

DE VERMOEIING VAN EEN GELASTE
KONSTRUKTIE IN Fe430 en Fe510Nb

W.L.M. Lucassen

Delft, juni 1977

afstudeerverslag
tussenafdeling der metaalkunde
technische hogeschool delft

-/-

Summary

Fatigue investigations on centre cracked specimens and welded specimens of Fe430 and Fe510Nb.

Fatigue experiments were carried out on centre cracked specimens and on structural specimens of Fe430 and Fe510Nb.

Three uniaxial loading types ($R = -1/3, 0, 1/3$) were applied to both types of specimens, fatigue data are given in terms of stress intensity factor amplitude values as well as in maximum values of the stress intensity factor.

An estimation for the stress intensity factor of the welded structure is made with the aid of a finite element program. To minimize the possible error, among others caused by the usage of a low number of elements, a comparison is made with the finite element solution of an analytical solvable problem, i.e. the centre cracked specimen.

No advantage in fatigue behaviour is found for Fe510Nb over Fe430 in the structural specimens in contrast with the results of the centre cracked specimens.

INHOUDSOPGAVE

| | |
|--|----|
| Summary | 1 |
| Inhoudsopgave | 2 |
| Lijst van symbolen | 3 |
| I Inleiding | 4 |
| II Theoretische beschouwingen | 5 |
| II.1 De spanningsintensiteitsfactor | 5 |
| II.2 De spanningsintensiteitsfactor uit een energiebeschouwing | 7 |
| II.3 De spanningsintensiteitsfactor en de scheuropening | 8 |
| II.4 De scheurgroeisnelheid en de spanningsintensiteitsfactor | 9 |
| II.5 De eindige elementen methode | 11 |
| II.6 Toepassing van de eindige elementen methode | 13 |
| III Meetopstelling en proefstukken | 15 |
| IV Metingen | 17 |
| IV.1 Uitvoering van de metingen | 17 |
| IV.2 Verwachte uitkomsten van de metingen | 17 |
| V Berekeningen | 19 |
| V.1 De centraal gescheurde plaat, analytische oplossing | 19 |
| V.2 Kwalitatieve schatting van het spanningsveld in de gelaste constructie | 19 |
| V.3 De berekeningen met behulp van de eindige elementen methode | 23 |
| V.3.1 FEM-berekening van de centraal gescheurde plaat | 24 |
| V.3.2 FEM-berekening van de gelaste constructie | 25 |
| V.4 Controle van de FEM-berekeningen | 26 |
| V.5 Berekening van de elasticiteits- en glijdingsmodulus uit de gedwongen resonantie-frequentie | 26 |
| VI Resultaten | 27 |
| VI.1 De scheurinitiatie | 27 |
| VI.2 De scheurgroeisnelheid in de centraal gescheurde plaat | 27 |
| VI.3 De scheurgroeisnelheid in de gelaste constructie | 28 |
| VII Diskussie en konklusies | 29 |
| VII.1 De eindige elementen methode | 29 |
| VII.2 De scheurinitiatie | 30 |
| VII.3 De scheurgroeisnelheid en de levensduur | 30 |
| VII.3.1 De centraal gescheurde vlakke plaat | 30 |
| VII.3.2 De gelaste constructie | 30 |
| VII.4 Samenvatting | 31 |
| VIII Aanbevelingen | 32 |
| IX Literatuur | 33 |
| Figuren | 34 |
| Tabellen | 59 |
| Appendix Overzicht van de belangrijkste details en de invoer voor het MARC-programma | 72 |

Lijst van symbolen

| | | | |
|------------------|---------------------------------------|--------------|------------------------|
| a | halve scheurlengte | δ | knooppuntsverplaatsing |
| a_{eff} | effektieve halve scheurlengte | ϵ_0 | initiële rek |
| b | breedte | θ | hoek |
| f_1, f_2 | gedwongen resonantie frequentie | ν | dwarskontractie |
| f_B | verplaatsing | σ | spanning |
| h | hoogte | τ | schuifspanning |
| k | stijfheidsmatrix | ϕ | hoek |
| l | lengte | | |
| m | massa | | |
| p | kracht | | |
| r | voerstraal | | |
| r_p^* | afmeting plastische zone | | |
| s | spanningsmatrix | | |
| w | halve plaatbreedte | | |
| B | dikte | | |
| C | compliantie | | |
| COD | scheuropening | | |
| E | elasticiteitsmodulus | | |
| F | arbeid | | |
| $F(\frac{h}{b})$ | geometriefactor | | |
| G | energy release rate, glijdingsmodulus | | |
| I | traagheidsmoment | | |
| K | spanningsintensiteitsfactor | | |
| ΔK | trajekt van K | | |
| N | aantal belastingswisselingen | | |
| P | knooppuntskracht | | |
| R | spanningsratio | | |
| S | spanning | | |
| U | elastische energie | | |
| W | scheurweerstand | | |

I. INLEIDING

Het onderzoek naar de vermoeiing van gelaste constructies in staal met hogere treksterktes is in de laatste jaren meer en meer ter hand genomen. Dit is mede veroorzaakt door het gestegen gebruik van Fe510 in de scheepsbouw. De door de hogere treksterkte toegelaten vermindering van de dikte van het gebruikte materiaal, ten opzichte van Fe370 en Fe430, heeft geleid tot hogere spanningen in de constructies. De scheurvorming kan sneller optreden en de scheurgroeisnelheid is in eerste benadering gelijk aan die in staal met een lagere treksterkte bij gelijke spanning. De weerstand tegen scheurgroei van Fe510 is voor bepaalde belastingstypes zelfs kleiner. De scheurinitiatieperiode is in het geval van gelaste constructies minder van belang dan de scheurgroeisnelheid bij levensduurbepalingen, omdat zeker bij grote constructies, zoals bijvoorbeeld schepen, juist door het lassen altijd wel plaatsen aan te wijzen zijn, die opgevat kunnen worden als beginscheuren. In o.a. Gurney [1] worden verschillende lasfouten en hun invloed op de scheurinitiatie behandeld.

Een onderzoek onder auspiciën van de Europese Gemeenschap voor Kolen en Staal, verricht door een vijftal Europese researchorganisaties op het gebied van de scheepsbouw, waaronder het Nederlands Scheepsstudiecentrum TNO, heeft resultaten opgeleverd, die een herwaardering verdienen [2]. In het bijzonder hebben enkele tegenstrijdigheden in de waarnemingen van de scheurgroeisnelheid in vlakke plaat en in gelaste constructie geleid tot het tot stand komen van het onderhavige afstudeerproject. Het experimentele deel van dit onderzoek is beperkt van opzet in vergelijking met het EGKS-onderzoek, in grote lijnen is het echter gelijklopend met het deel, dat de tegenstrijdigheden opleverde.

Het is gebruikelijk de scheurgroeisnelheid te relateren aan de spanningsintensiteitsfaktor van de constructie. Getracht is de spanningsintensiteitsfaktor van de gelaste constructie nauwkeuriger te bepalen dan in het EGKS-onderzoek gedaan is. Een analytische berekening van de spanningsintensiteitsfaktor van complexe structuren is niet mogelijk, numerieke bepaling van de spanningen, rekken en deformaties (en daarmee van de spanningsintensiteitsfaktor) echter wel.

