

**DE AKOESTISCHE EMISSIE TECHNIEK  
VOOR NIET-DESTRUCTIEVE INSPECTIE  
VAN AFBRANDSTUIKLASSEN**

F.P. Drijver.

Afstudeerverslag.

T.U. Delft.

Faculteit der S.T.M.

Vakgroep T.M.C., Sectie Lastechnologie en N.D.O.

Oktober 1990.

Begeleiding DAF : Ir.J.H.M. Martens  
Afstudeerbegeleiders : Drs.W.J.P. Vink en Ir.F.A. Veer  
Afstudeerhoogleraren : Prof.Dr.G. den Ouden en Prof.Dr.Ir.A. Bakker

<b><u>Inhoudsopgave.</u></b>	blz.
Summary	iii
Samenvatting	iv
Symbolenlijst	v
1. Inleiding	1
2. Probleemstelling	2
3. Keuze en vervaardiging van proefstukken	4
4. Vermoeiings- en bezwijkgedrag van de afbrandstuiklasverbinding	6
4.1. Proefopstelling	6
4.2. Scheurlengtemeting met behulp van de potentiaalvalmethode	6
4.3. Uitvoering van de vermoeiingsproeven	8
4.4. Resultaten van de vermoeiingsproeven	9
4.5. Normalisatie van het vermoeiingsgedrag	12
4.6. Bezwijkgedrag van de afbrandstuiklas met een vermoeiingsscheur	14
5. De A.E.-techniek als N.D.O.-methode voor de afbrandstuiklas	15
5.1. Inleiding	15
5.2. Ontstaan van A.E. en de experimentele parameters	15
5.3. Stoorsignalen en filtertechnieken	17
5.4. Akoestische activiteit van het metaal in de laszone	20
5.5. A.E.-onderzoek bij quasi-statische belasting	21
5.6. Proefplaten en proefopstelling	22
5.7. Uitvoering van de A.E.-proeven	24
5.7.1. A.E.-metingen op een hydraulische trekbank	24
5.7.2. A.E.-metingen op een elektromechanische trekbank	25

6. Bespreking van de resultaten	28
7. Conclusies	29
8. Aanbevelingen voor verder onderzoek	31
9. Literatuur	32
Bijlage.	
Berekening van de toelaatbare initiële scheurgrootte van de as volgens de PD 6493 en op basis van de vermoeiingsgegevens van de proefplaten.	35

## **Summary.**

This research has been carried out to investigate the possible use of the acoustic emission (A.E.) technique for the non-destructive inspection of a flash-welded axle joint.

Center Cracked Tension specimens have been manufactured for the experiments with a similar flashweld, in which a spark discharged flaw is introduced.

The defect size permissible in the axle joint has to be known to determine the feasibility of the A.E.-inspection method. To calculate the dimensions of this defect, experiments have been carried out to obtain the necessary fatigue and fracture data of the flashwelded specimens.

Specimens with a fatigue crack have been loaded in tension, and the produced A.E. has been recorded and studied. The significant emission for the inspection is caused by crack tip plasticity. After an extensive study it was possible to eliminate most sources of noise.

The smallest non permissible defect was calculated to be a semi-elliptical surface crack with a length of 22 mm and a depth of 7 mm. The maximum stress intensity for this defect that could be reached with the maximum permitted loading on the axle joint is  $45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . The experiments have shown that the stress intensity that can be detected by the used A.E. equipment is  $50 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . It is concluded that the smallest non permissible defects in the axle joint can not be detected with the equipment available.

## **Samenvatting.**

Dit onderzoek is uitgevoerd om te toetsen wat de mogelijkheden en beperkingen zijn van de akoestische emissie (A.E.) techniek voor de niet-destructieve inspectie van vrachtwagenassen, waarin de verbinding tot stand is gebracht door middel van afbrandstuiklassen.

Ten behoeve van het onderzoek zijn proefplaten vervaardigd met een vergelijkbare afbrandstuiklas, waarin een kerf is aangebracht.

Ter bepaling van de geschiktheid van de A.E.-inspectiemethode om ontoelaatbare defecten in de asverbinding met zekerheid vast te stellen, moeten de afmetingen hiervan bekend zijn. Om deze afmetingen nauwkeurig te kunnen berekenen is aan de hand van proeven het vermoeiings- en bezwijkgedrag van de afbrandstuiklas in de proefplaten bepaald.

Proefplaten met een vermoeiingsscheur zijn quasi-statisch belast, waarbij de vrijkomende A.E. is opgenomen en bestudeerd. De significante emissie voor de inspectie wordt geproduceerd bij de plastische vervormingen aan de scheurtip. Na een uitvoerig ruisonderzoek was het mogelijk de meeste storingsbronnen te elimineren.

Berekend is dat een semi-elliptische oppervlaktescheur met een lengte van 22 mm en diepte van 7 mm het kleinste ontoelaatbare defect in de asverbinding is. De maximale spanningsintensiteit voor dit defect, die kan worden bereikt met de maximaal toelaatbare belasting van de asverbinding is  $45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . De experimenten hebben aangetoond dat de detecteerbare spanningsintensiteit met de gebruikte A.E.-apparatuur  $50 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  is. Hieruit is geconcludeerd, dat de kleinste ontoelaatbare defecten in de asverbinding niet gedetecteerd kunnen worden met de beschikbare apparatuur.

## Symbolenlijst.

a	scheurlengte (mm)
$a_i$	diepte van initiële randscheur
A	constante van parisrelatie
A.E.	akoestische emissie
C	correctiefactor voor de geometrie
C.A.	constante amplitude
da	toename van de scheurlengte ( $\mu\text{m}$ )
dn	toename van het aantal belasting cycli
K	spanningsintensiteit ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )
$\Delta K$	cyclische spanningsintensiteit
$K_c$	kritische spanningsintensiteit
$K_{\text{det}}$	detecteerbare spanningsintensiteit met A.E.
$\Delta K_{\text{eff}}$	effectieve cyclische spanningsintensiteit
$K_{\text{max}}$	maximaal optredende spanningsintensiteit
m	constante van parisrelatie
N	A.E.-telling (counts)
N.D.O.	niet-destructief onderzoek
R	spanningsverhouding
$r_y$	straal van plastische zone (mm)
$\Delta S$	cyclische nominale spanning ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )
$S_{\text{max}}$	maximale nominale spanning
$S_{\text{min}}$	minimale nominale spanning
$S_{\text{pr}}$	proefbelasting
$\sigma_{\text{vt}}$	vloeispanning ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )
U	verhouding tussen de effectieve- en opgelegde cyclische spanningsintensiteit
W	breedte van proefplaat (mm)

## 1. Inleiding.

Bij DAF wordt de verbinding asstomp-aslichaam tot stand gebracht door middel van afbrandstuiklassen. Ondanks het feit dat dit lasproces zeer betrouwbaar is voor serieproductie is het niet uitgesloten dat daarbij macroscopische lasdefecten kunnen ontstaan. Ongunstig gelegen defecten kunnen onder bepaalde omstandigheden leiden tot vermoeiingsscheuren. Het is wenselijk dat de aanwezigheid van vermoeiingskritische defecten niet-destructief kan worden vastgesteld. Uit de literatuur komt naar voren, dat dit wellicht mogelijk is met behulp van akoestische emissie (A.E.) analyse (lit. 1).

Het principe van deze inspectiemethode is, dat de aanwezige defecten bij een trekbelasting aanleiding geven tot spanningsconcentraties, waardoor microplastische vervormingen kunnen optreden. Verwacht wordt dat bij deze plastische deformatie voldoende A.E. wordt geproduceerd om te kunnen detecteren. Deze A.E. kan gebruikt worden om de aanwezigheid van het defect vast te stellen en om een indicatie te krijgen van de ernst ervan.

Deze methode moet experimenteel worden getoetst waarbij tevens moet worden bepaald of een schadelijk defect gedetecteerd kan worden. Hiervoor moet bekend zijn wat de toelaatbare afmetingen zijn van een initieel defect. Om deze afmetingen nauwkeurig te kunnen berekenen moeten de vermoeiingseigenschappen van de lasverbinding bepaald worden.

Indien alle schadelijke defecten detecteerbaar zijn en de ernst ervan bepaald kan worden met behulp van de A.E.-techniek kan een richtlijn gegeven worden voor een inspectiecriterium.

## 2. Probleemstelling.

Tot nog toe is bij DAF het afbrandstuiklasproces gebruikt voor de verbinding van de asstomp aan het aslichaam. Hierbij worden de te verbinden delen onder een hoge elektrische spanning afwisselend tegen elkaar aangedrukt. Tijdens het contact zullen vloeistofbruggen ontstaan, die bij het verbreken aanleiding geven tot boogvorming. Als na een aantal wisselingen de contactvlakken voldoende zijn voorverwarmd wordt de boog tussen de asdelen voor enige tijd in stand gehouden. Nadat beide oppervlakken voldoende zijn afgesmolten, worden ze tenslotte stevig tegen elkaar gedrukt waardoor de verbinding ontstaat (lit. 2). Dit proces is, wat betreft de kwaliteit van de lasverbinding, door mechanisering en automatisering zeer betrouwbaar geworden. Tijdens het afbranden kunnen zich in de vloeibare laszone slak- en oxydeïnsluitels bevinden. Door de stuikslag zullen deze met het vloeibare metaal weggeperst worden. Wanneer dit niet gebeurt zullen de insluitels altijd in vlakke vorm, in de 1 à 2 millimeter brede laszone, aanwezig zijn (lit. 3, blz. 1124; fig. 1). Voor de achterasverbinding staan deze vlakke defecten loodrecht op de hoofdspanningsrichting.

Ook wanneer bij DAF in de toekomst over wordt gegaan tot het wrijvingslasproces zullen de defecten zich in vlakke vorm in een zeer smalle zone bevinden. Bij dit proces wordt één van de te verbinden asdelen snel om zijn as geroteerd en vervolgens tegen het andere aangedrukt.

Zowel voor het afbrandstuiklasproces als voor het wrijvingslasproces kan er van uit worden gegaan, dat alle voorkomende defecten vlak zijn en loodrecht staan op de spanningsrichting. Bij een gegeven spanning en gelijke afmetingen van defect en scheur is de spanningsintensiteitsfactor (K) van het defect altijd kleiner dan die van de scheur:

$$K_{1,\text{defect}} < K_{1,\text{scheur}}$$

Voor de berekening van de toelaatbare defectgrootte is het dan ook een veilige veronderstelling dat alle vlakke defecten scheuren zijn. Met deze aanname kan op basis van de PD 6493 (lit. 4) of op basis van te bepalen vermoeiingsgegevens berekend worden wat de toelaatbare afmetingen zijn van een lasdefect.



Het risico dat defecten zullen leiden tot vermoeiingsscheuren is met name afhankelijk van de cyclische spanningsintensiteit aan de rand van het defect ten gevolge van de opgelegde vermoeiingsbelasting. De ernst van een defect bepaalt de optredende spanningsintensiteit bij een gegeven proefbelasting. De mate van microplastische vervormingen, en dus ook de daarbij optredende A.E., wordt hoofdzakelijk bepaald door de spanningsintensiteit en de toename daarvan. Door de vrijkomende A.E., bij een gegeven belastingtoename per tijdseenheid, te bestuderen, kan de optredende spanningsintensiteit wellicht worden bepaald. Bij deze inspectiemethode zal een toelaatbare spanningsintensiteit bij een gegeven proefbelasting als inspectiecriterium worden gehanteerd. Dit criterium kan worden berekend met behulp van de toelaatbare afmetingen van een initiële scheur in de afbrandstuiklas.

Doordat het inspectiecriterium is gebaseerd op de spanningsintensiteit, kan voor het toetsen van de inspectiemethode een willekeurig lasdefect benaderd worden door een kunstmatig aangebrachte vermoeiingsscheur in een proefplaat.

De vorm en grootte van de plastische zone aan de scheurtip in een dunne homogene plaat kan worden benaderd door een cirkel met straal (lit. 5, blz. 56):

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K}{\sigma_{vl}} \right)^2, \text{ waarbij } \sigma_{vl} = \text{vloeispanning}$$

Doordat de scheur in het grensvlak ligt tussen extreem hard en zeer taai metaal (fig. 2, 3) is de vloeispanning aan weerszijden van de scheur sterk verschillend. Doordat de vloeispanning van het staal 42CrMo4 in de warmte beïnvloede zone hoger is dan de bezwijkspanning van het staal Fe510 is de vervormingstoestand aan de ene zijde van de scheurtip volledig elastisch en aan de andere zijde vooral plastisch. De vorm van de sterk asymmetrische plastische zone van een belaste scheur (fig. 4) voldoet niet aan de genoemde benadering. De spanningsintensiteit beschreven volgens de lineair elastische breukmechanika is in theorie alleen geldig voor scheuren in een elastisch spanningsveld in een homogeen materiaal. Maar ook bij het optreden van een beperkte hoeveelheid plastische deformatie is de spanningsintensiteit een bruikbaar gereedschap voor de scheurgroeiberekeningen en voor het aangeven van een inspectiecriterium.

### **3. Keuze en vervaardiging van proefstukken.**

Zowel voor de bepaling van het vermoeiingsgedrag van het lasmetaal als voor het aanbrengen van een kunstmatig lasdefect zijn proefstukken nodig waarbij het scheurgroeitraject op de naad van de afbrandstuiklas ligt. Voor vermoeiingsproeven wordt bij voorkeur een centraal gescheurde (C.C.T.) proefplaat gebruikt omdat bij dit proefstuk de spanningsintensiteit van een belaste scheur nauwkeurig kan worden berekend over een groot traject. Ook voor het A.E.-onderzoek is dit proefstuk geschikt omdat het star kan worden ingeklemd zodat er geen A.E. zal worden geproduceerd bij de krachtinleiding (lit. 6).

De vermoeiingsproeven worden uitgevoerd volgens de ASTM-standaard E647-88A (lit. 7), waardoor de C.C.T.-proefplaten moeten voldoen aan de hierin gestelde normen (fig. 5). Door de vereiste afmetingen van de proefplaten is het niet mogelijk om ze uit de vrachtwagenas te vervaardigen. De afbrandstuiklas van de te inspecteren achteras is aangebracht tussen de staalsoorten Fe510 en 41CrS4. Om een afbrandstuiklas te maken die zoveel mogelijk dient overeen te komen met die van de vrachtwagenas moet worden uitgegaan van dezelfde materialen. Het staal 41CrS4 is echter niet verkrijgbaar in plaatmateriaal zodat is gekozen voor het staal 42CrMo4. Er zijn 50 platen met de afmetingen 200 x 120 x 10 mm vervaardigd uit het staal Fe510 en 50 platen van dezelfde afmetingen uit het staal 42CrMo4. Deze laatste serie platen heeft dezelfde warmtebehandeling gekregen als de asstomp van de achteras.

Omdat in Nederland geen afbrandstuiklasmachine met voldoende capaciteit en de juiste inspanmogelijkheid beschikbaar is, zijn de afbrandstuiklasverbindingen tussen de platen van Fe510 en 42CrMo4 gemaakt bij Mibach in Duitsland. Bij het instellen van de lasparameters voor het verkrijgen van een optimale buigsterkte, is de helft van de platen gebruikt. Er zijn 25 proefplaten gelast met dezelfde optimale instelling van de parameters.

Voor het A.E.-onderzoek is het van belang dat er zo min mogelijk plastische deformatie optreedt bij de bewerking van de proefplaten. Om deze reden zijn de platen met de afmetingen van ca 400 x 120 x 10 mm trapsgewijs afgeslepen tot de proefplaatdikte van 6 mm. Doordat de platen tweezijdig zijn geslepen worden rand-effecten in de proefplaat vermeden.

Voor het aanbrengen van de kerf in de proefplaat op de lasnaad is een gat geboord van 2 mm in het midden van de las. Vanuit dit gat is de kerf aangebracht door middel van vonkverspanen. De kerf met een dikte van ca 0.3 mm is precies in de lasnaad aangebracht, zodat scheurinitiatie op de lasnaad wordt geforceerd.

Omdat de kerf centraal in de proefplaat moet liggen en de las loodrecht op de lengte richting van de proefplaat moet staan, zijn het geboorde gat en de lasnaad als referentie gebruikt voor de verdere bewerking van de proefplaat tot de uiteindelijke vorm (Fig. 5).

## **4. Vermoeiings- en bezwijkgedrag van de afbrandstuiklas.**

### **4.1. Proefopstelling.**

Voor het aanbrengen van de belasting wordt gebruik gemaakt van een hydraulische vermoeiingsbank van Schenck (PSB 2529, Serie 56). De maximale dynamische belasting van deze bank is 250 kN. Zowel de belasting als de verplaatsing kunnen worden gestuurd en gemeten door een computer.

De scheurlengtemeting wordt uitgevoerd met behulp van de Howden potentiaalvalmeter. De uitgang van deze potentiaalvalmeter is gekoppeld aan de computer, zodat de belasting afhankelijk van de scheurlengte per meting kan worden geregeld. De belasting, het aantal wisselingen en de scheurlengte worden automatisch gemeten en opgeslagen door de computer. Hierdoor hoeft de experimentator alleen controlemetingen te verrichten.

### **4.2 Scheurlengte meting met behulp van de potentiaalvalmethode.**

De lengte van de vermoeiingsscheur in de proefplaat wordt gemeten met behulp van de potentiaalvalmethode. Hierbij worden blokvormige stroompulsen door de proefplaat gestuurd, die door de aanwezigheid van de scheur worden omgeleid (fig. 6). Door het meten van het potentiaalverschil tussen twee contacten aan weerszijden van de scheur kan de elektrische weerstand over het stroompad worden bepaald. De potentiaalval tussen de twee contacten is afhankelijk van:

- de stroomsterkte
- het oppervlak van de plaatdoorsnede
- de afstand tussen de meetpunten
- de soortelijke weerstand van de gebruikte metalen en het lasmetaal
- het oppervlak van de scheurflanken dat geen elektrisch contact maakt bij de maximale belasting

Voor de scheurlengte meting is een eenduidige relatie gewenst tussen scheurlengte en de gemeten potentiaalval. Deze relatie is alleen mogelijk als de invloed van de andere factoren op de potentiaalval constant worden gehouden.

Het oppervlak van de plaatdoorsnede, de afstand tussen de contacten en de soortelijke weerstand van de verbonden metalen zijn gelijk voor alle proefplaten. De verhouding tussen twee potentiaalvalmetingen met verschillende contactafstand is onafhankelijk van de stroomsterkte. De potentiaalvalmeter meet gelijktijdig twee potentiaalverschillen en geeft hiervan de verhouding als uitvoer. Door deze verhouding te gebruiken voor de scheurlengtemeting wordt de invloed van variaties in de stroomsterkte voorkomen.

Doordat het materiaal van de proefplaten ferromagnetisch is ontstaan door de stroompulsen wervelstromen die een grote variatie geven van de gemeten potentiaalvalverhouding. Door gebruik te maken van relatief lange pozen tussen de opeenvolgende stroompulsen hebben de wervelstromen voldoende tijd om uit te dempen zodat de variatie van de potentiaalval sterk wordt verlaagd.

De invloed van de resterende variatie op de meetresultaten wordt beperkt doordat met behulp van de computer snel opeenvolgende metingen (ca 6 per minuut) kunnen worden gedaan. Uit deze metingen kan achteraf met behulp van een correcte middeling zeer nauwkeurig de scheurlengte voor ieder aantal wisselingen worden berekend.

De relatie tussen de potentiaalvalverhouding en de scheurlengte is bepaald door regelmatig een gelijktijdige meting van de potentiaalvalverhouding en de scheurlengte uit te voeren van de uitbreidende scheur in de eerste twee proefplaten. Om voldoende metingen te kunnen uitvoeren zijn deze proeven uitgevoerd met een zodanige vermoeiingsbelasting dat de scheurgroeisnelheid laag en redelijk constant was. Om de scheurlengte goed te kunnen meten is een fotografisch raster aangebracht op de proefplaten. Bij de vermoeiingsproeven is de ijking regelmatig gecontroleerd.

Met behulp van de kleinste kwadraten methode is een derde graads polynoom berekend die de relatie tussen de uitvoerspanning van de potentiaalvalmeter (V) en de bijbehorende scheurlengte (a) nauwkeurig benaderd (fig. 7).

$$a = +0.091V^3 - 1.18V^2 + 12.13V - 17.84$$

### 4.3. Uitvoering van de vermoeiingsproeven.

Het doel van de vermoeiingsproeven is het verkrijgen van een eenduidige relatie tussen de scheurgroeisnelheid en de opgelegde belasting. Deze relatie kan gebruikt worden voor het berekenen van de toelaatbare initiële scheurgrootte. Om deze relatie te bepalen moet de scheurgroeisnelheid gemeten worden bij verschillende belastingen.

Een vermoeiingsbelasting kan worden beschreven met een spanningsamplitude ( $\Delta S$ ) en een spanningsverhouding ( $R$ ). De spanningsamplitude is de verschil tussen minimale- ( $S_{\min}$ ) en maximale nominale spanning ( $S_{\max}$ ) en de spanningsverhouding is de quotiënt van de minimale- en maximale belasting. Maar omdat de scheuruitbreiding per wisseling met name wordt bepaald door de cyclische spanningsintensiteit ( $\Delta K$ ) aan de scheurtip en de spanningsverhouding, worden deze belastingsgrootheden gebruikt om de vermoeiingsbelasting te beschrijven. De cyclische spanningsintensiteit aan de scheurtip kan bij een gegeven spanningsamplitude, plaatbreedte ( $W$ ) en scheurlengte ( $a$ ) met de lineair elastische breukmechanica als volgt worden berekend:

$$\Delta K = C \Delta S \sqrt{\pi a}$$

Met de correctiefactor voor de geometrie ( $C$ ) volgens Fedderson (lit. 5):

$$C = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{W}\right)}$$

Bij de vermoeiingsproeven moeten de minimale- en maximale belasting, de scheurlengte en het aantal wisselingen regelmatig worden gemeten om de relatie tussen de scheurgroeisnelheid en de belastingsgrootheden te kunnen bepalen. Voor de bepaling van het vermoeiingsgedrag moeten zowel de spanningsverhouding als de cyclische spanningsintensiteit worden gevarieerd. Wanneer de vermoeiingsproeven worden uitgevoerd met een constante amplitude (C.A.) belasting zal de cyclische spanningsintensiteit stijgen bij toenemende scheurlengte, terwijl de spanningsverhouding gelijk blijft. De spanningsverhouding kan gevarieerd worden door de belastingverhouding van de C.A.-proef anders in te stellen.

Alle proeven worden uitgevoerd in lucht bij kamertemperatuur met een frequentie van 20 Hz. Wel moet er rekening mee worden gehouden dat de scheurgroei-snelheid bij een verhoogde frequentie en onder laboratoriumomstandigheden lager zal zijn dan onder bedrijfsomstandigheden (lit. 8).

Doordat de belasting afhankelijk van de scheurlengte kan worden geregeld is het mogelijk vermoeiingsproeven uit te voeren met een constante cyclische spanningsintensiteit en een constante spanningsverhouding. Bij gebruik van een goede correctiefunctie voor de geometrie zal de scheurgroei-snelheid bij deze proeven redelijk constant zijn. Aangezien met behulp van deze belastingregeling de belastingsgrootheden die de scheurgroei-snelheid bepalen constant worden gehouden kan de invloed van restspanningen in het materiaal aan de scheurtip ten gevolge van voorgaande belastingen op de scheurgroei-snelheid worden bepaald. Hiertoe worden een aantal proeven uitgevoerd waarbij de maximale spanningsintensiteit abrupt wordt verlaagd. Na deze verlaging moet de scheurgroei-snelheid gemeten worden tot de scheur volledig door de plastisch vervormde zone van de voorgaande maximale belastingen is heengegroeid en er geen effect van de overbelasting meer is.

Ook wordt er een proef uitgevoerd waarbij de minimale spanningsintensiteit plotseling wordt verhoogd van een negatieve naar een positieve waarde bij een gelijk blijvende maximale spanningsintensiteit. Hierbij kan de invloed worden bepaald van de verminderde residuële drukspanningen aan de scheurtip ten gevolge van de voorgaande compressie belastingen op de scheurgroei-snelheid.

#### **4.4. Resultaten van de vermoeiingsproeven.**

Er zijn zeven constante amplitude proeven uitgevoerd bij verschillende spanningsverhoudingen (tabel 1). Doordat de scheurlengte en het bijbehorend aantal wisselingen van iedere proef regelmatig is gemeten, kan de scheuruitbreiding per wisseling voor iedere scheurlengte nauwkeurig worden berekend (zie bijvoorbeeld fig. 8). De spanningsamplitude is gedurende de vermoeiingsproeven constant gehouden op bekende waarden zodat voor iedere scheurlengte berekend kan worden wat de bijbehorende cyclische spanningsintensiteit is geweest. Hiermee wordt een relatie verkregen tussen de scheurgroei-snelheid en de cyclische span-

ningsintensiteit (fig. 9).

Wanneer de berekende waarden van de scheurgroeisnelheid en de bijbehorende cyclische spanningsintensiteit worden uitgezet in een dubbel logaritmisch assenstelsel, wordt waargenomen dat de relatie in de scheurgroeiperiode kan worden benaderd met een rechte (fig. 10). Deze benadering wordt beschreven met de Paris-vergelijking (lit. 5, blz. 173):

$$\frac{da}{dn} = A \Delta K^m \quad , \text{ waarbij } A, m \text{ constant.}$$

De gemeten relatie tussen de scheurgroeisnelheid en de cyclische spanningsintensiteit is goed reproduceerbaar, indien de spanningsverhouding gedurende de proef constant wordt gehouden op identieke waarden (fig. 11). Deze reproduceerbaarheid wordt bovendien bevestigd door de constante scheurgroeisnelheid die wordt waargenomen bij de vermoeiingsproeven die zijn uitgevoerd met een constante cyclische spanningsintensiteit en een constante spanningsverhouding (fig. 12). Constante scheurgroeisnelheden zijn ook waargenomen bij het aanbrengen van de vermoeiingsscheuren met een trapsgewijs afnemende constante cyclische spanningsintensiteit (fig. 13). In deze figuur is te zien dat de scheurgroeisnelheid na initiatie al snel een constante waarde bereikt. Na een plotselinge verlaging van de belasting wordt na een abrupte afname van de scheurgroeisnelheid weer een constante scheurgroeisnelheid waargenomen.

Doordat de C.A.-proeven zijn uitgevoerd met verschillende spanningsverhoudingen variërend van -0.5 tot 0.7 (tabel 1), wordt voor de verschillende waarden hiervan een andere relatie tussen de scheurgroeisnelheid en de cyclische spanningsintensiteit waargenomen (fig. 14).

Wanneer bij een vermoeiingsproef met een constante cyclische spanningsintensiteit de maximale belasting plotseling wordt verlaagd, zal de residuele plastische zone groter zijn dan de plastische zone die bij de verlaagde belasting wordt gevormd. Omdat op een grotere plastische zone hogere drukspanningen worden uitoefend door het omliggende materiaal, zal de scheur bij het groeien door de residuele plastische zone vertraagd worden doordat de residuele drukspanningen de scheur trachten te sluiten. Bij een abrupte verlaging van de maximale belasting met 40 %, blijkt slechts gedurende korte tijd een kleine scheurgroei vertraging op te treden (fig. 15, 16).



Bij een abrupte verhoging van de minimale belasting wordt een versnelling van de scheurgroeisnelheid verwacht (lit. 8). Deze versnelling kan optreden doordat de voorgaande compressiebelastingen het scheurfront hebben afgevlakt waardoor de effectieve cyclische belasting wordt verhoogd. Het blijkt echter dat een abrupte verhoging van de minimale belasting bij proeven met een constante cyclische spanningsintensiteit geen meetbare versnelling van de scheurgroeisnelheid geeft (fig. 17, 18), wat verklaart kan worden door het vlakke scheurfront dat ook wordt waargenomen zonder compressiebelastingen.

Uit deze proeven met blokbelastingen blijkt dat de residuële spanningen aan de scheurtip ten gevolge van overbelastingen, die de effectieve spanningsamplitude beïnvloeden, gering zijn. Hierdoor is het effect van de overbelastingen klein.

Indien de kerf exact op de lasnaad is aangebracht zal de scheur ook hier initiëren. Maar zelfs als de kerftip tot ca 1 mm naast de lasnaad ligt blijkt dat de scheur na initiatie toch weer naar de lasnaad groeit. Na initiatie in het staal 42CrMo4 of in het staal Fe510 groeit de scheur vrijwel bij alle proeven binnen 5 mm naar de lasnaad (fig. 19, 20). Bij microscopisch onderzoek blijkt dat de scheur met name bij lage vermoeiingsbelastingen uiteindelijk enkele tientallen micrometers naast de lasnaad aan de staal Fe510 zijde ligt (fig. 21). Omdat vermoeiingsscheuren bij lage belastingen volgens de gemakkelijkste weg groeien (lit. 8), kan worden geconcludeerd dat het metaal direct naast de lasnaad aan de staal Fe510-zijde gevoeliger is voor vermoeiing dan het metaal tot één millimeter daarvandaan. De scheur wordt dan ook snel asymmetrisch als slechts één kerftip op de lasnaad ligt.

Doordat de scheur bij voorkeur langs de lasnaad groeit neemt het breukvlak geheel de vorm aan van de vlakke lasnaad. Zelfs bij uitstulpingen in de lasnaad en geringe afbuigingen van de lasnaad ten opzichte van de hoofdspanningsrichting blijft de scheur de lasnaad volgen.

Ondanks het grote hardheidsverschil tussen beide zijden van de lasnaad treedt er een striatievormend vermoeiingsmechanisme op. Straties op het breukvlak kunnen alleen voorkomen bij vermoeiingsscheuren (lit. 8). De striaties komen zeer lokaal voor op het breukvlak en zijn waargenomen met behulp van een scanning elektronenmicroscoop (JEOL JSM-840A). De gemiddelde afstand tussen de gefotografeerde striaties (fig. 22) is ca 0.35  $\mu\text{m}$  en ligt binnen de spreidingsband van de berekende scheuruitbreiding per cyclus ter plaatse van de striaties (fig. 23).

#### 4.5. Normalisatie van het vermoeiingsgedrag.

Voor de berekening van de toelaatbare initiële scheurgrootte in de afbrandstuijklas is een eenduidige relatie nodig tussen de scheurgroeisnelheid en de vermoeiingsbelasting. Daar de scheurgroeisnelheid afhankelijk is van de cyclische spanningsintensiteit en de spanningsverhouding wordt de vermoeiingsbelasting in deze grootheden aangeduid.

De invloed van de spanningsverhouding op de scheurgroeisnelheid is een gevolg van de scheursluiting nog voordat de minimale belasting is bereikt. Hierdoor wordt de effectieve belastingsamplitude kleiner. Bij een toenemende waarde van de spanningsverhouding wordt het scheursluitingseffect steeds kleiner en de opgelegde spanningsamplitude zal de effectieve spanningsamplitude steeds meer benaderen.

