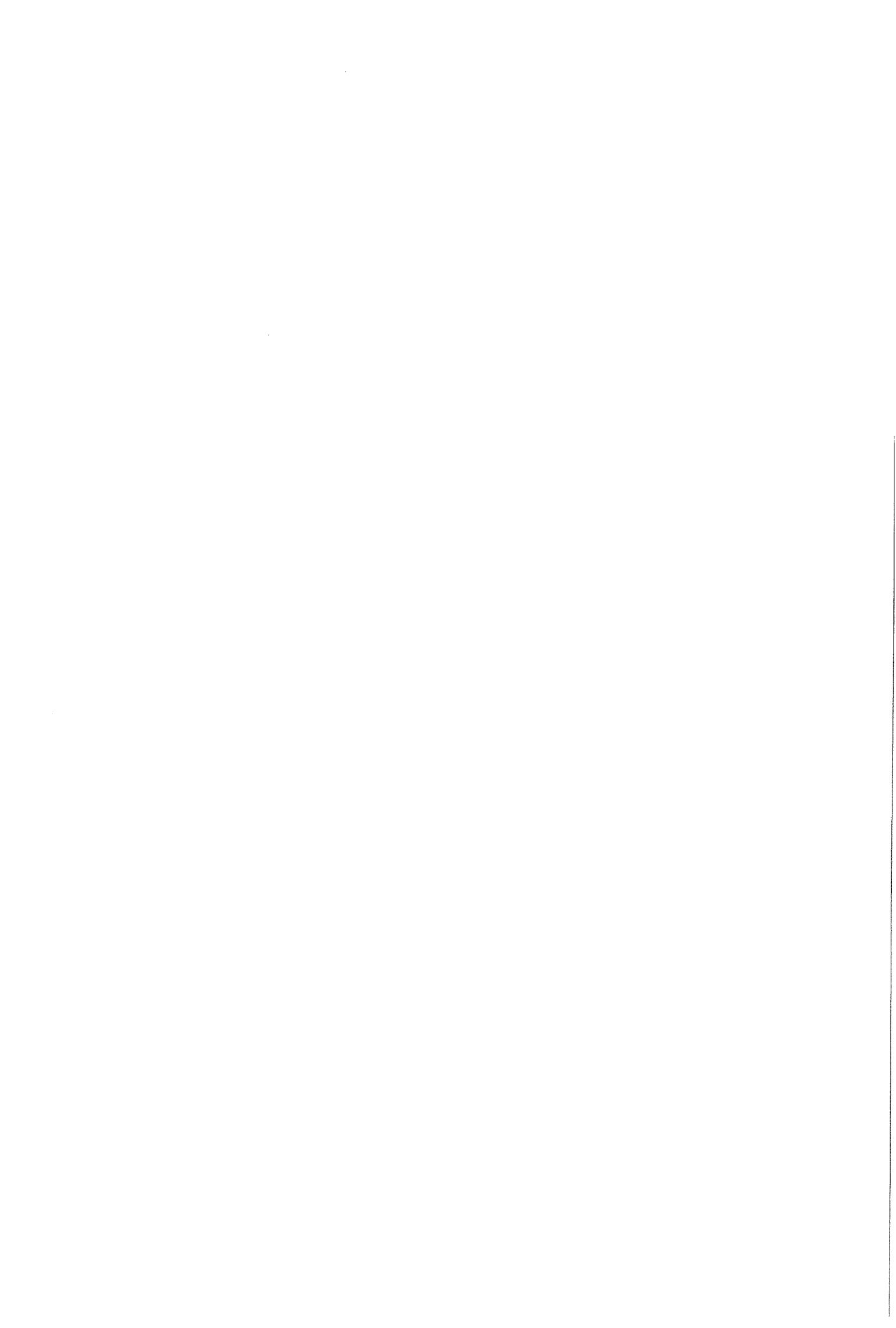
## CONCLUSIE

- De gebruikte valgewichtopstelling is geschikt voor het bepalen van de breukenergie en maximale kracht bij breuk van kunststof proefstukken indien de maximale kracht groter is dan 120 N.
- Ten aanzien van oscillaties kunnen de volgende conclusies getrokken worden:
  - De oscillaties nemen af als de testsnelheid wordt verlaagd en als er kleinere proefstukken worden getest,
  - Dempingsmateriaal vermindert de oscillaties en heeft geen invloed op  $G_C$  en  $K_{IC}$ ,
  - Bij snelheden boven 1.5 m/s is de breuktijd korter dan driemaal de periodetijd van de oscillaties en zijn volgens het ESIS protocol de bepalingen ongeldig,
  - Bij hogere snelheden dan 3m/s zijn breukparameters niet meer te bepalen.
- Indien er proefstukken met zijgroeven worden getest ontstaan er geen shearlips, is het craze front recht en treedt er geen scheurstop gevolgd door scheurinitiatie op. Het gevolg hiervan is dat het verschil tussen de totale breukenergie en energie tot maximale kracht klein wordt. Het verschil tussen  $G_C$  bepaald uit de totale breukenergie en  $G_C$  bepaald uit de energie tot maximale kracht wordt hierdoor klein en bij 1 m/s zelfs minimaal.
- Bij de proefstukken waarbij  $0.4 < a/W < 0.6$  zijn de bepaalde  $K_{IC}$  geldige  $K_{IC}$  waarden.  $K_{IC}$  varieert nauwelijks met de snelheid en is gelijk aan  $3.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .
- Bij verhoging van de snelheid van 1 naar 3 m/s daalt  $G_C$  van 8.6 naar  $7.2 \text{ kJ/m}^2$ .
- De bepaalde  $G_{IC}$ ,  $K_{IC}$  en de dichtheid van het onderzochte HDPE geven aan dat het materiaal zich gedraagt als een MDPE.
- De afmetingen van de craze komen globaal overeen met het plastische zone model van Dugdale.
- Tussen de craze lengte en de snelheid bestaat een lineair verband. Uit extrapolatie volgt dat bij een snelheid van ongeveer 12 m/s er geen craze meer zal zijn.
- Aan het breukoppervlak zijn 3 zones te onderscheiden:
  1. Gladde zone, veroorzaakt door interkristallijne splijtbreuk,
  2. Zone met schollen als gevolg van craze vorming,
  3. Zone met schilfers veroorzaakt door instabiele scheurgroei. Deze zone gaat geleidelijk over in een sponsachtige structuur als gevolg van het lager worden van de scheurgroeisnelheid.