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van de eindige elementen methode (FEM) voor de berekening. Deze methode vraagt een aanzienlijke hoeveelheid computertijd, vooral indien een hoge betrouwbaarheid van de resultaten wordt verlangd. Bij gebrek aan een voldoende groot rekenbudget is

gekozen voor een relatieve beschouwing. Door vergelijking van de FEM-resultaten van een analytisch oplosbaar probleem met de exakte oplossing kan een korrektiefactor voor de FEM-resultaten van de gelaste constructie bepaald worden, zodat toch een redelijke nauwkeurigheid verkregen wordt.

II. THEORETISCHE BESCHOUWINGEN

De spanningen, rekken en deformaties in een constructie bepalen of een scheur in die constructie groeit. De spanningen blijken beschreven te kunnen worden door de spanningsintensiteitsfactor K. Voor eenvoudige constructies is de berekening van K op analytische wijze mogelijk. Meer ingewikkelde gevallen dwingen tot een numerieke berekening van de spanningsintensiteitsfactor. Een van de mogelijkheden is het gebruik maken van de eindige elementen methode. In dit hoofdstuk worden na een algemene beschouwing een tweetal methoden ter bepaling van K gegeven, die toegankelijk zijn voor berekening met de FEM. Een paragraaf is gewijd aan de K-afhankelijkheid van de scheurgroeisnelheid. Als laatste wordt de eindige elementen methode en de toepassing daarvan behandeld.

II.1 De spanningsintensiteitsfactor

Uit de berekening van het spanningsveld aan een scheurtip in een oneindig uitgebreide vlakke plaat met centrale scheur (fig. 1) vindt men voor de spanning in de y-richting:

$$\sigma_y = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right) \quad (1)$$

De factor $\sigma \sqrt{\pi a}$ wordt de spanningsintensiteitsfactor, K, genoemd. Omdat hier sprake is van een spanning loodrecht op het scheurvlak, krijgt de spanningsintensiteitsfactor de index I : K_I . Voor de gevallen, waarin de spanning evenwijdig aan het scheurvlak is en evenwijdig aan, respectievelijk loodrecht op de a-richting worden de indices II en III gebruikt.

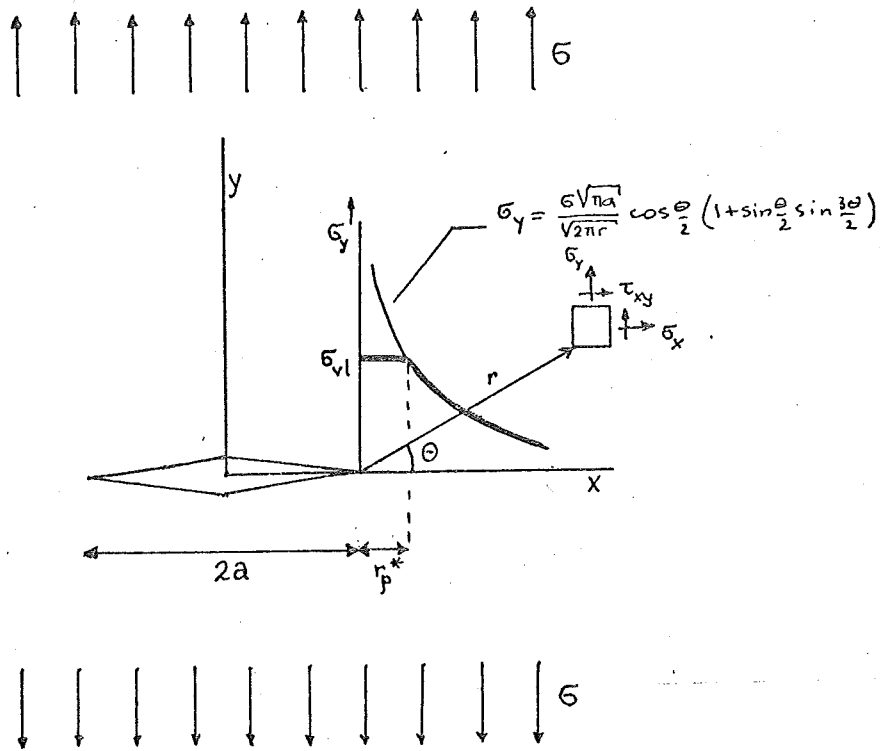


Fig. 1. Spanningsveld aan een scheurtip in een oneindig uitgebreide vlakke plaat.

In het vervolg wordt alleen het eerste geval beschouwd.
 We schrijven dus:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \tag{2}$$

De spanning aan de scheurtip, die volgt uit de vergelijking voor σ_y (1) is voor kleine r groter dan de vloeispanning, σ_{vl} , van het materiaal, er is dus een plastisch vervormd gebied aan de scheurtip. Nu wordt verondersteld, dat de spanningsintensiteitsfactor in het elastisch-plastisch geval de grootte van de spanningen en de rekken blijft bepalen als de plastisch vervormde zone klein is ten opzichte van de scheurlengte.

Tot nu toe is slechts gesproken over het geval van de oneindige plaat. Voor eindige platen kunnen korrektiefactoren voor de spanningsintensiteitsfactor gevonden worden. Een uitgebreid overzicht van deze deels berekende, deels empirisch bepaalde correcties wordt gegeven door Tada [3]. Ook voor andere geometrieën zijn spanningsintensiteitsfactoren te bepalen, voor relatief eenvoudige gevallen worden deze ook door Tada gegeven.

II.2 De spanningsintensiteitsfaktor uit een energiebeschouwing

Als eerste voorwaarde voor scheurgroei geldt dat spanningen en rekken voldoende groot moeten zijn. Een tweede voorwaarde volgt uit een energiebeschouwing. De energie benodigd voor scheuruitbreiding (W) moet geleverd worden door de vermindering van de in het gescheurde lichaam opgeslagen elastische energie (U) of de door de uitwendige krachten verrichte arbeid (F) bij scheurgroei. Voor een gescheurde plaat met eenheidsdikte wordt dit:

$$\frac{dW}{da} = \frac{d}{da} (F - U) \quad (3)$$

Het rechterlid van (3) wordt de "energy release rate" (G) genoemd.

In het geval van konstante uitwendige kracht, respektievelijk konstante verplaatsing van de aangrijpingspunten van de krachten, kan vergelijking (3) geschreven worden als:

$$G = \frac{1}{B} \left(\frac{dU}{da} \right)_{p=\text{konst}} = - \frac{1}{B} \left(\frac{dU}{da} \right)_{\delta=\text{konst}} \quad (4)$$

waarin B de dikte van het materiaal, P de kracht en δ de verplaatsing van het aangrijpingspunt is.

De elastische energie die in de plaat is opgeslagen is te schrijven als:

$$U = \frac{1}{2} P \delta = \frac{1}{2} C P^2 \quad (5)$$

waarin $C = \frac{\delta}{P}$ de compliantie (reciproke van de stijfheid) van de plaat is.