Volgens Elber (lit. 5, blz. 178) wordt bij gebruik van de effectieve cyclische spanningsintensiteit ( $\Delta K_{\text{eff}}$ ) rekening gehouden met de invloed van de spanningsverhouding op de scheurgroeisnelheid. Uitgaande van deze stelling kunnen de gemeten scheurgroeirelaties voor de verschillende spanningsverhoudingen door extrapolatie worden benaderd door één relatie tussen de effectieve cyclische spanningsintensiteit ( $\Delta K_{\text{eff}}$ ) en de scheurgroeisnelheid ( $da/dn$ ) geldig in het parisgebied (fig. 24):

$$\frac{da}{dn} = 6.0 \cdot 10^{-7} \Delta K_{\text{eff}}^4$$

De verhouding tussen de opgelegde- en effectieve cyclische spanningsintensiteit ( $U$ ) kan voor de gemeten scheurgroeirelaties met verschillende spanningsverhoudingen worden berekend. Hiermee kan de relatie tussen de verhouding van de opgelegde- en effectieve cyclische spanningsintensiteit en de spanningsverhouding voor het staal Fe510 vlak naast de lasnaad worden bepaald (fig. 25):

$$U = \frac{\Delta K_{\text{eff}}}{\Delta K} = 0.8 + 0.2R \quad , \text{ geldig voor: } -0.5 < R < 0.7$$

Bij gebruik van deze genormaliseerde vermoeiingsgegevens voor de berekening van de toelaatbare initiële scheurlengte in de asverbinding (bijlage) moet er rekening mee worden gehouden dat deze gegevens alleen geldig zijn voor de afbrandstuiklasverbinding van proefplaten.

Er zijn duidelijke structuurverschillen tussen het asstomp materiaal (41CrS4) en het proefplaatmateriaal (42CrMo4) naast de las. Dit is het gevolg van verschil in samenstelling, warmtebehandeling en lasparameters. Doordat de structuur en het hardheidsverloop in de as gunstiger zijn, mag worden aangenomen dat de scheurgroeisnelheid in de proefplaten hoger is dan in de as.

Ook moet worden opgemerkt dat de vermoeiingsgegevens zijn verkregen uit C.A.-proeven terwijl de vrachtwagenas een variabele amplitude belasting ondergaat. Maar op basis van de geringe invloed van de blokbelastingen op de scheurgroeisnelheid wordt geen langdurig effect verwacht van piekbelastingen bij een variabele amplitudebelasting.

Wanneer de gemeten scheurgroei-relatie van de afbrandstuiklassen in de proefplaten voor een lage spanningsverhouding ( $R = -0.1$ ) wordt vergeleken met de benadering van de scheurgroei-relatie voor homogeen staal Fe510 voor een lage spanningsverhouding (lit. 5, blz. 173), wordt geconstateerd dat de scheurgroeisnelheid in de proefplaten zeer weinig afwijkt van de scheurgroeisnelheid in het constructiestaal (fig. 26).

De gemeten scheurgroei-relaties van de afbrandstuiklassen in de proefplaten voor lage spanningsverhoudingen ( $R = -0.1$  en  $R = 0.12$ ) zijn ook vergeleken met de benadering van de scheurgroei-relatie voor afbrandstuiklassen in spoorrails (fig. 27), die is bepaald volgens dezelfde procedure (ASTM 647) bij een spanningsverhouding van  $R = 0.033$  (lit. 9). Het blijkt dat bij dezelfde belasting de scheurgroeisnelheid in de las van de proefplaten hoger is dan in de las van de spoorrails. De spoorrails zijn vervaardigd van koolstofstaal met een treksterkte van  $880 \text{ N/mm}^2$ .

#### 4.6. **Bezwijkgedrag van de afbrandstuiklas met een vermoeiingsscheur.**

Voor de berekening van de toelaatbare initiële scheurgrootte moet bekend zijn welke afmetingen een vermoeiingsscheur mag hebben aan het einde van de levensduur. Deze afmetingen worden bepaald door de kritische spanningsintensiteit ( $K_c$ ) van het lasmetaal en de maximale stootbelasting die in het belastingspectrum van de as optreedt.

Een deel van de C.C.T.-proefplaten met de gescheurde lasnaad bezwijkt bij trekproeven door macroplastische vervorming van het restoppervlak. Een aantal van de proefplaten vertoont eveneens macroplasticiteit, maar bezwijkt door instabiele scheuruitbreiding. Door de macroplasticiteit kan de spanningsintensiteit niet meer worden beschreven volgens de lineair elastische breukmechanica, waardoor de gemeten kritische spanningsintensiteit ongeldig is. Deze ongeldige kritische spanningsintensiteit van het lasmetaal van minimaal  $70 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  (tabel 2) kan echter wel worden gebruikt voor een conservatieve berekening van de kritische scheurgrootte (bijlage).

## **5. De A.E.-techniek als N.D.O.-methode voor de afbrandstuiklas.**

### **5.1. Inleiding.**

Uit de literatuur komt naar voren dat de akoestische emissie techniek wellicht bruikbaar is voor het detecteren van defecten in een afbrandstuiklas (lit. 1). Verwacht wordt dat de microplasticiteit, die optreedt bij het belasten van deze defecten, voldoende A.E. produceert om te detecteren. Bij de uitbreiding van de plastische zone is de hierbij vrijkomende A.E. gerelateerd aan de spanningsintensiteit (lit. 10, 11, 12). Indien met behulp van deze emissie een bepaalde optredende spanningsintensiteit kan worden onderscheiden, is het mogelijk bij een bekende toenemende belasting de equivalente scheurgrootte te bepalen van het aanwezige defect. Deze inspectiemethode geeft dus een indicatie van de ernst van het defect. Alle andere N.D.O.-methoden bepalen alleen de afmetingen van het defect. Aan de hand van experimenten wordt getoetst of de vrijkomende A.E. bij microplasticiteit meetbaar is en in hoeverre deze A.E. bruikbaar is om schadelijke defecten te onderscheiden.

### **5.2. Ontstaan van A.E. en de experimentele parameters.**

In een belast materiaal kunnen lokale plastische deformaties voorkomen door de aanwezigheid van imperfecties die spanningsconcentraties veroorzaken. Bij deze plastische vervorming treden processen op, zoals dislokatiebewegingen en splijting van brosse deeltjes, waarbij energie vrij komt. Een deel van deze energie wordt omgezet in elastische trillingen. De spanningsgolven die ontstaan door deze trillingen wordt akoestische emissie genoemd. De belasting van het materiaal moet wel groter zijn dan de voormalige belastingen omdat een materiaal pas akoestisch actief wordt wanneer de maximale voorgaande belasting wordt overschreden. Dit verschijnsel wordt het Kaisereffect genoemd (lit. 11). Voor het niet-destructief onderzoek met de A.E.-techniek zijn de spanningsgolven, die ontstaan bij plastische deformatie, belangrijk. Wanneer de spanningsgolven het oppervlak van het werkstuk bereiken kunnen deze worden gedetecteerd met behulp van een opnemer. De opnemer zet de relatieve verplaatsingen van het oppervlak ten gevolge van de

spanningsgolven om in een elektrisch signaal. Dit signaal wordt versterkt, gefilterd en verwerkt tot bruikbare informatie.

De *A.E.-parameters* volgens de definitie van de ASTM-standaard E610-82 (lit. 13) zijn (fig. 28):

A.E.-telling (count or ring-down-count) (N):

Het aantal keren dat de amplitude van het A.E.-signaal de ingestelde drempelwaarde overschrijdt.

A.E.-gebeurtenis (event):

Een lokale materiaalverandering waardoor de A.E. toeneemt.

Relatieve aankomsttijd:

Het verschil in aankomsttijd van een A.E.-signaal van één gebeurtenis bij verschillende opnemers.

Duur van de gebeurtenis:

De tijdsduur waarbij de drempel wordt overschreden.

Maximale amplitude:

Het maximale analoge signaal dat optreedt bij een gebeurtenis of gedurende een bepaalde periode.

Stijgtijd:

De tijd tussen de eerste drempeloverschrijding en het optreden van de maximale amplitude bij één gebeurtenis.

A.E.-energie:

De totale elastische energie die vrijkomt bij een gebeurtenis of gedurende een bepaalde periode.

Eventueel voor moderne apparatuur:

Telling tot maximale amplitude:

Het aantal tellingen voor de maximale amplitude is bereikt.

Frequentiespectrum:

De karakteristieke frequentieverdeling van een gebeurtenis.

Deze laatste twee A.E.-parameters kunnen met de beschikbare A.E.-apparatuur (PAC 3400) niet worden waargenomen. Behalve de relatieve aankomsttijd en het frequentiespectrum zijn alle parameters afhankelijk van de drempelinstelling en de versterkingsfactor.

Het is mogelijk om tijdens de beproeving het verloop van de A.E. te volgen, doordat de A.E.-telling, het aantal gebeurtenissen, de maximale amplitude, de stijgtijd, de A.E.-energie en de belasting op een beeldscherm getoond kunnen worden. Om een verband te kunnen leggen tussen de A.E. en de optredende spanningsintensiteit is het van belang een karakteristiek patroon te vinden in de A.E., waarmee de plastische deformatie kan worden geïdentificeerd.

### **5.3. Stoorsignalen en filtertechnieken.**

Vooraf wanneer gewerkt wordt met materialen die een lage akoestische activiteit hebben wordt het A.E.-onderzoek vaak bemoeilijkt door het optreden van een te hoge continue achtergrondruis. Deze continue emissie, die wordt geproduceerd door snel opvolgende A.E.-gebeurtenissen, geeft een aanhoudend signaalniveau (lit. 13). Naast de continue emissie kunnen ook discrete A.E.-signalen optreden afkomstig van specifieke A.E.-gebeurtenissen. De ruissignalen worden verdeeld in elektrische- en mechanische ruis.

De *elektrische ruis* kan weer worden verdeeld in (lit. 14):

#### Witte ruis:

Deze ruis ontstaat bij de voorversterker en is niet te voorkomen. Hierdoor wordt de gevoeligheid van de apparatuur beperkt.

#### Aarde loop ruis:

Deze ruis kan ontstaan bij een slechte isolatie tussen opnemerdraden en werkstuk.

#### Elektromagnetische interferentie ruis:

Radiozenders e.d.

De *mechanische ruis* kan ontstaan door:

De beproevingsapparatuur:

Bij het onderzoek moet voor het aanbrengen van de belasting een trekbank gebruikt worden, die een bron van stoorsignalen kan zijn.

De constructie:

Wanneer de proefplaat of de as wordt belast kunnen hierin bronnen actief worden op plaatsen buiten de te onderzoeken laszone.

Gas- en vloeistofstromingen:

Indien de belasting wordt aangebracht met behulp van een hydraulische machine kunnen stoorsignalen ontstaan door vloeistofstromingen in pompen en kleppen.

Wrijvingsprocessen:

Deze storing ontstaat vaak ter plaatse van de krachtinleiding, met name wanneer zelfklemmende bekken of belastingpennen worden gebruikt.

Er zijn verschillende filtermethoden voorhanden om de stoorsignalen geheel of gedeeltelijk te elimineren. Deze methoden kunnen worden ingedeeld in een groep die de stoorsignalen elimineert zonder ze te registreren (prefiltertechnieken) en een groep die de stoorsignalen achteraf verwijdert (postfiltertechnieken).

De *prefiltertechnieken* zijn gebaseerd op:

Het voorkomen en afschermen van storingsbronnen:

Het is beter om geen hydraulische apparatuur te gebruiken voor het aanbrengen van de belasting, omdat deze veel storing geeft. Het ruisniveau kan worden verlaagd door het werkstuk te scheiden van de bank met een geluiddempend materiaal. Aral is een goed dempend materiaal doordat het is opgebouwd uit meerdere aluminium- en kunststoflagen. Ultrasonische geluidsgolven zullen op de grenslagen reflecteren en in de kunststoflagen dempen.



#### De frequentiekaracteristiek:

Filtering van de signalen kan worden bewerkstelligd door opnemers en apparatuur te gebruiken met een dusdanig frequentieinterval, dat de frequentie van ongewenste signalen daarbuiten, en van bruikbare signalen daarbinnen valt.

#### Vershil in aankomsttijd:

Er kunnen bewakingsopnemers ten opzichte van de inspectiezone buiten de meetopnemers worden geplaatst. De meetopnemer kan voor een instelbare tijdsduur worden gesloten wanneer een signaal eerst bij de bewakingsopnemer aankomt en dus van buiten de inspectiezone afkomstig moet zijn.

De *postfiltertechnieken* kunnen gebaseerd zijn op:

#### Signaalkarakteristiek:

Wanneer de stoorsignalen een afwijkende karakteristiek vertonen ten opzichte van de bruikbare signalen kunnen ze op basis hiervan worden gescheiden. Elektrische stoorsignalen hebben bijvoorbeeld vaak een hoge amplitude en een relatief korte stijgtijd terwijl mechanische stoorsignalen over het algemeen een lange tijdsduur en een lage amplitude hebben.

#### Vershil in aankomsttijd:

Bij gebruik van meerdere opnemers kunnen de A.E.-bronnen op grond van het verschil in aankomsttijd van de signalen bij de verschillende opnemers worden gelokaliseerd. Signalen die niet uit de laszone afkomstig zijn, worden geëlimineerd.

Door de beperkte proefplaatafmetingen is de maximale opnemerafstand ten opzichte van de scheurtip ca 100 mm. Gezien de hoge geluidssnelheid in staal en de kleine afstandsverschillen tussen de opnemers, is ruisfiltering op basis van het verschil in aankomsttijd van een signaal bij verschillende opnemers alleen mogelijk, indien verschillen in aankomsttijd van enkele microseconden meetbaar zijn. De filtermethoden die gebaseerd zijn op het verschil in aankomsttijd kunnen hierdoor niet worden uitgevoerd met de voor het onderzoek beschikbare apparatuur.

#### 5.4. Akoestische activiteit van het metaal in de laszone.

De meetbare A.E., die optreedt bij plastische deformatie, wordt geproduceerd door het splijten van brosse structuren. Bij het splijten van deze brosse fasen worden spanningsgolven met hoge amplitude opgewekt (lit. 11, blz. 47).

De structuur van ijzer-koolstof staal wordt bepaald door de legeringselementen en thermomechanische behandeling. De lage-sterkte stalen, waaronder het staal Fe510, geven A.E. met een lage energie omdat er weinig brosse structuren aanwezig zijn en de activeringsenergie voor de dislokatiebewegingen laag is (lit. 10). Het legeringselement chroom in het gebruikte asstomp materiaal 41CrS4 zal chroomcarbiden vormen. Deze carbiden zullen zich evenals de molybdeencarbiden, die in het staal 42CrMo4 naast de chroomcarbiden voorkomen, met name afzetten op de korrelgrenzen. Indien er zwavel aanwezig is in het staal zal naast de carbiden ook de brosse fase MnS voorkomen (lit. 15, blz. 203). Het staal Fe510 heeft een laag koolstofgehalte en bevat weinig brosse fasen. Hierdoor blijkt de akoestische activiteit een 2 tot 3 maal lager niveau te hebben dan het staal 42CrMo4 bij breukmechanische experimenten (lit. 10, blz. 508). Maar de structuur van het staal Fe510 vlak naast de lasverbinding bestaat uit grove ferrietplaten, met daartussen perliet (Widmannstätte, lit. 16), waardoor verwacht wordt dat de akoestische activiteit hiervan hoger zal zijn (lit. 10, blz. 506; lit. 17, blz. 81).

Doordat de treksterkte van het staal Fe510 lager is dan de vloeispanning van het geharde staal 42CrMo4 naast de las, zal de deformatie bij het belasten alleen aan de staal Fe510 zijde optreden. Dit is ook waargenomen bij de trekproeven voor de bepaling van het bezwijkgedrag van de las (Hf. 4.6.; fig. 4). De akoestische activiteit zal dus afhankelijk zijn van het staal in de warmte beïnvloede zone aan de staal Fe510 zijde. Omdat de structuur van het staal in deze zone van de afbrandstuiklassen in de proefplaten en de as overeenkomt, mag verwacht worden dat de akoestische activiteit eveneens overeenstemt.

## 5.5. A.E.-onderzoek bij quasi-statische belasting.

Bij een scheur onder quasi-statische belasting treden de volgende meetbare scheurafhankelijke A.E.-bronnen op (lit. 10):

- 1) breken van brosse structuren bij scheurtipdeformatie
- 2) scheuruitbreiding

Bij de belasting van de vlakke defecten in een afbrandstuiklas, zoals slak- en oxydeïnsluitels, zal eveneens plastische deformatie aan de rand van het defect optreden. Verwacht wordt dat de A.E., die wordt geproduceerd bij deze microplastische vervormingen, voldoende energie bezit om te kunnen detecteren. Naast deze primaire A.E. kan ook secundaire emissie optreden ten gevolge van scheurflankverschuivingen en het breken van corrosie- en slakdeeltjes. Deze hoog energetische emissie kan niet gebruikt worden voor een veilige inspectie van de afbrandstuiklas omdat niet bij alle lasdefecten, bij voorbeeld gasinsluitels, secundaire emissie hoeft op te treden. Bovendien heeft de secundaire emissie van verschillende bronnen een ander karakter, waardoor de interpretatie hiervan zeer gecompliceerd is. Een betrouwbare inspectie is daarom alleen mogelijk wanneer de A.E., die optreedt bij de uitbreiding van de plastische zone van een niet-groeiend defect, gedetecteerd kan worden.

De relatie tussen A.E. ten gevolge van de uitbreiding van de plastische zone en de spanningsintensiteit kan theoretisch worden benaderd door het plastisch deformatie model (lit. 12). Hieruit volgt, dat bij de uitbreiding van de plastische zone, de A.E.-telling (N; gedefinieerd in hoofdstuk 5.2.) evenredig is met de vierde macht van de spanningsintensiteitsfaktor:

$$N = k(\sigma_v K)^4 \quad , \text{ waarbij} \quad \begin{array}{l} N = \text{A.E.-telling} \\ k = 6.7 \cdot 10^{-33} \text{ mm}^{22} \text{N}^{-12} \end{array}$$

Deze theoretische relatie is echter niet geldig voor andere defecten dan scheuren. Maar doordat de defecten die voorkomen in een afbrandstuiklas vlak zijn, zal bij benadering de plastische zone uitbreiding aan de fouttip en dus ook de akoestische emissie gelijkenis vertonen met die van een niet-groeiende scheur.

Bij kleine scheuren is, voor het aanleggen van de detecteerbare spanningsintensiteit een spanning nodig die groter is dan de vloeispanning van het staal Fe 510 (fig. 29). Zodoende wordt de detecteerbare scheurgrootte beperkt door deze vloeispanning of door de laagste vloeispanning van het metaal in de warmte-beïnvloede zone. Uit het hardheidsverloop over de afbrandstuiklas (fig. 2) blijkt dat verzachting van het metaal in de warmte-beïnvloede zone niet optreedt. Met behulp van de toelaatbare initiële scheurgrootte ( $a_i$ ) en de detecteerbare spanningsintensiteit ( $K_{det}$ ) kan de benodigde proefbelasting ( $S_{pr}$ ) voor het vaststellen van het defect worden berekend:

$$S_{pr} = \frac{K_{det}}{C\sqrt{\pi a_i}}$$

## 5.6. Proefplaten en proefopstelling.

Voor de experimenten moeten proefstukken gebruikt worden waarbij een defect op de naad van een afbrandstuiklas ligt. Bovendien moet de spanningsintensiteit nauwkeurig berekend kunnen worden omdat deze gerelateerd is aan zowel de ernst van het defect als aan de mate van de microplastische vervormingen. Gekozen is voor C.C.T.-proefplaten die gemaakt zijn volgens de beschreven procedure in hoofdstuk 3. Door vermoeiing met een constante cyclische spanningsintensiteit is kunstmatig een scheur aangebracht op de lasnaad. Deze belasting is trapsgewijs gereduceerd met toenemende scheurlengte zodat de plasticiteit aan de scheurtip beperkt is.

Doordat de plastische zone niet zal uitbreiden voordat de laatste maximale vermoeiingsbelasting van de scheur is overschreden, zal er pas A.E. ten gevolge van plastische deformatie op kunnen treden nadat deze belasting is bereikt (zie Kaisereffect Hf.5.2.). Deze "historische" belasting van de scheur, uitgedrukt als spanningsintensiteit, heeft voor alle A.E.-proefplaten een waarde van  $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .

De belasting kan worden aangebracht met behulp van de hydraulische vermoeiingsbank (SCHENCK PSB 2529 Serie 56) of met behulp van een elektromechanische trekbank (TIRA-Test 2300), die een maximale belasting kunnen leveren van 250 kN respectievelijk 100 kN.

De A.E., die vrijkomt bij het belasten van het defect, kan worden opgevangen met behulp van een smalband- of breedbandopnemer. De opnemers zijn voorzien van een piëzo-elektrisch kristal met een diameter van 12,7 mm en een keramische zool. Het frequentieinterval van de breedbandopnemer PAC W68D (nummers WD183 en WD200) loopt van 100 tot 600 kHz. De smalbandopnemer PAC R50D-H8 heeft een resonantiefrequentie van 500 kHz.

Voor een goede geluidsoverdracht van proefplaat naar opnemer is een koppelvloeistof gebruikt (ULTRAGEL II).

Het elektrische signaal dat door de opnemer wordt opgewekt wordt extern versterkt door een voorversterker (type 1220A). Deze versterker biedt de keuze uit een versterking van 40 of 60 dB. Het frequentieinterval loopt van 20 tot 1200 kHz en het ruisniveau aan de ingang bedraagt minder dan  $2 \cdot 10^{-6}$  V.

Het extern versterkte signaal wordt nogmaals versterkt en tevens gefilterd door de vierkanaals A.E.-analyse apparatuur (PAC 3400). Deze apparatuur is in staat de belangrijkste parameters van het signaal vast te leggen. De versterking van de apparatuur kan gevarieerd worden van 0 tot 21 dB met een stapgrootte van 3 dB. Een extra versterking van 20 dB kan worden ingeschakeld. De drempelwaarde is variabel van 0.1 tot 0.9 V met een stapgrootte van 0.1 V en kan een factor 10 worden verhoogd. De volledige technische details staan in de PAC-handleiding (lit. 18). Een combinatie van versterkingsfactor en drempelwaarde geeft bij de verschillende kanalen van de A.E.-apparatuur een andere gevoeligheid. Dit betekent dat deze instellingen niet nauwkeurig zijn en gehanteerd dienen te worden als relatieve waarden.

## **5.7. Uitvoering van de A.E.-proeven.**

### **5.7.1. A.E.-metingen op een hydraulische trekbank.**

Er zijn zes A.E.-proeven uitgevoerd op de hydraulische machine waarmee eveneens de vermoeiingsscheur is aangebracht. De proefplaten kunnen mechanisch zeer star ingeklemd worden waardoor er geen A.E. geproduceerd zal worden bij de krachtinleiding. De lengte van de aangebrachte vermoeiingsscheur was voor deze proeven ongeveer 30 mm en de opnemer is op ca 25 mm van de scheurtip

geplaatst. Voor de eerste vier proeven is de smalbandopnemer (PAC R50D-H8) gebruikt en de overige twee proeven zijn uitgevoerd met de breedbandopnemer (PAC WD 183). De A.E., die vrijkomt bij het quasi-statisch belasten van de voorgescheurde proefplaat, wordt opgevangen door de opnemer en na voorversterking opgeslagen en verwerkt met behulp van de A.E.-apparatuur.

Om de trekproef bij het optreden van macroplastische vervormingen stabiel te laten verlopen wordt de belasting aangebracht door een constante verplaatsing van de zuiger ( $v = 0.0001$  mm/s). De gemeten belasting wordt samen met de A.E.-parameters voor iedere A.E.-gebeurtenis geregistreerd.

De A.E.-apparatuur is ingesteld nadat de constante zuigerverplaatsing is gestart. Het blijkt namelijk dat bij een stilstaande zuiger een zwakker signaal wordt waargenomen. Om de ruis van de hydraulische bank te onderdrukken is bij een versterking van 75 dB een drempelwaarde van 0.3 V nodig. Bij drie proeven zijn gedurende de toenemende belasting hoorbare A.E.-gebeurtenissen waargenomen. Deze A.E.-gebeurtenissen met zeer hoge amplitude en tijdsduur (fig. 30) zijn waarschijnlijk afkomstig van kleine scheurstappen. Pas bij een veel hogere belasting wordt een sterke toename van het aantal A.E.-gebeurtenissen waargenomen. Signalen die afkomstig zijn van een irreversibel proces, zoals van plastische deformatie en scheuruitbreiding, zullen bij een tweede belasting pas optreden nadat de voorgaande maximale belasting wordt overschreden. Bij de tweede belasting van de proefplaat treedt een plotselinge toename van het aantal A.E.-tellingen inderdaad op bij de maximale voorgaande belasting (fig. 31).

De eerste indicatie van plastische deformatie met behulp van de A.E. wordt geobserveerd bij een spanningsintensiteit die ligt tussen 50 en 76 MPa $\sqrt{m}$  (tabel 3). Deze detecteerbare spanningsintensiteit is te hoog om de aanwezigheid van vermoeiingkritische defecten vast te stellen.

De gevoeligheid van de methode kan wellicht worden vergroot door het ruisniveau te verlagen. Dit kan worden gerealiseerd door het voorkómen van metallisch contact tussen de zuiger en de proefplaat. Getracht is de proeven uit te voeren met aralplaat tussen de bekken en de proefplaat. De belasting werd hierbij echter overgebracht door de wrijving tussen het aral en de proefplaat, waardoor de bereikbare belasting niet hoog genoeg was voor de A.E.-metingen.

#### 5.7.4. A.E.-metingen op een elektromechanische trekbank.

Het ruisniveau van de hydraulische trekbank kan alleen nog effectief worden verlaagd door ingrijpende veranderingen aan de hydrauliek en de inspanbekken. Om toch te kunnen toetsen of de gevoeligheid van de methode kan worden vergroot wordt de belasting van de navolgende A.E.-proeven aangebracht door een elektromechanische trekbank. Het ruisniveau van een mechanische trekbank is over het algemeen beduidend lager dan dat van een hydraulische machine (lit. 19).

Doordat de computersturing van de beschikbare elektromechanische trekbank automatisch stopt na een bepaalde tijd, is de constante verplaatsingsnelheid verhoogd tot 0.006 mm/s. Bij deze snelheid is er nog voldoende tijd beschikbaar voor het instellen van de A.E.-apparatuur.

Een nadeel van de elektromechanische trekbank voor de trekproeven is de beperkte maximale belasting van 100 kN. Om de proefplaat op deze machine tot breuk te kunnen belasten moet de scheurlengte worden vergroot tot ca 35 mm. Bij deze scheurlengte blijft slechts 15 mm plaatligament over om de plastische zone te laten uitbreiden. Een ander nadeel van de elektromechanische bank is dat er uitsluitend zelfklemmende bekken beschikbaar zijn voor het inspannen van de proefplaat. De proefplaat kan in de bekken worden geplaatst na het wegnemen van zijdeksels.

Het metallisch contact tussen proefplaat en trekbank kan zeer eenvoudig voorkomen worden door plaatsing van aralplaatjes tussen de trekkop en bekken. Tussen het aral en de bekken zijn bovendien messingplaatjes gelegd om de wrijving van de bekken bij het vasttrekken te beperken.

Bij ruisproeven van de trekbank door het belasten van een ongescheurde plaat blijkt dat bij het belasten hoog energetische emissie optreedt, die bij een tweede belasting van de proefplaat pas optreedt na het overschrijden van de voorgaande maximale belasting (fig. 32). Deze A.E. moet dus afkomstig zijn van een irreversibel proces zoals plastische deformatie of wrijving van het vasttrekken van de bekken. Wanneer de proefplaat voor het aanbrengen van een derde belasting eerst wordt uitgespannen, wordt een A.E.-patroon waargenomen dat overeenkomt met dat van de eerste belasting. Hieruit kan worden geconcludeerd, dat de optredende A.E. wordt geproduceerd door wrijvingsprocessen bij het vasttrekken van de inspanbekken. Deze A.E. kan worden voorkomen door starre inspanbekken te gebruiken.

Daar deze niet beschikbaar zijn, is getracht de proefplaat vast te trekken in de zelfklemmende bekken tot de maximale proefbelasting zonder de scheur te belasten. Hiertoe zijn speciale klemblokken vervaardigd die de scheur voor maximaal negentig procent kunnen ontlasten (fig. 33). Indien de scheur in werkelijkheid slechts voor tachtig procent wordt ontlast, zal de "historische" belasting van de scheur van  $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  nog niet zijn overschreden.

Er zijn acht A.E.-proeven uitgevoerd waarbij de inspanbekken zijn voorgetrokken tot voorbij de maximale proefbelasting. Aangezien het gebruik van de smalbandopnemer geen voordelen bleek te hebben voor dit onderzoek, is bij de A.E.-metingen gebruik gemaakt van de breedbandopnemer (PAC WD 200), die een veel algemenere respons geeft.

Bij het gebruik van kanaal 3 van de A.E.-apparatuur is geen combinatie van de versterking en drempelwaarde mogelijk waarbij slechts een geringe hoeveelheid stoorsignalen uit de omgeving wordt geregistreerd. Deze instelling van de A.E.-apparatuur is wel mogelijk bij het gebruik van kanaal 2, waardoor gevoeliger kan worden gemeten. Bij een geringe verhoging van de gevoeligheid neemt het aantal ruissignalen per tijdseenheid enorm toe. Deze ruis treedt ook op terwijl de opnemer vrij is van ieder contact. De gevoeligheid van de A.E.-metingen wordt dus niet beperkt door de ruis van de trekbank maar door de omgevingsruis of interne ruis van de A.E.-apparatuur.

Het patroon van de ruis bij deze proeven zal bij een versterking van 78 dB en een drempelinstelling van 0.2 V overeenkomen met het A.E.-patroon, dat is waargenomen bij de tweede belasting van een ongescheurde plaat zonder deze tussentijds uit te spannen (fig. 34). Opvallend is dat de amplitude en de duur van de stoorsignalen in een nauwe band liggen.

Indien de proefplaat niet is bezwaken bij de eerste belasting na het voortrekken met klemblokken, is de plaat een tweede keer belast ter bepaling van de ruis. Het verschil tussen A.E.-patronen van de eerste en tweede belasting moet afkomstig zijn van één of meerdere irreversibele processen in het deel van de plaat dat zich tussen de klemblokken bevond (fig. 35). De enige bronnen van A.E. in deze zone zijn scheuruitbreiding en plastische vervormingen.

De eerste indicatie van de aanwezigheid van de scheur bij de zorgvuldig uitgevoerde proeven wordt waargenomen bij een belasting die overeenkomt met een spanningsintensiteit van 50 tot  $60 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  (tabel 4). Na de eerste indicatie van



plastische deformatie neemt de A.E.-telling bij alle proeven toe (fig. 36). De mate van deze toename in A.E.-telling is per proef sterk verschillend, waardoor er geen verband kan worden gelegd tussen de A.E. en de optredende spanningsintensiteit. Doordat de A.E. kwantitatief niet reproduceert is de toetsing van het plastisch deformatie model (Hf. 5.5.) niet mogelijk.

Bij proef 20, waarbij de scheur naast de lasnaad in het staal 42CrMo4 lag, wordt de eerste indicatie van de scheur al geconstateerd bij een spanningsintensiteit van  $19 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . De A.E., die hierbij optreedt, is echter niet afkomstig van plastische deformatie maar van hoorbare scheurstappen (fig. 37).

## 6. Bespreking van de resultaten.

Uit de vermoeiingsproeven met een constante amplitude belasting volgt een eenduidige relatie tussen de opgelegde belasting en de scheurgroeisnelheid. Deze relatie mag worden gebruikt voor berekeningen met variabele cyclische belastingen, omdat verwacht wordt dat de invloed van piekbelastingen uit het spectrum gering is. Omdat de verwachte vermoeiingsbelasting gedurende de gebruikperiode van de achteras bekend is, kan worden berekend dat een elliptische randscheur met een diepte van 7 mm en een lengte van 22 mm zich in deze periode kan uitbreiden tot een cirkelvormige door-de-dikte scheur (bijlage).