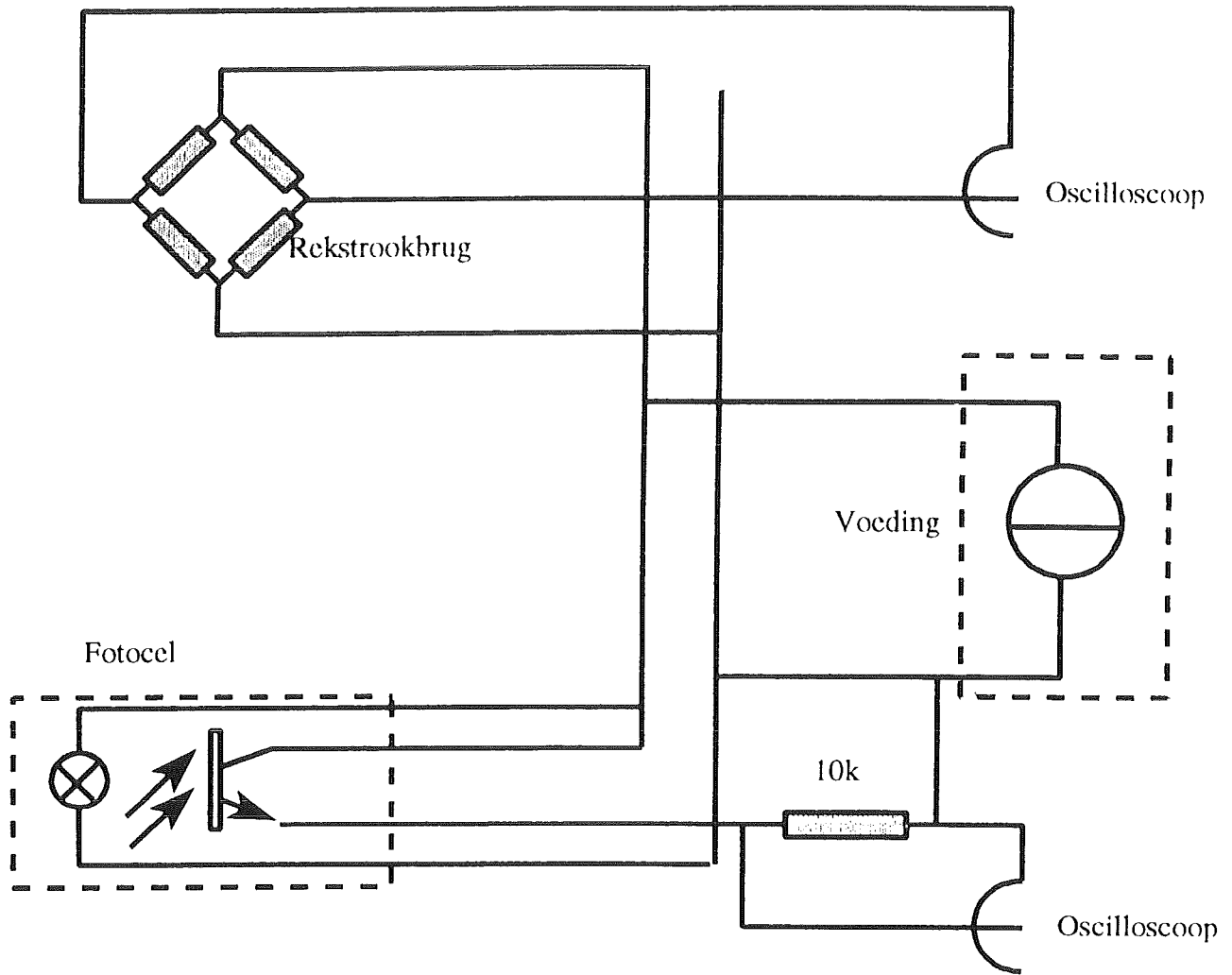


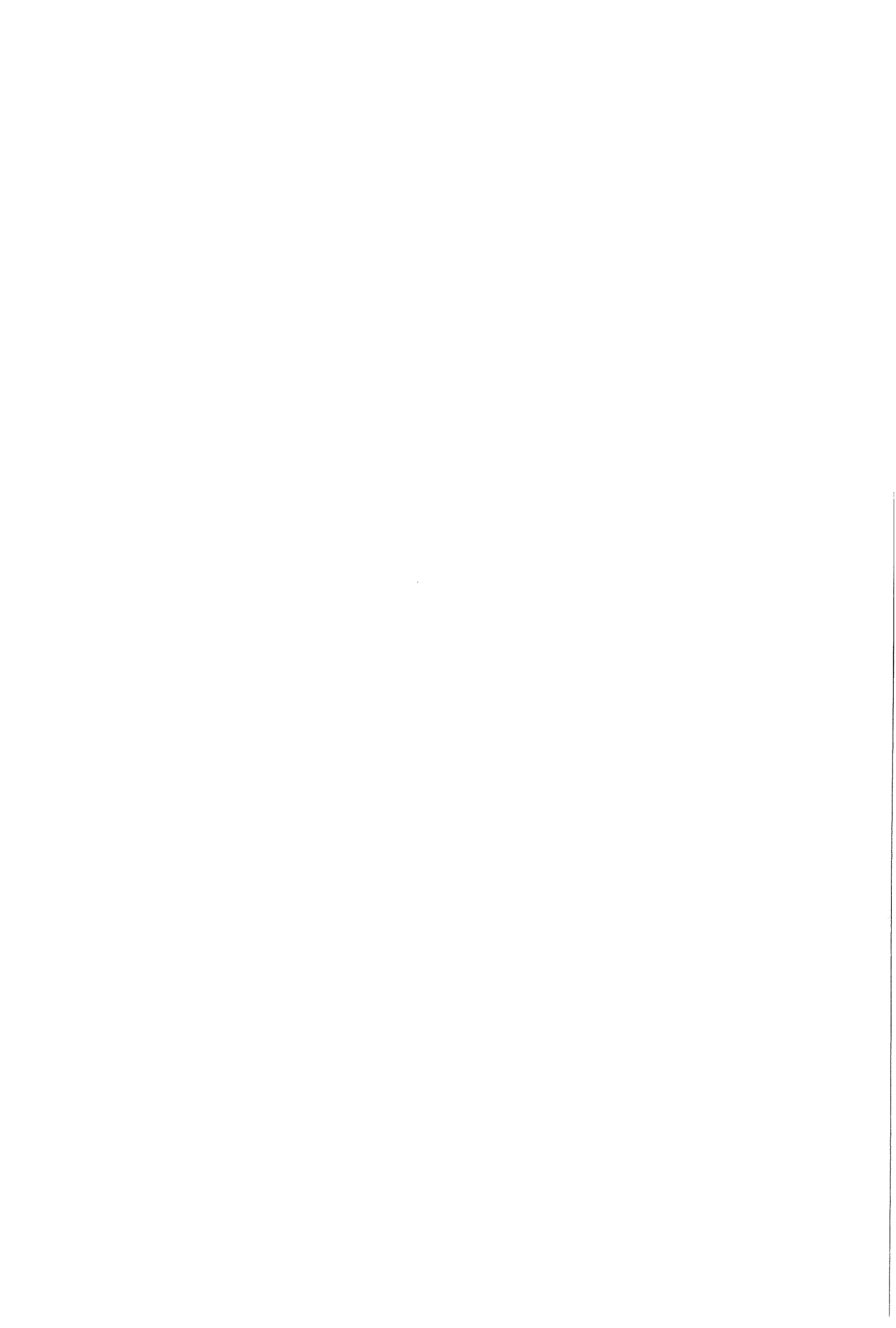
## LITERATUUR

- [1] Tada, H., Paris, P.C. and Irwin, G.R., "**The stress analysis of cracks handbook**," Del Research Corporation, Hellertown, USA, 1973.
- [2] Kinloch, A.J. and Young, R.J., "**Fracture behaviour of polymers**," Elsevier Applied Science, London and New York, 1988.
- [3] Williams, J.G., "**Stress analysis of polymers**," Ellis Horwood, Chichester, 1980.
- [4] Williams, J.G., "**Fracture Mechanics of Polymers**," Ellis Horwood Limited, London, 1984.
- [5] Vu-Khanh, T. and Charentenay, F.X., "**Mechanics and Mechanisms of Impact fracture in Semi-Ductile Polymers**," Polymer Engineering and Science, Vol. 25, 1985, 841-845.
- [6] Dekker, J.C., "**Literatuurscriptie: Bepaling van breukparameters bij dynamische belasting van kunststoffen**," TU-Delft, 1993.
- [7] "**A linear elastic fracture mechanics (LEFM) standard for determining  $K_{Ic}$  and  $G_c$  for Plastics**," Testing Protocol-March 1990, EGF task group on polymers.
- [8] Böhme, W. and Kalthoff, J.F., "**The behavior of notched bend specimens in impact testing**," International Journal of Fracture, Vol. 20, 1982, 139-143.
- [9] Plati, E. and Williams, J.G., "**The determination of the fracture parameters for polymers in impact**," Polymer Engineering and Science, Vol. 15, 1975, 470-474.
- [10] Bruijn, J.C.M., "**The failure behaviour of high density polyethylene with an embrittled surface layer due to weathering**," Delft University Press, The Netherlands, 1992.
- [11] Harry, P.G. and Marshall, G.P., "**Use of instrumented impact testing to characterise failure in pressure pipe grades of MDPE and HDPE**," Plastic and Rubber International, December 91/January 92, 10-13.
- [12] Hemingway, A.J., Channell, A.D. and Clutton, E.Q., "**Instrumented charpy impact testing of polyethylene**," Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications, vol 17, 1992, 147-155.
- [13] Schoolenberg, G.E., "**Breukgedrag van polypropreen bij verschillende deformatiesnelheden en temperaturen**," Materialen, nr. 5, 1990, 9-14.
- [14] White, J.R. and Thomas, E.L., "**Advances in SEM of polymers**," Rubber Chemistry and Technology, Vol. 57, 1984, 457-506.
- [15] Riemsdag, A.C., "**Fractografie van op vermoeiing belast hoge dichtheid polyetheen (HDPE) en polycarbonaat (PC)**," Bond voor Materialenkennis, Contactgroep Fractografie, 1992.
- [16] Lee, C.S. and Epstein, M.M., "**Fracture surface features of polyethylene pipe samples**," Polymer Engineering and Science, Vol. 22, 1982, 549-555.
- [17] Klooster, H. ten, "**Afstudeerverslag: J-integraal bepaling van hoge dichtheid polyetheen**," TU-Delft, 1992.



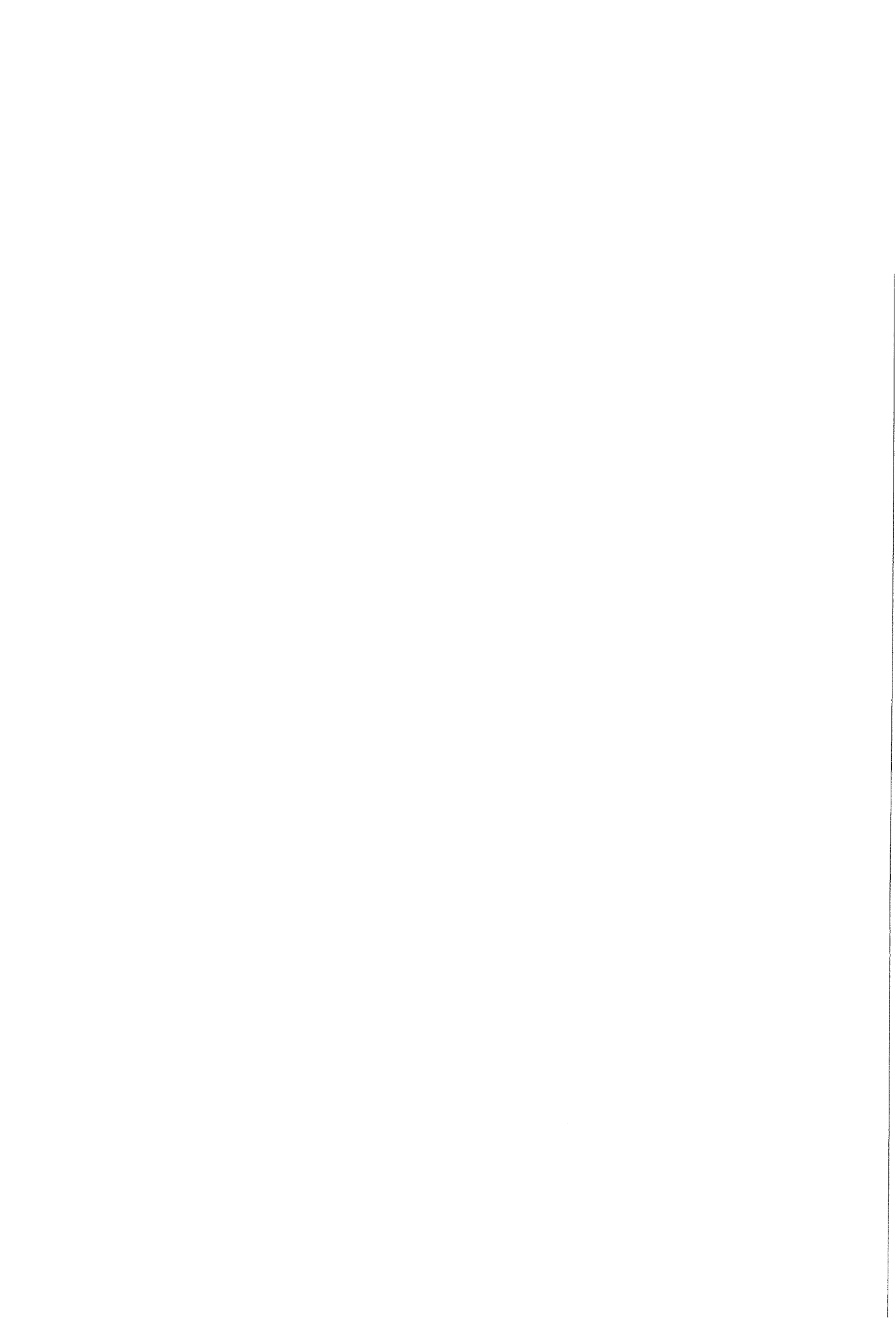
**BIJLAGE 1 ELEKTRISCH SCHEMA VAN DE VALGEWICHT OPSTELLING**







**BIJLAGE 2 BLOKDIAGRAM EN LISTING VAN HET PROGRAMMA**



Declareer de subroutines voor:  
Communicatie met GPIB-interface  
Grafische routines  
Koptekst  
Standaard keuze menu

Initialiseer GPIB-interface

Scherm: Koptekst

Laad instellingen uit setting.st5 van disk  
en zendt deze naar de scoop

Invoer: verwachte breuktijd  
verwachte maximale kracht  
gemonteerde tup  
gewenst aantal meetpunten

Bereken horizontale en verticale range instelling  
van de scoop en zendt deze naar de scoop

stoppen / Scherm: Instellingen in orde? / nee

Ja

Invoer: Proefstukcode  
en één regel commentaar

Proefstukcode al in gebruik?

Ja

nee

Scherm: Plaats proefstuk en hamer

Lees trigger status van de scoop

Scoop getriggerd?

nee

Ja

stoppen / Signaal opslaan? / nee

Ja / Zeker? / nee

Ja

nee / Zeker? / Ja

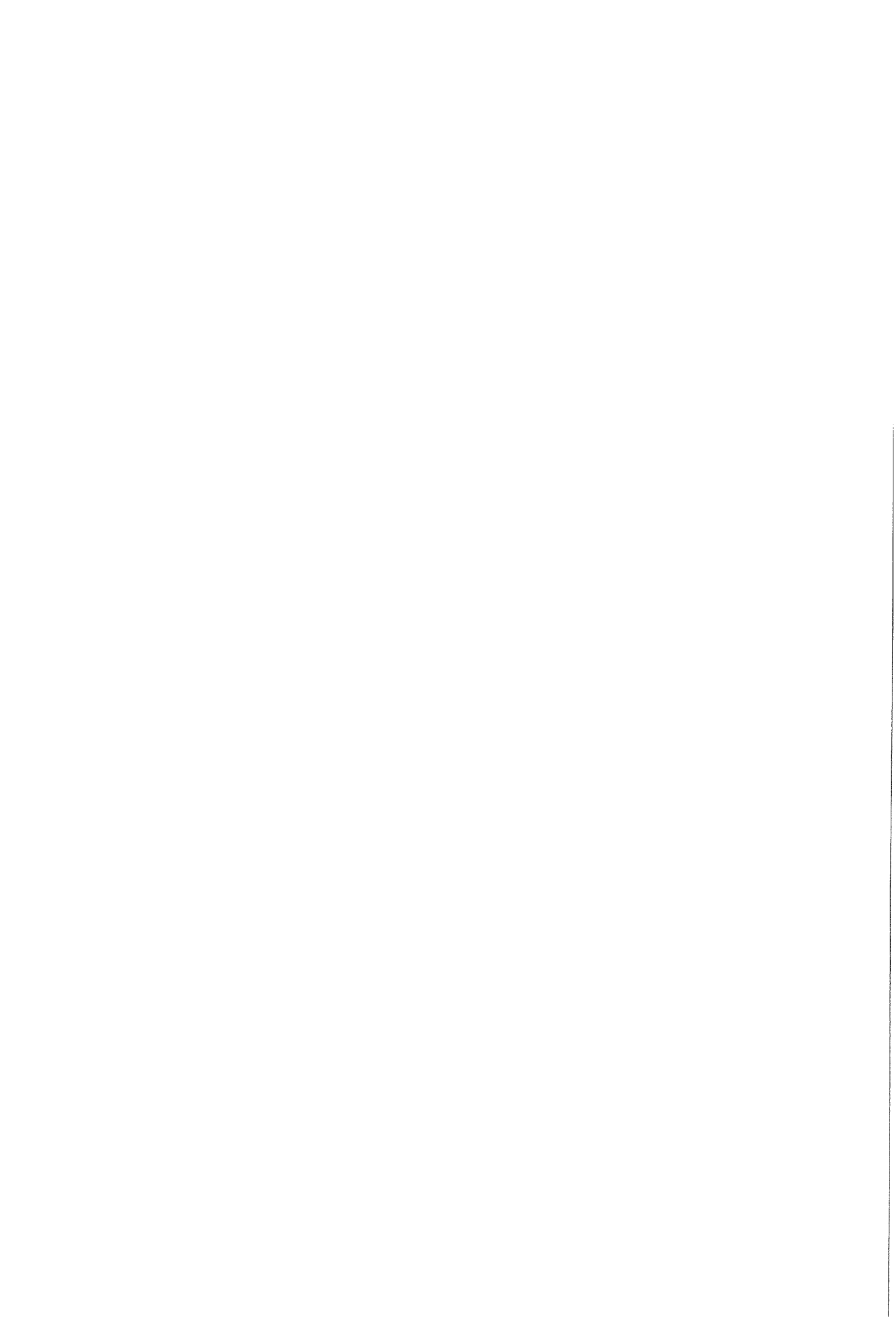
Lees uit de scoop:  
Data blok  
Assenstelsel  
Periode meting trigger signaal