Uit de vergelijkingen (4) en (5) volgt nu voor konstante kracht

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (6)$$

en dus:

$$G = \frac{1}{2B} \frac{d}{da} (P \delta) \quad (7)$$

In het geval van konstante kracht wordt de benodigde energie geleverd door de verrichte arbeid, bij konstante verplaatsing van de aangrijpingspunten door de elastische energie. De energy release rate moet dus evenredig zijn met de elastische energie:

$$G \propto \frac{\sigma^2}{E} \quad (8)$$

Uit een dimensie- en geometrie-beschouwing volgt dat G tevens evenredig is met een lengte. De enige daarvoor in aanmerking komende parameter is de halve scheurlengte a :

$$G = \text{konstante} \frac{\sigma^2 a}{E} \quad (9)$$

Voor een oneindig brede, centraal gescheurde plaat geldt voor één scheurtip dat de konstante gelijk aan π is. Met andere woorden:

$$G = \frac{K^2}{E} \quad (10)$$

Door combinatie van de vergelijkingen (7) en (10) wordt voor de spanningsintensiteitsfaktor gevonden:

$$K = \sqrt{\frac{E}{2B} \frac{d}{da} (p \delta)} \quad (11)$$

II.3 De spanningsintensiteitsfaktor en de scheuropening

Uit de lineair-elastische berekening van het spanningsveld rond de scheurtip van een centrale scheur in een oneindig uitgebreide vlakke plaat volgt dat de scheur een elliptische vorm heeft. Hiervan uitgaand is voor de scheuropening (Crack Opening Displacement, zie fig. 2) te schrijven

$$\text{COD} = 2\delta = \frac{4\sigma}{E} \sqrt{a^2 - x^2} \quad (12)$$

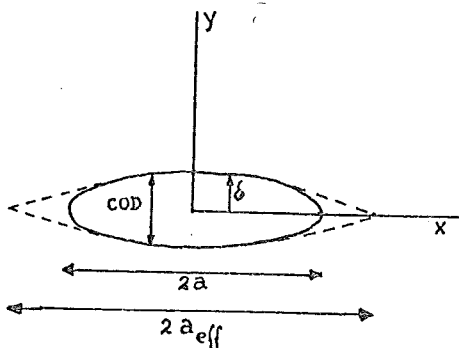


Fig.2. De scheuropening in een oneindig uitgebreide plaat.

Zoals in paragraaf II.1 al is opgemerkt zal zich aan de scheurtip een plastisch gebied ontwikkelen, de grootte van het gebied is in eerste benadering r_p^* . Door de

aanwezigheid van de plastische zone doet de scheur zich langer voor dan zij in werkelijkheid is. Korrigeren we de scheurlengte in (12) voor de grootte van de plastische zone dan volgt:

$$\text{COD} = \frac{4\sigma}{E} \sqrt{(a+r_p^*)^2 - x^2} \quad (13)$$

In feite wordt hier geweld gedaan aan het uitgangspunt: een elastische benadering. Over het algemeen wordt echter aangenomen dat de lineair-elastische benadering geldig is voor $\sigma < \frac{2}{3} \sigma_{v1}$ (zie o.a. Broek [4]) en

$$\text{als } r_p^* \ll a.$$

De grootte van r_p^* kan bij benadering berekend worden uit vergelijking (1) bij $\theta=0$ door gelijkstelling van σ_y en de vloeispanning:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{K}{2\pi r_p^*}} = \sigma_{v1} \quad (14)$$

of

$$r_p^* = \frac{K^2}{2\pi\sigma_{v1}^2} \quad (15)$$

Uit de combinatie van de vergelijkingen (13) en (15) volgt dan voor de scheuropening ter plaatse $x = 0$:

$$\text{COD}_{x=0} = \frac{4K^2}{\pi\sigma E} \left(1 + \frac{\sigma^2}{2\sigma_{v1}^2} \right) \quad (16)$$

en dus

$$K = \sqrt{\frac{\pi\sigma E \text{COD}_{x=0}}{4}} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\sigma^2}{2\sigma_{v1}^2}}} \quad (17)$$

Hierdoor is weer de bepaling van de spanningsintensiteitsfactor uit metingen en berekeningen mogelijk geworden.

II.4 De scheurgroeisnelheid en de spanningsintensiteitsfactor

In paragraaf II.1 is al aangeduid dat de spanningsintensiteitsfactor alle spanningen en rekken rond de scheurtip beschrijft. Men mag dus verwachten dat de scheurgroeisnelheid een functie van de spanningsintensiteitsfactor is.

Bij een cyclisch wisselende belasting is er geen eenduidige spanningsintensiteitsfactor, de waarde van K varieert met de belasting tussen

een minimum- en een maximumwaarde, respektievelijk $K_{min} = S_{min} \sqrt{\pi a}$ en $K_{max} = S_{max} \sqrt{\pi a}$ (zie fig.3). Voor $S_{min} = 0$ beheerst $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ de scheurgroeisnelheid, zodat dan :

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K) \tag{18}$$

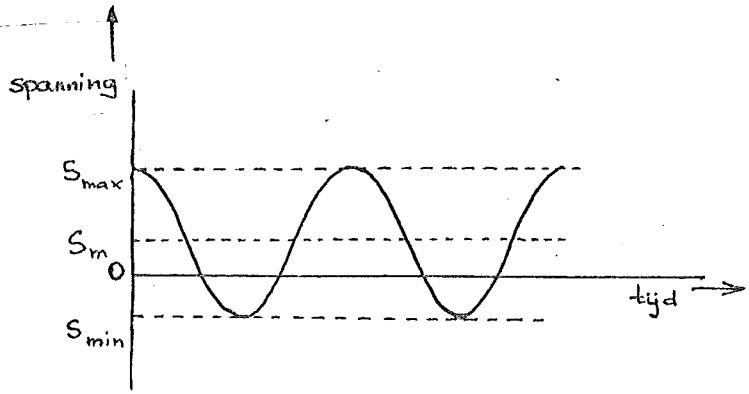


Fig. 3. Een cyclisch wisselende belasting.

De scheurgroeisnelheid is naast van ΔK nog afhankelijk van parameters zoals de frequentie, de materiaaleigenschappen, de temperatuur en vele andere. Daar in dit onderzoek deze parameters zoveel mogelijk konstant zijn gehouden, worden ze verder in de beschouwing meegenomen als deel van een konstante in de scheurgroei-relaties.

Voor het geval dat $S_{min} \neq 0$ is de spanningswisseling niet alleen door ΔK beschreven, een tweede parameter, bijvoorbeeld K_{max} , is nodig. Ook de scheurgroeisnelheid wordt dan door twee parameters beschreven:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, K_{max}) \tag{19}$$

In plaats van ΔK en K_{max} wordt wel gebruikt ΔK en de spanningsratio $R = \frac{S_{min}}{S_{max}}$ of K_{max} en R :

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R) = f(K_{max}, R) \tag{20}$$

In de literatuur (Broek [4] en [9], Gurney [10] e.v.a.) worden vele voorstellen gedaan voor de vorm van (18), (19) en (20), de eenvoudigste luiden:

$$\frac{da}{dN} = \text{konstante} \cdot K_{max}^m \cdot \Delta K^n \tag{21}$$

$$\frac{da}{dN} = \text{konstante} \cdot \frac{\Delta K^n}{(1-R)(K_{lc} - K_{max})} \tag{22}$$

waarin K_{lc} een kritische waarde voor K_{max} en m en n konstantes zijn. In het geval van belastingswisselingen, waarvan een gedeelte in het drukgebied ligt, mogen de genoemde relaties niet zonder meer gebruikt worden. Een scheur onder druk sluit zich en treedt niet op als spanningsverhogend element. Voor spanningsratio kleiner dan nul is de scheurgroeisnelheid in theorie niet afhankelijk van K_{max} en R , maar van K_{max} alleen.