Als criterium wordt gesteld dat een door-de-dikte scheur ontoelaatbaar is, omdat deze aanleiding kan geven tot olie lekkage. Op basis van dit "lek criterium" kan de berekende initiële elliptische randscheur als het kleinste ontoelaatbare lasdefect worden aangegeven.

Doordat de achterasverbinding pas onveilig wordt nadat een door-de-dikte scheur een kritische lengte heeft bereikt, is in de berekening van de kritische initiële scheurgrootte een veiligheidsmarge gecreëerd. De kritische lengte van een door-de-dikte scheur, berekend met de maximale stootbelasting en de conservatieve kritische spanningsintensiteit van  $70 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , is 29 mm. De benodigde vermoeiingsbelasting om een door-de-dikte scheur uit te breiden van 22 mm naar 29 mm komt overeen met ruim 10 % van de vereiste levensduur van de as. De maximale stootbelasting, waarmee de kritische scheurlengte is berekend, treedt slechts een paar keer op in de gebruiksduur van de vrachtwagenas.

De detecteerbare spanningsintensiteit van een belaste scheur met behulp van de gebruikte A.E.-apparatuur ligt tussen de 50 en  $60 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  (tabel 4). Met behulp van de toelaatbare initiële scheurgrootte en een detecteerbare en onderscheidbare spanningsintensiteit kan de belasting worden berekend waarboven bij een inspectie geen A.E. mag optreden, die aangeeft dat deze bepaalde spanningsintensiteit is bereikt.

De maximaal toelaatbare proefbelasting wordt beperkt door de vloeispanning van het staal Fe510 ( $\sigma_{v, \text{Fe510}} = 410 \text{ N/mm}^2$ ). Bij een maximale proefbelasting van  $400 \text{ N/mm}^2$  is de maximaal optredende spanningsintensiteit ( $K_{\text{max}}$ ) van het kleinste kritische initiële defect ca  $46 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .

## 7. Conclusies.

- Het vermoeiingsgedrag van de afbrandstuiklas in de proefplaat is kwalitatief niet afwijkend van dat van staal en kan worden beschreven met de relatie:

$$\frac{da}{dn} = 6.0 \cdot 10^{-7} \Delta K_{\text{eff}}^4$$

$$U = \frac{\Delta K_{\text{eff}}}{\Delta K} = 0.8 + 0.2R \quad , \text{ geldig voor: } -0.5 < R < 0.7$$

- Bij dezelfde belasting is de scheurgroeisnelheid in de afbrandstuiklassen van de proefplaten nauwelijks afwijkend van de scheurgroeisnelheid in homogeen staal Fe510.

$$\left( \frac{da}{dn} \right)_{\text{LAS}} \approx \left( \frac{da}{dn} \right)_{\text{STAAL}}$$

- Een conservatieve waarde voor de kritische spanningsintensiteit van het lasmetaal is ca 70 MPa√m.
- Op basis van het "lek criterium" wordt gesteld dat het kleinste ontoelaatbare defect een cirkelvormige door-de-dikte scheur is. Uitgaande van deze kritische scheur en de bepaalde vermoeiingsgegevens kan met behulp van de maximale vermoeiings- en stootbelasting berekend worden dat een elliptische randscheur met een lengte van 22 mm en een diepte van 7 mm het kleinste kritische initiële defect is voor de afbrandstuiklas in de as.
- De detecteerbare spanningsintensiteit ( $K_{\text{det}}$ ) met de gebruikte A.E.-apparatuur onder de gegeven proefomstandigheden ligt tussen de 50 en 60 MPa√m.
- De hoogste toelaatbare proefbelasting wordt beperkt door de vloeispanning van het staal Fe510 ( $\sigma_{\text{vl, Fe510}} = 410 \text{ N/mm}^2$ ). Bij een maximale proefbelasting van  $400 \text{ N/mm}^2$  is de maximaal optredende spanningsintensiteit ( $K_{\text{max}}$ ) van het kleinste kritische initiële defect ca 46 MPa√m.

- Onder de gegeven proefomstandigheden is de bereikbare spanningsintensiteit van het kleinste kritische defect bij de maximale proefbelasting kleiner dan de minimaal detecteerbare spanningsintensiteit:

$$K_{\max} < K_{\det}$$

Hieruit kan worden geconcludeerd dat het kleinste kritische defect in de afbrandstuiklas van de vrachtwagenas onder de gegeven proefomstandigheden en met de gebruikte A.E.-apparatuur niet gedetecteerd kan worden met behulp van de A.E.-techniek.

## 8. Aanbevelingen voor verder onderzoek.

De volgende aanbevelingen voor verder onderzoek kunnen worden gedaan:

- Bepaling van de exacte maximale vermoeiingsbelasting en de vermoeiingsgegevens van de afbrandstuiklas in de as voor een herberekening van de toelaatbare afmetingen van een initieel defect.

- Onderzoek of een lagere spanningsintensiteit detecteerbaar is met behulp van aangepaste- of modernere apparatuur.

De gevoeligheid van de A.E.-metingen kan alleen nog worden verhoogd indien de ruissignalen van de omgeving of van de A.E.-apparatuur met behulp van een prefiltermethode kunnen worden geëlimineerd. Omdat deze ruissignalen niet kunnen worden voorkomen en nauwelijks afgeschermd kunnen worden, moet de meettechniek worden verfijnd.

De beste oplossing is te onderzoeken of er een frequentieband is, waarbij het niveau van de ruis veel lager is. Door een juiste keuze en aanpassing van de apparatuur kan binnen dit frequentiegebied worden gemeten. De voorwaarde hierbij is dat de significante A.E. wel moet optreden in dit frequentiegebied.

Een andere oplossing is het gebruik maken van moderne A.E.-apparatuur waarmee zeer veel signalen per tijdseenheid kunnen worden geregistreerd, zodat de gevoeligheid van de metingen kan worden verhoogd. De enorme hoeveelheid ruissignalen die bij de verlaging van de drempelwaarde worden geregistreerd, kunnen met behulp van deze moderne apparatuur veel eenvoudiger worden geëlimineerd dan met de gebruikte apparatuur. Bovendien kunnen met deze apparatuur signalen van een opgegeven karakteristiek worden verwijderd nog voordat ze worden geregistreerd.

## 9. Literatuur.

- 1.) F.P. Drijver,  
"Niet-destructieve inspectie van afbrandstuiklassen"  
T.U.Delft, jan. 1990.
- 2.) G.den Ouden,  
"Lasttechnologie".  
Delft, 1987.
- 3.) R.Zimmermann,  
"Ultraschallprüfung von Widerstandabbrennstumpfschweißverbindungen".  
ZIS-mitteilungen 10 (1982), 1123-1128.
- 4.) Published Document 6493,  
"Guidance on some methods for the derivation of acceptance levels for  
defects in fusion welded joints".  
British Standards Institution, 1980.
- 5.) H.L.Ewalds en R.J.H.Wanhill,  
"Fracture mechanics". 3e druk.  
Delft, 1986.
- 6.) F.A.Veer,  
"Crack detection in an axle joint using acoustic emission".  
Intern rapport, T.U.Delft, sept. 1989.
- 7.) ASTM Standard E647-88a,  
"Standard Test Method for Measurement of fatigue Crack Growth Rates".  
Annual Book of ASTM Standards (1988), 646-666.

- 8.) J.Schijve,  
"Lecture notes on fatigue, static tensile strength and stress corrosion of aircraft materials and structures".  
T.U.Delft, okt. 1982.
- 9.) J.Dziubinski en A.Szymanski,  
"Abbreunnstumpfschweißen von Schienen und mechanische Eigenschaften der Verbindungen".  
Schweißen und Schneiden 42 (1990), 22-25.
- 10.) G.Green,  
"Sources of acoustic emission during crack growth in ferritic steels".  
Metal Science 15 (nov-dec 1981), 505-513.
- 11.) R.K.Miller, P.McIntire en American Society for Nondestructive Testing,  
"Nondestructive testing handbook". Volume 5, acoustic emission testing. 2e druk.  
USA, 1987.
- 12.) H.L.Dunegan, D.O.Harris en C.A.Tatro,  
"Fracture analysis by use of acoustic emission".  
Engineering Fracture Mechanics 1 (1968), 105-122.
- 13.) ASTM Standard E610-82,  
"Standard Definitions of Terms Relating to Acoustic Emission".  
Annual Book of ASTM Standards (1982).
- 14.) A.A.Pollock,  
"Practical guide to acoustic emission testing".  
Physical Acoustics Corporation, USA, 1988.
- 15.) W.J.P.Vink en N.H.R.Versluis,  
"Niet-destructief onderzoek".  
Delft, 1985.

- 16.) Anoniem.  
"Kwaliteitseisen afbrandstuiklassen". Fotografisch weergegeven.  
Intern rapport, DAF-Trucks Centraal laboratorium, mei 1985.
  
- 17.) D.J.Buttle en C.B.Scruby,  
"Acoustic emission monitoring of a fatigue crack in 50D steel in a sea-water environment".  
NDT International 22 (apr 1989), 81-95.
  
- 18.) Physical Acoustics Corporation,  
"Technical manual 3400 four channel  
A.E. analyzer".  
Princeton, 1982.
  
- 19.) A.A.A.Scheerder, E.A.Sluyter, J.Boogaard en H.van den Hooff,  
"Acoustic emission detectability of fatigue cracks in high strength low alloy  
steel plate during quasi static loading".  
Proceedings of the 12th World Conference on Non-Destructive Testing.  
Amsterdam, april 1989, 484-489.



**Bijlage. Berekening van de toelaatbare initiële scheurgrootte van de as volgens de PD 6493 en op basis van de vermoeiingsgegevens van de proefplaten.**

**1. Inleiding.**

De geschiktheid van de A.E.-techniek voor de detectie van vermoeiingskritische defecten in de afbrandstuiklas van de achteras moet worden bepaald. Hiervoor is het van belang te weten welke afmetingen voor deze initiële defecten toelaatbaar zijn. Voor de berekening van deze afmetingen moet de maximale stootbelasting en de vermoeiingsbelasting in de afbrandstuiklas, die gedurende de gebruikperiode verwacht kan worden, bekend zijn. Bij wegmetingen zijn de belastingen van zowel de 1346-as als van de 1339-as bepaald. De meetplaatsen op de 1346-as liggen ver van de laszone waardoor de omrekening van de belastingen naar deze zone onbetrouwbaar is. De meetplaatsen op de 1339-as liggen juist zeer dichtbij de laszone van de 1346-as. Omdat de belasting, spoorbreedte en veersteunplaatsen voor de 1346-as en de 1339-as gelijk zijn, mogen voor de berekening van de belasting van de afbrandstuiklas van de 1346-as de wegmeetgegevens van de 1339-as gebruikt worden. De wegmeetgegevens van de 1339-as zijn overgenomen uit rapport nr. 55125/89 - 002<773>.

**2. Belastingen.**

**2.1. Bepaling maximale stootbelasting 1346-as.**

De maximale stootbelasting wordt bepaald uit de combinatie van de grootste amplituden, die uit de wegmetingen volgen. Deze amplitudecombinatie is vergelijkbaar met een pothole-belasting. Hierbij wordt met veertig km/h fors remmend over een gat in de weg gereden. Voor de verticale buiging moet de statische belasting worden meegerekend.

- Maximale momenten 1339-as op meetplaats 3 (25mm buiten remankerplaat).

$$M_{v,\max} = 16.1 \text{ kNm}$$

$$M_{h,\max} = 10.5 \text{ kNm}$$

$$M_{t,\max} = 16.1 \text{ kNm}$$

De maximaal gemeten buigbelastingen op meetplaats 3 ( $M_{MP}$ ) moeten worden omgerekend naar de plaats van de stomplas ( $M_{SL}$ ). Voor deze omrekening mag gebruik gemaakt worden van de theoretische momentenlijn omdat zowel de meetplaats als de stomplas niet in de buurt liggen van de veersteun en wiellagers. De nominale momentenlijn wijkt bij deze steunpunten sterk af van de theoretische momentenlijn. Uit deze theoretische momentenlijn (fig. 38) volgt de omrekenfactor:

$$\frac{M_{SL}}{M_{MP}} = \frac{307.0}{212.5} = 1.44$$

- Maximale momenten 1346-as ter plaatse van de lasverbinding.

$$M_{v,\max} = 23.3 \text{ kNm} + 20.5 \text{ kNm} \text{ (statische belasting vol)}$$

$$M_{h,\max} = 15.2 \text{ kNm}$$

$$M_{t,\max} = 16.1 \text{ kNm}$$

Met behulp van de profielafmetingen van de 1346-as ter plaatse van de lasverbinding (fig. 39) kunnen de weerstandsmomenten berekend worden:

$$W_v = W_h = \frac{1}{6} \left( \frac{H-h}{H} \right) = 1.87 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$W_t = 2 \left( \frac{H+h}{2} \right)^2 B = 3.06 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Dit geeft de volgende maximale spanningen in de lasverbinding:

$$\sigma_{v,max} = M_{v,max} / W_v = 234.0 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{h,max} = M_{h,max} / W_h = 81.2 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{max} = M_{t,max} / W_t = 52.6 \text{ N/mm}^2$$

In een van de hoekpunten van het kokerprofiel komen deze spanningen gelijktijdig voor. De spanning in dit hoekpunt wordt dan:

$$\sigma_{max} = \sigma_{v,max} + \sigma_{h,max} = 315.2 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{max} = 52.6 \text{ N/mm}^2$$

## 2.2. Bepaling vermoeiingsbelasting.

- Vermoeiingsbelasting 1339-as op meetplaats 3 (wegmeetgegevens).

	omrekenniveau	aant. wisselingen
verticale buiging	$M_v = 7 \text{ kNm}$	$n = 393.000$
horizontale buiging	$M_h = 4 \text{ kNm}$	$n = 451.000$
torsie	$M_t = 10 \text{ kNm}$	$n = 65.000$

De buigbelastingen geven na omrekening volgens momentenlijn (zie fig. 38):

- Vermoeiingsbelasting 1346-as ter plaatse van de lasverbinding.

	omrekenniveau	aant. wisselingen
verticale buiging	$M_v = 10.11 \text{ kNm}$	$n = 393.000$
horizontale buiging	$M_h = 5.78 \text{ kNm}$	$n = 451.000$
torsie	$M_t = 10.00 \text{ kNm}$	$n = 65.000$

Dit zijn de belastingen die de lasverbinding kan verwachten gedurende zijn gebruiksperiode. De horizontale buiging en de torsie ontstaan door wisselende belastingen waarbij de gemiddelde spanning gelijk aan nul is. In de verticale richting is er sprake van een schommelbelasting omdat in deze richting ook een statische belasting heerst ten gevolge van het wagengewicht.

- Statische momenten en spanningen ten gevolge van het gewicht van een lege en volle wagen ter plaatse van de lasverbinding.

$$\begin{array}{ll}
 M_{v,leeg} = 6.3 \text{ kNm} & \sigma_{v,leeg} = 33.7 \text{ N/mm}^2 \\
 M_{v,vol} = 20.5 \text{ kNm} & \sigma_{v,vol} = 109.6 \text{ N/mm}^2
 \end{array}$$

- Vermoeiingsbelasting 1346-as uitgedrukt in spanningen.

	omrekenniveau	aant. wisselingen
verticale buiging	$\Delta\sigma_v = 54.0 \text{ N/mm}^2$	$n = 393.000$
horizontale buiging	$\Delta\sigma_h = 30.9 \text{ N/mm}^2$	$n = 451.000$
torsie	$\Delta\tau = 32.8 \text{ N/mm}^2$	$n = 65.000$

De torsiebelasting zal gezien het aantal wisselingen zeer weinig vermoeiingsschade geven. Ook wordt het defect door de torsie belasting slechts op langsafschuiving belast in tegenstelling tot de buigbelastingen, die het defect openen. Er zijn geen regels om de vermoeiingsschade van de verschillende modi te accumuleren. Om deze redenen wordt bij deze scheurgroeberekening alleen uitgegaan van de buigbelastingen.

Bij de wegmetingen is de spanningsrimpel ten opzichte van de nominale spanning gemeten, zodat het spanningstraject gelijk is aan tweemaal de spanningsplitude. Wanneer gerekend wordt met een volle vrachtwagen kan de vermoeiingsbelasting nu als volgt worden aangegeven:

	spanningstraject	spanningsverh.	aant. wisselingen
verticale buiging	$s = 108.0 \text{ N/mm}^2$	$R_{v,vol} = 0.34$	$n = 393.000$
horizontale buiging	$s = 30.9 \text{ N/mm}^2$	$R_h = 0.00$	$n = 451.000$

Deze vermoeiingsbelasting moet worden teruggebracht tot één omrekeniveau met bijbehorend aantal wisselingen. Doordat de lasverbinding over de volledige doorsnede gelijktijdig tot stand wordt gebracht mag verwacht worden dat na gelijkmatig afkoelen de residuële spanningen in de verbinding laag zijn. Nu geldt volgens de PD 6493:

$$S = \left( \frac{\sum ns^4}{3.93 \cdot 10^5} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Dit geeft het volgende equivalente constante amplitude belasting:

$$S = 108.2 \text{ N/mm}^2$$

$$R = 0.34$$

$$n = 3.93 \cdot 10^5 \text{ wisselingen}$$

Uit deze waarden blijkt dat de horizontale belasting vrijwel geen vermoeiingsschade geeft in verhouding met de verticale belasting. Bij de verdere berekening wordt ervan uitgegaan dat de scheur zich in het plaatgedeelte tussen de hoekpunten bevindt.

### 3. Scheurvorm en spanningsintensiteitsfaktor.

Om de kleinste kritische initiële scheurgrootte te bepalen wordt uitgegaan van randscheuren daar deze het meest kritisch zijn. Omdat vermoeiingsscheuren naar een vorm toegroeien waarbij de spanningsintensiteit langs de scheurtip constant is, wordt verwacht dat de kleinste ontoelaatbare scheur half cirkelvormig is. De scheur zal zich in het vlak loodrecht op de trekspanningsrichting vormen. Deze vorm en stand van de scheur is ook waargenomen na een 4-punts buigwisselproef van de

as (lab.kode mo86/719).

De kleinste vermoeingskritische randscheur die zal uitbreiden tot de ontoelaatbare cirkelvormige randscheur zal de vorm hebben van een halve ellips.

De spanningsintensiteit op plaats A en B (fig. 40) langs de rand van een semi-elliptische scheur kan worden beschreven door (lit. 5, blz. 50):

$$K_A = 2C_A \sigma \sqrt{\frac{a}{\pi}} \quad C_A = C_1 + C_2 \left(\frac{a}{B}\right)^2 + C_3 \left(\frac{a}{B}\right)^4$$

$$K_B = C_B \sigma \sqrt{\frac{a}{\pi}} \quad C_B = \left( C_1 + C_2 \left(\frac{a}{B}\right)^2 + C_3 \left(\frac{a}{B}\right)^4 \right) C_4 G$$

$$C_1 = 1.13 - 0.09 \frac{a}{c} \quad C_2 = -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + \frac{a}{c}}$$

$$C_3 = 0.5 - \frac{1}{0.65 + \frac{a}{c}} + 14 \left(1 - \frac{a}{c}\right)^{24} \quad C_4 = 1.1 + 0.35 \left(\frac{a}{B}\right)^2$$

$$G = \sqrt{\frac{a}{c}}$$

#### 4. Bepaling van kritische scheurgrootte.

De stootbelasting geeft een trekspanning van  $\sigma_{\max} = 315.2 \text{ N/mm}^2$ . Omdat de schuifspanning evenwijdig ligt aan de scheurrichting wordt de scheur hierdoor nauwelijks belast. De waarde van de kritische spanningsintensiteitsfactor van het lasmetaal is bepaald bij de trekproeven en heeft een waarde van ongeveer  $70 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . De kritische scheurgrootte kan nu worden bepaald door de spanningsintensiteitsfactor van de scheur gelijk te stellen aan de kritische spanningsintensiteitsfactor. Na berekening blijkt dat alleen door-de-dikte scheuren met een lengte groter dan 29 mm kritisch zijn. Omdat de onderhoudsvrije vrachtwagenas geen olie mag verliezen wordt een door-de-dikte scheur als ontoelaatbaar beschouwd.

## 5. Bepaling van de toelaatbare initiële scheurgrootte.

Doordat de scheuruitbreiding door de cyclische belasting op iedere plaats langs de scheurtip verschillend is, verandert de vorm van de semi-elliptische scheur ( $a/c$ ) bij iedere belastingwisseling. De scheuruitbreiding ten gevolge van de equivalente constante cyclische belasting zal daarom numeriek worden berekend. Omdat vermoeiingsscheuren naar een cirkelvorm toegroeien, wordt aangenomen dat de kleinste ontoelaatbare scheur half cirkelvormig is. Deze numerieke berekening wordt uitgevoerd met behulp van de regel van Paris en de correctie voor de spanningsverhouding volgens Elber.

$$\frac{da}{dn} = A (U \Delta K)^m \quad U = \frac{\Delta K_{\text{eff}}}{\Delta K}$$

Uitgaande van de cirkelvormige randscheur die net door de dikte groeit kan per wisseling de cyclische spanningsintensiteit op plaats A en B langs de scheurtip worden berekend. Met behulp van vermoeiingsgegevens kunnen de scheuruitbreidingen bij iedere cyclus op deze lokaties worden berekend en worden afgetrokken van de uitgangsscheur.

- Berekening op basis van de PD 6493.

Volgens de PD 6493 geldt voor een stompe lasverbinding van ferritisch staal met een vloeispanning kleiner dan  $600 \text{ N/mm}^2$  in een niet-agressieve omgeving en een temperatuur lager dan  $100^\circ\text{C}$  :

$$m = 4$$

$$A = 1.7 \cdot 10^{-6}$$

$$U = 1 \quad , \text{ met een overlevingskans van } 99.5\%$$

De maximaal toelaatbare lengte en diepte van de initiële semi-elliptische scheur wordt met de gegeven equivalente belasting berekend op:

$$\text{initiële scheurdiepte} = 2.6 \text{ mm}$$

$$\text{initiële scheurlengte} = 21.0 \text{ mm}$$

- Berekening op basis van de vermoeiingsgegevens.

$$m = 4$$

$$A = 6.0 \cdot 10^{-7}$$

$$U = 0.8 + 0.2 R \quad , \text{ met een overlevingskans van } 50\%$$

De maximaal toelaatbare lengte en diepte van de initiële semi-elliptische scheur wordt met de gegeven equivalente belasting berekend op:

$$\text{initiële scheurdiepte} = 7.1 \text{ mm}$$

$$\text{initiële scheurlengte} = 22.1 \text{ mm}$$



## Dankwoord.

Mijn dank gaat uit naar:

Ir.H.J. Schoorlemmer en Drs.A.A.A. Scheerder, die mij beiden zeer hartelijk hebben ontvangen en mij gewezen hebben op de mogelijkheden en begrenzingen van de A.E.-techniek voor dit onderzoek.

P.F. Colijn voor veel fotowerk en urenlange enthousiaste privécolleges.

Ir.M.R. Ling, dankzij wie het breukvlakonderzoek op de elektronenmicroscop van L&R mogelijk was.

Th.M. van Soest, die mij thuis heeft gebracht met de bediening van de vermoeiingsbank.

Ing.B.A. Wiersma, die onmisbaar was bij het gebruik van zijn besturingsprogrammatuur voor de vermoeiingsbank.

C.J. van Beekum, die het mogelijk maakte om nieuwe ideeën snel te realiseren.

**Tabel 1.** *Spanningsverhoudingen (R) van de constante amplitude proeven.*

C.A.-proef	R	$\Delta S$ (N/mm <sup>2</sup> )
6b	0.707	30.4
4	0.501	50.8
7b	0.303	71.3
3	0.121	91.4
6a	- 0.070	82.5
5	- 0.098	82.4
22	- 0.501	150

**Tabel 2.** *Kritische spanningsintensiteit ( $K_c$ ).*

Trekproef	$K_c$ (MPa $\sqrt{m}$ )	a (mm)
2	79.8	30.1
18	84.5	36.5
19	74.6	34.3
23	75.4	39.5
24	77.2	39.0
25	74.7	38.9
26	70.2	39.7

**Tabel 3.** *Detecteerbare spanningsintensiteit ( $K_{det}$ ) met hydraulische trekbank.*

A.E.-proef	$K_{det}$ (MPa $\sqrt{m}$ )
2	76
9	71
10	56
11	50

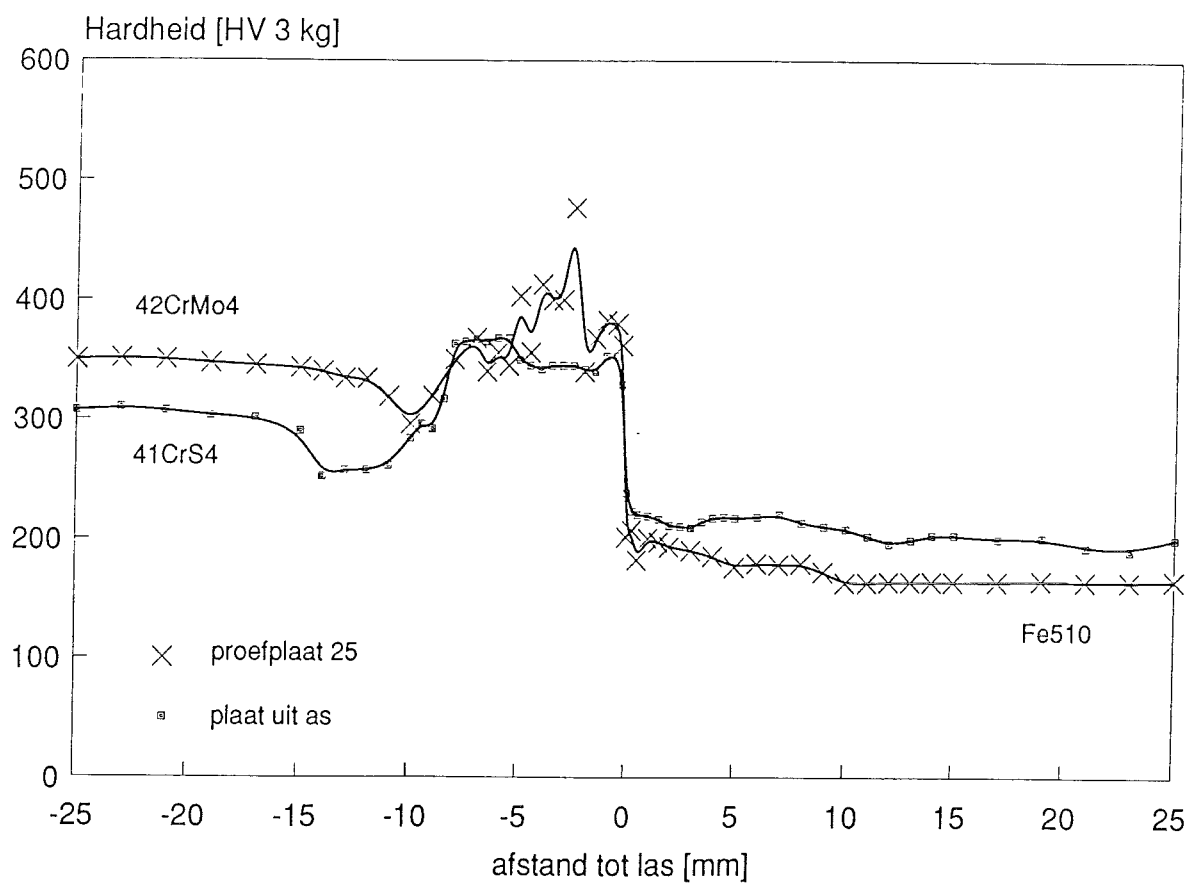
**Tabel 4.** *Detecteerbare spanningsintensiteit ( $K_{det}$ ) met elektromechanische trekbank.*

A.E.-proef	$K_{det}$ (MPa $\sqrt{m}$ )
18a	61
18b	58
19	53
20	19*
21	55
22	62
23	55
24	54
25	57
26	52

\* A.E. is niet afkomstig van plastische deformatie, maar van hoorbare scheurstappen in het staal 42CrMo4.