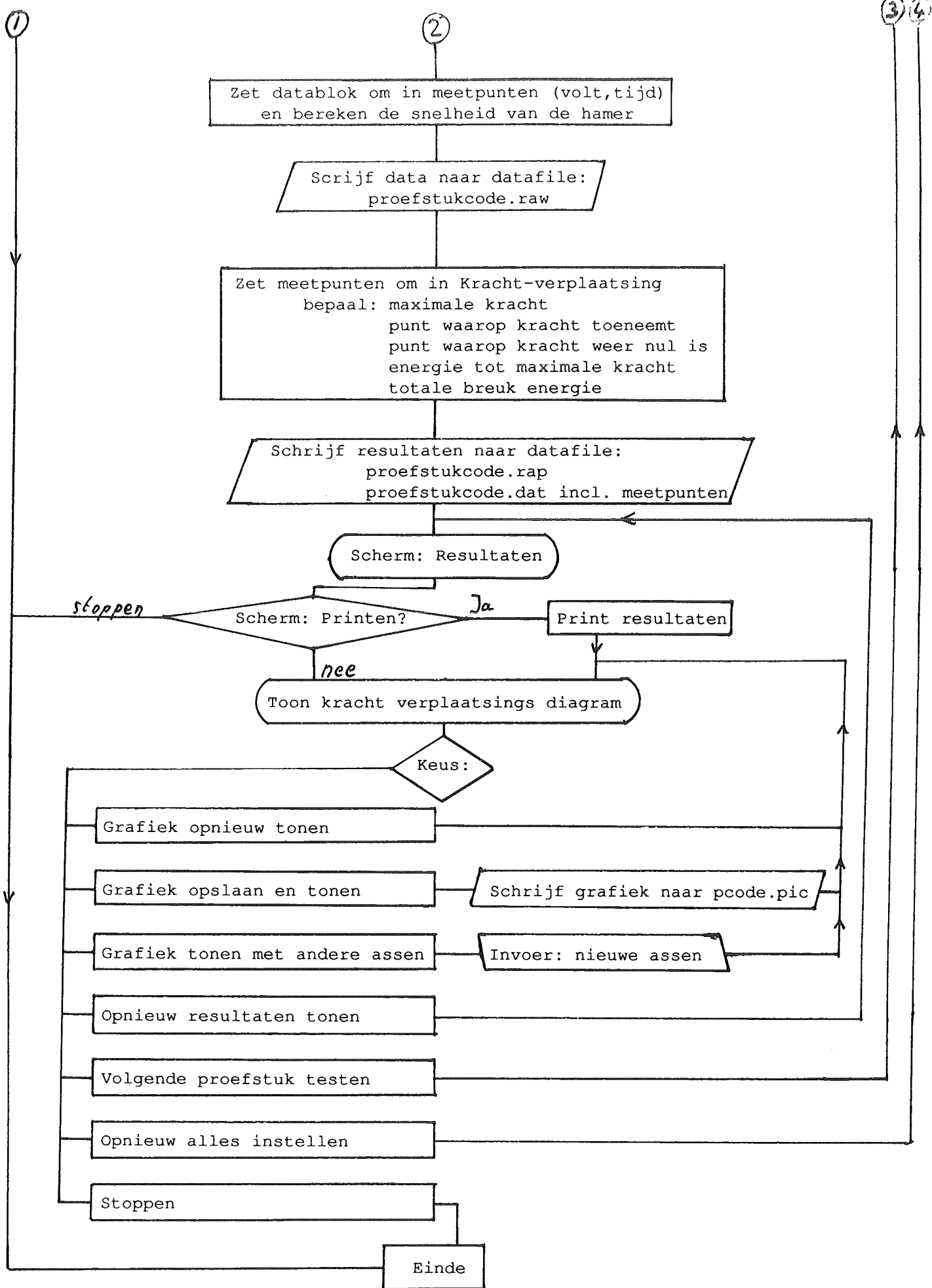
1

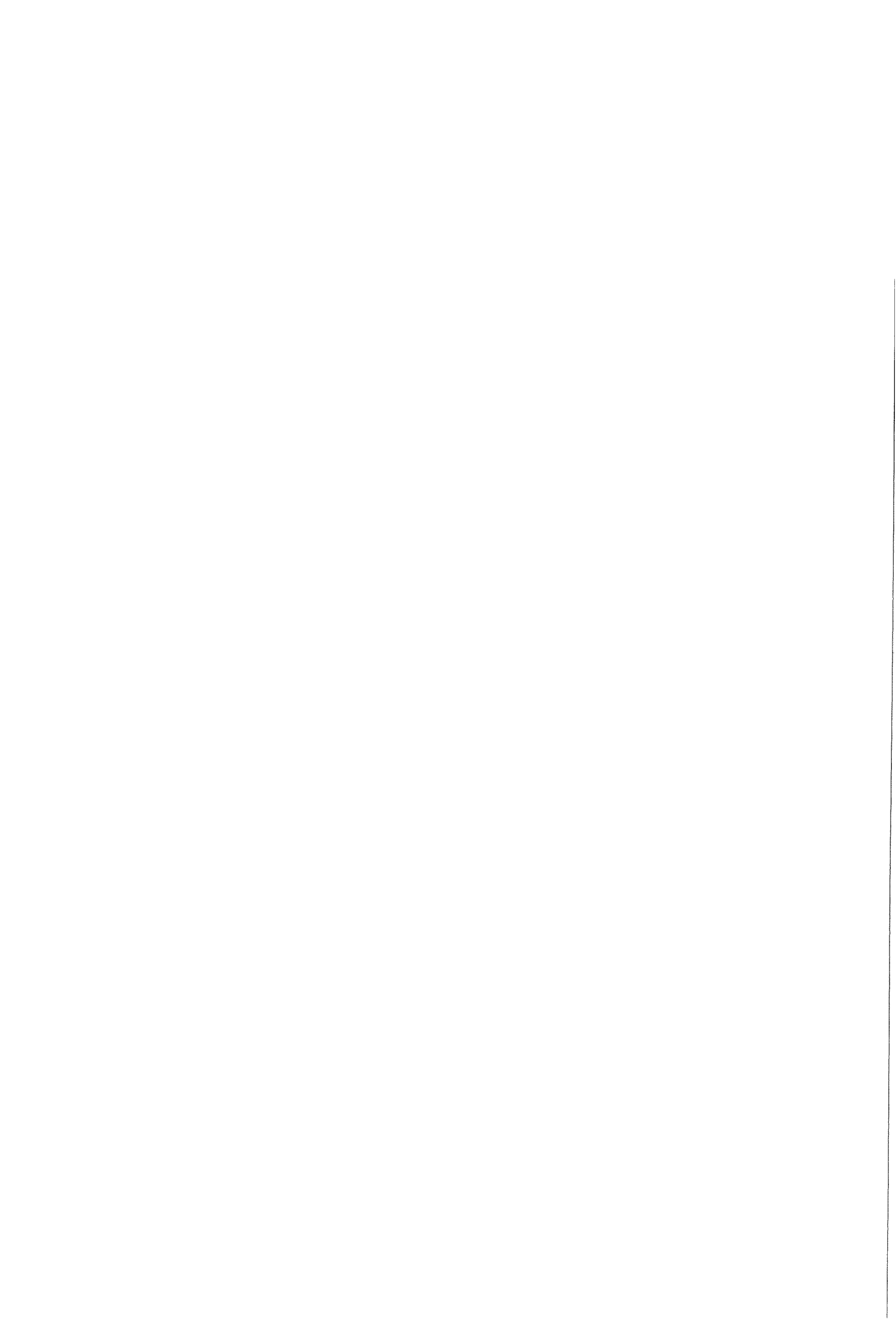
2

3

4





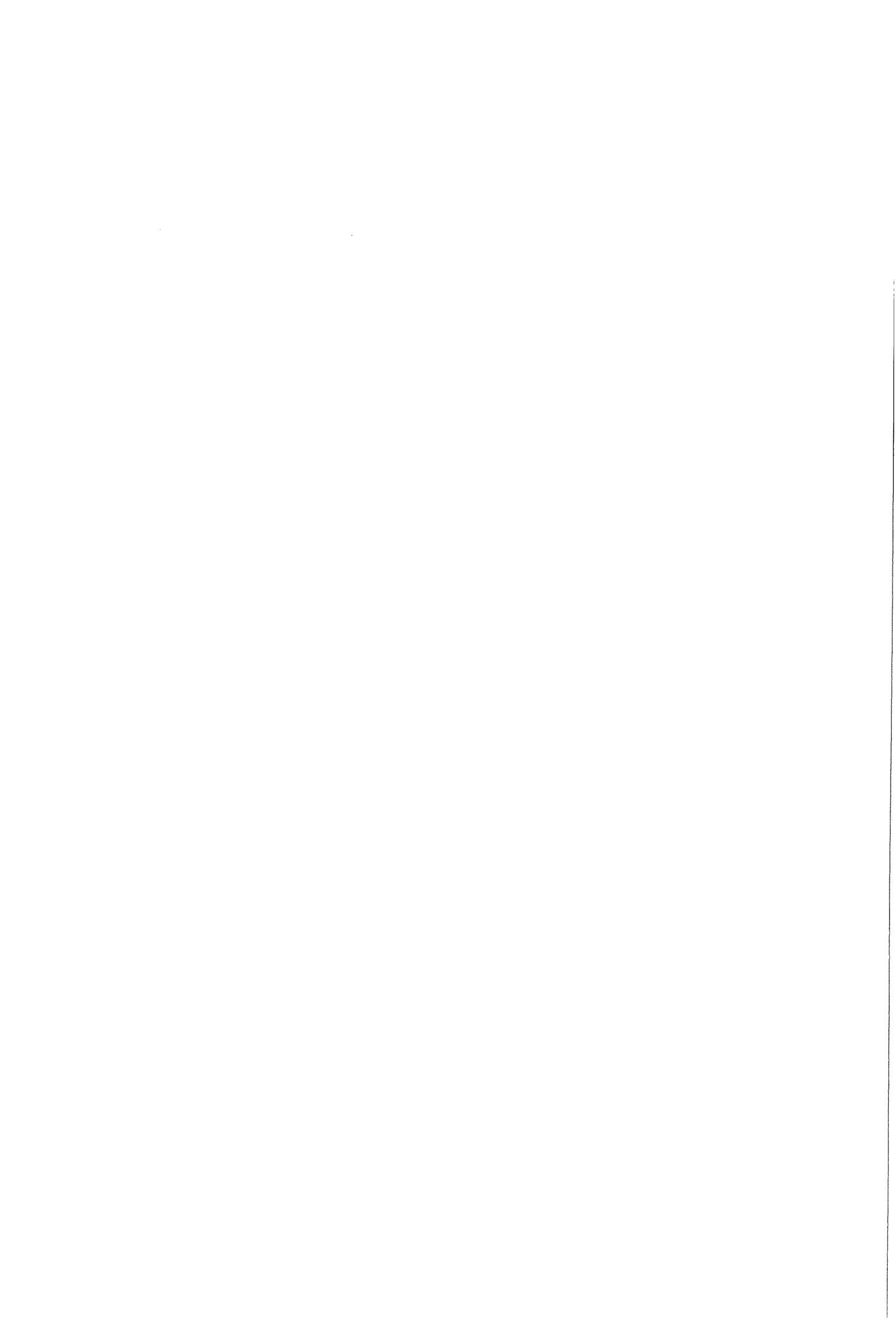


```

REM $DYNAMIC
DECLARE SUB koptekst ()
DECLARE SUB gpibwrite (DEV%, CMD$)
DECLARE SUB gpibread (DEV%, RESP$)
DECLARE SUB gpibwaitcom (DEV%, Delay%)
DECLARE SUB gpibwait (DEV%, Delay%)
DECLARE SUB keuze (count%, standaard%, row%, col%)
DECLARE SUB report (filename$)
DECLARE SUB videoopslag (filename$)
DECLARE FUNCTION exist% (filename$)
DECLARE FUNCTION pmnready% (lptn%)
REM $INCLUDE: 'deklgraf.bas'
REM $INCLUDE: 'qbdecl.bas'
REM $INCLUDE: 'qb.bi'
REM $INCLUDE: 'fontq16.bas'
DIM Inregs AS RegType, outregs AS RegType
DIM ans AS STRING * 1
DIM SHARED pcode AS STRING * 7
DIM SHARED commentaar AS STRING * 38

begin:
datum$ = MID$(DATE$, 4, 3) + MID$(DATE$, 1, 3) + MID$(DATE$, 7, 4)
vlag! = .006656 'afstand tussen de twee vlaggetjes in m
CLS
CALL clock(1, 70, 10, 1) 'zorgt voor tijd op het scherm
CALL koptekst 'laat de koptekst op het scherm zien
PRINT
PRINT " -Koppel het signaal van de lichtcel aan CH1"
PRINT " en de kracht opnemer aan CH2"
PRINT
'initialiseer de GBIB interface
' Assign a unique identifier to the gpib board (assumed to be board GPIB0)
' and store in variable BRD; check for errors
'
GPIBNAME$ = "GPIB0"
CALL IBFIND(GPIBNAME$, BRD%)
IF BRD% < 0 THEN PRINT "BAD IBFIND GPIB BOARD CALL": STOP
'
' Assign a unique identifier to device (assumed to be device DEV1) and store
' in variable SCOPE; check for errors
'
BDNAME$ = "DEV1"
CALL IBFIND(BDNAME$, scope%)
IF scope% < 0 THEN PRINT "BAD IBFIND DEVICE CALL": STOP
'
' Clear the device and check for errors
'
CALL IBSIC(scope%)
' IF IBSTA% < 0 THEN PRINT "BAD IBSIC CALL": STOP
CALL IBCLR(scope%)
IF IBSTA% < 0 THEN PRINT "BAD IBCLR CALL": STOP
CALL IBSRE(BRD%, 0)
IF IBSTA% < 0 THEN PRINT "BAD IBSRE CALL": STOP
wrt$ = "*cls"

```





```
CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
```

instellen:

' Laad de settings die met het programma TEKDIG zijn opgeslagen

' onder de naam "setting.st5"

```
PRINT " -Indien de scoop tussentijds door anderen is gebruikt moet hij"
```

```
PRINT " opnieuw ingesteld worden"
```

```
PRINT
```

```
PRINT
```

```
PRINT " -Opnieuw instellen?"
```

```
antw% = 3
```

```
CALL keuze(antw%, 2, 19, 24)
```

```
IF antw% = 3 THEN END
```

```
IF antw% = 1 THEN
```

```
LOCATE 20, 40
```

```
COLOR 16 + 15
```

```
PRINT "Wacht totdat de scoop is ingesteld"
```

```
COLOR 13
```

```
count = 0
```

```
settings$ = ""
```

```
DIM blok$(94)
```

```
OPEN "setting.st5" FOR INPUT AS #1
```

```
DO WHILE NOT EOF(1)
```

```
count = count + 1
```

```
LINE INPUT #1, blok$
```

```
CALL gpibwrite(scope%, blok$)
```

```
LOOP
```

```
CLOSE #1
```

```
LOCATE 20, 40
```

```
PRINT " "
```

```
END IF
```

```
wrt$ = "clearmenu;;header off;;measu:meas1:state off"
```

```
CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
```

' Vraag om het aantal meetpunten, gemonteerde tup, maximale kracht en breuktijd

' en bereken hieruit de range instellingen van de scoop

' en schrijf die ook naar de scoop

```
'aantal meetpunten
```

```
PRINT
```

```
PRINT
```

```
PRINT " -Kies het aantal meetpunten"
```

```
keus$(1) = " 500"
```

```
keus$(2) = "1000"
```

```
keus$(3) = "2500"
```

```
keus$(4) = "5000"
```

```
antw% = 4
```

```
CALL amenu(BYVAL VARPTR(keus$(1)), 3, antw%, scancode%, 23, 112, 4, 1, 1, 21, 33)
```

```
IF antw% = 1 THEN r1% = 500
```