II.5 De eindige elementen methode (Finite Element Method)

Elke structuur kan in gedachten worden verdeeld in deelstructuren, die elementen worden genoemd. Deze elementen zijn onderling verbonden op een aantal zogenaamde knooppunten. Juist hierin schuilt het verschil met de werkelijkheid, waar de elementen deel uitmaken van een continuum. Door het diskrete aantal knooppunten is een numerieke oplossingsmethode mogelijk geworden.

Gegeven de eigenschappen van elk element kan voor elk knooppunt de kracht-verplaatsing (en de spanning) relatie worden bepaald. Als de krachten op de n knooppunten van element a worden geschreven als

$$\{p\}^a = \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ \vdots \\ p_n \end{Bmatrix}^a \quad (23)$$

en de verplaatsingen van de knooppunten onder invloed van die krachten als

$$\{\delta\}^a = \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \vdots \\ \delta_n \end{Bmatrix}^a \quad (24)$$

dan is in het elastische geval de relatie tussen krachten en verplaatsingen:

$$\{p\}^a = [k]^a \{\delta\}^a + \{p\}_p^a + \{p\}_{\epsilon_0}^a \quad (25)$$

waarin $\{k\}^a$ de stijfheidsmatrix van het element a , $\{p\}_p^a$ en $\{p\}_{\epsilon_0}^a$ de krachten op de knooppunten nodig voor het evenwicht met respectievelijk de opgelegde spanningen en de initiële spanningen, die veroorzaakt worden door bijvoorbeeld temperatuurstijgingen, zonder dat er sprake is van verplaatsingen.

Vergelijking (25) is eenvoudig te transformeren tot een spannings-verplaatsingsrelatie, daar de eigenschappen binnen een element als bekend verondersteld worden:

$$\{\sigma\}^a = [s]^a \{\delta\}^a + \{\sigma\}_p^a + \{\sigma\}_{\epsilon_0}^a \quad (26)$$

waarin $[s]$ de spanningsmatrix van element a is, de overige symbolen m.m. als in (25).

Een konstruktie bestaat over het algemeen uit meer dan één element. Er moet dus voor elk element een verzameling vergelijkingen bepaald worden als (25). Voor de knooppunten, die tot meer dan één element behoren moet aan een tweetal voorwaarden voldaan worden:

- de verplaatsing van knooppunt i van element p moet gelijk zijn aan de verplaatsing van knooppunt j van element q , als de elementen p en q gekoppeld zijn via de knooppunten i en j
- de krachten op elk knooppunt moeten in evenwicht zijn, ook na koppeling van elementen.

Door $\{\delta\}$ wordt impliciet al voldaan aan de eerste voorwaarde, aan de tweede voorwaarde is voldaan binnen één element van een konstruktie. Er moet dus een verzameling vergelijkingen worden opgesteld met de verplaatsingen van de knooppunten als onbekenden.

Als op een konstruktie een uitwendige kracht $\{p_{ex}\}$ werkt, dan wordt dit in de FEM geschreven als de verzameling krachten op de knooppunten:

$$\{p_{ex}\} = \begin{Bmatrix} p_{ex_1} \\ p_{ex_2} \\ \vdots \\ p_{ex_n} \end{Bmatrix} \quad (27)$$

Deze krachten moeten in evenwicht zijn met de krachten op de knooppunten:

$$\{p_{ex_i}\} = \sum_a \{p_i\}^a = \{p_i\}^1 + \{p_i\}^2 + \dots + \{p_i\}^n \quad (28)$$

waarin i het knooppuntnummer en $\{p_i\}^a$ de bijdrage aan de kracht op knooppunt i , veroorzaakt door element a is.

Kombineren we dit met vergelijking (25) dan geldt voor knooppunt i :

$$\begin{aligned} \{p_{ex_i}\} = & (\sum_i [k_{i1}]^a) \{\delta_1\} + (\sum_i [k_{i2}]^a) \{\delta_2\} + \dots \\ & \dots + (\sum_i [k_{in}]^a) \{\delta_n\} + \sum \{p_i\}_p^a + \sum \{p_i\}_{\epsilon_0}^a \end{aligned} \quad (29)$$

Sommatie over alle knooppunten geeft de verzameling vergelijkingen, die voor de hele konstruktie opgesteld kan worden:

$$\{p_{ex}\} = [k]\{\delta\} + \{p\}_p + \{p\}_{\epsilon_0} \quad (30)$$

waarin $\{p\} = \sum\{p\}^a$, $[k] = \sum[k]^a$ etc.

De optelling van de matrices is geoorloofd bij gelijke dimensies, aan deze voorwaarde kan altijd voldaan worden door uitbreiding met "nullen", waardoor geen extra vergelijkingen ontstaan.

Het stelsel vergelijkingen kan worden opgelost als voldoende randvoorwaarden gegeven worden om $[k]$ niet singulier te laten zijn. Deze randvoorwaarden worden gevonden uit de eindige en bekende verplaatsing (in de meeste gevallen gelijk aan nul) van een aantal knooppunten, die moeten voorkomen dat de konstruktie zich onder invloed van de uitwendige krachten zich in zijn geheel verplaatst in de ruimte.

In het geval dat plastische vervorming in de konstruktie optreedt is een analoge redenering op te stellen. Aangezien in het onderhavige onderzoek hiervan geen gebruik is gemaakt, wordt verwezen naar de literatuur op dit gebied, bijvoorbeeld Zienkiwicz [5].

II.6 Toepassing van de eindige elementen methode

Voor de toepassing van de FEM zijn een aantal standaard computerprogramma's ontwikkeld. De bekendste zijn ASKA en MARC, beide aanwezig op het Rekencentrum van de TH Delft. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van het MARC-pakket, waarvoor geen andere reden aan te wijzen is dan dat het ruimere mogelijkheden biedt dan het ASKA-pakket. Hoewel slechts een gering deel van deze mogelijkheden gebruikt is, was bij het begin van het onderzoek niet duidelijk welke omvang het onderzoek zou nemen door gebrek aan ervaring op dit gebied binnen de Tussenafdeling der Metaalkunde.

Het is ondoenlijk in dit verslag een overzicht van de mogelijkheden te geven, die het MARC-pakket biedt; de handleiding [6] geeft deze uitgebreid aan, geïllustreerd met een groot aantal voorbeelden.