**Figuur 1.** *Slakinsluitel in de afbrandstuiklas van een vrachtwagenas.*



**Figuur 2.** *Hardheidsverloop van de afbrandstuiklas in een as en in een proefplaat.*



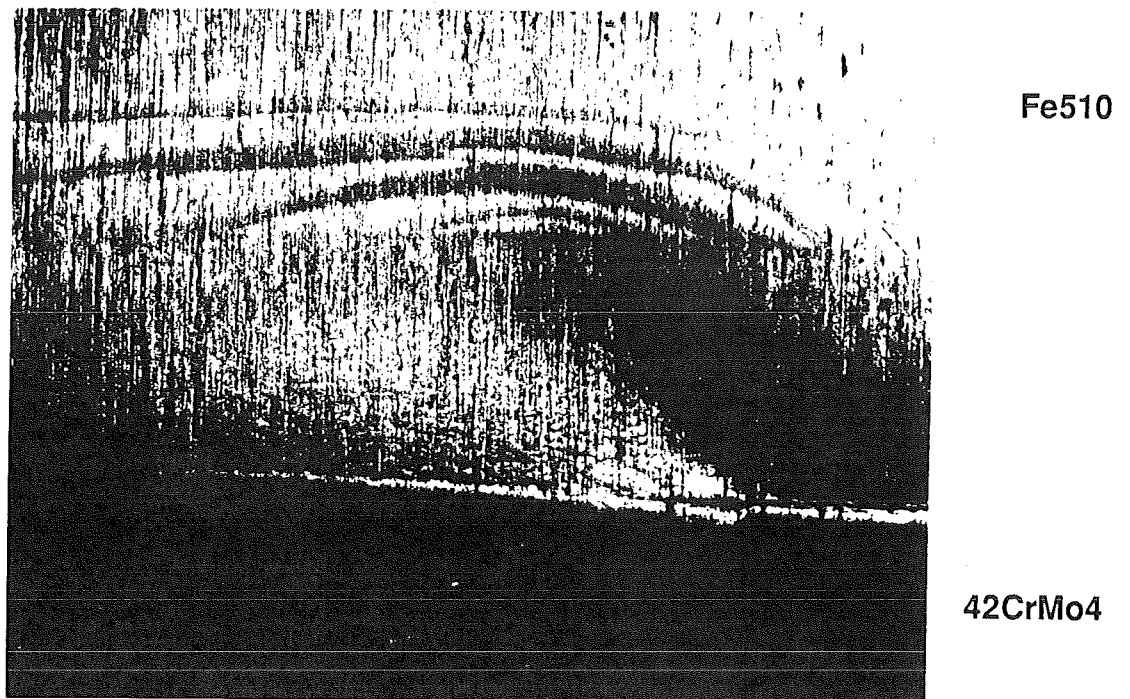
Fe510

$H_v = 210$

$H_v = 360$

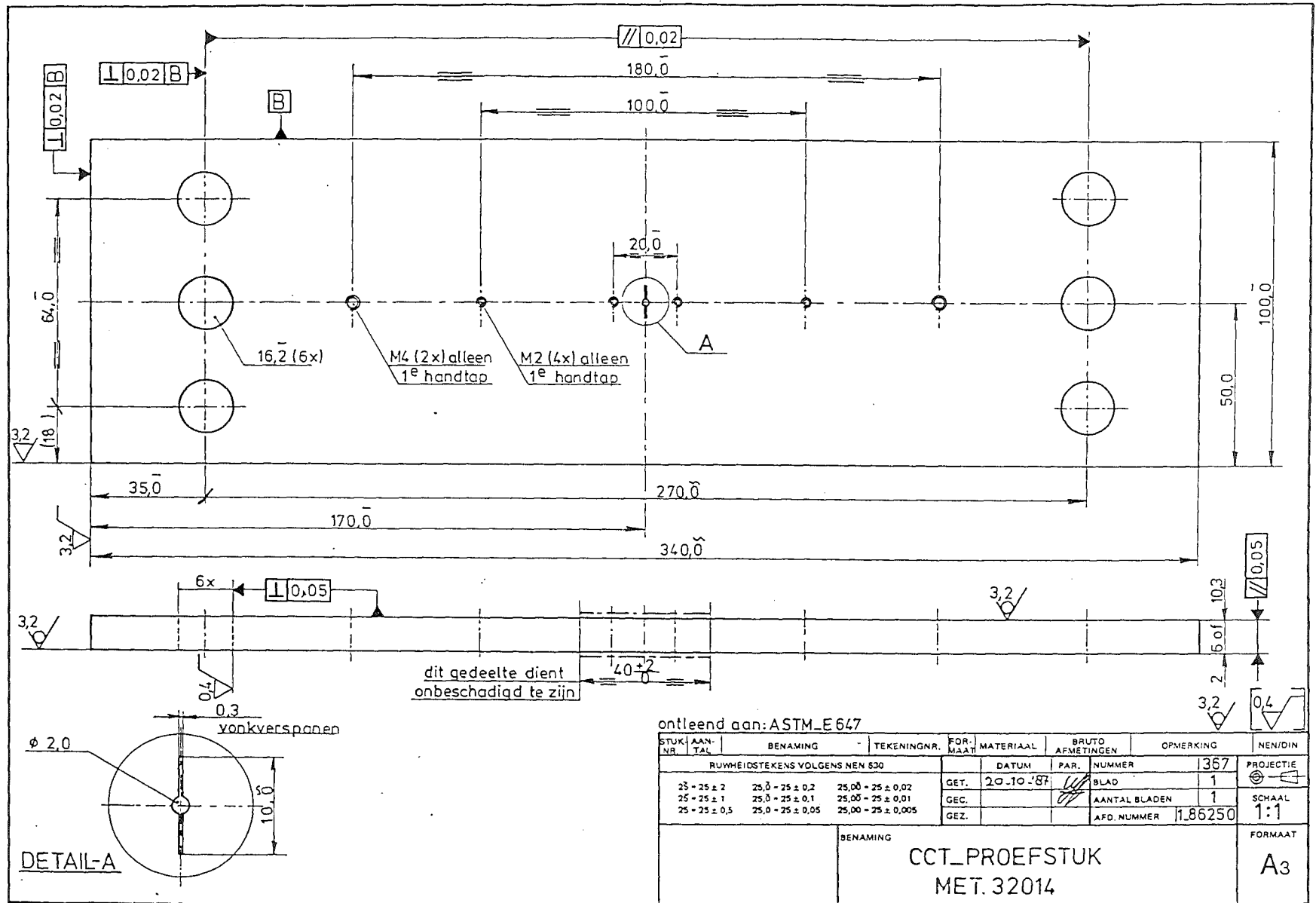
42CrMo4

**Figuur 3.** *Hardheidsprikken aan weerszijden van de scheur in een proefplaat (vergroting 157 x, aangeëtst met 5 % kourbatoff oplossing).*

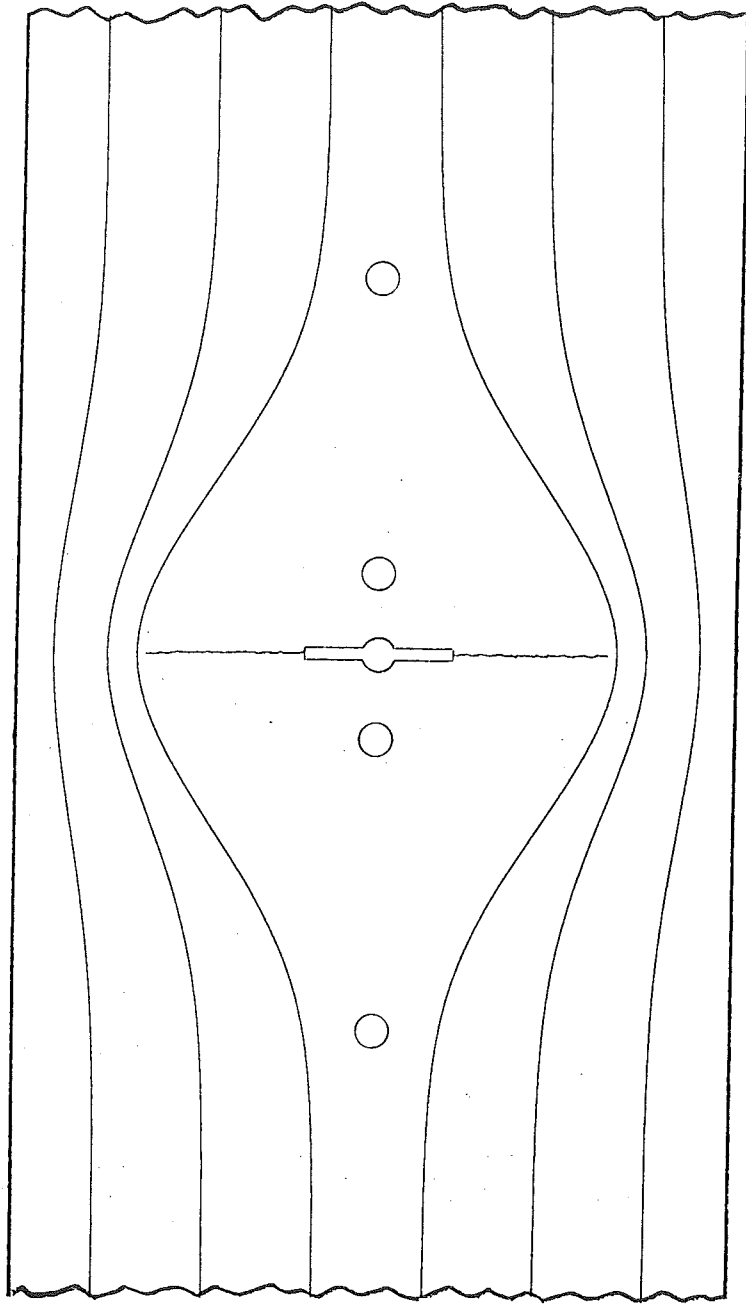


**Figuur 4.** *De plastische zone van een belaste scheur (vergroting 6.3 x).*

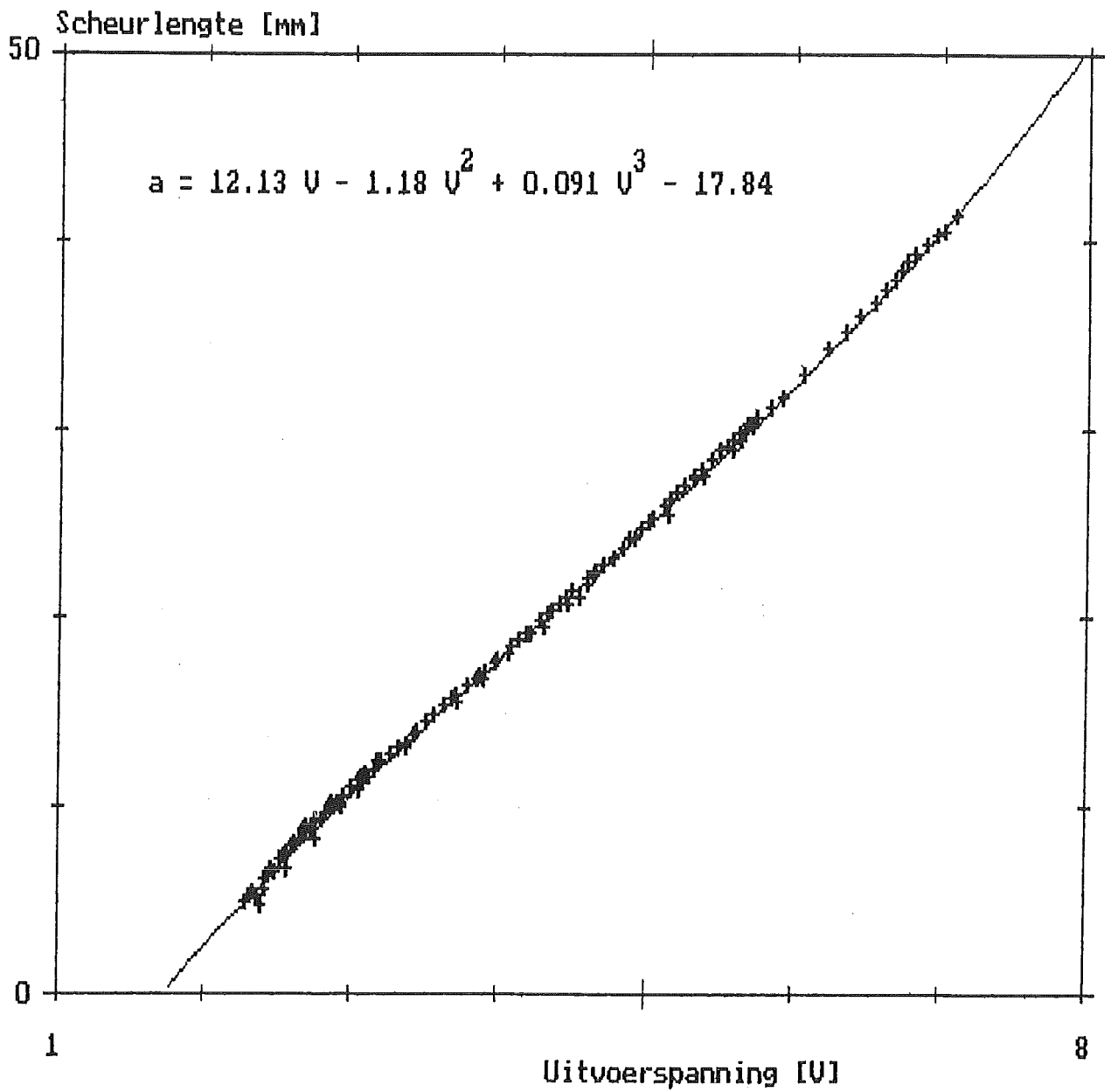
Figuur 5. De CCT-proefplaat volgens ASTM-standaard E647-88A.



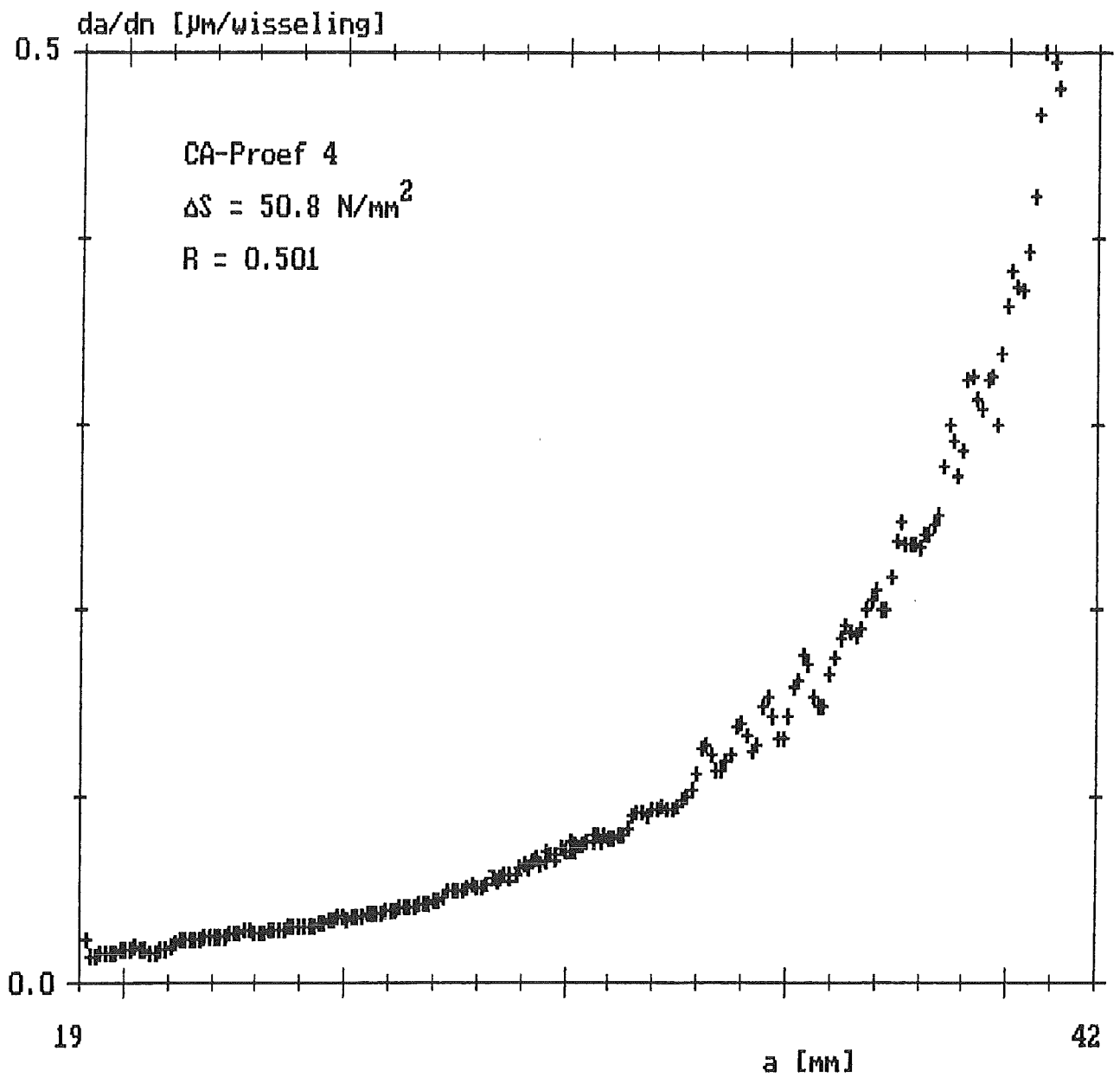




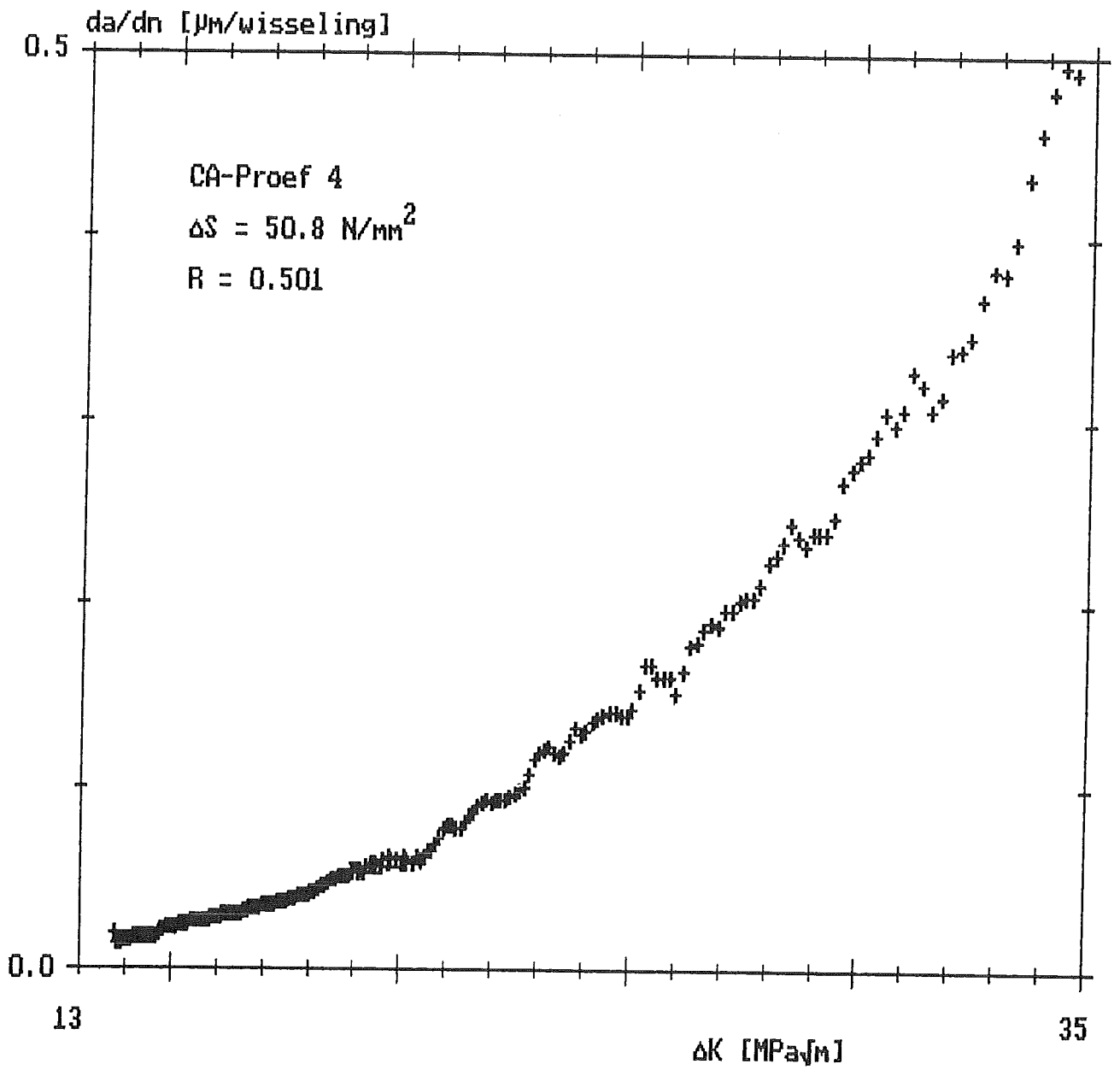
**Figuur 6.** *De stroomlijnen in een gescheurde proefplaat en de contactpunten voor de potentiaalvalmeting.*



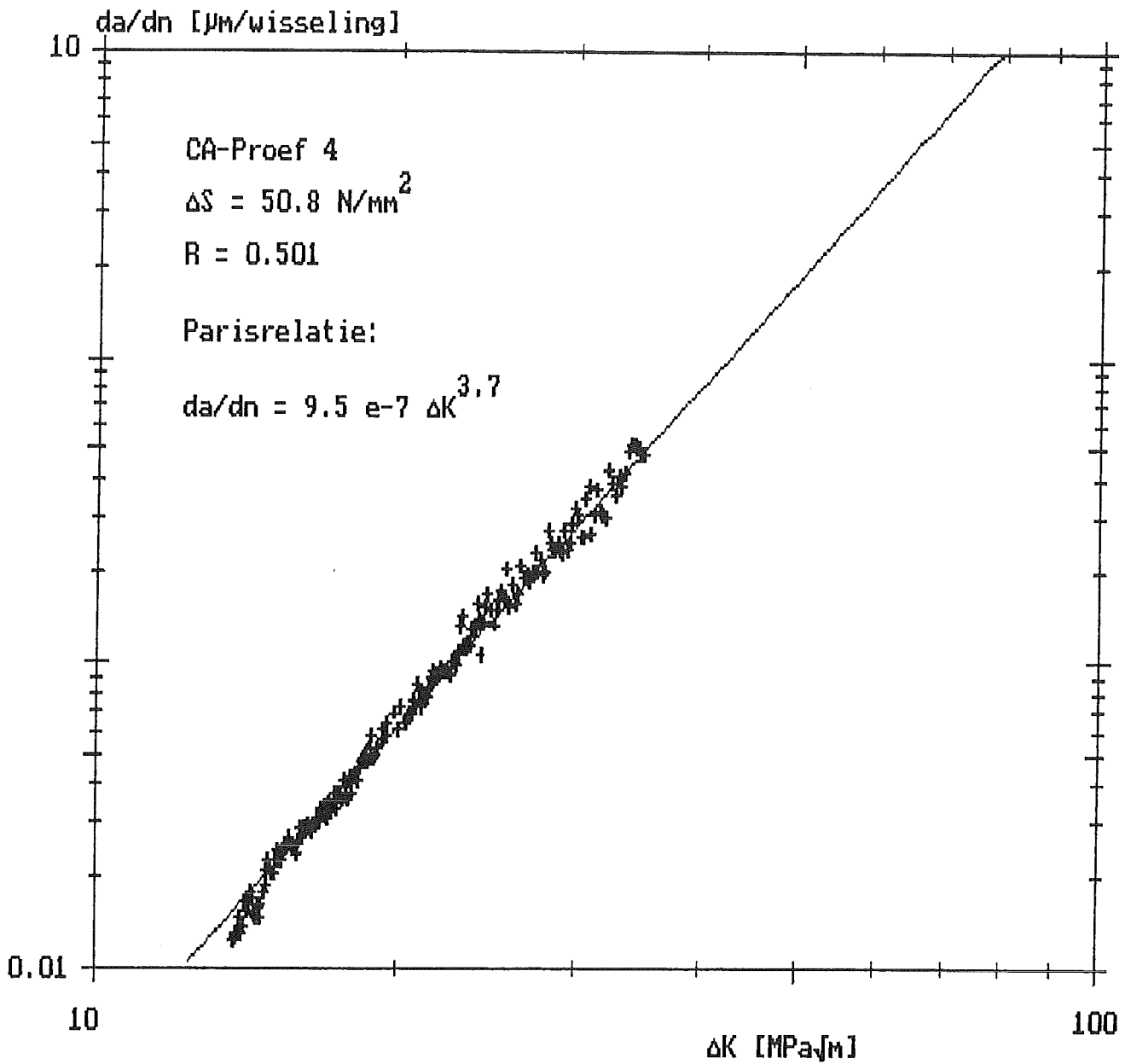
Figuur 7. De relatie tussen de uitvoerspanning van de potentiaalvalmeter (V) en de scheurlengte (a).



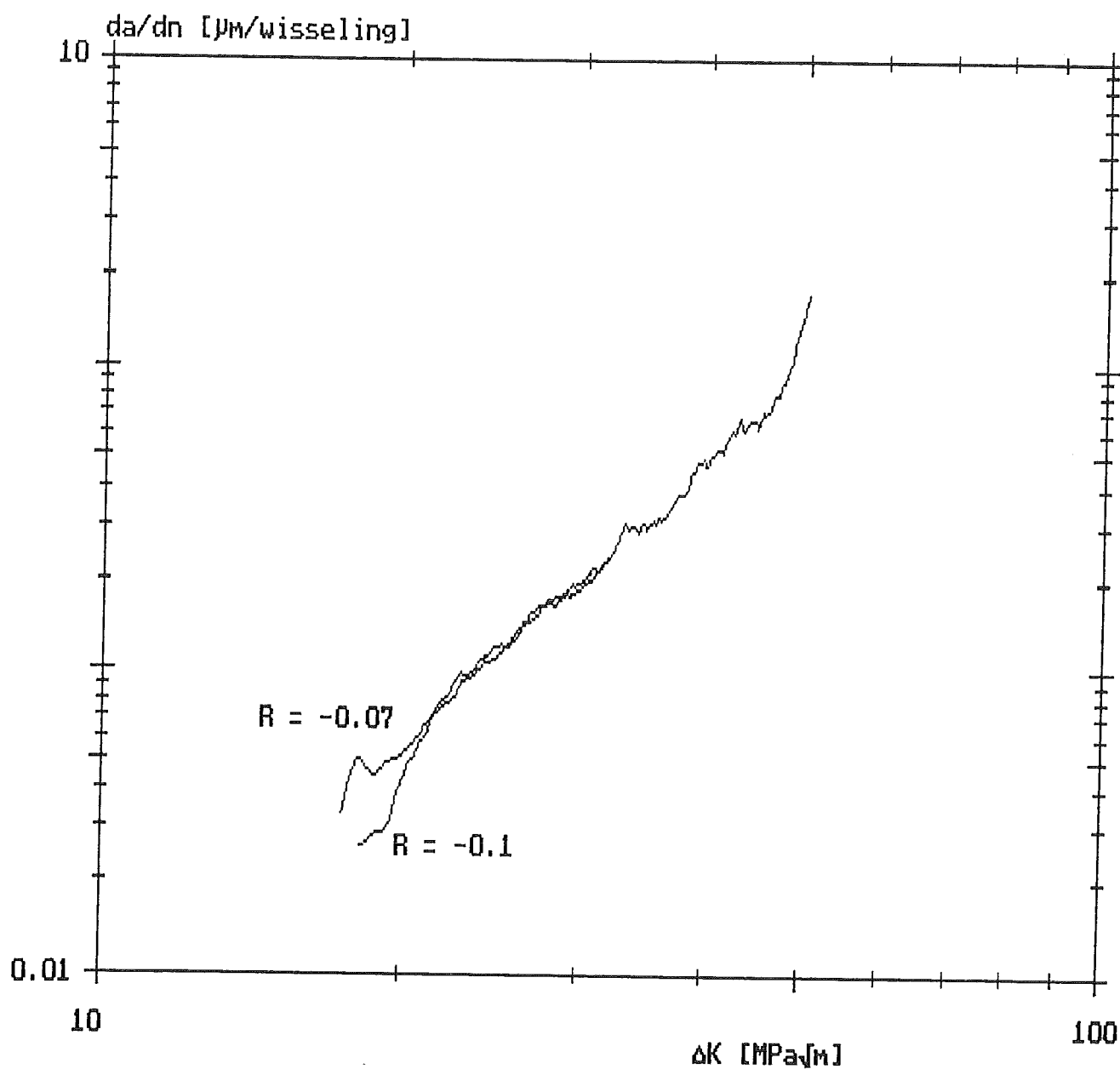
Figuur 8. De relatie tussen de scheurgroeisnelheid ( $da/dn$ ) en de scheurlengte ( $a$ ) bij een constante amplitude belasting met een constante spanningsverhouding ( $R$ ).



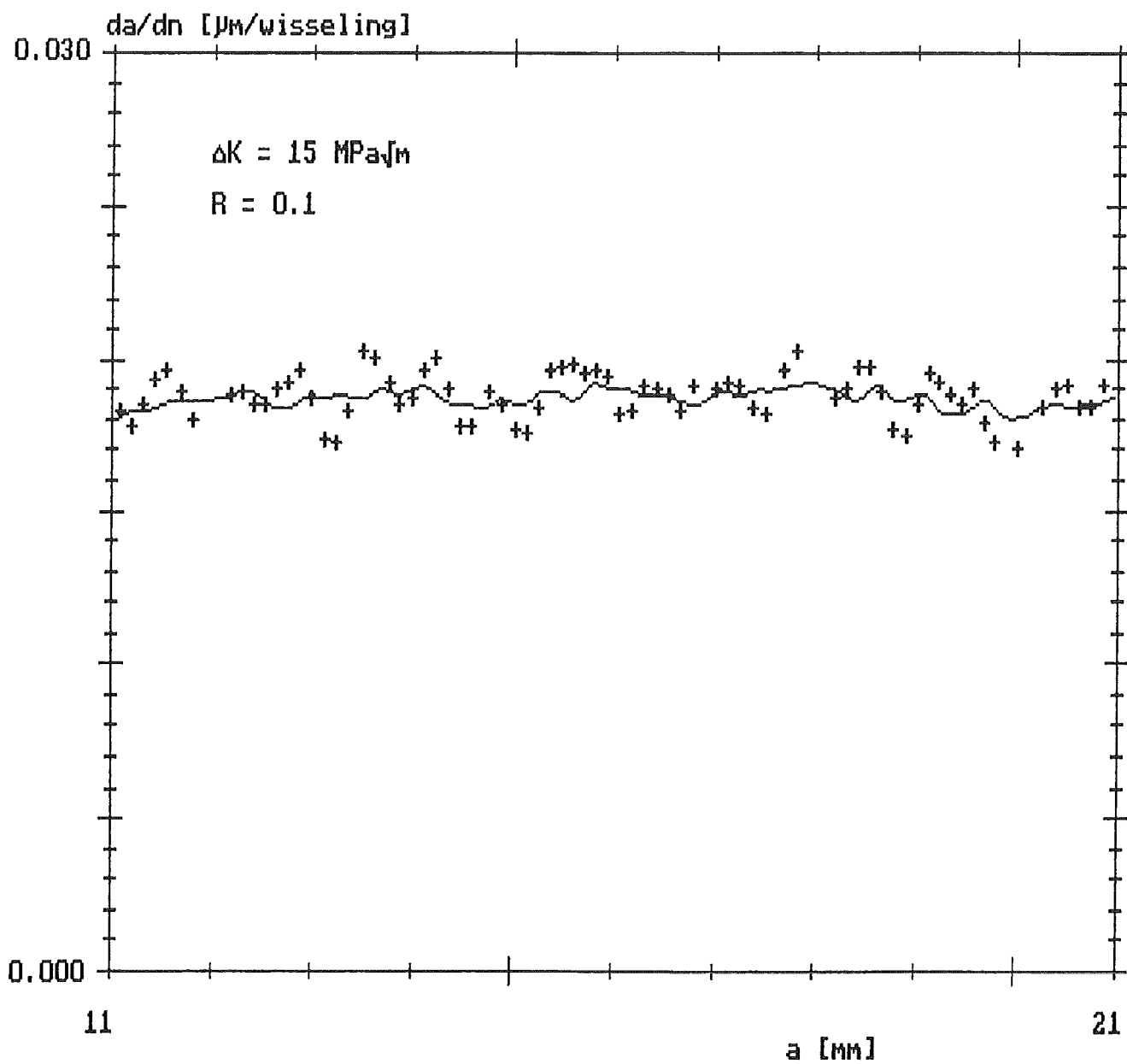
Figuur 9. De relatie tussen de scheurgroeisnelheid ( $da/dn$ ) en de cyclische spanningsintensiteit ( $\Delta K$ ) bij een constante spanningsverhouding ( $R$ ).