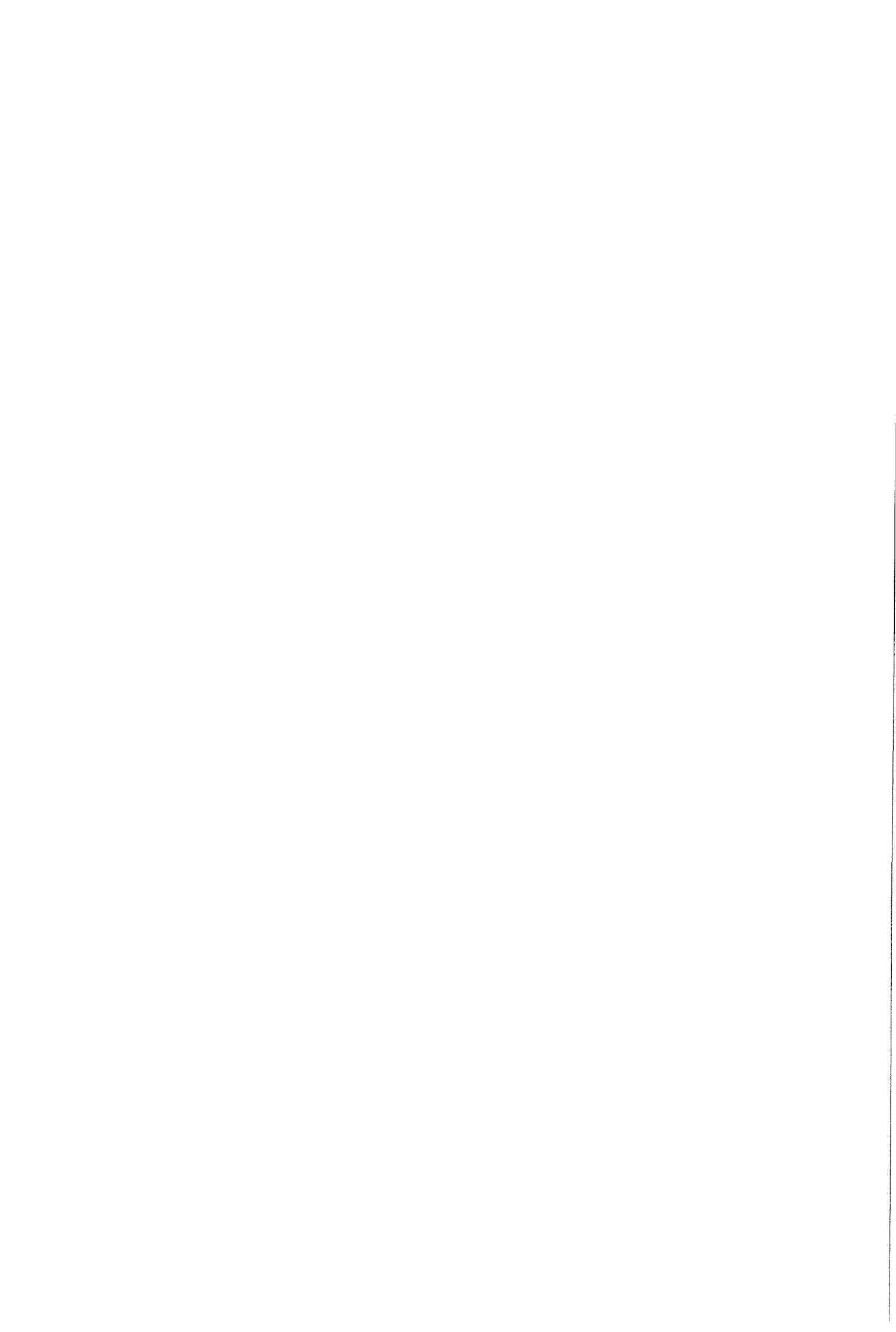
```
IF antw% = 2 THEN r1% = 1000
```

```
IF antw% = 3 THEN r1% = 2500
```

```
IF antw% = 4 THEN r1% = 5000
```

```
wrt$ = "HORIZONTAL:RECORDLENGTH " + STR$(r1%)
```

```
CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
```



```

'Verticale range instelling
CLS
koptekst
PRINT " -Welke tup is er gemonteerd?"
keus1$(1) = "45 KN tup"
keus1$(2) = "15 KN tup"
antw% = 2
CALL amenu(BYVAL VARPTR(keus1$(1)), 2, antw%, scancode%, 23, 112, 2, 1, 1, 12, 35)
IF antw% = 1 THEN calf! = 93704 'in N/volts bij input van 5.5V
IF antw% = 2 THEN calf! = 28305
PRINT
PRINT
INPUT " -Geef de verwachte maximale kracht (1000) [N]"; maxf%
IF maxf% = 0 THEN maxf% = 1000
maxv! = maxf% / calf!
range! = 1.2 * maxv! / 8
wrt$ = "CH2:VOLTS " + STR$(range!)
CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
wrt$ = "CH2:VOLTS?"
CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
rd$ = SPACE$(10)
CALL gpibread(scope%, rd$)
PRINT " De ingestelde range in V/div is: "; rd$

```

```

'Horizontale range instelling
INPUT " -Geef de verwachte breuktijd in milli seconde (10)"; btijd%
IF btijd% = 0 THEN btijd% = 10
apunt! = 500
adiv! = 10
tijd! = btijd% / (adiv! * r1% / apunt!) ' 10 aantal divisions
'500 aantal punten op scherm
tijd! = tijd! / 1000
wrt$ = "HOR:MAI:SCA " + STR$(tijd!)
CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
wrt$ = "HOR:MAI:SCA?"
CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
rd$ = SPACE$(10)
CALL gpibread(scope%, rd$)
rangeh! = VAL(rd$)
PRINT " De ingestelde tijd range in s/div is: "; rd$
LOCATE 20
PRINT " De opname tijd is: "; rangeh! * 100 * r1% / 5; " ms"
PRINT

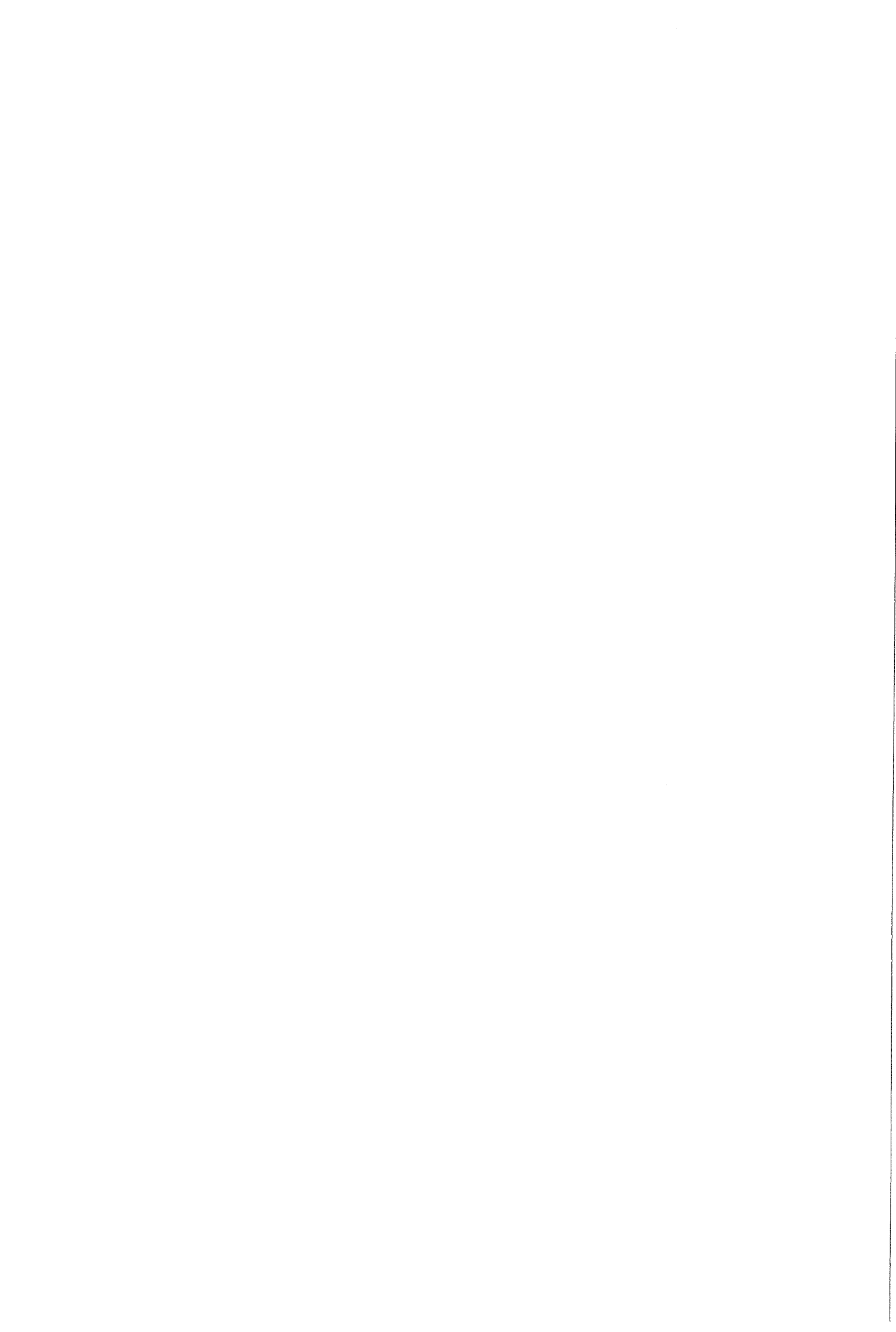
```

' Zet de scoop op run en forceer een trigger zodat de signalen worden  
' weergegeven.

```

wrt$ = "acq:state on;;trigger force"
CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
CALL gpibwaitcom(scope%, 14)
PRINT " -Zijn deze instellingen gewenst?"
antw% = 3
CALL keuze(antw%, 1, 21, 37)
IF antw% = 2 THEN
    CLS

```



```

                koptekst
                PRINT
                PRINT
                PRINT
                PRINT
                GOTO instellen
    END IF
    IF antw% = 3 THEN END
    CLS
    koptekst
' Vraag of de instellingen kloppen en geef de mogelijkheid deze te veranderen
    PRINT " -De verticale positie van het krachtsignaal moet nu zo"
    PRINT " geplaatst worden dat het onderin het beeld van de scoop komt"
    PRINT " Draai aan 'VERTICAL POSITION' totdat het signaal goed staat"
    PRINT " en druk op een toets"
' Forceer steeds een trigger zodat het effect van het
' instellen zichtbaar wordt
    wrt$ = "select:control ch2"
    CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
    wrt$ = "acq:state on"
    CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
    wrt$ = "acq:stopa runst"
    CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
    DO
        CALL gpibwrite(scope%, "trigger force")
        CALL gpibwaitcom(scope%, 14)
        key$ = INKEY$
    LOOP WHILE key$ = ""
    wrt$ = "acq:stopa seq"
    CALL gpibwrite(scope%, wrt$)

```

CLS

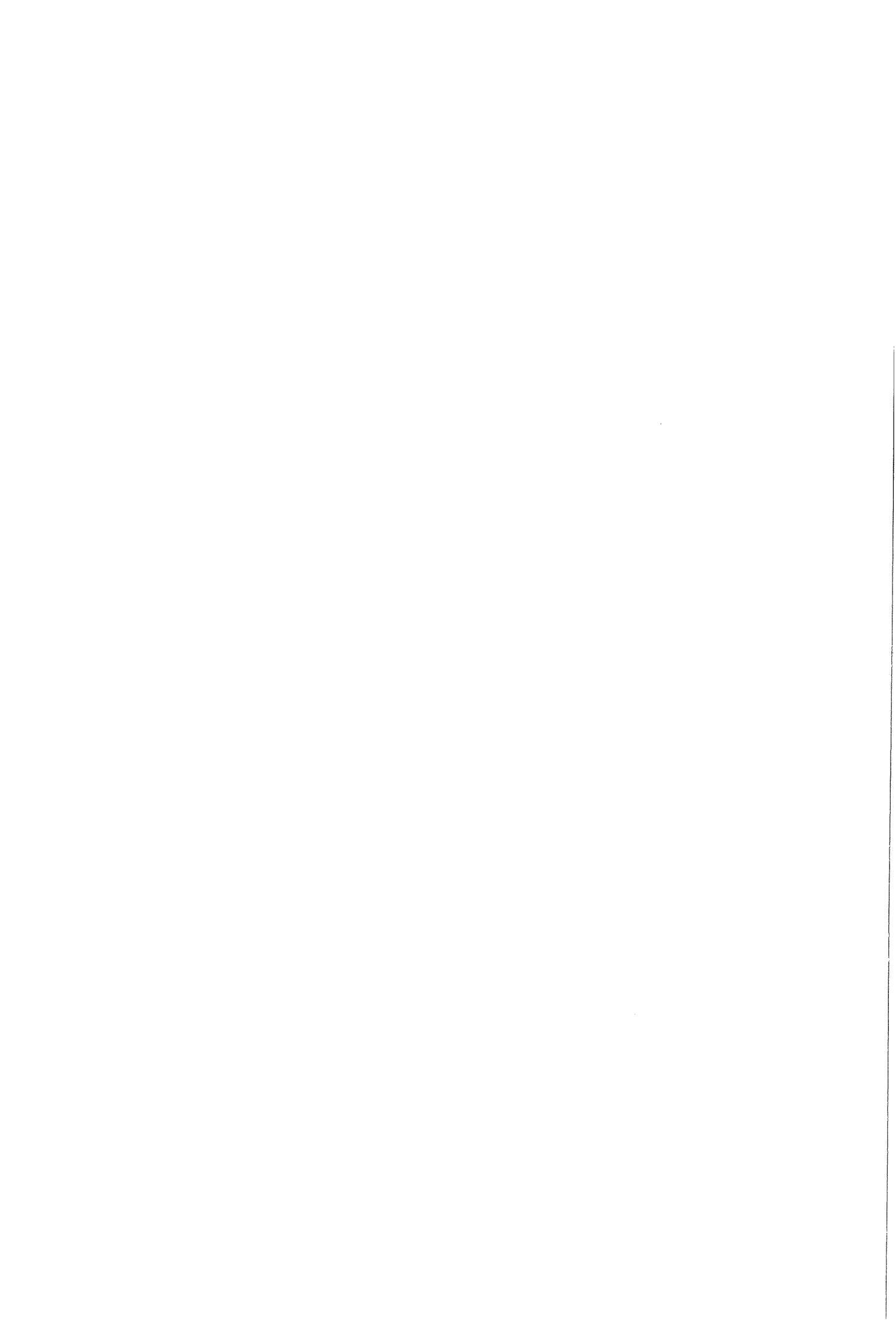
proef:

'Vraag om proestuk code en commentaar en stel de scoop in zodat hij getriggerd wordt

```

    koptekst
    pcode = "    "
    INPUT " -Geef de proefstuk code (max 7 tekens)"; pcode
    filename$ = pcode + ".*"
    IF pcode = "    " THEN
        PRINT "    "
        BEEP
        PRINT " Geen geldige code "
        LOCATE 1, 1
        GOTO proef
    END IF
    IF exist%(filename$) = -1 THEN
        BEEP
        PRINT
        PRINT "    "
        PRINT " Code is al in gebruik, Overschrijven?"
        antw% = 3
        CALL keuze(antw%, 2, 14, 43)
        IF antw% = 3 THEN END
        IF antw% = 2 THEN CLS : GOTO proef
    END IF