De eindige elementen methode is gebruikt met als doel het berekenen van de spanningsintensiteitsfaktor van een gelaste konstruktie (fig. 7). Bij nadere bestudering van de mogelijkheden, blijkt dat voor een nauwkeurige berekening de benodigde computertijd groot is. Voor eenvoudige problemen, zoals een centraal gescheurde plaat, belopen de kosten naar de huidige tarieven al gauw f10.000 of meer. Met een toenemend aantal elementen en dus toenemende nauwkeurigheid lopen de kosten sterk op.

Voor de gelaste konstruktie bedragen deze zeker meer dan f50.000 bij een onnauwkeurigheid van 5% in de resultaten. Een ander probleem is dat voor de verdeling van een konstruktie in elementen enige ervaring nodig is voor het verkrijgen van nauwkeurige resultaten.

Een en ander leidt tot de konklusie dat, vooral gezien het beperkte computerbudget van de Tussenafdeling, toepassing van de FEM niet tot de mogelijkheden behoort. Dit bezwaar is ondervangen door een vereenvoudigde toepassing van het MARC-programma. Een analytisch te bepalen spanningsintensiteitsfaktor is met een zeer beperkt aantal elementen berekend. Hierdoor is een "ijkkromme" verkregen voor de berekeningen aan de gelaste konstruktie, welke uitgevoerd zijn met elementen van vergelijkbare grootte op de kritieke plaatsen en veel grotere elementen in het resterende deel van de konstruktie. In de tweede plaats is geen gebruik gemaakt van de in het MARC-pakket opgenomen mogelijkheid de J-integraal (Broek [4]) en daarmee de spanningsintensiteitsfaktor te berekenen. In plaats van deze methode is gekozen voor de goedkopere berekening uit de verandering van de compliantie met de scheurlengte uit de verplaatsing van de belaste knooppunten en voor de berekening uit de scheuropening.

III. MEETOPSTELLING EN PROEFSTUKKEN

Voor de vermoeingsproeven is gebruik gemaakt van een Losenhausen-pulsator met een dynamisch bereik van 40 ton. In de eerste instantie is getracht de scheurgroei fotografisch te volgen. Daartoe is de pulsator uitgebreid met een pulsgever en een pulsteller (1 puls per 10 belastingswisselingen). Door telkens na een bepaald aantal wisselingen zowel het proefstuk als de pulsteller te fotograferen, zou de scheurgroei nauwkeurig gevolgd kunnen worden. Daar het echter noodzakelijk bleek het proefstuk sterk te verlichten, waardoor de LED's van de pulsteller overstraalt werden, bleek dit niet goed mogelijk. De scheurgroei is daarom gevolgd met behulp van een meetkijker. De geometrie van de proefstukken is voornamelijk bepaald door het maximale bereik van de pulsator. De vorm en afmetingen van de gebruikte proefstukken, centraal gescheurde vlakke plaat en gelaste konstruktie wordt gegeven in de figuren 12 en 13.

De vorm van het gelaste proefstuk is ontstaan uit de beschouwing van een aantal veel voorkomende konstrukties en hun belasting (fig 4).

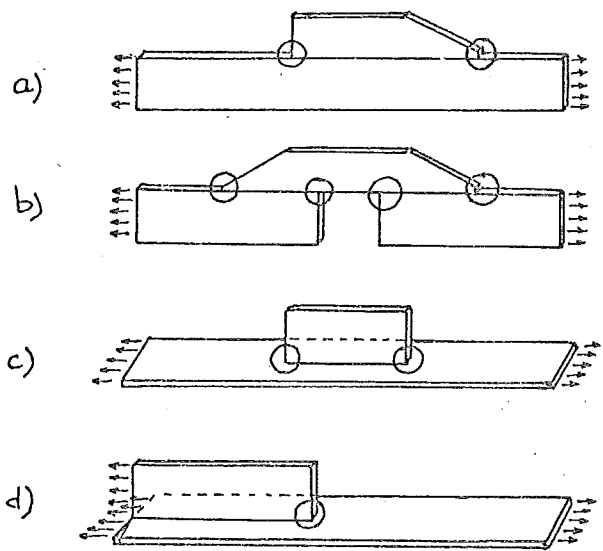
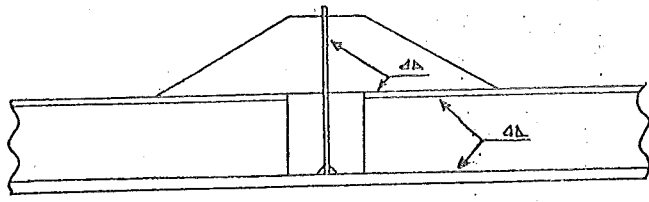
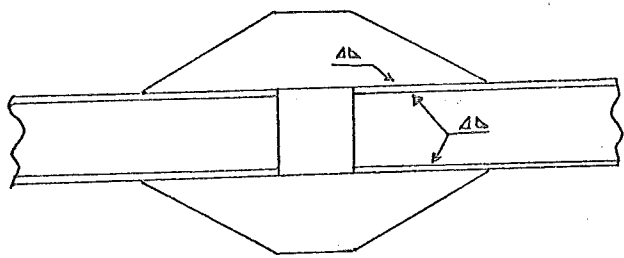


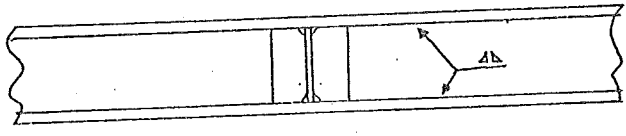
Fig. 4. Veel voorkomende konstrukties en hun belasting. De cirkels duiden de kritieke plaatsen aan.



a)



b)



c)

Fig. 5. Karakteristiek deel van een scheepsconstructie en de daaruit te ontwikkelen proefstukken.

Een karakteristiek deel van een scheepsconstructie is een gedeelde ligger met een schetsplaat (fig. 5a). Een dergelijke constructie is door de asymmetrie lastig te beproeven. Er bestaan twee mogelijkheden hieruit een symmetrisch proefstuk te ontwikkelen, zoals in fig.5b en c is aangegeven. In dit onderzoek is gekozen voor het type met twee schetsplaten (belasting als in fig. 4b), omdat juist voor deze proefstukken in het EGKS-onderzoek tegenstrijdige resultaten gevonden werden.

De onderdelen, waaruit het gelaste proefstuk is opgebouwd, zijn met behulp van een autogeen snij-apparaat uit plaatmateriaal vervaardigd. Na door schaven op maat gebracht te zijn (waardoor ook de warmte beïnvloede zone van het snijden is verwijderd) zijn de onderdelen in een mal geplaatst en gelast. De lasparameters worden gegeven in tabel III.

IV. METINGEN

IV.1 Uitvoering van de metingen

Metingen zijn verricht aan twee staalsoorten en wel aan Fe430 en aan niobhoudend Fe510. In tabel II zijn de chemische samenstelling en enkele mechanische eigenschappen vermeld.

De mechanische eigenschappen zijn bepaald aan prismatische trekstaven met een doorsnede van $40 \times 10 \text{ mm}^2$, met uitzondering van de kerfslagwaarde en de elasticiteits- en glijdingsmodulus. Deze laatste zijn met behulp van de Elastomat bepaald uit de gedwongen resonantiefrequentie van staven ter grootte van $150 \times 9 \times 9 \text{ mm}^3$. De kerfslagwaardes zijn gemeten aan Charpy-V staven bij 20°C .