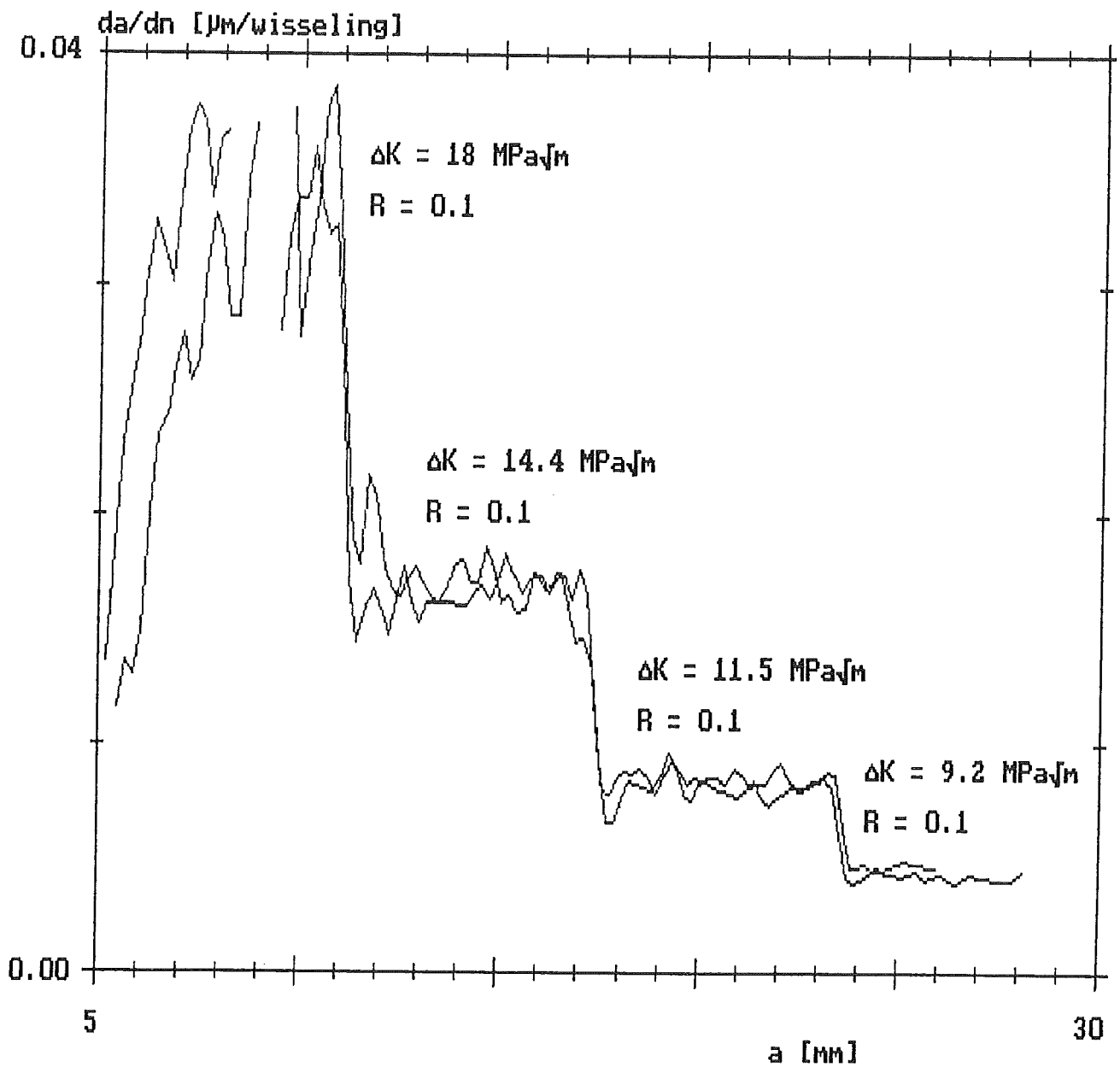
Figuur 10. De relatie tussen de scheurgroeisnelheid ( $da/dn$ ) en de cyclische spanningsintensiteit ( $\Delta K$ ) bij een constante spanningsverhouding ( $R$ ) op logaritmische schaal.



Figuur 11. De relatie tussen de scheurgroeisnelheid ( $da/dn$ ) en de cyclische spanningsintensiteit ( $\Delta K$ ) van twee constante amplitude proeven met nagenoeg dezelfde spanningsverhouding.

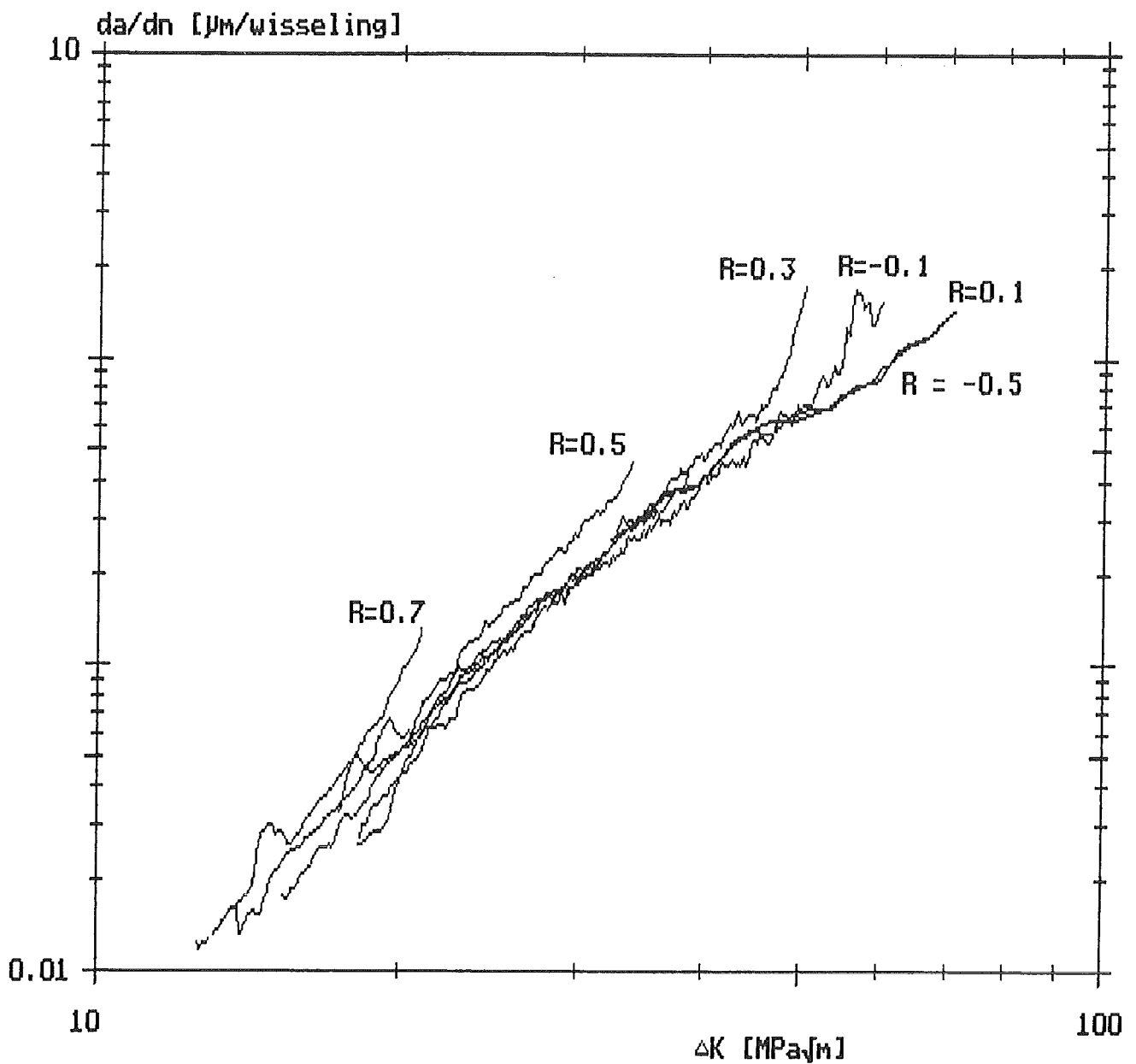


Figuur 12. De scheurgroei­nelheid ( $da/dn$ ) van een proef met een constante cyclische spanningsintensiteit ( $\Delta K$ ) en een constante spannings­verhouding ( $R$ ).

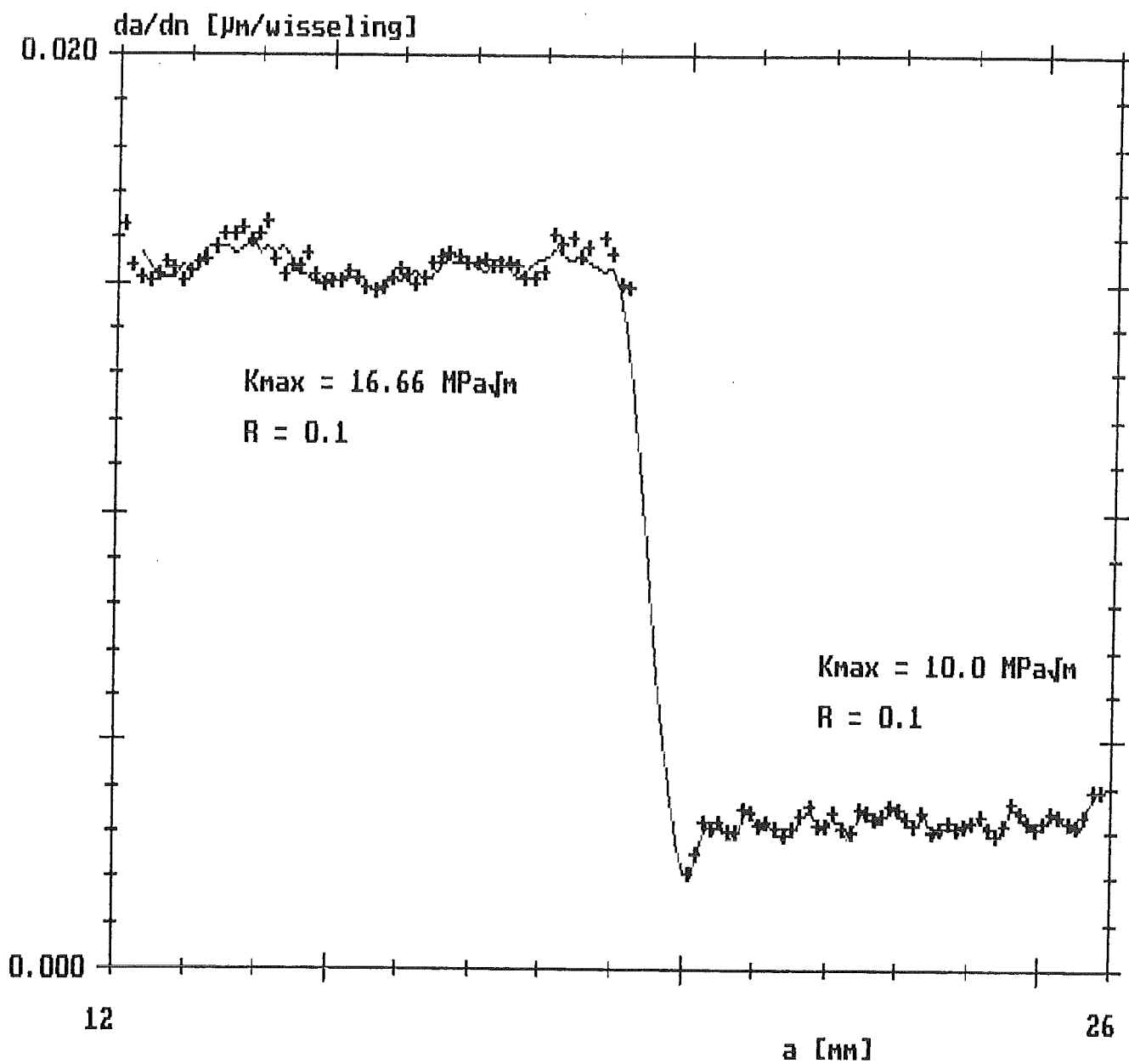


Figuur 13. Scheurgroeisnelheden ( $da/dn$ ) van twee proeven met dezelfde constante cyclische spanningsintensiteit ( $\Delta K$ ) en spanningsverhouding ( $R$ ).

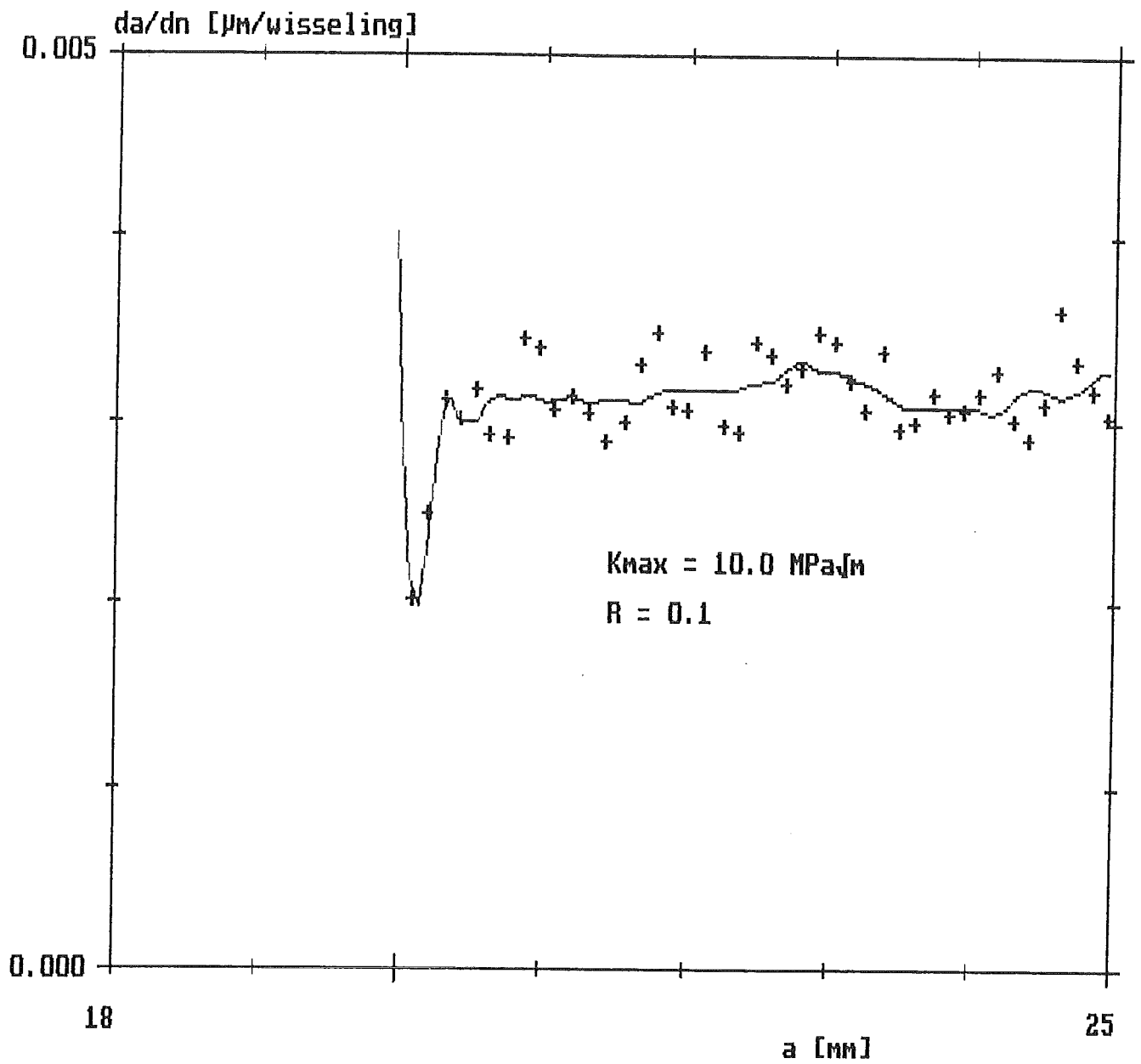




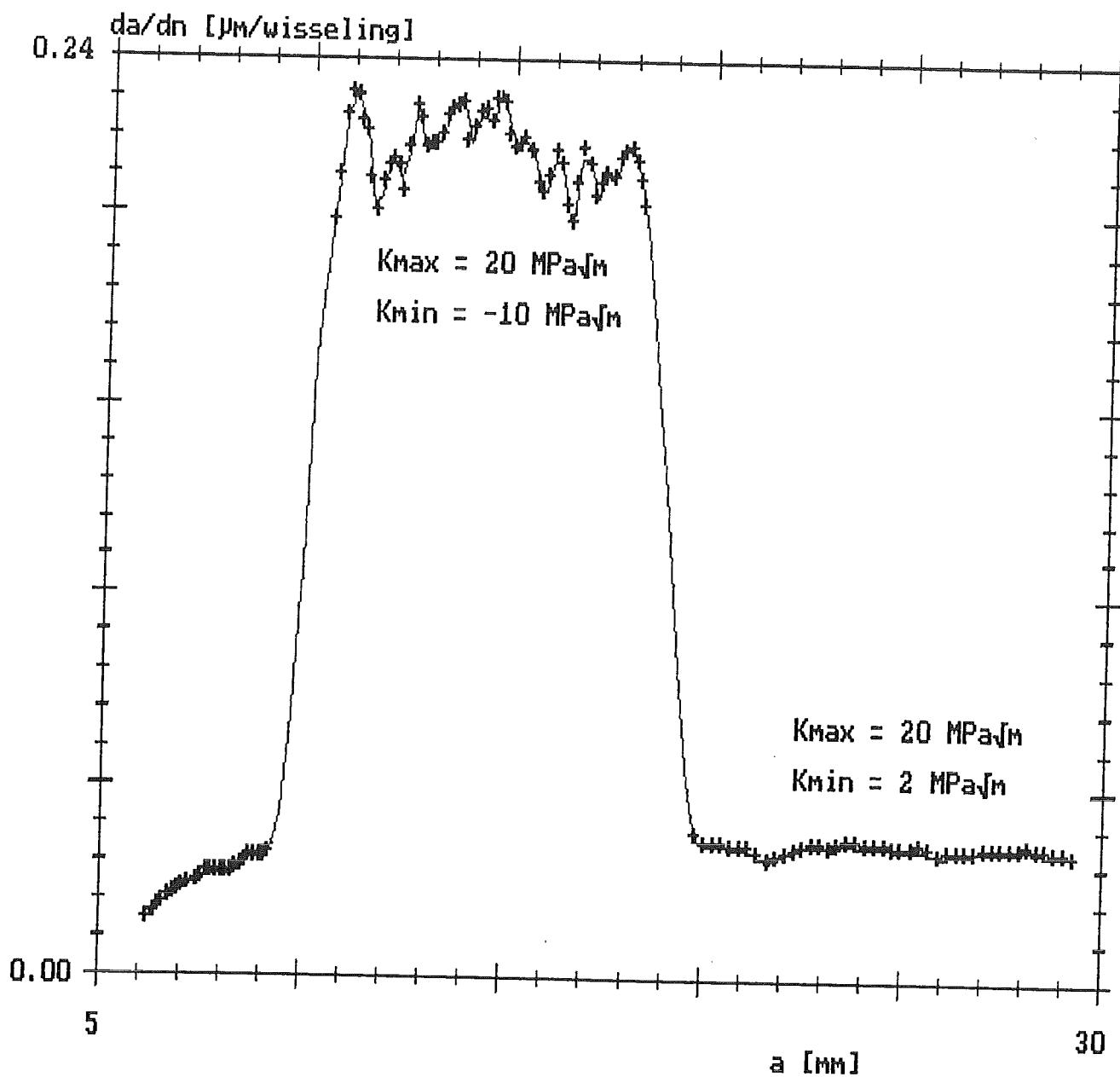
Figuur 14. De relaties tussen de scheurgroeisnelheid ( $da/dn$ ) en de cyclische spanningsintensiteit ( $\Delta K$ ) bij verschillende spanningsverhoudingen ( $R$ ) op logaritmische schaal.



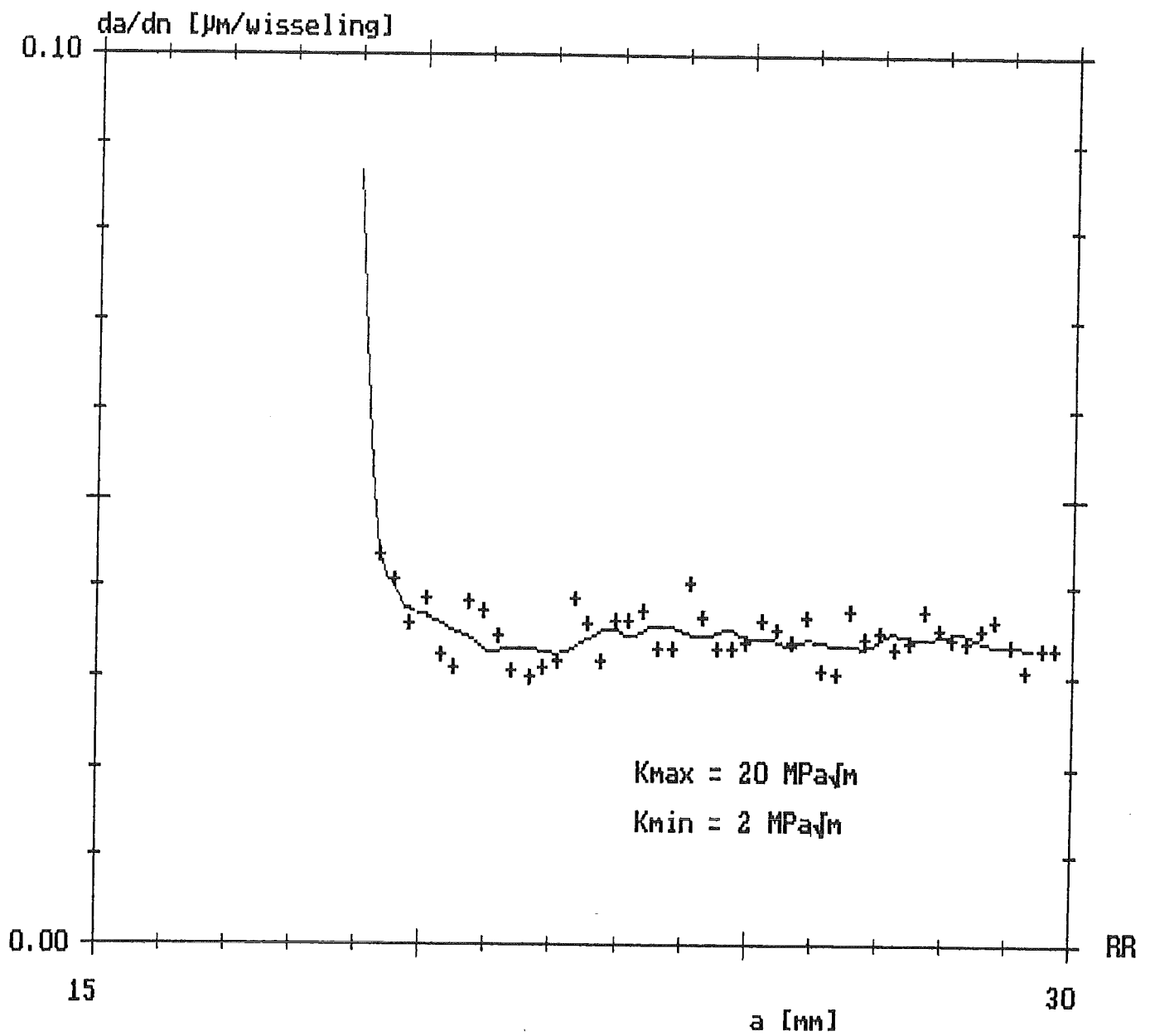
Figuur 15. De scheurgroeisnelheid ( $da/dn$ ) na een plotselinge verlaging van de maximale spanningsintensiteit ( $K_{max}$ ) van 40 %.



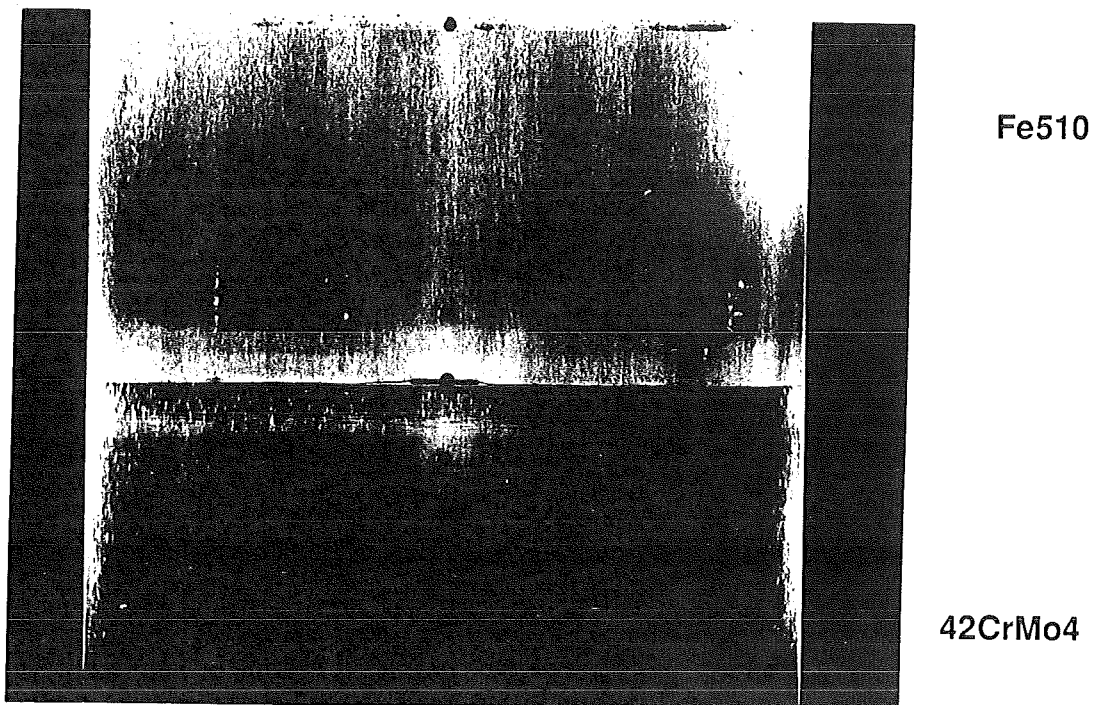
Figuur 16. Een detailweergave van de scheurgroeisnelheid ( $da/dn$ ) na een plotselinge verlaging van de maximale spanningsintensiteit ( $K_{\text{max}}$ ) van 40 %.



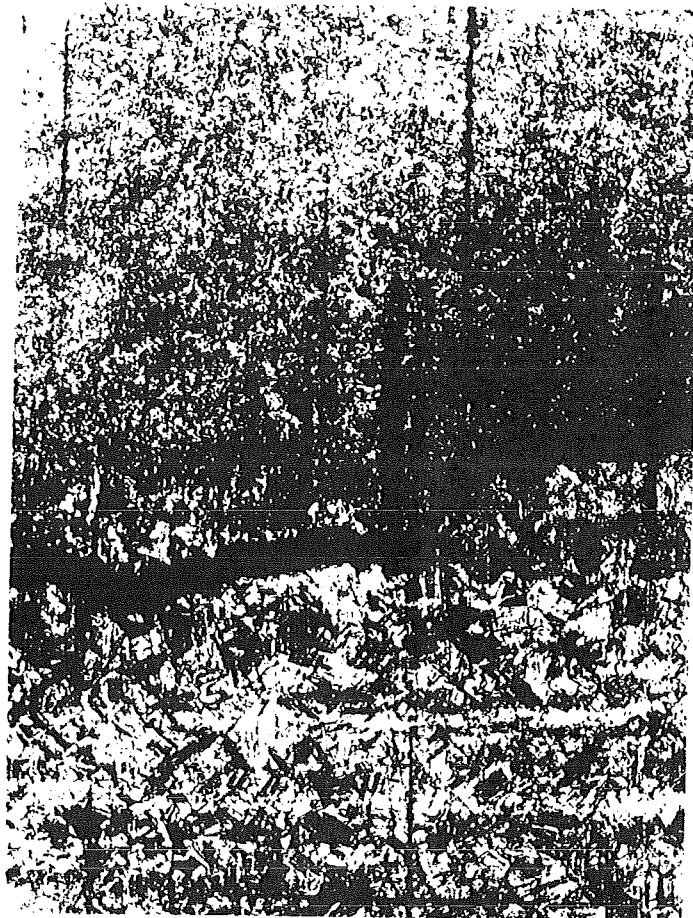
Figuur 17. Scheurgroei­nelheid ( $da/dn$ ) na een plotselinge verhoging van de minimale spanningsintensiteit ( $K_{\text{min}}$ ) van 120 %.



Figuur 18. Een detailweergave van de scheurgroeisnelheid ( $da/dn$ ) na een plotselinge verhoging van de minimale spanningsintensiteit ( $K_{\min}$ ) van 120 %.



*Figuur 19. Een vermoeiingsscheur in een proefplaat die naar de lasnaad is gegroeid.*

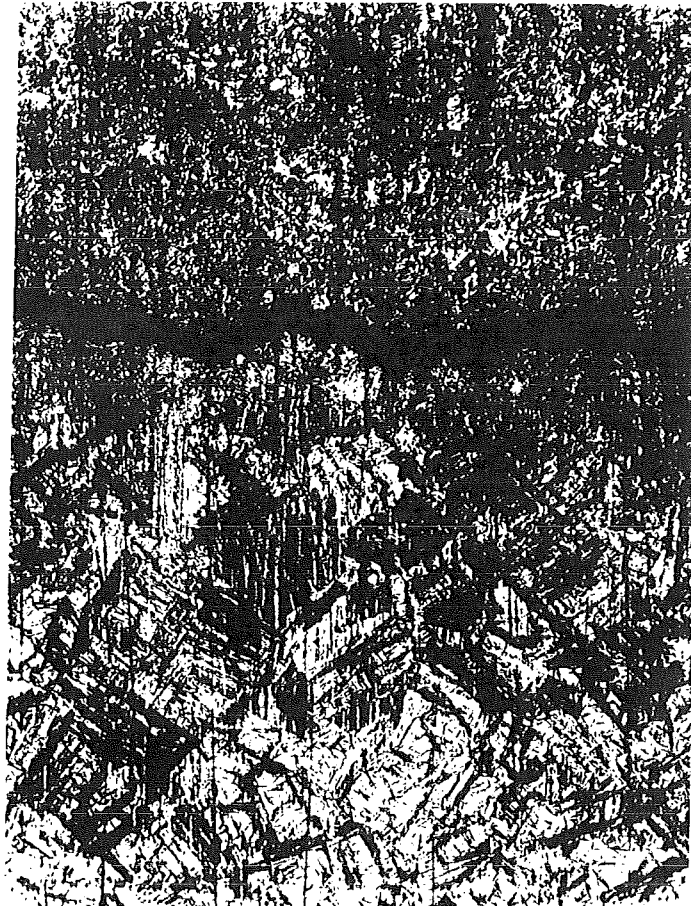


Fe510

42CrMo4

←  
Scheurgroeirichting

**Figuur 20.** Een detail van een vermoeiingsscheur in een proefplaat die na een sprong vlak langs de lasnaad is gaan groeien (vergroting 52 x, aangeëtst met 5 % kourbatoff oplossing).