```



```

PRINT
PRINT
INPUT " -Commentaar (max 38 tekens)"; commentaar
CLS
koptekst
PRINT " Proefstukcode: "; pcode
PRINT " "; commentaar
PRINT
PRINT " -Leg het proefstuk op zijn plaats en plaats de hamer op de goede hoogte"
PRINT
INPUT " -Druk op [enter] als de test kan beginnen", klaar
BEEP
PRINT
COLOR 16 + 15
PRINT " -De scoop zal zodra de vlag door de meetcel gaat de signalen opnemen"
COLOR 13
wrt$ = "acq:state on"
CALL gpibwrite(scope%, wrt$)

'Wacht totdat de scoop het kracht tijd signaal heeft opgenomen
wrt$ = "acq:state?"
DO
    CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
    rd$ = SPACE$(1)
    CALL gpibread(scope%, rd$)
LOOP UNTIL rd$ = "0"

```

opslaan:

```

'De data wordt uit de scoop gelezen en op harddisk opgeslagen
CLS
koptekst
PRINT " Proefstukcode: "; pcode
PRINT " "; commentaar
PRINT
PRINT " -De scoop heeft een signaal opgenomen"
PRINT
PRINT " Moet het opgenomen signaal worden opgeslagen?"
antw% = 3
CALL keuze(antw%, 1, 16, 50)
IF antw% = 2 OR antw% = 3 THEN
    BEEP
    PRINT
    PRINT
    INPUT " Zeker weten? (J/N): ", ans
    ans = UCASE$(ans)
    IF ans <> "J" THEN GOTO opslaan
    IF antw% = 3 THEN END
    IF antw% = 2 THEN CLS : GOTO proef
END IF
LOCATE 20
COLOR 16 + 13 'vet + knipperen
PRINT " De data wordt wordt opgeslagen en verwerkt"
COLOR 13
' Zet data kanaal op 2 (kracht signaal)
DATSRC$ = "CH2"

```





```

wrt$ = "DATA:SOURCE " + DATSRCS$
CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
'
' Zet het data formaat op 2 bytes per meet punt (WID 2)
' en zet het minst significante byte eerst (SRI)
'
CALL gpibwrite(scope%, "DATA:ENCDG SRI;WID 2")
'
' Set up the recordlength, and the data start and data stop positions.
'
scoopread:
DSTART% = 1
DSTOP% = r1%
wfpoints% = DSTOP% - DSTART% + 1
wrt$ = "DATA:START " + STR$(DSTART%)
CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
wrt$ = "DATA:STOP " + STR$(DSTOP%)
CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
wrt$ = "HEADER OFF"
CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
' Send the scope a curve query to get waveform data.
'
CALL gpibwrite(scope%, "CURVE?")
' Read waveform data.
'
' The waveform is formatted as #<x><yyy><data><newline> where
' <x> is the number of y bytes; for example if yyy = 500, then
'   x = 3
' <yyy> is the number of bytes to transfer including checksum;
'   if width is 1 then all bytes on bus are single data
'   points; if width is 2 then bytes on bus are
'   2-byte pairs; this program uses width of 1
' <data> is the curve data
' <newline> is a single byte newline character at the end of the data
'
rlpream$ = SPACE$(LEN(STR$(wfpoints% * 2)) + 1)      'Haal de eerste regel
CALL gpibread(scope%, rlpream$)                    'van het data blok
'
PRINT rlpream$
empty$ = SPACE$(LEN(STR$(wfpoints% * 2)) + 1)
IF rlpream$ = empty$ THEN GOTO scoopread
IF rlpream$ = "" THEN GOTO scoopread
' Zet data blok om in een reeks getallen
' Dimension the array. There are two data points stored in each array element.
' The first data point is stored in the low byte and the second data point is
' stored in the high byte. The array dimension is one-half the number of
' waveform points plus one additional element. This last element is used for
' the termination character and, optionally, a data point if the waveform
' contains an odd number of points.
'
DIM IARR%(wfpoints% - 1)
CURBYTES% = 2 * (wfpoints%) ' set up the number of bytes to read
' Read in the waveform data
CALL IBRDI(scope%, IARR%(), CURBYTES%)

```



```

IF IBSTA% < 0 THEN PRINT "BAD CURVE DATA REQUEST": STOP
MASK% = &H100
CALL IBWAIT(scope%, MASK%)
IF IBSTA% < 0 THEN PRINT "BAD CURVE DATA READ": STOP
'
rd$ = SPACE$(20)      'Haal de eventueel nog achtergebleven bytes
CALL gpibread(scope%, rd$)  'uit de scoop
' Transfer data to another array that will have one data element per data
' point to make data manipulation easier. The low byte, high byte swapping
' and sign extension of the storage mechanism is also handled.
'
' Check to see if the number of bytes in the waveform is even or odd to
' determine how the last data point and newline character are stored.
' The data is also written to a file called "WFM".
'
' Reset de ch1 period meting
wrt$ = "measu:meas1:state 0"
CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
wrt$ = "measu:meas1:state 1"
CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
CALL gpibwaitcom(scope%, 14)
' Read the waveform preamble.
' Get the vertical offset and scale multiplier,
' the trigger point, the horizontal sampling interval
' and the horizontal units to convert the data points to
' time and voltage values.
'

```

```

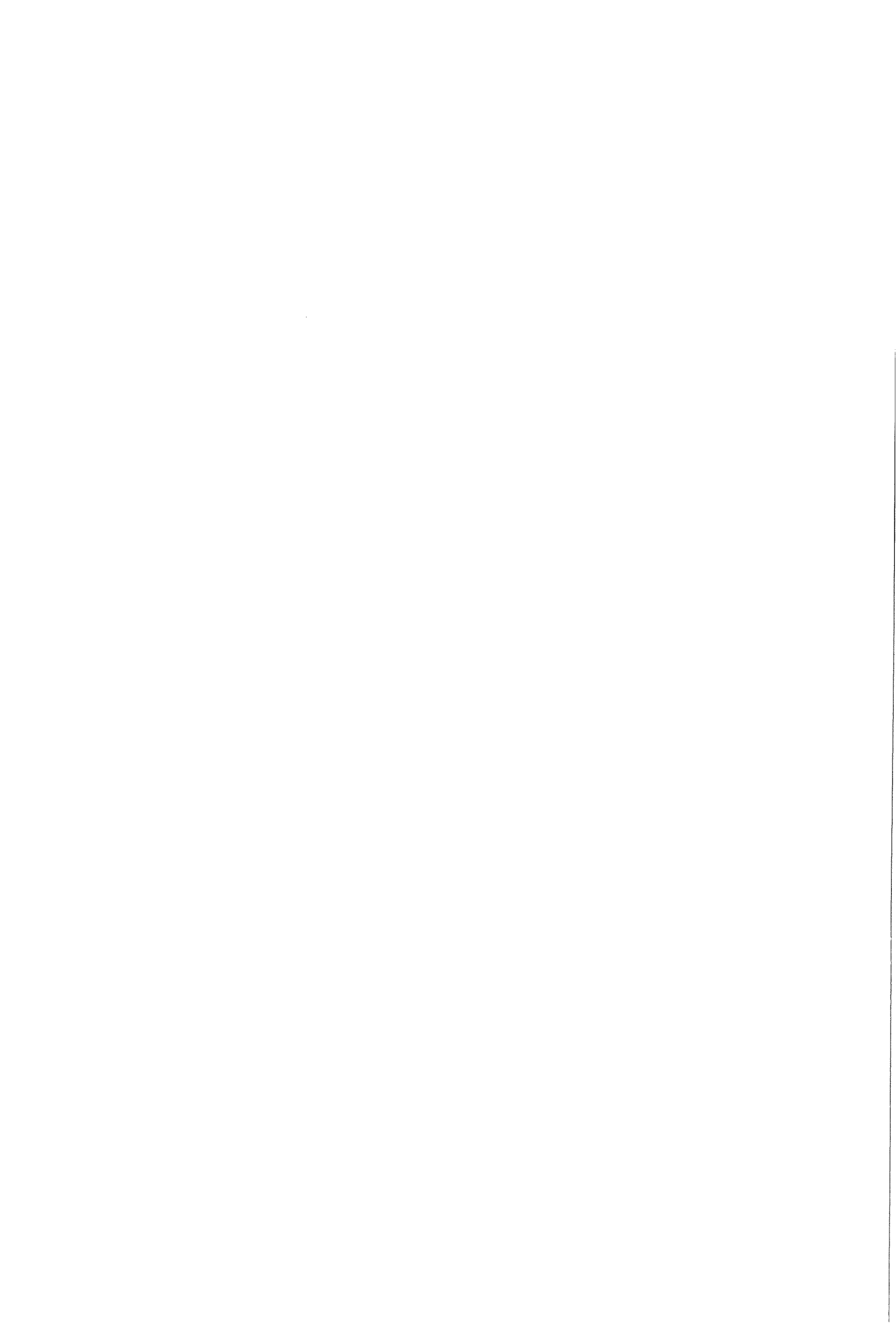
'Lees het assenstelsel van de scoop in
wrt$ = "WFMPRE:" + DATSRCS$ + ":YOFF?"
CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
rd$ = SPACE$(20)
CALL gpibread(scope%, rd$)
YOFF! = VAL(rd$)
wrt$ = "WFMPRE:" + DATSRCS$ + ":YMULT?"
CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
rd$ = SPACE$(20)
CALL gpibread(scope%, rd$)
YMULT! = VAL(rd$)
wrt$ = "WFMPRE:" + DATSRCS$ + ":PT_Off?"
CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
rd$ = SPACE$(20)
CALL gpibread(scope%, rd$)
PtOff! = VAL(rd$)
wrt$ = "WFMPRE:" + DATSRCS$ + ":XINCR?"
CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
rd$ = SPACE$(20)
CALL gpibread(scope%, rd$)
xincr# = VAL(rd$)

```

```

'Lees de vlagtijd
wrt$ = "measu:meas1:val?"
CALL gpibwrite(scope%, wrt$)
rd$ = SPACE$(20)
CALL gpibread(scope%, rd$)

```



```

CALL gpibwaitcom(scope%, 14)
vlagtijd! = VAL(rd$)
snelheidb# = vlag! / vlagtijd!
filename$ = pcode + ".raw"
OPEN filename$ FOR OUTPUT AS #2
DIM h AS STRING * 1
h = CHR$(34)
PRINT #2, h; commentaar; h
PRINT #2, calf!; ","; h; "calibratiefactor"; h
PRINT #2, vlagtijd!; ","; h; "vlagtijd"; h
PRINT #2, snelheidb#; ","; h; "valsnelheid"; h
PRINT #2, wfpoints%; ","; h; "aantal punten"; h
PRINT #2, xincr#; ","; h; "delta t"; h
PRINT #2, h; "tijd in s", "Spanning in V"; h
DIM tijd!(wfpoints%)
DIM volt!(wfpoints%)
FOR i% = 0 TO wfpoints% - 1
    tijd!(i%) = i% * xincr#
    volt!(i%) = (IARR%(i%) - YOFF!) * YMULT!
PRINT #2, USING "##.###^" ; tijd!(i%);
PRINT #2, ",",
PRINT #2, USING "##.#####^" ; volt!(i%)
NEXT i%
CLOSE #2
ERASE IARR%, tijd!

```

'Bepaal volt offset uit metingen 2-22

```

voltsom! = 0
FOR teller = 2 TO 21
    voltsom! = voltsom! + volt!(teller)
NEXT teller
voltoffset! = voltsom! / 20
DIM kracht!(wfpoints%)
ruis! = .0001 * calf! 'Hoog frequent storing van computer en scoop
ruisamp! = .0002 * calf! '50 Hz brom
ruispiek! = .0004 * calf! 'storing in de voeding

```

'Reken volts om in kracht en bepaal maximale kracht

```

maxkracht! = 0
FOR i% = 0 TO wfpoints% - 1
    kracht!(i%) = (volt!(i%) - voltoffset!) * calf!
    IF kracht!(i%) > maxkracht! THEN maxkracht! = kracht!(i%); maxi% = i%
NEXT i%
ERASE volt!

```

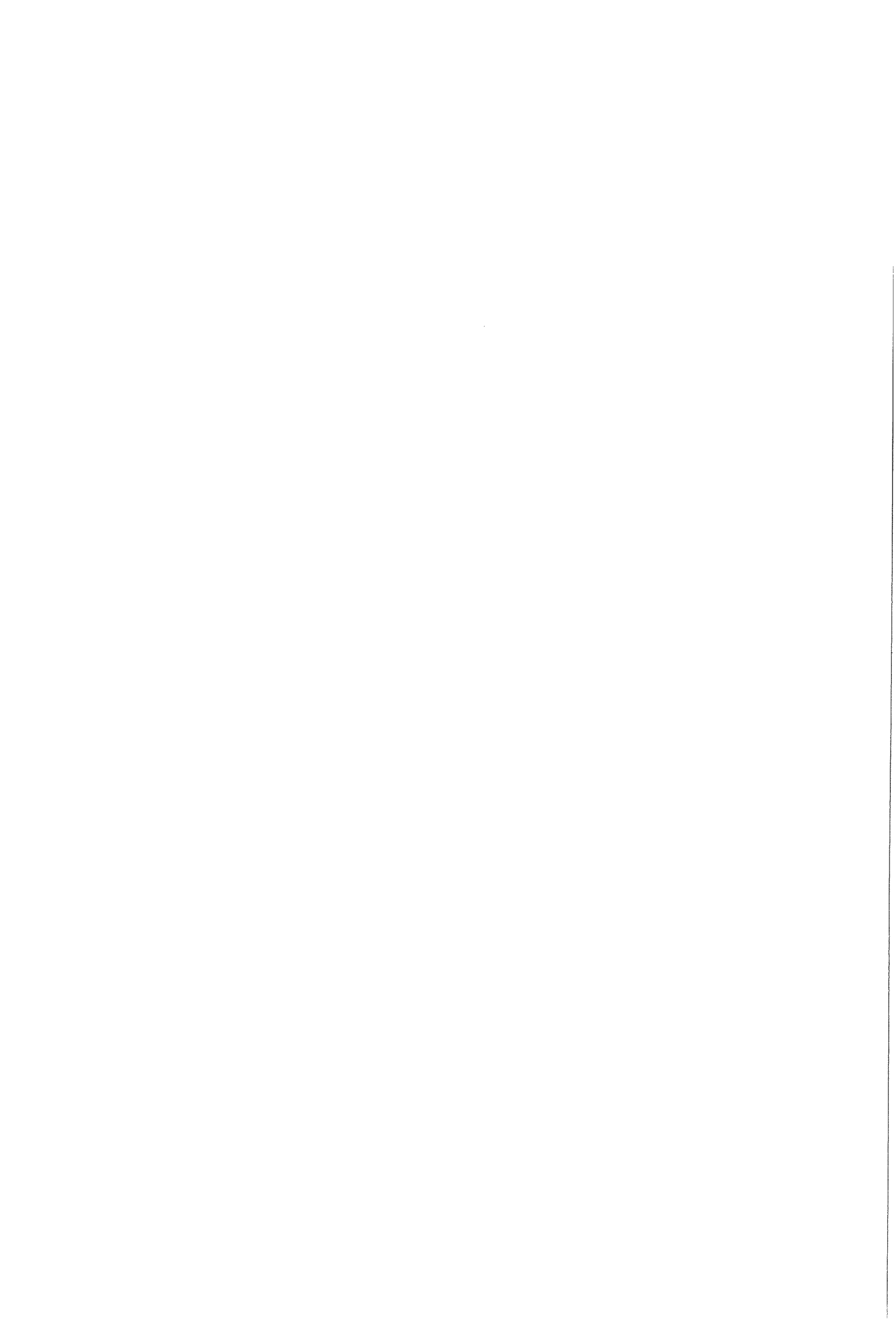
'Bepaal punt waarop kracht begint toe te nemen met behulp van het verschuivende gemiddelde

```

somkracht! = 0
FOR i% = 20 TO 29
    somkracht! = somkracht! + kracht!(i%)
NEXT i%
FOR i% = 20 TO maxi% - 10
    somkracht! = somkracht! - kracht!(i%) + kracht!(i% + 10)
    gemkracht! = somkracht! / 10
    IF gemkracht! < ruisamp! THEN nuli% = i% + 5
    IF gemkracht! > 2 * ruispiek! THEN EXIT FOR
NEXT i%