De scheurgroeimetingen zijn verricht aan vlakke platen van 10 mm dik en aan gelaste konstrukties zoals beschreven in hoofdstuk III (fig.12 en 13). De proeven aan vlakke plaat zijn alle uitgevoerd met een zogenaamd anti buckling device (ABD, fig.14) om eventuele knik van de plaat bij trek-druk belastingsgevallen te voorkomen. Dit ABD wordt aan beide zijden van de plaat aangebracht en door middel van handvast gedraaide boutverbindingen op zijn plaats gehouden. Om belastingsoverdracht van plaat naar ABD te voorkomen is tussen plaat en ABD een laag vilt aangebracht. Een controle hierop is uitgevoerd met behulp van rekstrookjes op de plaat en het ABD. De belastingsoverdracht in de lengterichting van de plaat is minder dan 1%, dat wil zeggen de belasting van de plaat bedraagt 99% van de ingestelde belasting. In dynamische omstandigheden treedt een faseverschil op tussen de spanning in de plaat en die in het ABD (± 10 graden).

De metingen met behulp van rekstrookjes zijn tevens gebruikt om de pulsator te ijken. Alle vermelde resultaten zijn werkelijke waarden, er is echter geen korrektie uitgevoerd voor het niet geheel sinusvormig zijn van de belastingswisseling (de toppen van de sinus waren enigszins verbreed).

De verrichte metingen (staalsoort, belastingstype en grootte) zijn vermeld in tabel I.

IV.2 Verwachte uitkomsten van de metingen

In het EGKS-onderzoek is voor de gelaste konstruktie voor $R = -\frac{1}{2}$, zowel als voor $R = -1$ geen verschil gevonden in levensduur tussen Fe430 en Fe 510Nb.

-18-

Ook de verschillen in scheurgroeisnelheid en het effect van de gemiddelde spanning daarop zijn insignifikant.

Dit is in tegenstelling met de resultaten van de proefnemingen aan vlakke platen, waar Fe510Nb betere vermoeiingseigenschappen bleek te hebben dan Fe430. Bovendien is de invloed van de gemiddelde spanning op de scheurgroeisnelheid duidelijk waarneembaar. De dubbele spanningsamplitude benodigd voor scheurgroei tot $a=20$ mm in 10^5 belastingswisselingen bedraagt $33,5 \text{ kg/mm}^2$ voor $R=-1$ en $19,5 \text{ kg/mm}^2$ voor $R=0$.

Het testprogramma van dit onderzoek is qua proefstukgeometrie gelijkloidend aan het EGKS-onderzoek, maar wat betreft R-waarden enigszins afwijkend.

De verwachting is dat Fe510Nb zowel wat betreft levensduur als scheurgroeisnelheid zich beter gedraagt dan Fe430 bij alle spanningsratio in het geval van de centraal gescheurde plaat. De scheurgroeisnelheid zal afhankelijk zijn van de gemiddelde spanning.

Voor de metingen aan het gelaste proefstuk worden dezelfde verwachtingen uitgesproken, naast de verwachting, dat de scheurinitiatieperiode korter zal zijn dan die in ongelaste toestand.

De initiatie zal plaats vinden op of nabij de smeltlijn van de las (fig. 6) om twee redenen:

- ter plekke heerst de grootste spanning
- grote kans op lasfouten (bijv. inkarteling)

Zoals uit figuur 6 blijkt zal de scheur zich slechts de eerste één à twee millimeter in de heat affected zone bevinden. Door de moeilijke detecteerbaarheid van de beginscheur zijn geen scheurgroeimetingen verricht in dit gebied. De invloed van de veranderde eigenschappen op de scheurgroeisnelheid en de scheurinitiatie is dus onbekend.

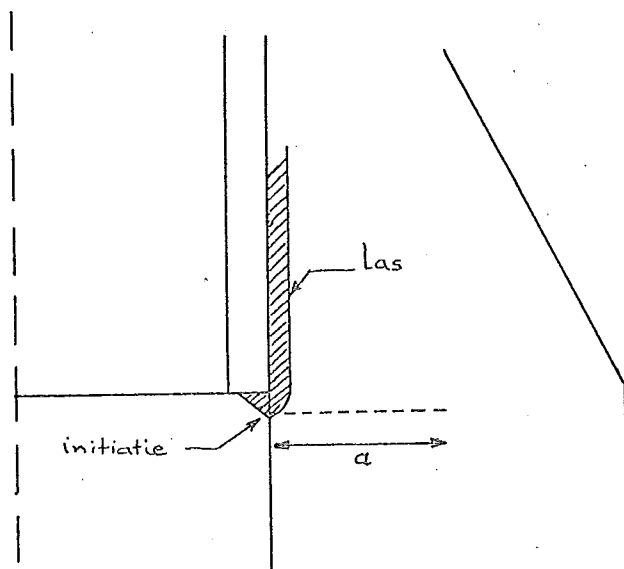


Fig. 6. Plaats van de scheur in het gelaste proefstuk.

V. BEREKENINGEN

In dit hoofdstuk worden de berekeningen besproken, welke gebruikt worden voor de weergave van de meetresultaten.

In de eerste plaats wordt de analytische oplossing voor vlakke plaat gegeven, welke tevens dient voor de konstruktie van de ijk-kromme voor de FEM-berekeningen.

In de tweede plaats wordt een kwalitatieve schatting van de spanning in de schetsplaten van de gelaste konstruktie gemaakt ter controle van de resultaten van de FEM-berekeningen. In paragraaf V.3 wordt de methode van berekening van de spanningsintensiteitsfaktor uitgewerkt. De paragrafen V.3.1 en V.3.2 beschrijven de invoer en het gebruik van het MARC-programma voor het centraal gescheurde en het gelaste proefstuk; in paragraaf V.4 wordt de spanning in het gelaste proefstuk van het EGKS-onderzoek vergeleken met de betreffende FEM-resultaten.

V.1. De centraal gescheurde plaat, analytische oplossing.

Bij de berekening van de spanningsintensiteitsfaktor, of de dubbele amplitude daarvan, is gebruik gemaakt van de Feddersen-korrektie voor eindige breedte van de vlakke plaat:

$$C = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{2w}\right)} \quad (31)$$

Waarmee we dan voor de spanningsintensiteitsfaktor $K_I = C\sigma\sqrt{\pi a}$ vinden:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{2w}\right)} \quad (32)$$

waarin w de halve plaatbreedte is.

De scheurgroeisnelheid is gelijk aan de helling van de a - N kromme, deze is bepaald als:

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{N+\Delta N} - a_{N-\Delta N}}{2\Delta N} \quad (33)$$

Ook voor de gelaste proefstukken is de scheurgroeisnelheid op deze wijze bepaald.

V.2 Kwalitatieve schatting van het spanningsveld in de gelaste konstruktie

Een kwalitatieve schatting van het spanningsveld is te maken met behulp van een schematisering van de konstruktie tot schaalkonstruktie. De konstruktie is op te vatten als een plaat met verstijvers en een gat (fig. 7.)