Fe510

lasnaad

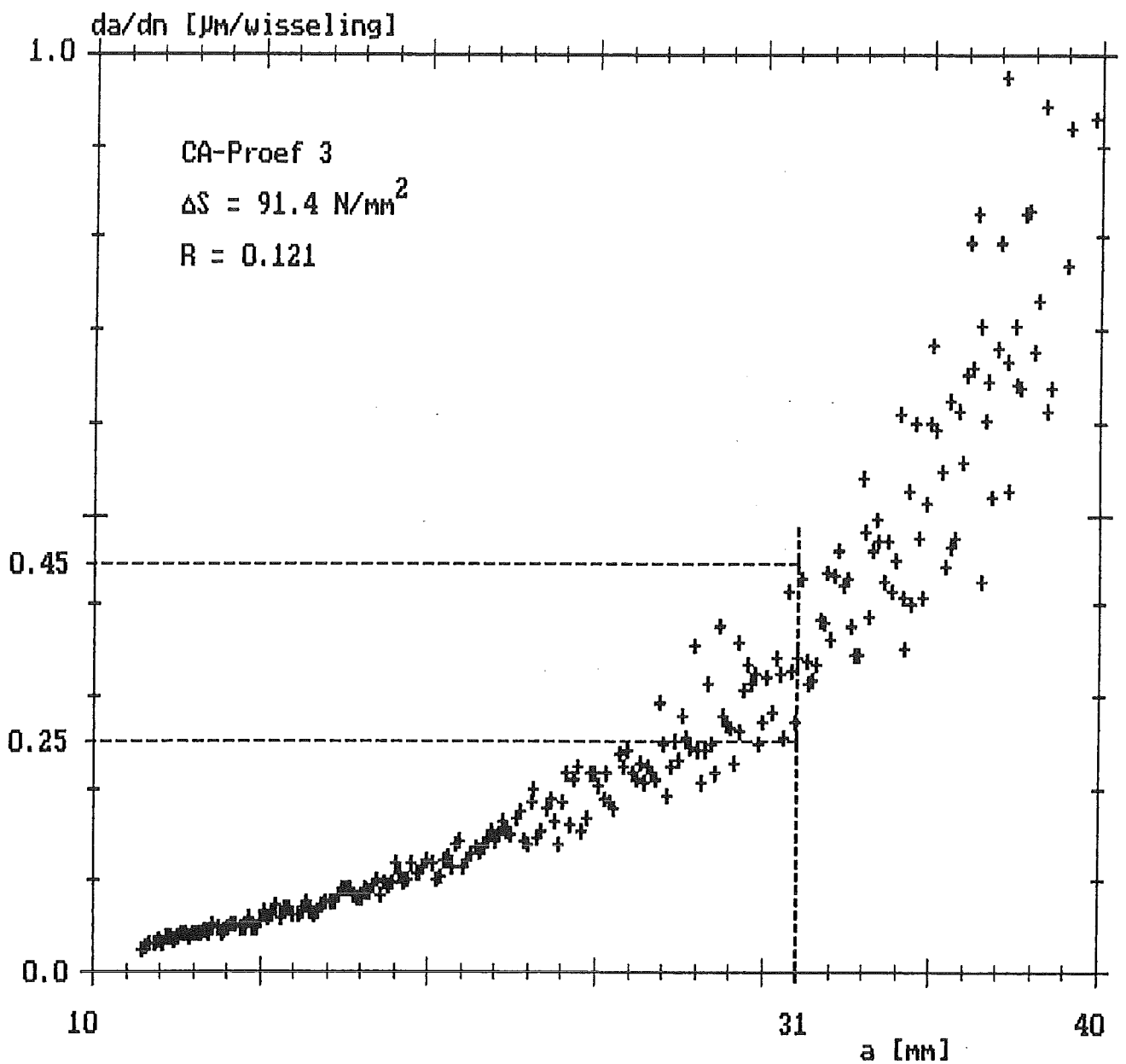
42CrMo4

**Figuur 21.** De vermoeiingsscheur in een proefplaat vlak naast de lasnaad aan de staal Fe510-zijde (vergroting 100 x, aangeëtst met 5 % kourbatoff oplossing).

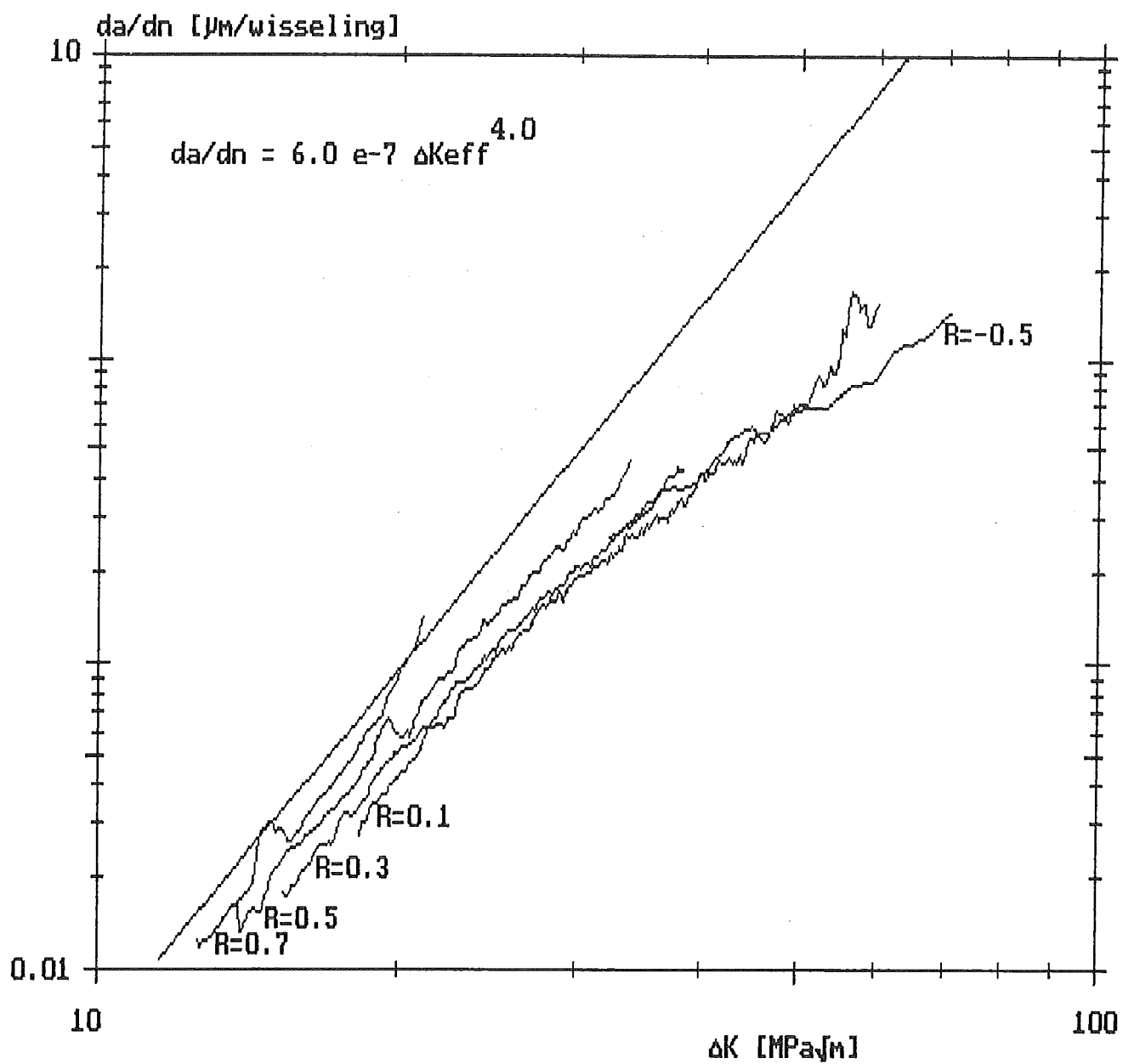




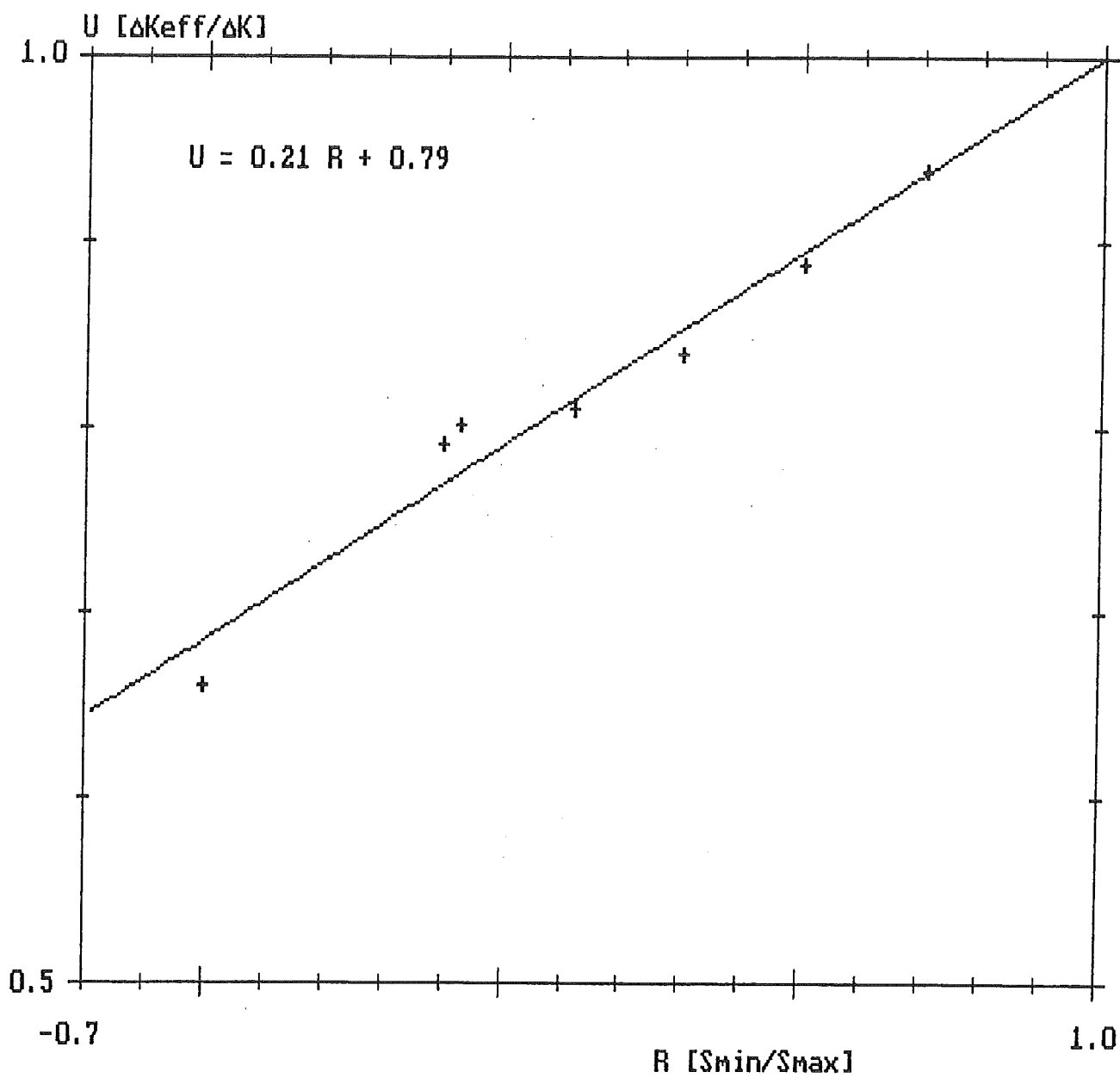
**Figuur 22.** Met behulp van een elektronenmicroscop gefotografeerde striaties op het breukvlak aan de staal 42CrMo4 zijde van een proefplaat (vergroting 4000 x, breukvlak 35° verdraaid).



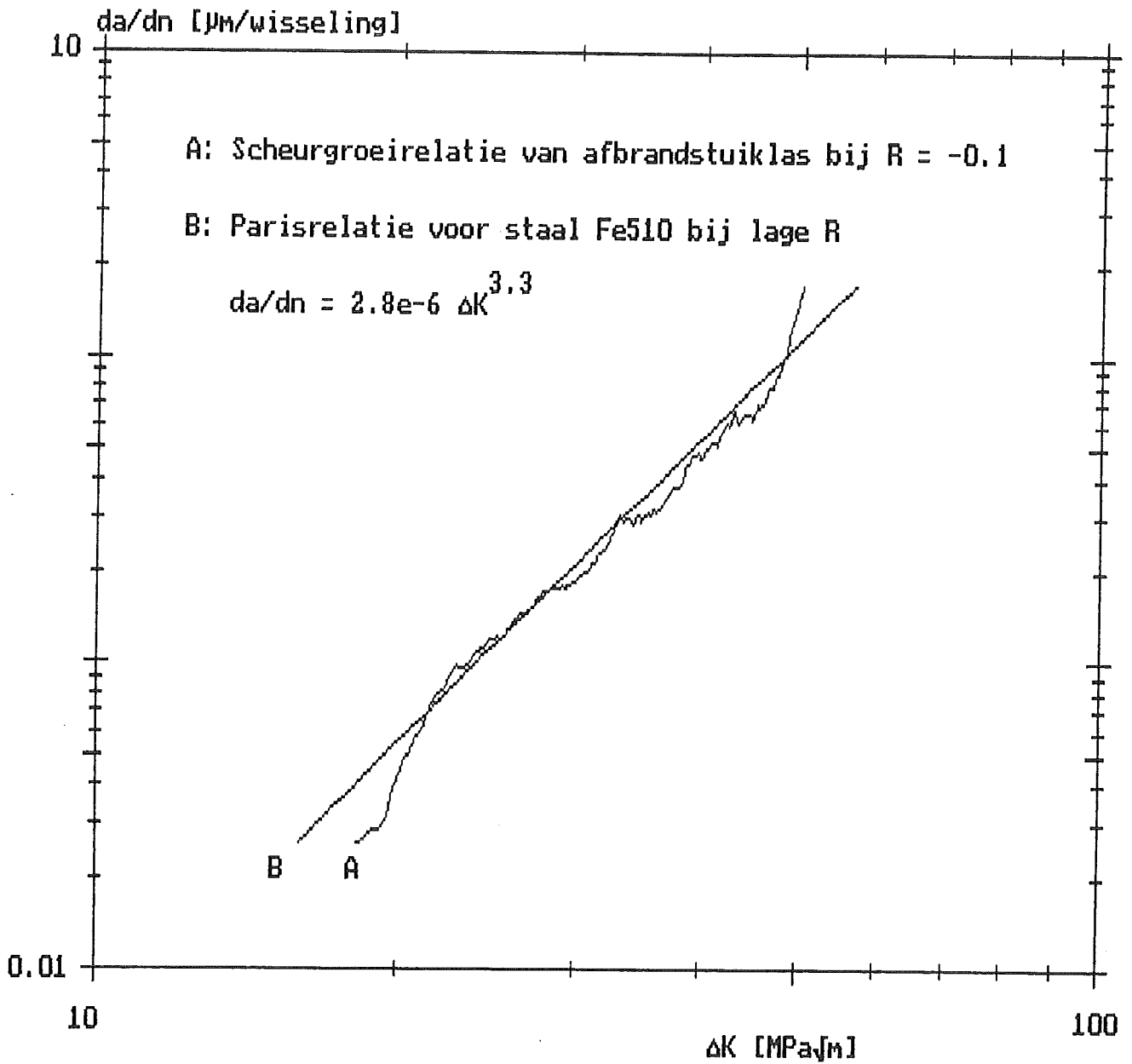
Figuur 23. De spreidingsband in de meting van de scheurgroeisnelheid ( $da/dn$ ) ter plaatse van de gefotografeerde striaties ( $a = 31 \text{ mm}$ ).



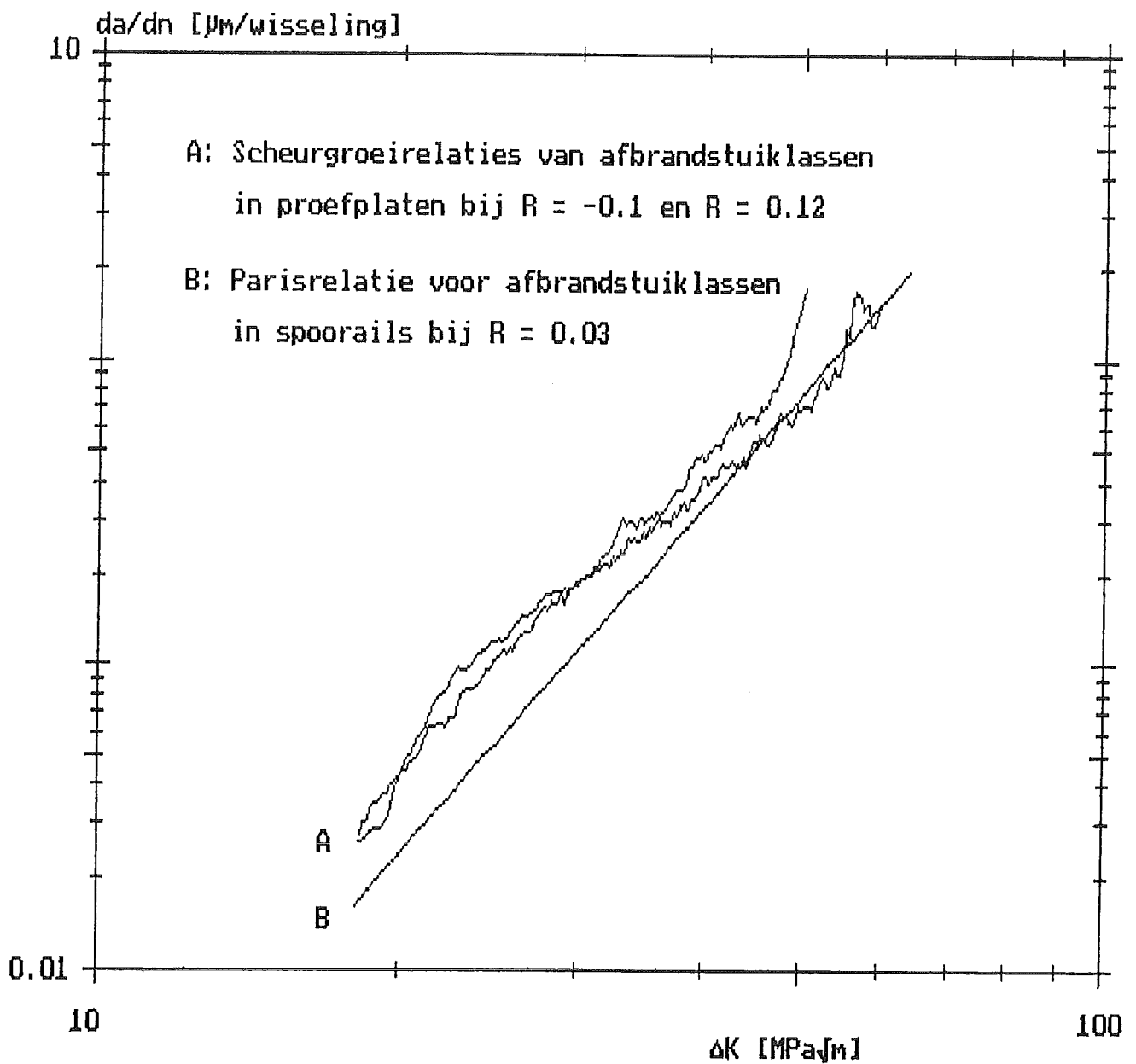
Figuur 24. De geëxtrapolerde relatie tussen de scheurgroei­nelheid ( $da/dn$ ) en de effectieve cyclische spanningsintensiteit ( $\Delta K_{\text{eff}}$ ).



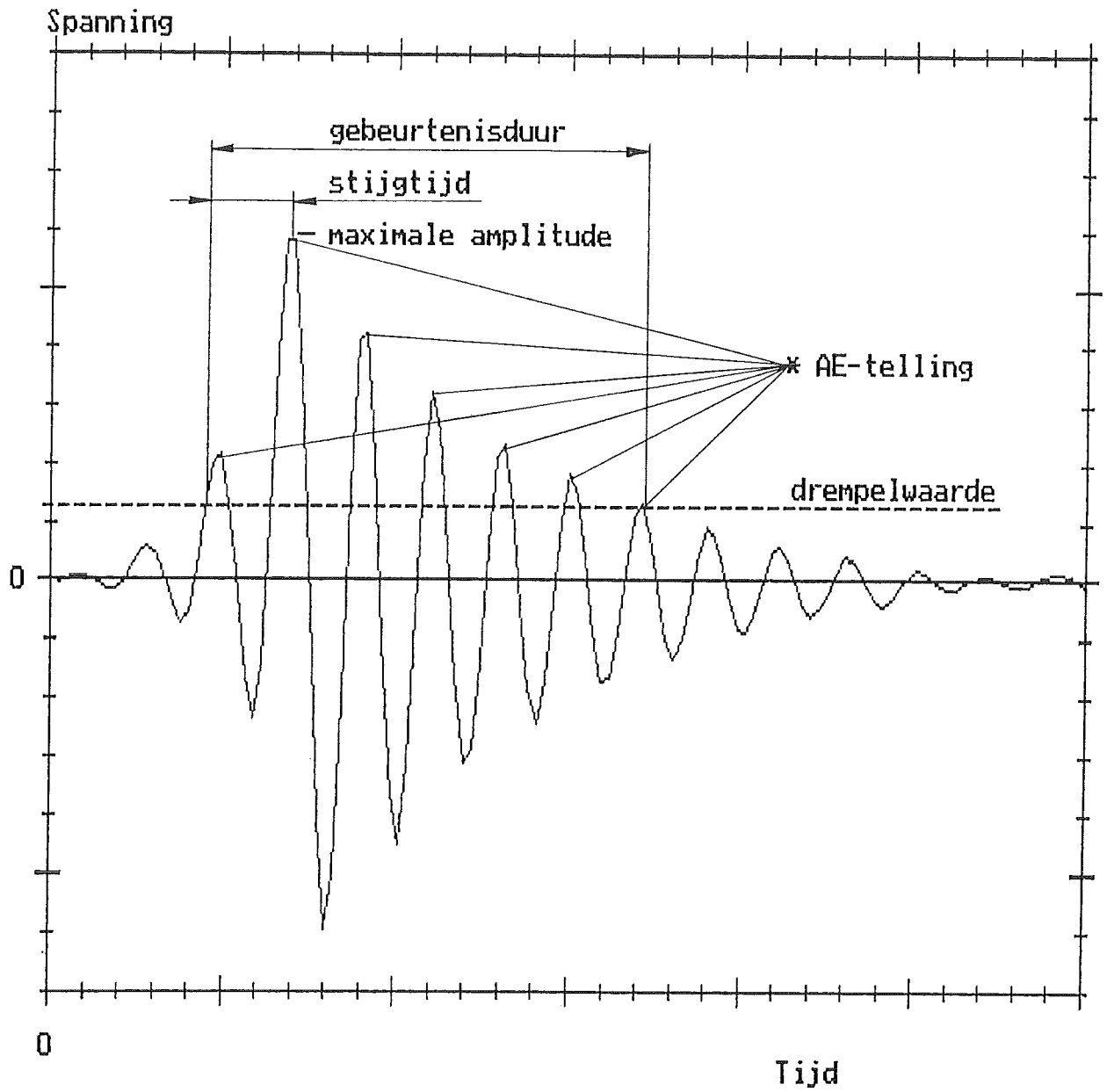
Figuur 25. De relatie tussen de verhouding van de opgelegde- en effectieve cyclische spanningsintensiteit ( $U$ ) en de spanningsverhouding ( $R$ ).



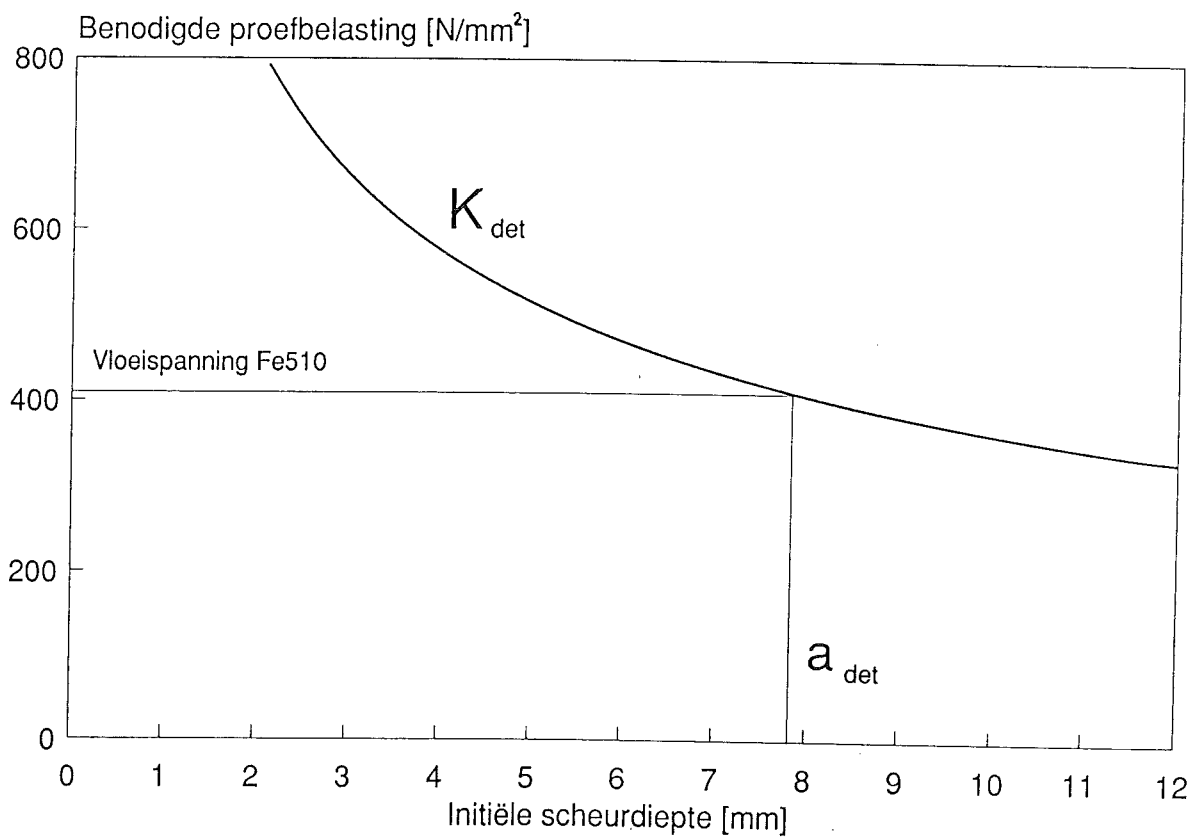
Figuur 26. De scheurgroeirelatie van de afbrandstuiklas in een proefplaat (A) en de benadering van de scheurgroeirelatie van homogeen staal Fe510 (B) bij een lage spanningsverhouding.



**Figuur 27.** De scheurgroei-relaties van de afbrandstuiklassen in de proefplaten (A) en de benadering van de scheurgroei-relatie van de afbrandstuiklassen in spoorrails (B) bij vergelijkbare spanningsverhoudingen.

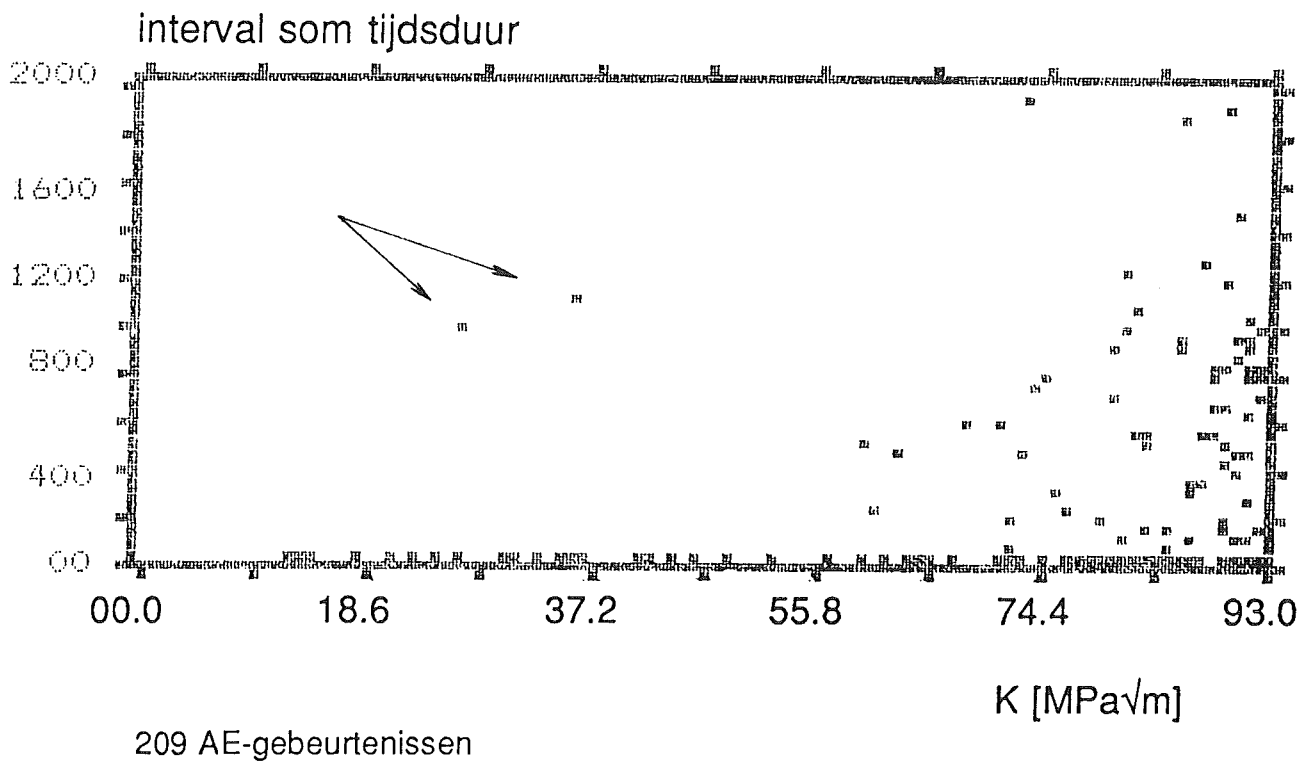
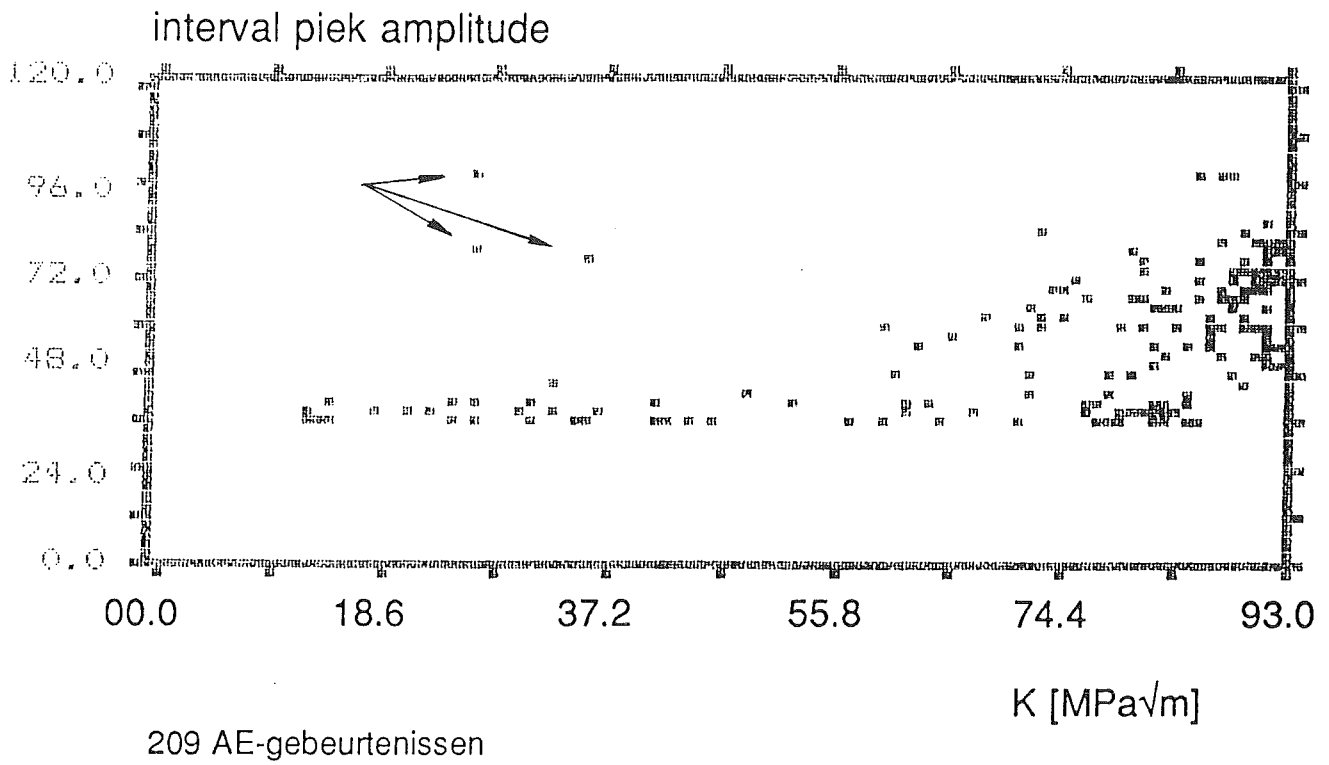


Figuur 28. De schematische weergave van een A.E.-signaal.