```

'Bepaal punt waarop het kracht signaal nul blijft



```

FOR i% = maxi% TO wfpoints% - 1
    IF kracht!(i%) >= ruisamp! THEN
        eindi% = i%:
        ELSE EXIT FOR
    END IF
NEXT i%
'Berken met integratie met trapezium regel de energie en verplaatsing
DIM verpl#(wfpoints%)
gewicht = 70.3 'kg
verpl#(0) = 0
energie# = 0
energiel# = 0
snelheid# = snelheidb#
FOR i% = nuli% + 1 TO wfpoints% - 1
    snelheid# = snelheid# + (9.81 - ((kracht!(i%) + kracht!(i% - 1)) / (2 * gewicht))) *
                                                xincr#

    IF i% = maxi% THEN snelhmax! = snelheid#
    deltax# = xincr# * snelheid#
    verpl#(i%) = verpl#(i% - 1) + 1000 * deltax#
    IF i% <= maxi% THEN
        energie# = energie# + (kracht!(i% - 1) + kracht!(i%)) * deltax# * .5
    ELSE IF i% < eindi% THEN energiel# = energiel# + (kracht!(i% - 1) + kracht!(i%)) *
                                                deltax# * .5
    END IF
    IF i% = maxi% THEN energiel# = energie#
NEXT i%
'Maak datafile met gegevens proefstuk, breukenergie + diversen
filename$ = pcode + ".dat"
CALL report(filename$) 'data punten worden ook weggeschreven
filename$ = pcode + ".rap"
CALL report(filename$) 'zonder data punten
'Laat resultaten op het scherm zien
reports:
CLS
PRINT "RESULTATEN VAN VALPROEF"
PRINT
CALL report("SCRN:")
LOCATE 23
PRINT " -Moeten deze gegevens geprint worden?"
antw% = 3
CALL keuze(antw%, 1, 22, 45)
IF antw% = 1 THEN
    IF NOT (prnready(1)) THEN
        BEEP
        PRINT
        PRINT " Zet de printer aan en druk op een toets"
        WHILE INKEY$ = "": WEND
        GOTO reports
    END IF
    CALL report("LPT1:")
END IF
'Laat kracht-verplaatsings diagram op het scherm zien
'Staandaard indeling van de assen
x1# = 0

```





```

y1# = 0
x2# = 10
y2# = maxf%
nx% = 1
ny% = 1
zx# = 10
zy# = 10
grafisch:
CALL clock(1, 70, 10, 0) 'zorgt dat de klok wordt uitgezet
CALL scherm(x3%, y3%, x4%, y4%)
LINE (0, 0)-(640, 400), 0, BF 'veeg het scherm schoon
x$ = "Verplaatsing [mm]"
y$ = "Kracht N"
CALL tekraster(x1#, x2#, y1#, y2#, zx#, zy#)
PSET (75, 340)
FOR i% = nuli% TO wfpoints% - 1
    x# = verpl#(i%)
    y# = kracht!(i%)
    CALL puntlijn(x#, y#)
NEXT i%
LOCATE 1, 2
PRINT "Proefstuk: "; pcode; " v"; FIX(snelheidb# * 10) / 10; "m/s";
PRINT " -Fmax"; FIX(maxkracht!); "N"; " -U(m)"; FIX(energie# * 1000) / 1000; " -U(T)";
FIX(energie# * 1000) / 1000; " J"
IF save$ = "ja" THEN
    filename$ = pcode + "pic"
    CALL videoopslag(filename$)
    save$ = "nee"
END IF
WHILE INKEY$ = "": WEND 'wacht tot een toets wordt ingedrukt

SCREEN 0
CLS
CALL clock(1, 70, 10, 1)
CALL koptekst
keus$(1) = "Grafiek opnieuw tonen met de zelfde assen"
keus$(2) = "Grafiek opnieuw tonen en wegschrijven "
keus$(3) = "Grafiek opnieuw tonen met andere assen "
keus$(4) = "Ga terug naar rapport "
keus$(5) = "Volgende proef "
keus$(6) = "Stoppen "
keus$(7) = "Opnieuw alles instellen "
keus$(8) = "Opnieuw data uit de scoop lezen "
PRINT
PRINT
PRINT " -Maak uw keus uit:"
antw% = 8
CALL amenu(BYVAL VARPTR(keus$(1)), 1, antw%, scancode%, 10, 112, 8, 1, 2, 12, 34)
IF antw% = 1 THEN GOTO grafisch
IF antw% = 2 THEN save$ = "ja": GOTO grafisch
IF antw% = 3 THEN
    PRINT
    INPUT "Beginwaarde x-as ", x1#
    INPUT "Eindwaarde x-as ", x2#

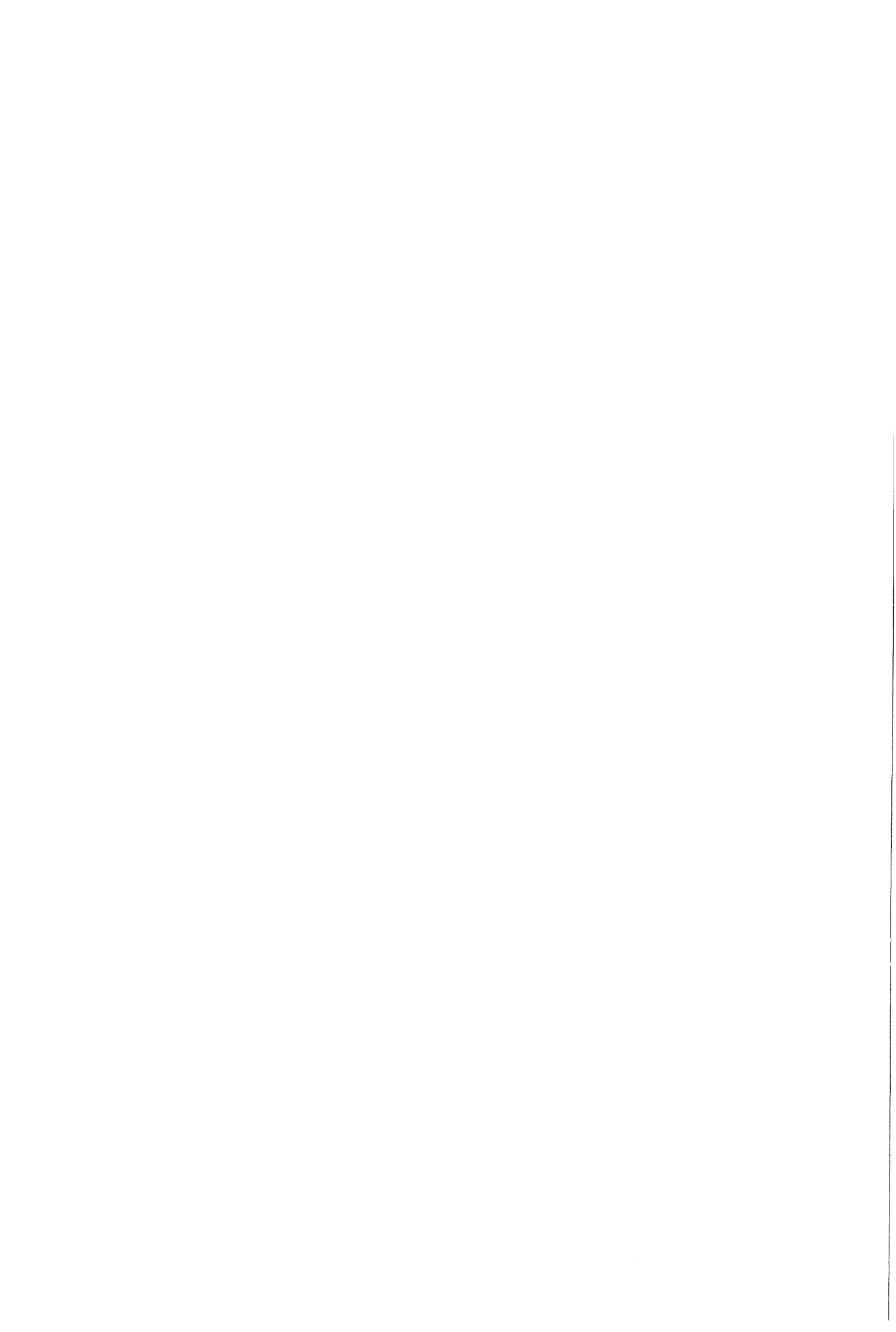
```



```

INPUT "Aantal cijfers achter de komma ", nx%
INPUT "Aantal gridlijnen ", zx#
IF zx# = 0 THEN zx# = 1
INPUT "Beginwaarde y-as ", y1#
INPUT "Eindwaarde y-as ", y2#
INPUT "Aantal cijfers achter de komma ", ny%
INPUT "Aantal gridlijnen ", zy#
IF zy# = 0 THEN zy# = 1
IF x2# = x1# THEN x1# = 0: x2# = 10
IF y2# = y1# THEN y1# = 0: y2# = 1000
GOTO grafisch
END IF
IF antw% = 4 THEN GOTO reports
IF antw% = 5 THEN
    ERASE kracht!, verpl#
    CLS
    GOTO proef
END IF
CLS
CALL clock(1, 70, 10, 0)
ERASE kracht!, verpl#
IF antw% = 7 THEN GOTO begin
IF antw% = 8 THEN GOTO scoopread
PRINT "Tot ziens!"
CLEAR
END

```



### BIJLAGE 3 FORMULES VOOR BEREKENING f(a/W) EN $\phi$

Single Edge Notched Bend Specimen ( $0 < a/w < 1$ )

$$f = 6\alpha^{\frac{1}{2}} \frac{[1.99 - \alpha(1 - \alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)]}{(1 + 2\alpha)(1 - \alpha)^{\frac{1}{2}}}$$

$$\phi = \frac{A + 18.64}{dA/d\alpha}$$

$$A = \frac{16\alpha^2}{(1 - \alpha)^2} [8.9 - 33.717\alpha + 79.616\alpha^2 - 112.952\alpha^3 + 84.815\alpha^4 - 25.672\alpha^5]$$

$$dA/d\alpha = \frac{16\alpha^2}{(1 - \alpha)^2} [-33.717 + 159.232\alpha - 338.856\alpha^2 + 339.26\alpha^3 - 128.36\alpha^4] +$$

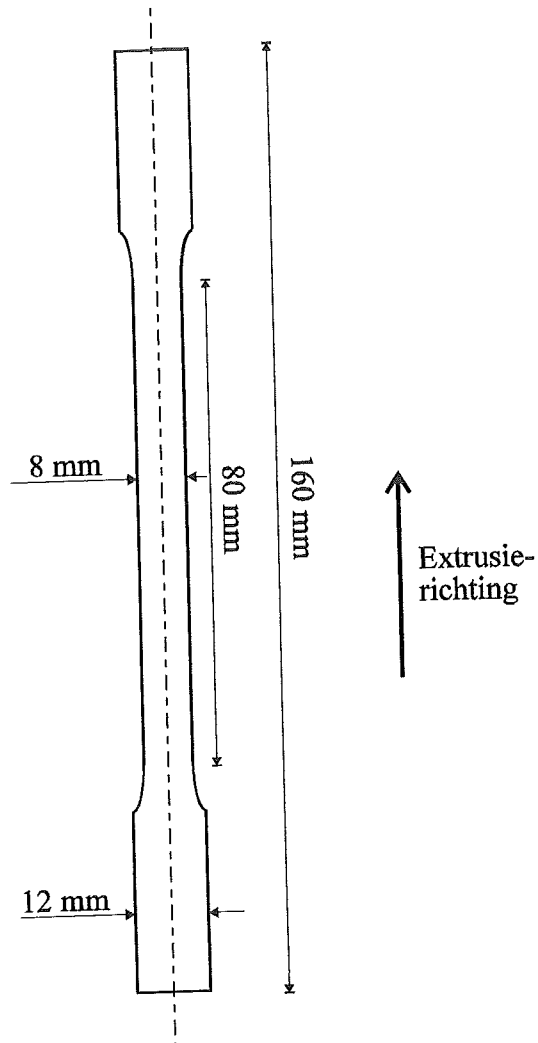
$$16[8.9 - 33.717\alpha + 79.616\alpha^2 - 112.952\alpha^3 + 84.815\alpha^4 - 25.672\alpha^5] \left[ \frac{2\alpha(1 - \alpha) + 2\alpha^2}{(1 - \alpha)^3} \right]$$