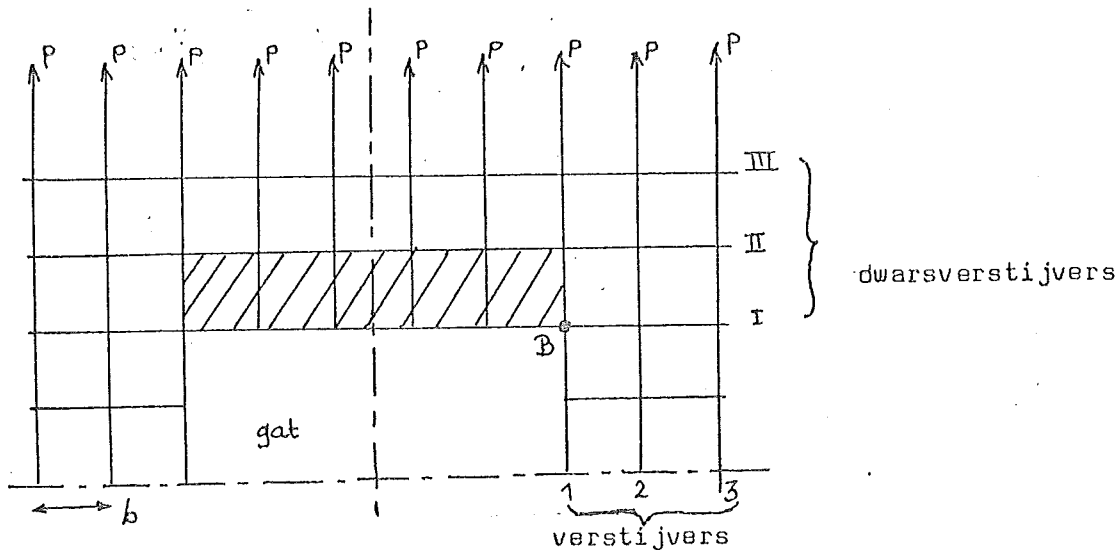


Fig. 7. Schematisering van het gelaste proefstuk.

Men bepaalt de zogenaamde stoorspanningen ten gevolge van het gat en superponeert ze op het onverstoorde spanningsveld, dat gevonden wordt uit de balkentheorie. De verstijvers nemen de normaalkrachten op, de plaatvelden kunnen alleen schuifspanningen ondergaan. Beschouwen we het detail aangeduid in fig. 8 a als een ingeklemde balk (fig. 8 b), dan kunnen we de verplaatsing van het punt B berekenen:

$$f_B = f_{2,5b}^p + f_{0,5b}^p + f_{1,5b}^p \quad (34)$$

waarin f_{b}^p de bijdrage van de kracht ter plaatse van de afstand b is. Nu is

$$f_{2,5b}^p = \frac{2 p (2,5 b)^3}{3 E I} \quad (35)$$

$$f_{0,5b}^p = - \frac{p (0,5 b)^3}{3 E I} - \frac{p (0,5 b)^2}{2 E I} \cdot 2b \quad (36)$$

$$f_{1,5b}^p = - \frac{p (1,5 b)^3}{3 E I} - \frac{p (1,5 b)^2}{2 E I} b \quad (37)$$

waaruit volgt:

$$f_B = 7,875 \frac{p b^3}{E I} \quad (38)$$

waarin I het traagheidsmoment en E de elasticiteitsmodulus is. De hoekverdraaiing θ_B ter plaatse van B volgt uit:

$$\theta_B = \theta_{0,5b} + \theta_{1,5b} + \theta_{2,5b} \quad (39)$$

$$\theta_B = - \frac{p (0,5 b)^2}{2 E I} - \frac{p (1,5 b)^2}{2 E I} - \frac{p (2,5 b)^2}{2 E I} \quad (40)$$

$$\theta_B = 1,875 \frac{p b^2}{E I} \quad (41)$$

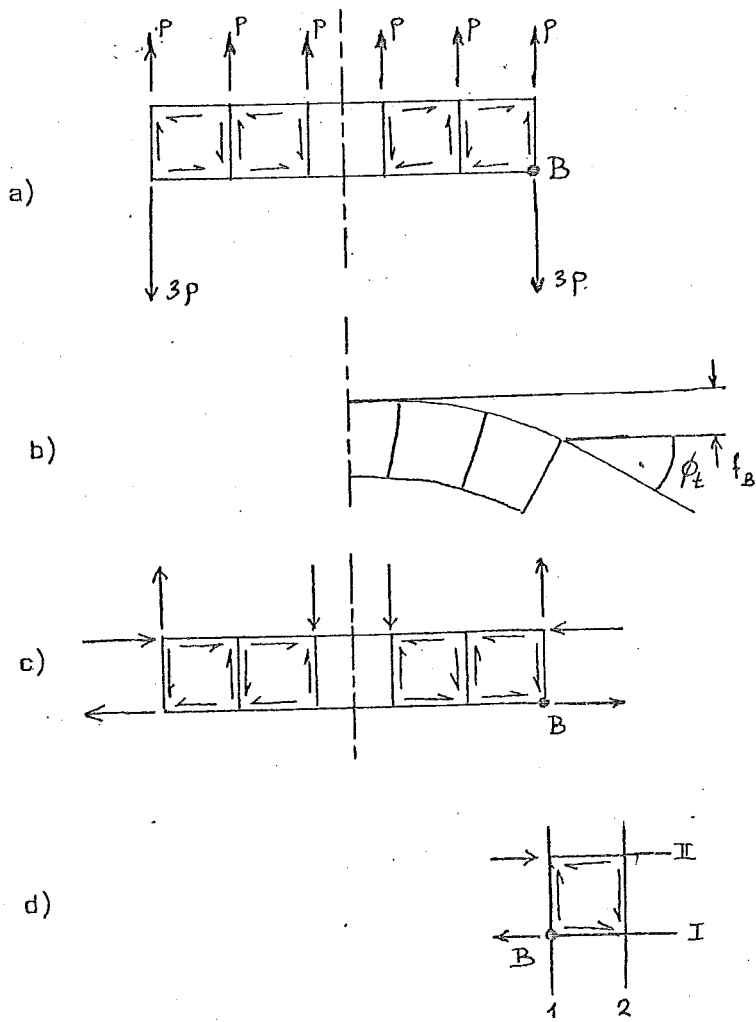


Fig. 8 Bij de berekening van de doorbuiging en de hoekverdraaiing.

- a) detail
- b) ingeklemde balk
- c) stoorsysteem van de balk
- d) stoorsysteem van de omgeving

In figuur 8c zijn de zogenaamde stoorspanningen aangegeven, die de balk weer op zijn plaats in de omringende constructie doen passen. Een zelfde berekening is uit te voeren voor balken, die boven de hier besproken balk liggen, alleen wordt het stoorspanningsveld telkens kleiner. (fig 9). Verstijver 1 zal onder de kracht $3p$ vervormen, waardoor de belasting relaxeert. Een deel zal door de verstijvers 2, 3 etc. in afnemende mate worden opgenomen. Het resulterende spanningsveld is in figuur 10. geschetst.