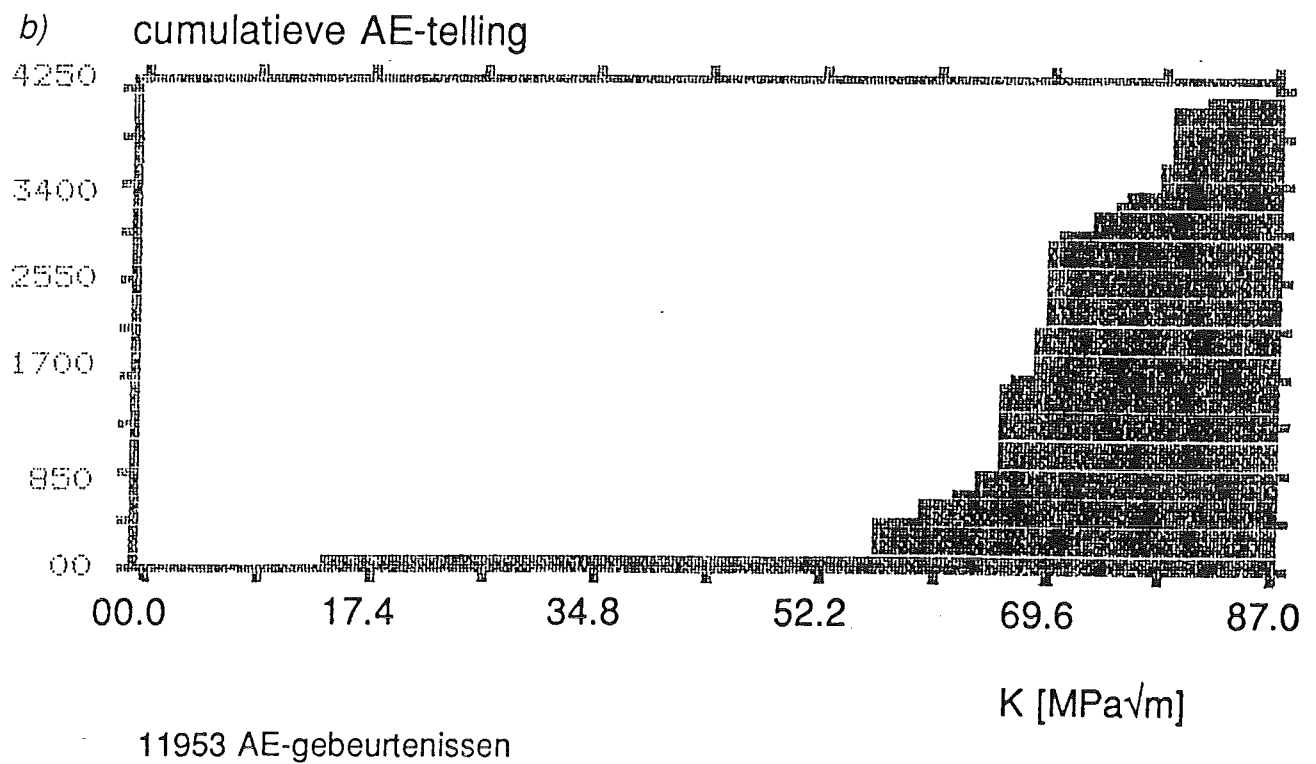
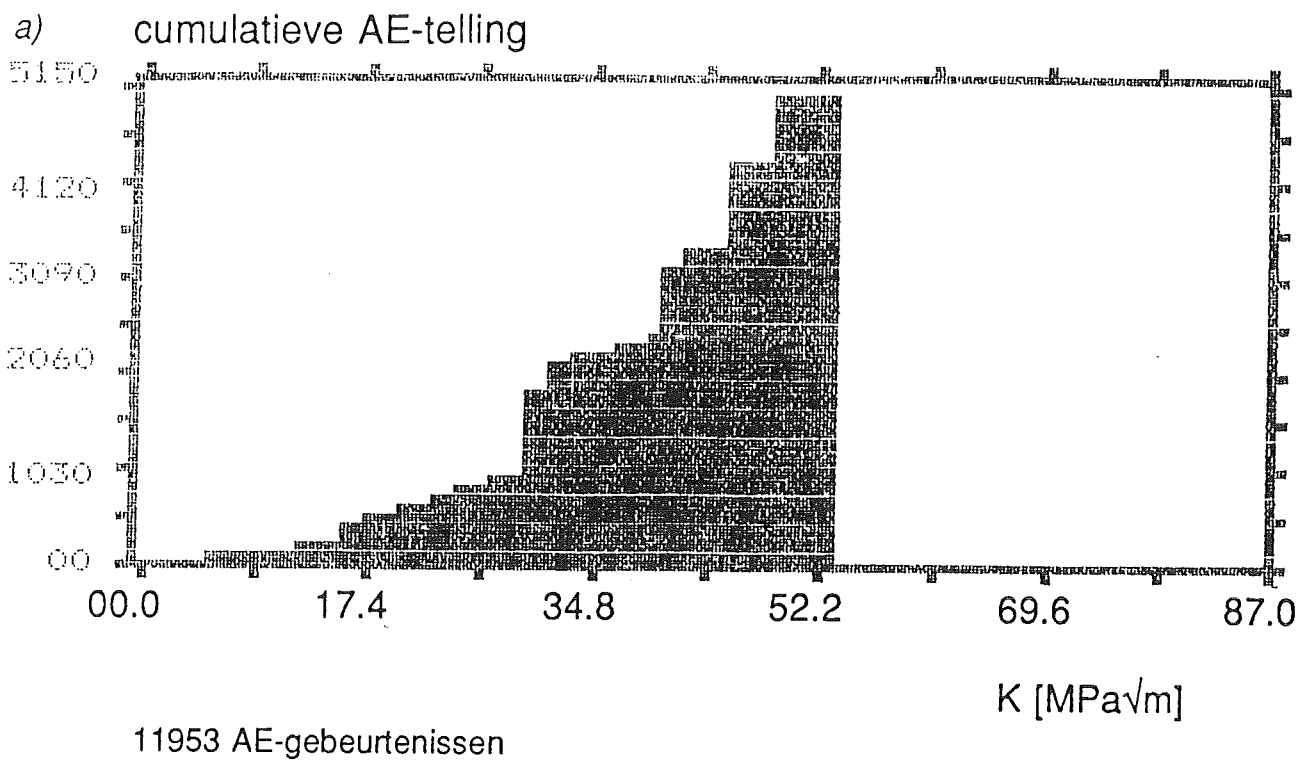


**Figuur 29.** De beperking van de detecteerbare diepte van een elliptische randscheur ( $a_{det}$ ) door de maximaal toelaatbare proefbelasting.

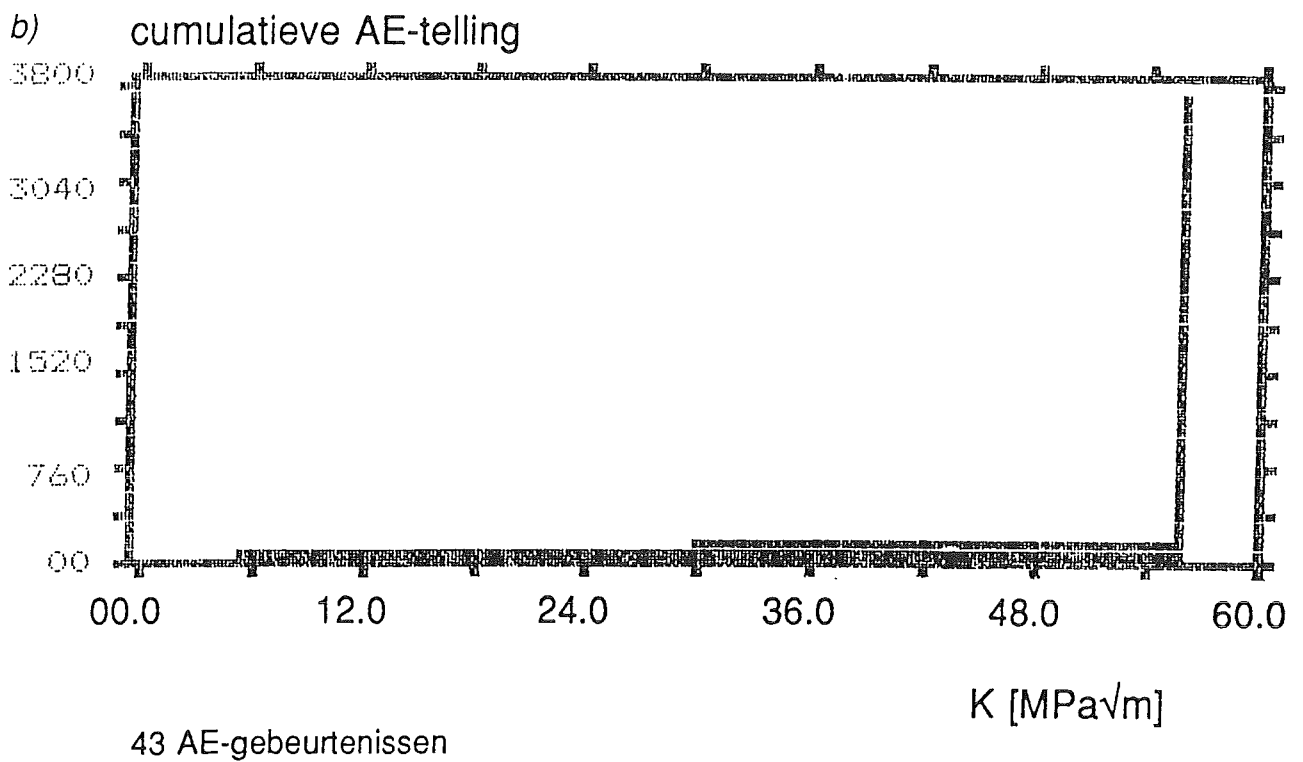
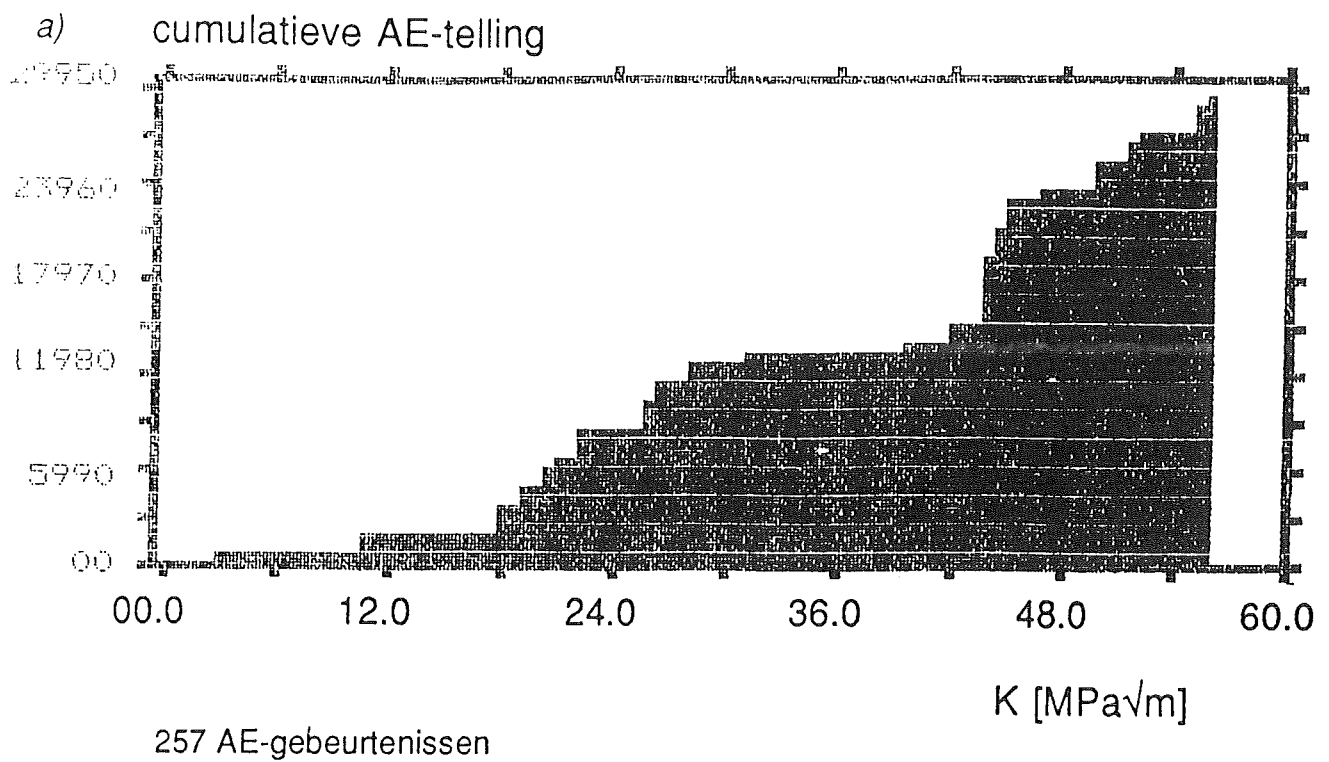




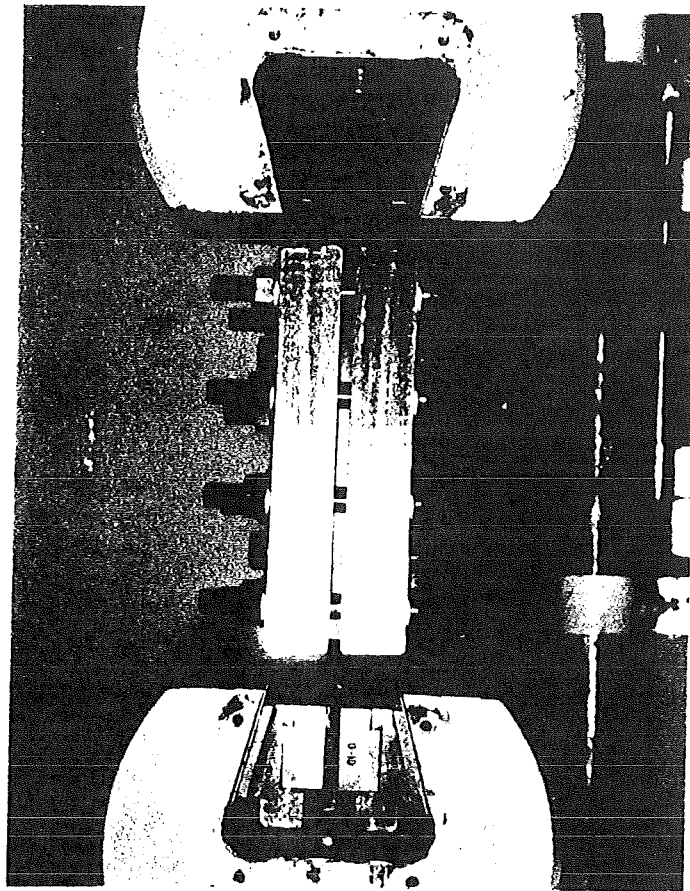
**Figuur 30.** A.E.-signalen met een hoge amplitude en tijdsduur afkomstig van hoorbare scheurstappen.



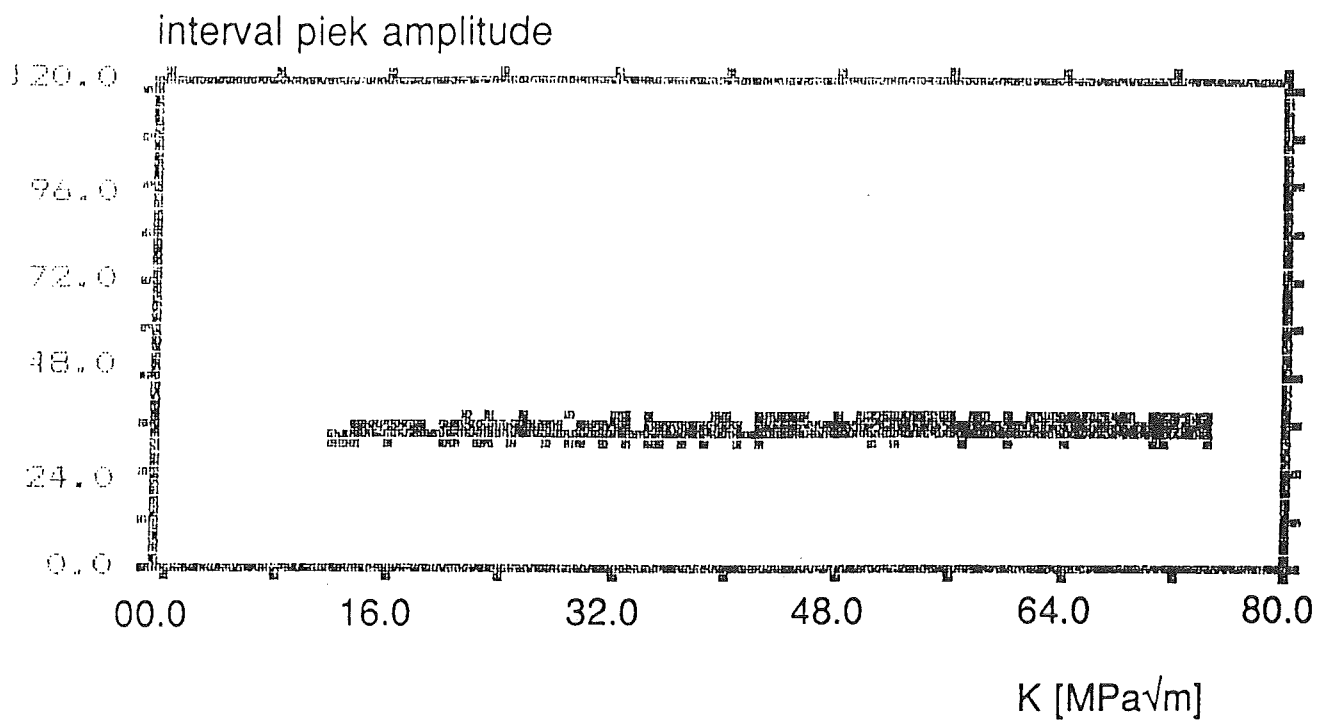
**Figuur 31.** *Toename van de cumulatieve A.E.-telling bij een tweede belasting (b) na overschrijding van de maximale waarde van de eerste belasting (a) op een hydraulische bank.*



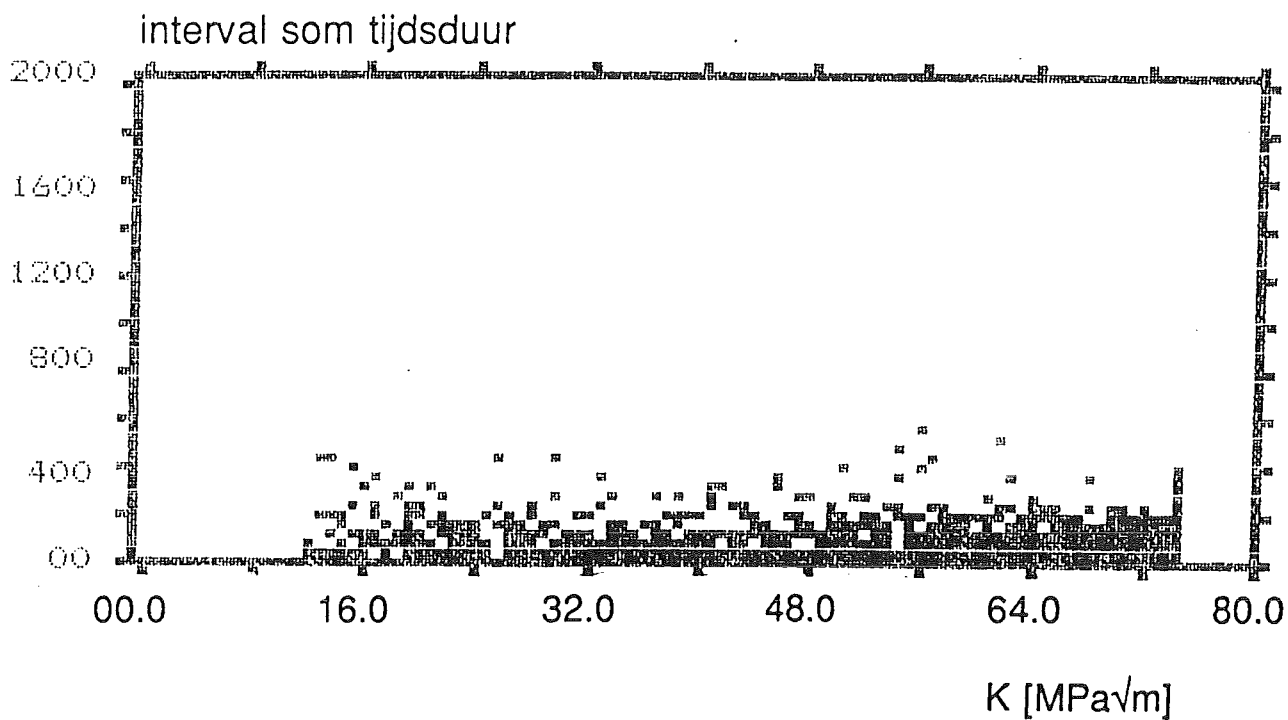
**Figuur 32.** *Toename van de cumulatieve A.E.-telling bij een tweede belasting (b) na overschrijding van de maximale waarde van de eerste belasting (a) op een elektromechanische trekbank met zelfklemmende bekken.*



*Figuur 33. De klemblokken waarmee de scheur wordt ontlast bij het voortrekken van de proefplaat om de zelfklemmende bekken vast te trekken.*

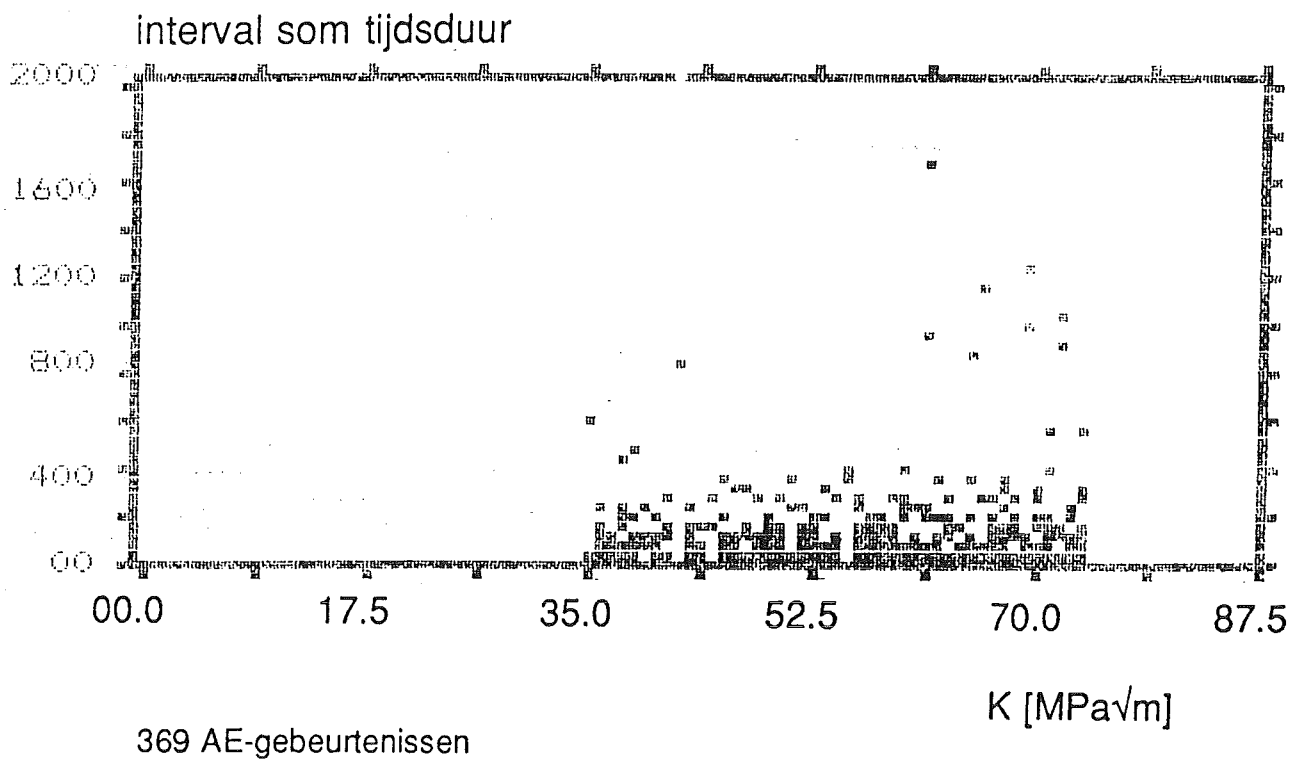
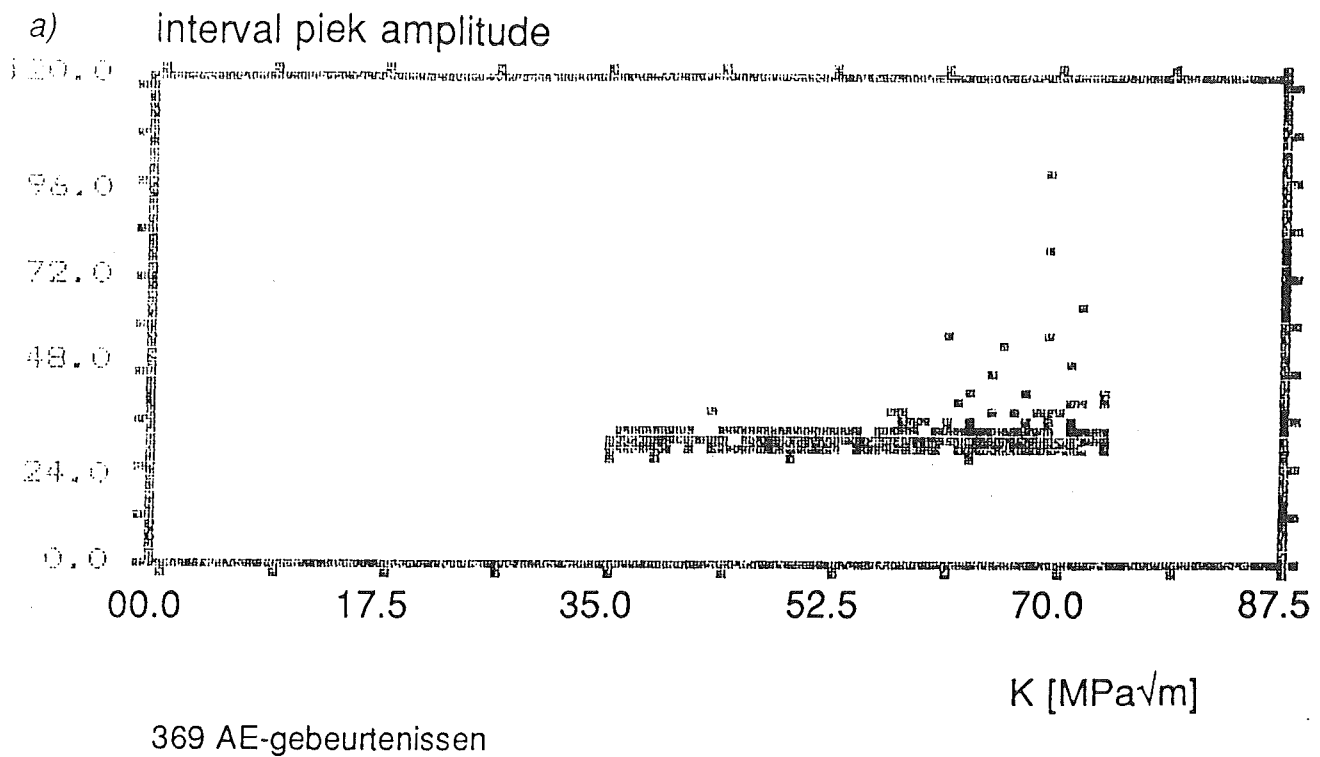


1297 AE-gebeurtenissen



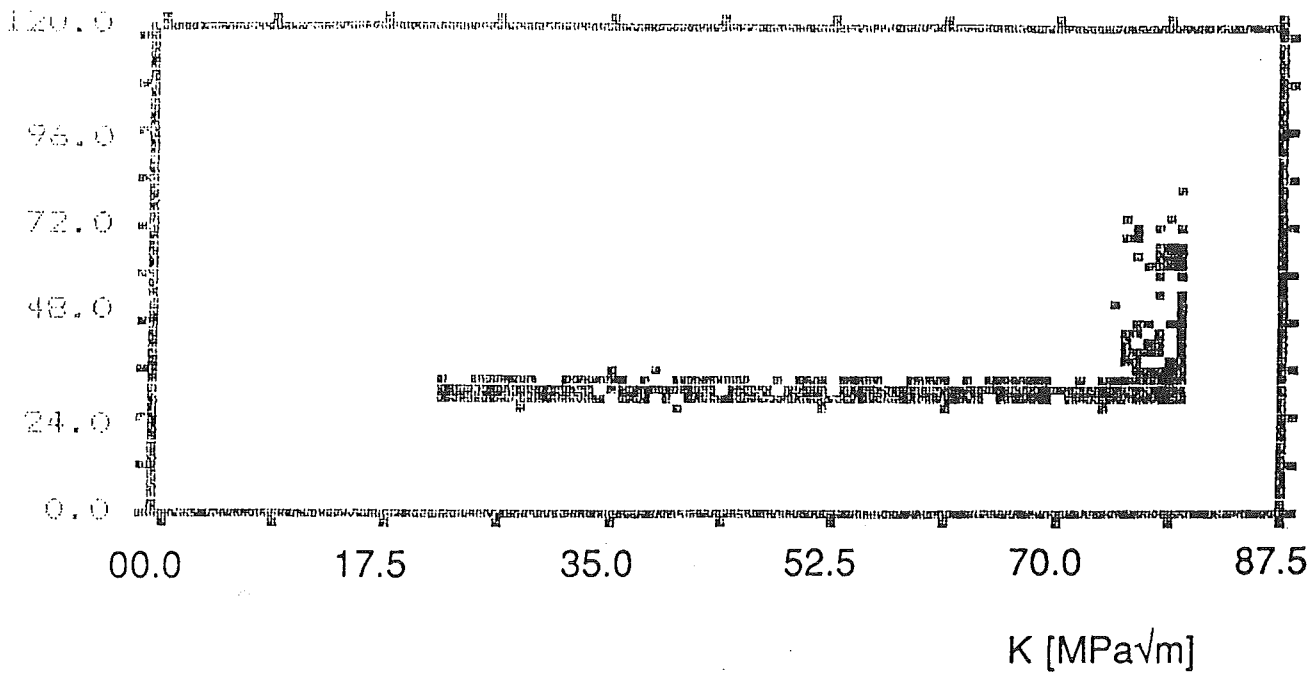
1297 AE-gebeurtenissen

**Figuur 34.** De amplitude en tijdsduur van de A.E.-signalen bij het belasten van een voorgetrokken ongescheurde proefplaat zonder deze tussentijds uit te spannen.