## BIJLAGE 4 GEGEVENS EN RESULTATEN VAN DE TREKPROEVEN

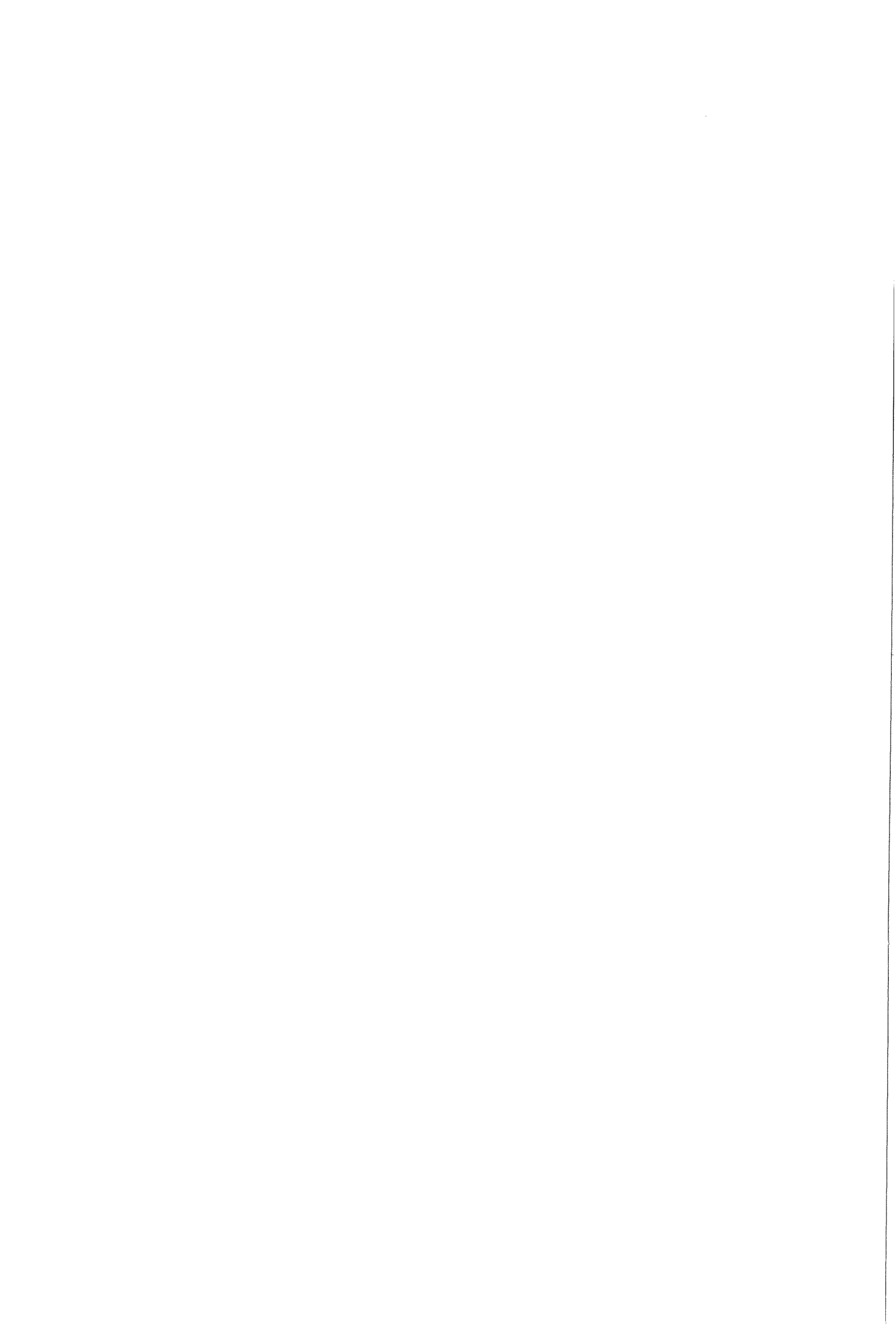
Gebruikte trekbank: Instron 4500 met 10 kN krachtopnemer

Afmetingen proefstaaf:



Resultaten:

Snelheid [mm/min]	Vloei <span>spanning</span> [MPa]
1000	28.6, 28,4
500	28.4, 27.7
100	26.4, 26.4
10	23.0, 23.2





**BIILAGE 5 FOTO'S VAN DE BREUKOPPERVLAKKEN**



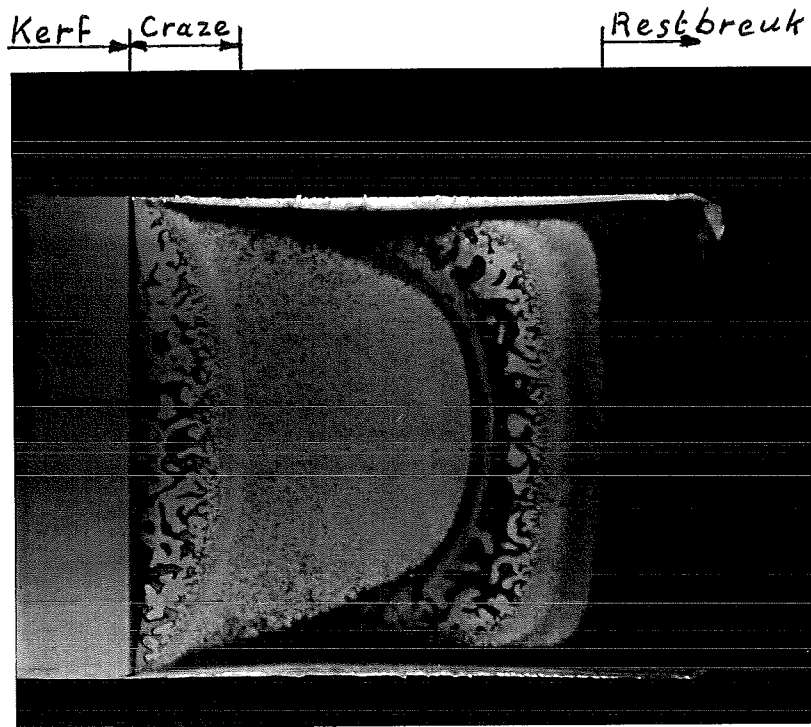


Foto 1: 6.3x Lichtmicroscop  
Overzicht van het breukoppervlak van een proefstuk zonder zijgroeven.  
Links: einde van de kerf. Rechts: taaie restbreuk.

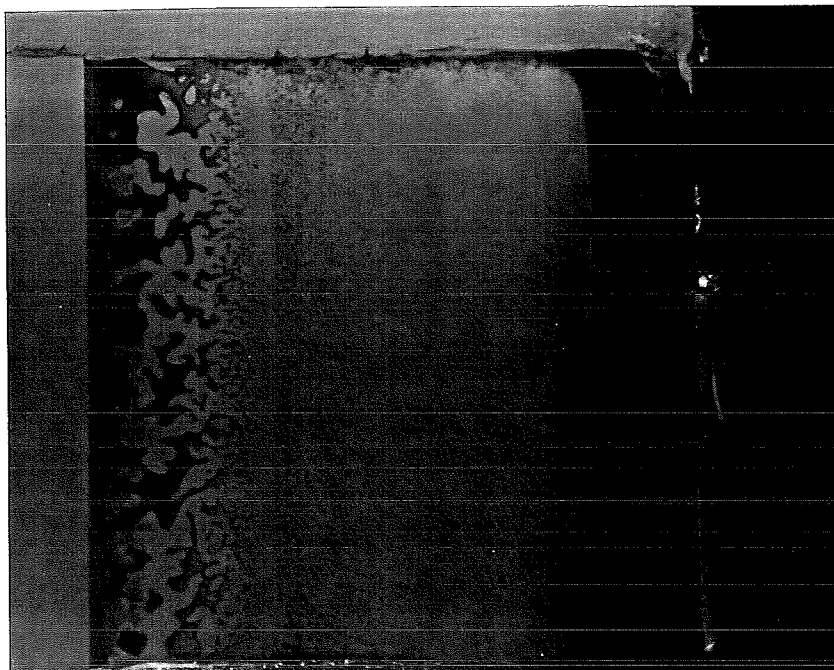


Foto 2: 10x Lichtmicroscop  
Overzicht van het breukoppervlak van een proefstuk met zijgroeven.



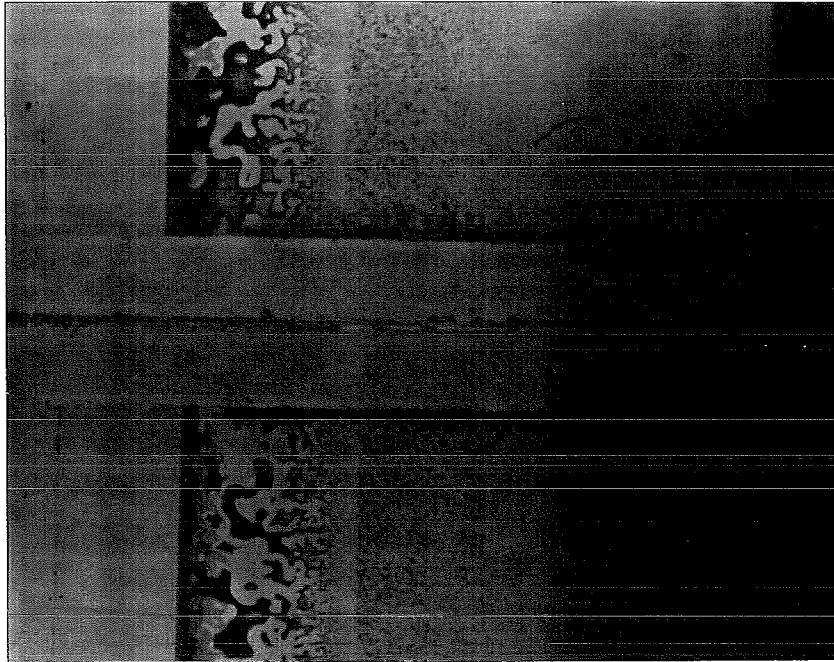


Foto 3: 10x Lichtmicroscop  
 Overzicht van de twee breukoppervlakken van een proefstuk met zijgroeven. De schollenstructuur van de twee helften passen in elkaar.

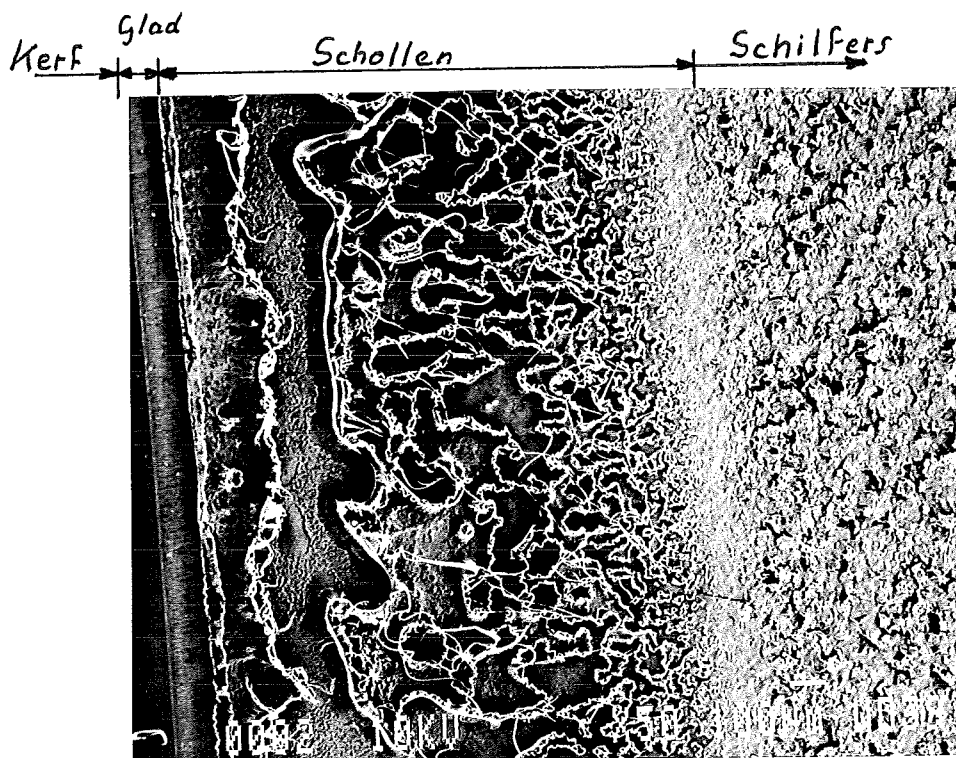


Foto 4: 50x SEM  
 Overzicht van de craze zone. Geheel links einde van de kerf, daarna een smalle gladde zone gevolgd door een zone met schollen en rechts een schilferachtige zone.



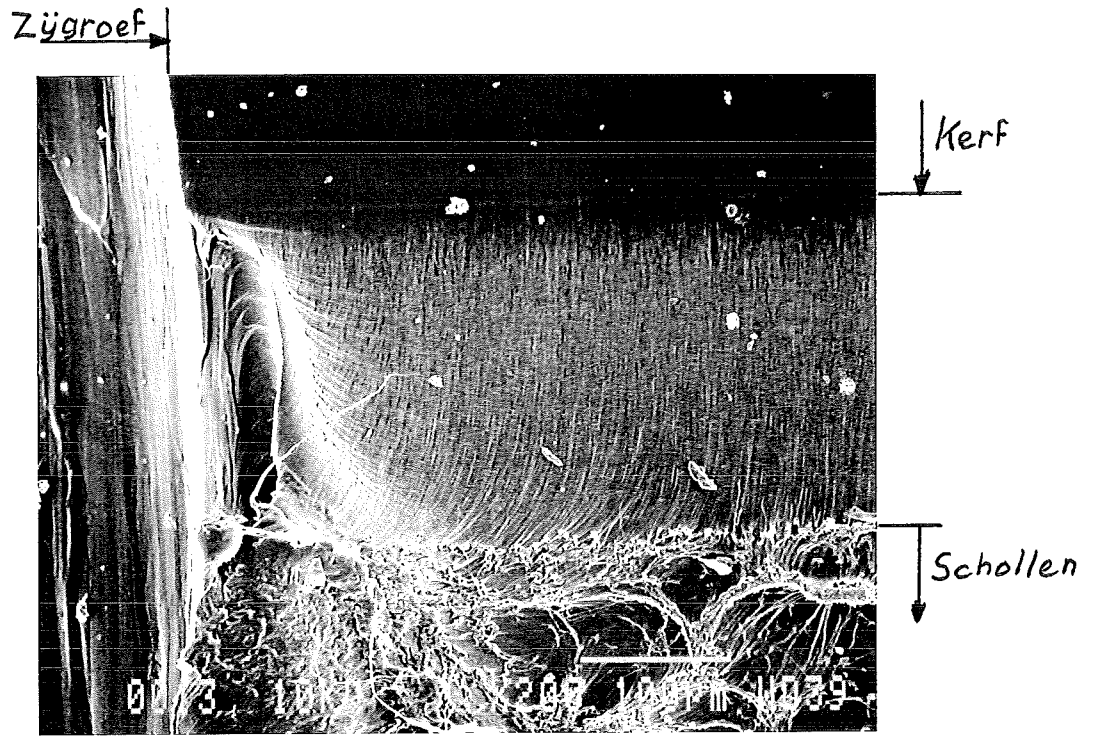


Foto 5: 200x SEM  
Vergroting van de gladde zone. Boven einde van de kerf. Links de zijgroef en onder begin van de zone met schollen.