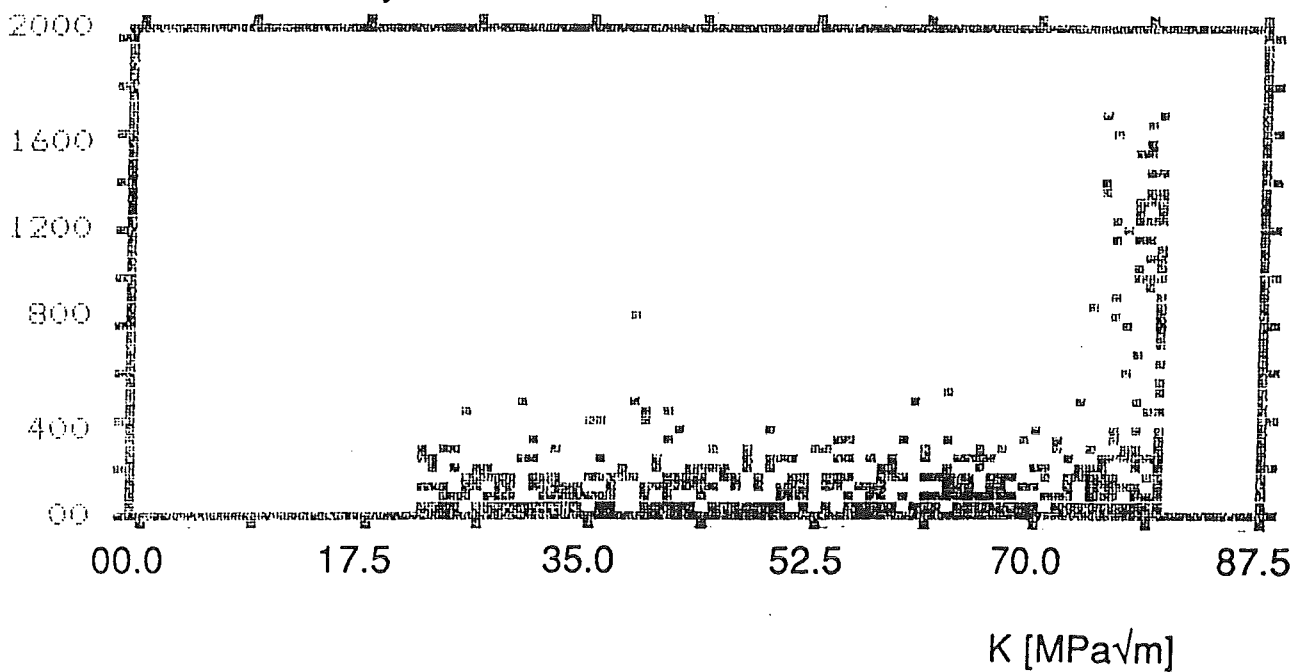
**Figuur 35.** De amplitude en tijdsduur van de A.E.-signalen bij de eerste (a) en tweede belasting (b) van een gescheurde proefplaat, nadat deze is voorgetrokken met gebruik van de klemblokken om de scheur te ontlasten.

b) interval piek amplitude



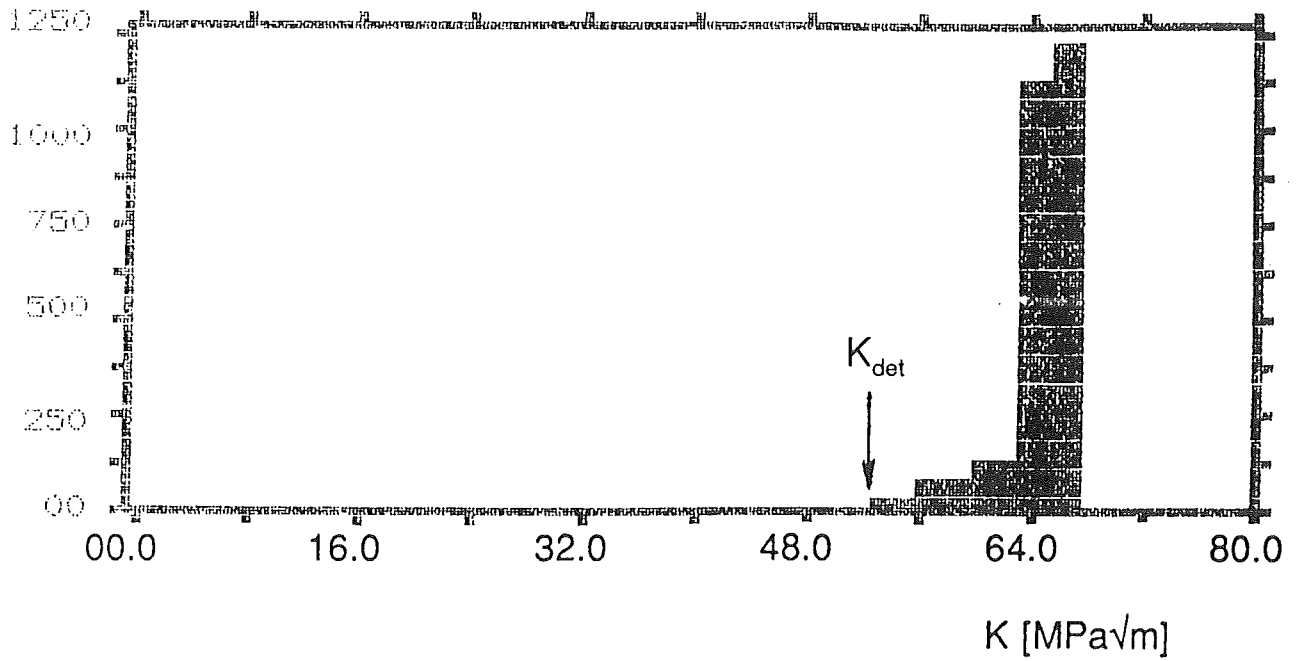
641 AE-gebeurtenissen

interval som tijdsduur



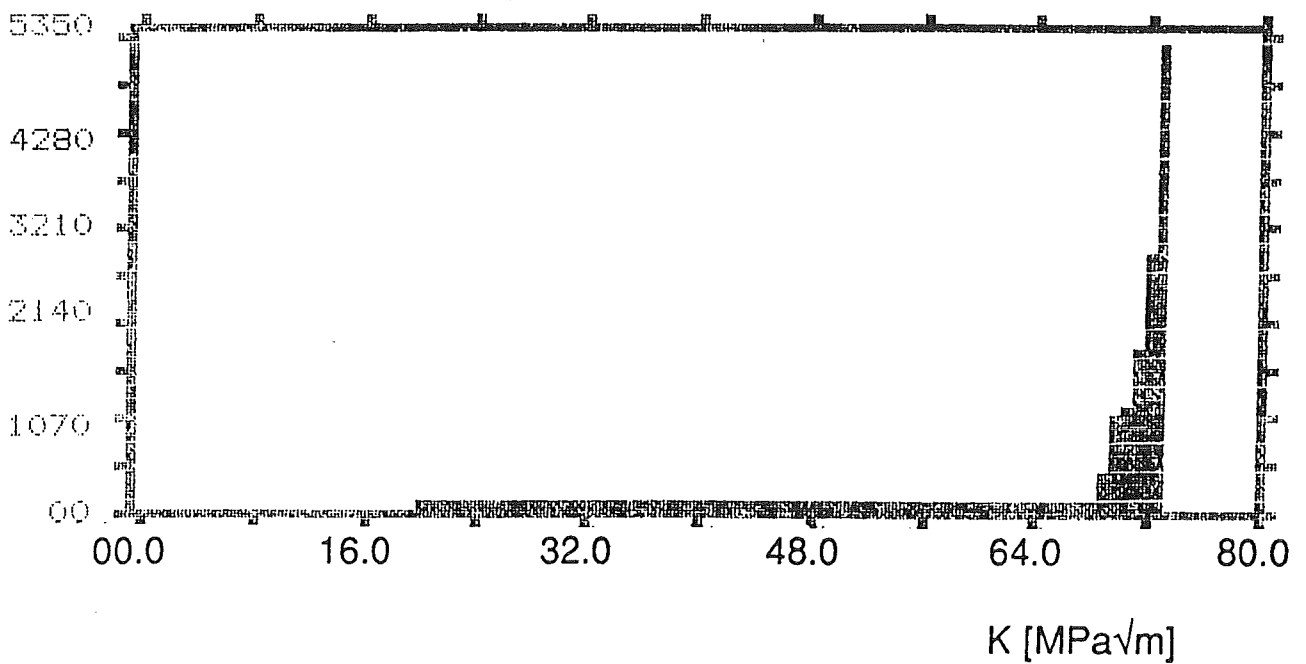
641 AE-gebeurtenissen

a) cumulatieve AE-telling



369 AE-gebeurtenissen

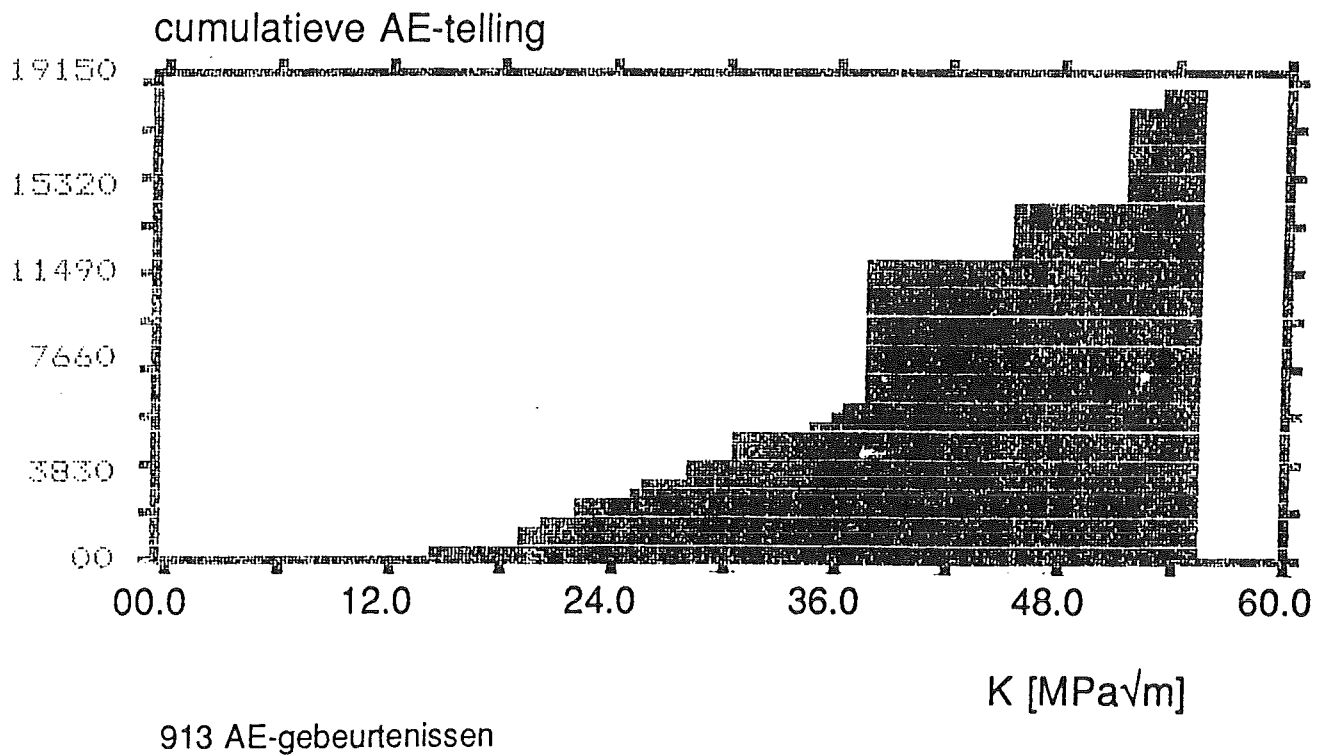
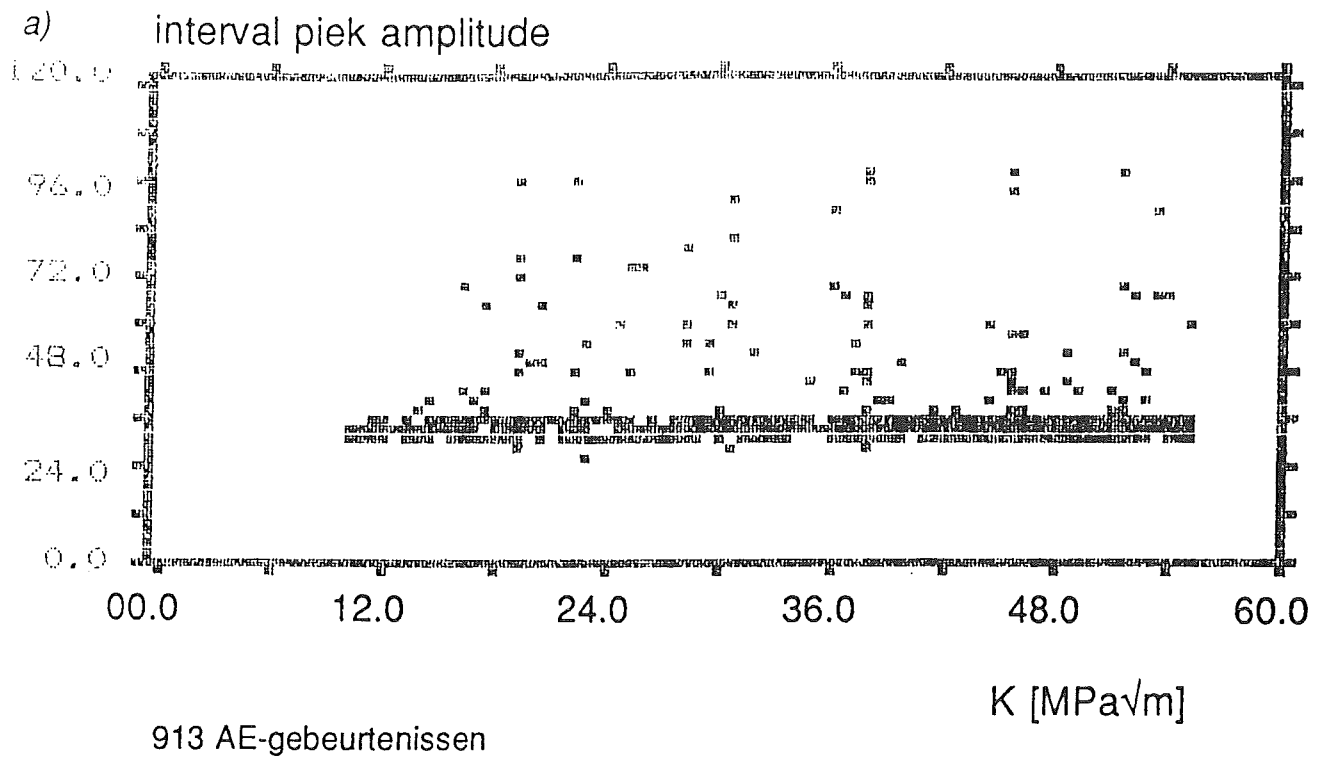
b) cumulatieve AE-telling



641 AE-gebeurtenissen

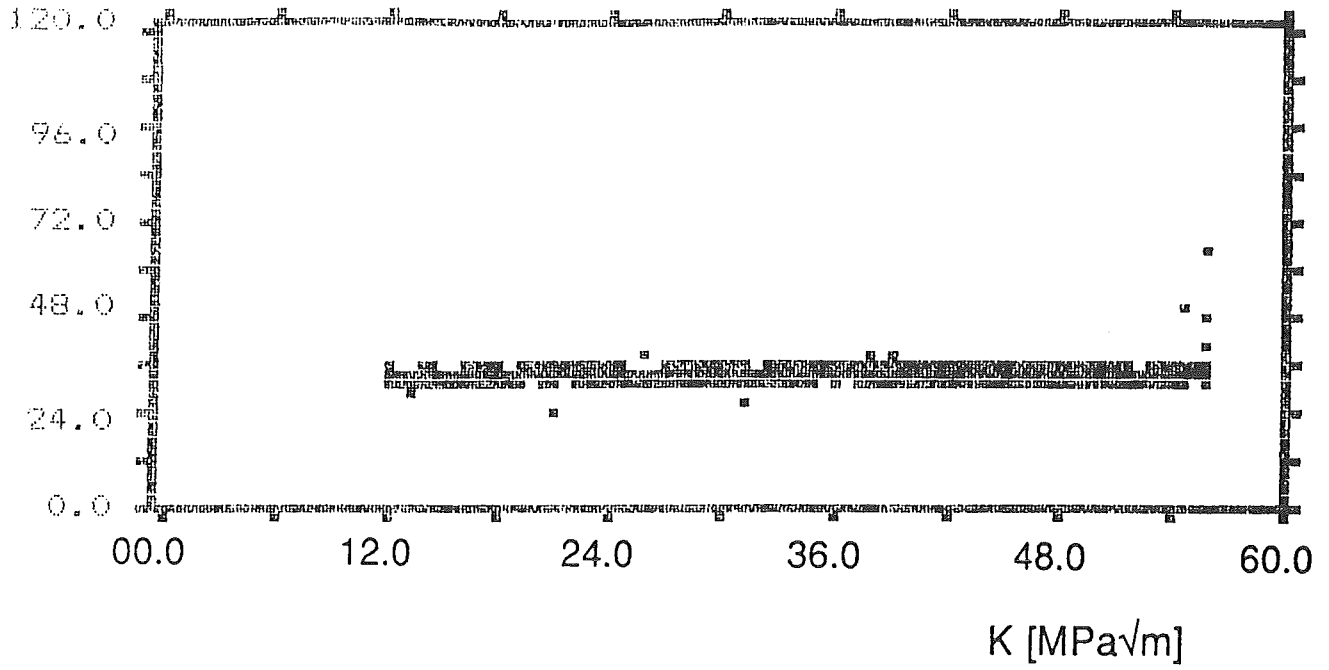
Figuur 36. De cumulatieve A.E.-telling bij de eerste (a) en tweede belasting (b) van een gescheurde proefplaat, waarin de detecteerbare belasting van de scheur ( $K_{det}$ ) is aangegeven.



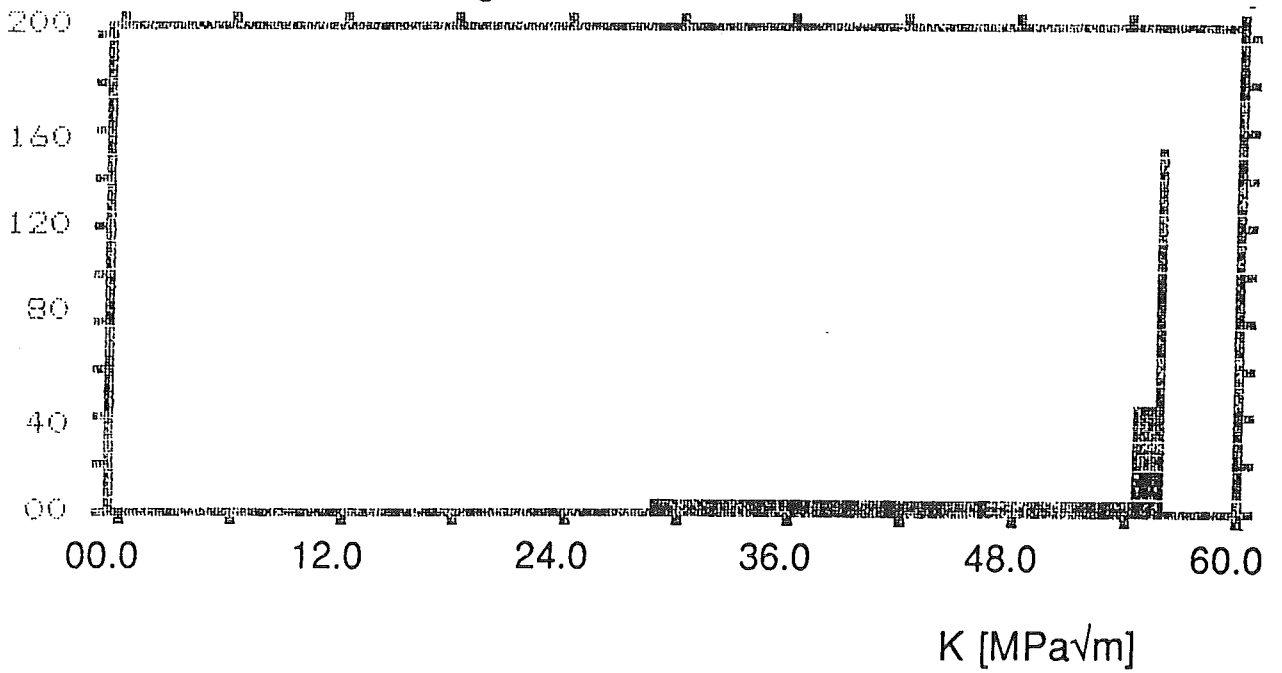


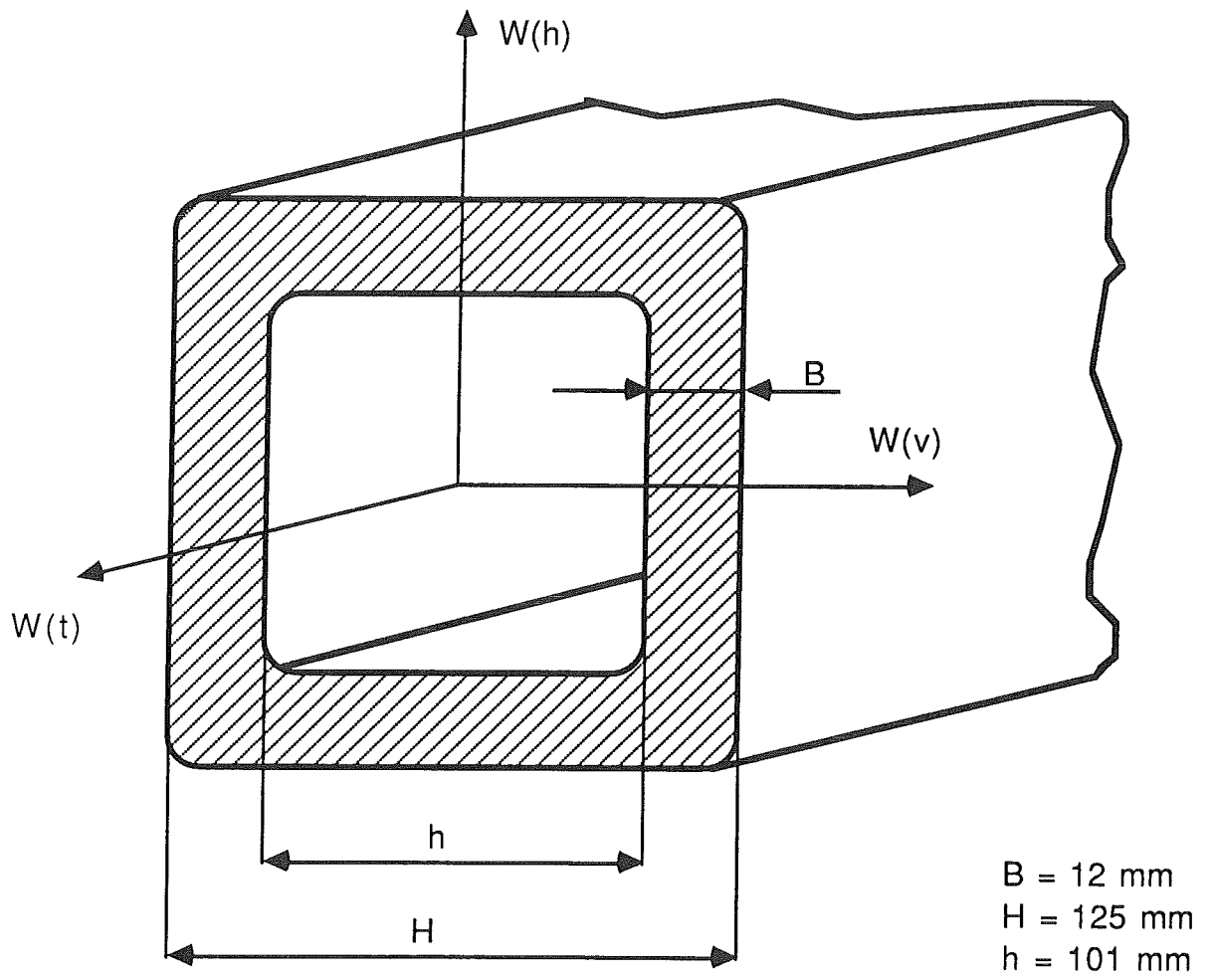
**Figuur 37.** De amplitude en cumulatieve A.E.-telling van de emissie bij de eerste (a) en tweede belasting (b) van een proefplaat, waarbij de scheur naast de lasnaad in het staal 42CrMo4 ligt.

b) interval piek amplitude



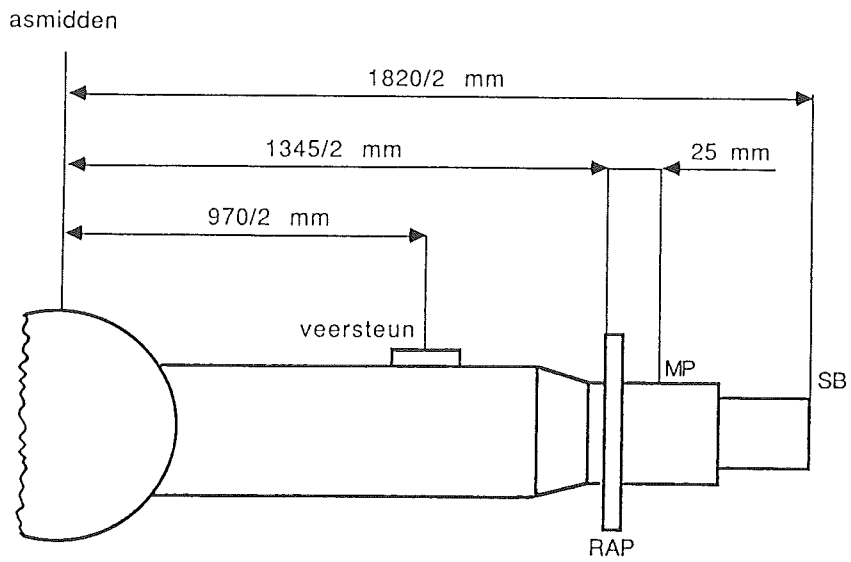
cumulative AE-telling



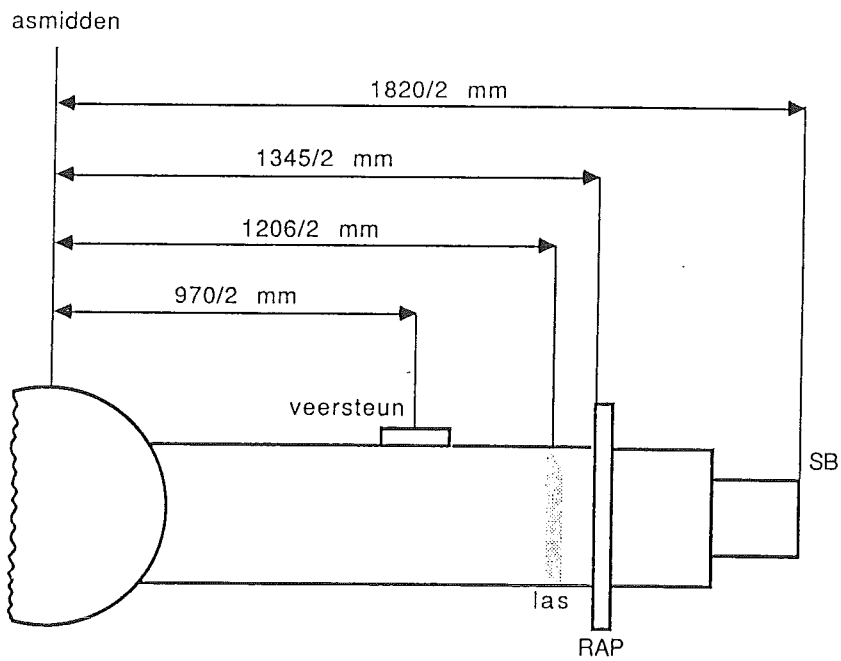


Figuur 38. Profiel van de 1346-as.

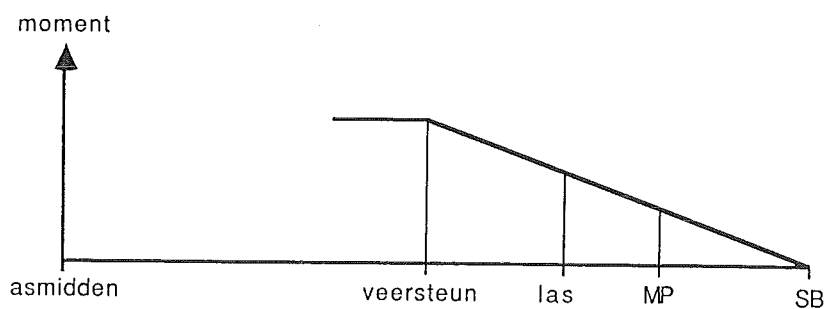
1339-as



1346-as

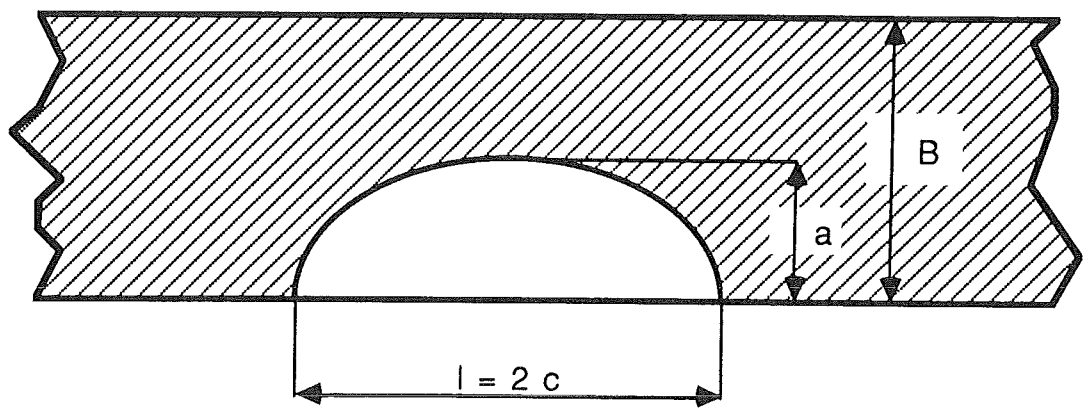


momentenlijn



RAP = remankerplaat  
MP = meetplaats  
SB = spoorbreedte

Figuur 39. Theoretische momentenlijnen van de 1346-as en de 1339-as.



**Figuur 40.** *Kritische initiële scheurvorm.*