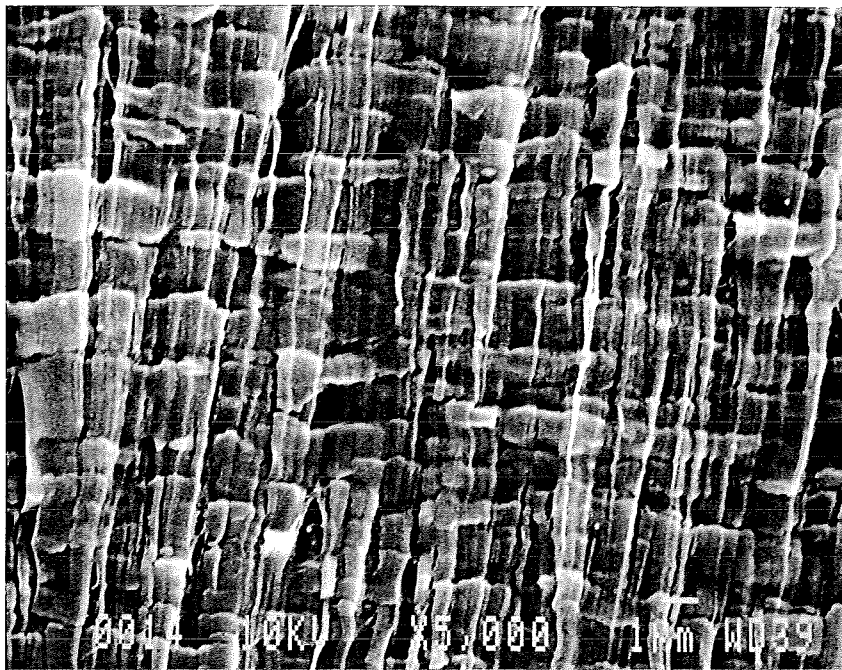


Foto 6: 5000x SEM  
Vergroting uit het midden van de gladde zone.





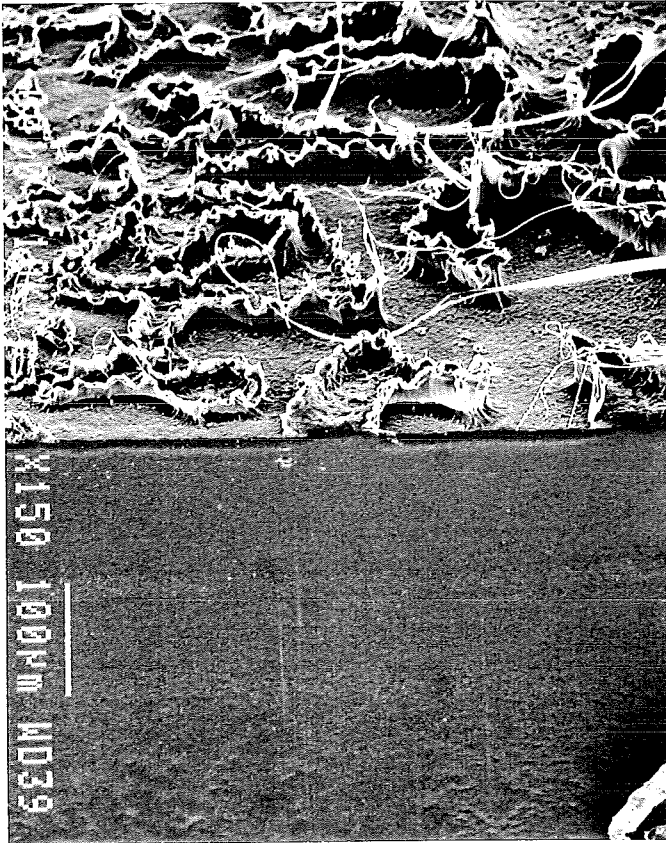


Foto 7: 150x SEM tilt: 40°  
Doorsnijding van het breukoppervlak op de plaats van de schollen.

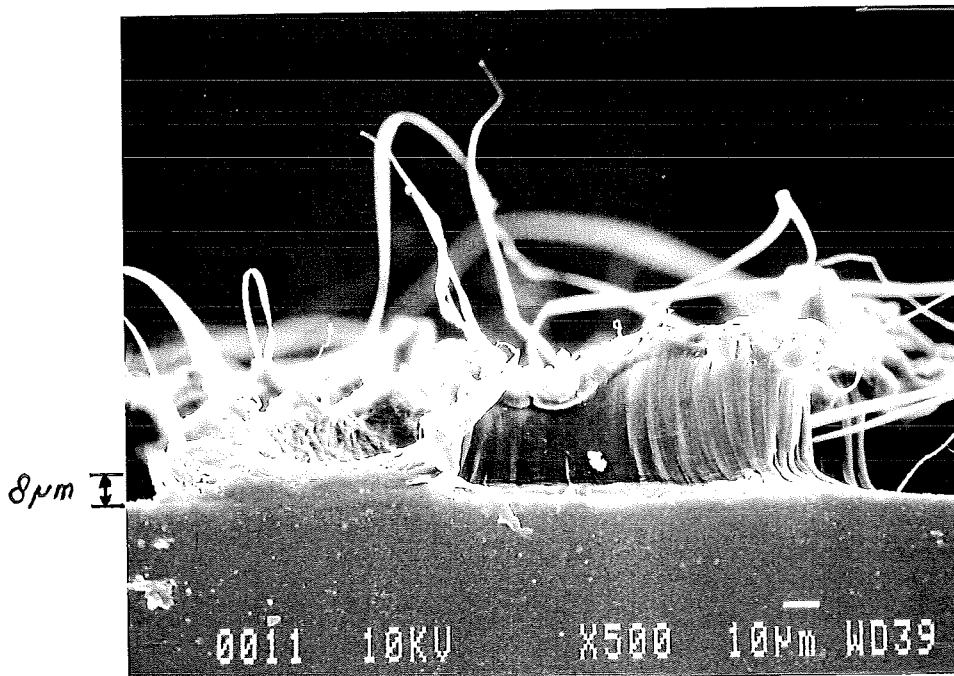


Foto 8: 500x SEM  
Doorsnijding van een schol.



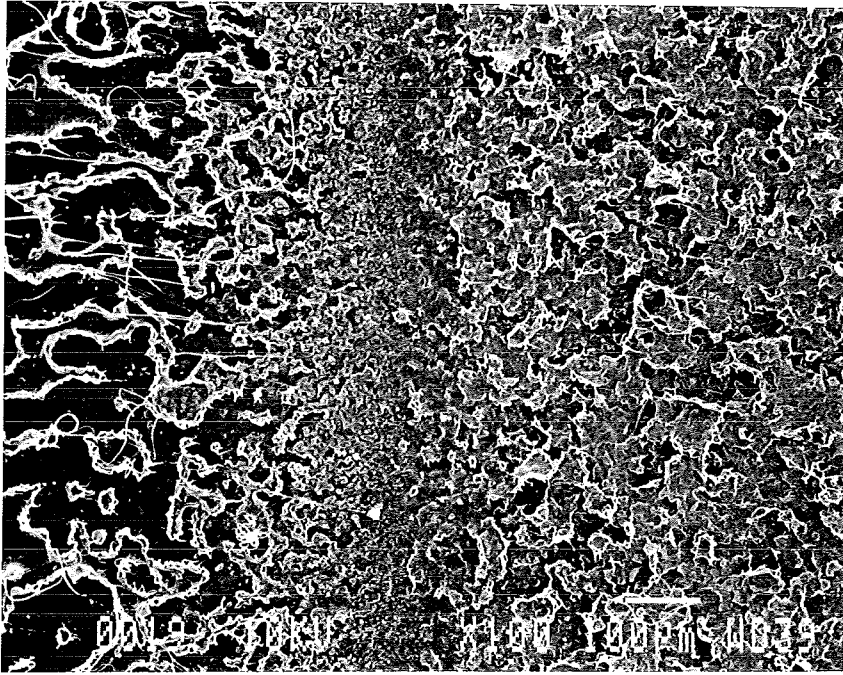


Foto 9: 100x SEM  
Overgang van de schollenstructuur naar de schilferstructuur.

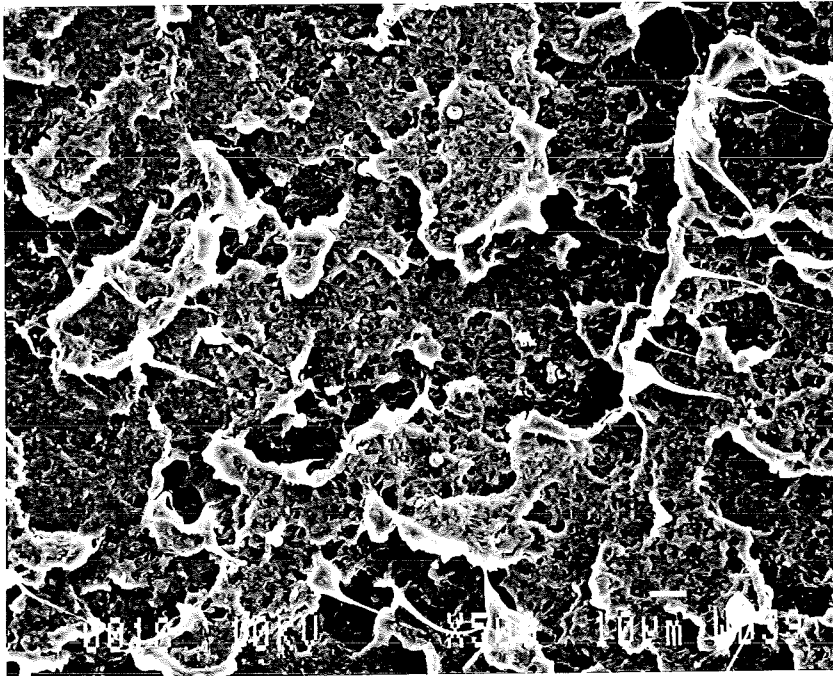


Foto 10: 500x SEM  
Vergroting van de schilferstructuur.



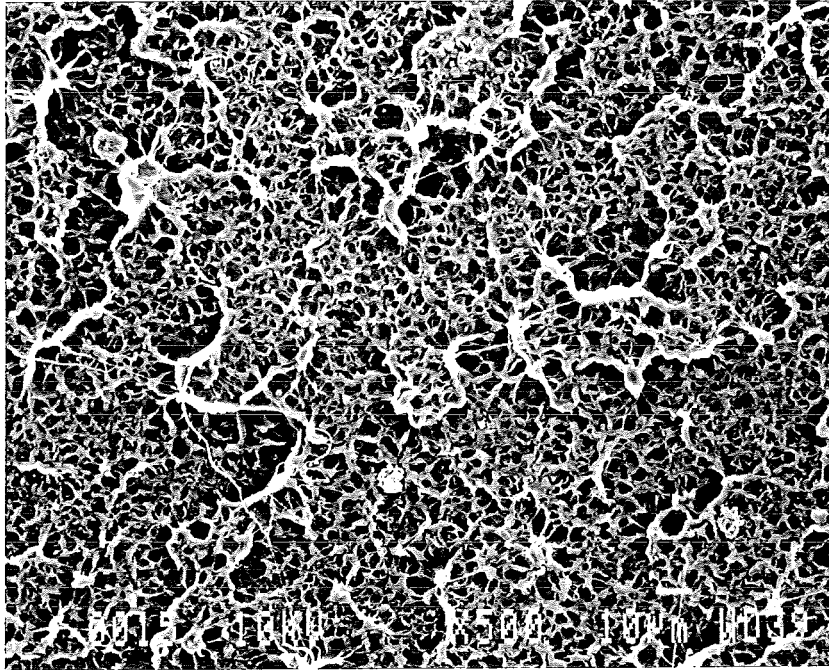


Foto 11: 500x SEM  
Als vorige foto maar nu verder van de kerf.

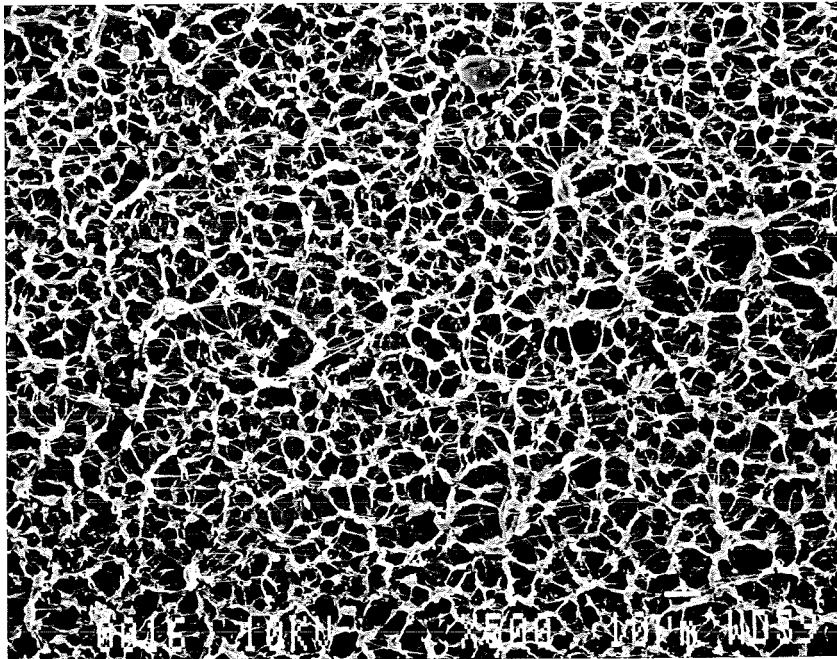


Foto 12: 500x SEM  
Gebied vlak voor de restbreuk.