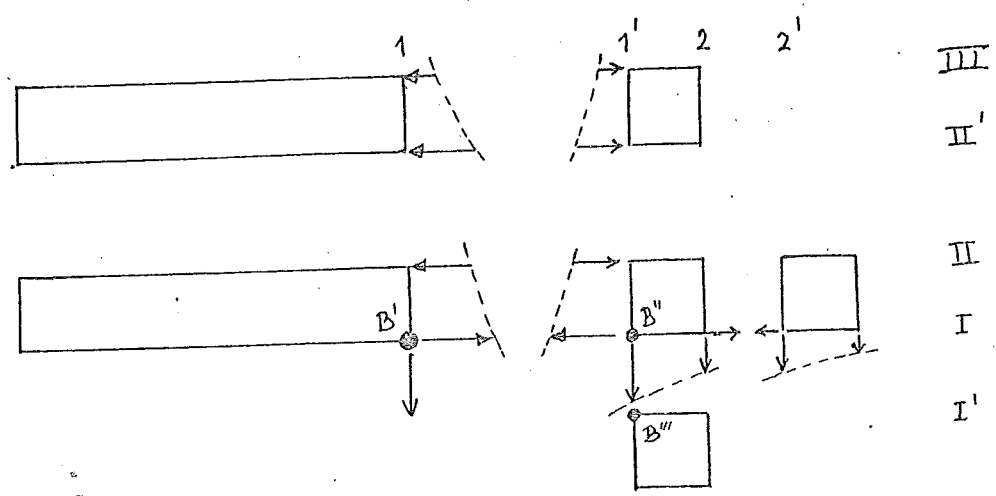


Fig. 9 De afnemende grootte van de stoorspanningen.

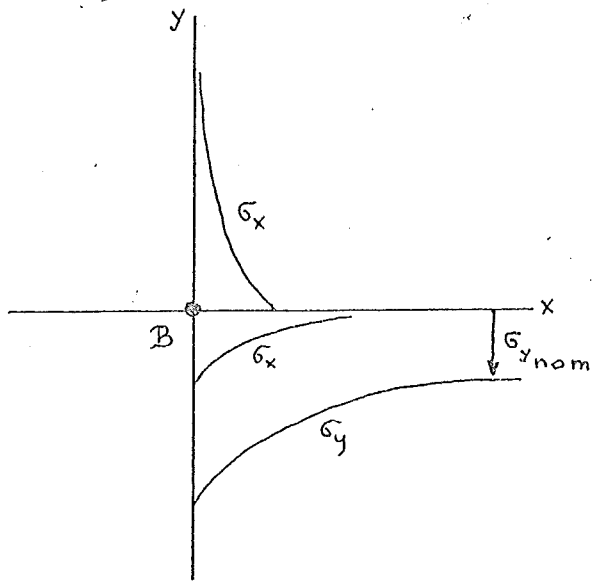


Fig.10. Het resulterende spanningsveld.

De onderzochte gelaste konstruktie verschilt van de geschematiseerde konstruktie in zoverre de I-balken op te vatten zijn als zware verstijvers. De verstijvers 1 dragen dus meer kracht dan de andere. Het gevolg is dat de kracht $3p$ groter wordt en de krachten p kleiner (zie figuur 11). De zakking f_B en de hoekverdraaiing worden dus kleiner. De stoorspanning in horizontale richting wordt eveneens kleiner, in tegenstelling tot de spanning bij B in verticale richting die groter wordt.

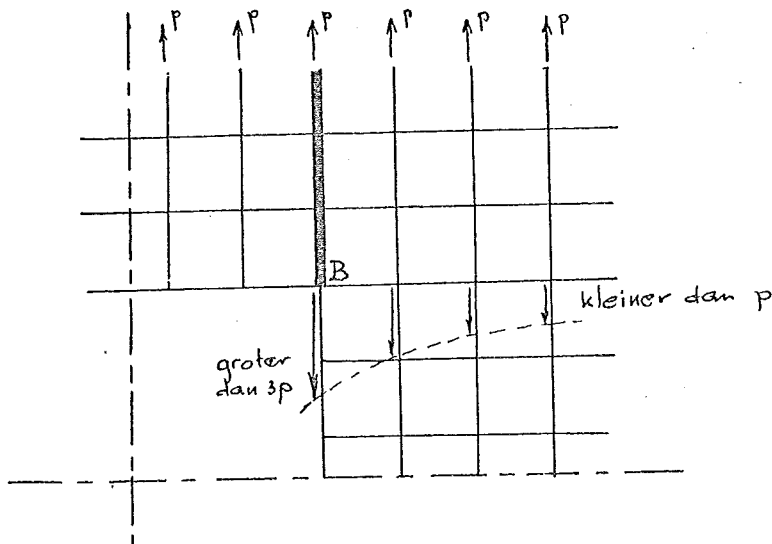


Fig. 11 Een zware verstijver in de konstruktie.

V.3 De berekeningen met behulp van de eindige elementen methode

De eindige elementen berekeningen zijn uitgevoerd met behulp van het MARC-programma. Dit programma vraagt invoer van een aantal gegevens:

- programma technische gegevens
 - zoals benodigde (gebruikte) geheugengrootte
 - aantal en grootte van gegevensbestanden op bijv. magneetschijf
 - gebruikte mogelijkheden van het programma
- gegevens betreffende het opdelen van de konstruktie in elementen
 - aantal, type en grootte van de elementen
 - hun onderling verband

Deze gegevens kunnen worden gegenereerd met een apart programma dat opgenomen is in het MARC-pakket. Dit programma vraagt op zijn beurt weer dezelfde gegevens als hier vermeld worden, alleen in een meer hanteerbare vorm.
- de eigenschappen van de elementen, de belasting en de randvoorwaarden
 - elasticiteitsmodulus, dwarskontraktie, vloeispanning
 - richting en grootte van de knooppuntskrachten
 - beperking van de verplaatsing van bepaalde knooppunten
- aan te brengen wijzigingen voor opeenvolgende berekeningen
 - loskoppelen van elementen
 - opheffen van randvoorwaarden
 - veranderende belasting, temperatuur, etc.

De invoer van het programma voor de uitgevoerde berekeningen is gegeven in appendix A, tezamen met een overzicht van de belangrijkste details zoals elementgrootte, belasting, etc.

De uitvoer van het MARC-pakket vermeldt onder andere spanningen, verplaatsingen, rekken, plastische vervormingen en reactiekrachten.

Zoals in hoofdstuk II al is vermeld, is de relatie tussen de spanningsintensiteitsfaktor en de compliantie te schrijven als:

$$K = \sqrt{\frac{E}{2 B} \frac{d}{da} (P \delta)} \tag{11}$$

In de eindige elementen methode wordt een spanning op een zijvlak van een element vertaald naar krachten op de knooppunten, die in dat zijvlak liggen. In de uitvoer van het MARC-programma worden de verplaatsingen van alle knooppunten gegeven, evenals de krachten op de belaste knooppunten. Vergelijking (11) kan worden herschreven als:

$$K = \sqrt{\frac{E}{2 B} \frac{\Delta(\sum_i P_i \delta_i)}{\Delta a}} \tag{42}$$

waarin gesommeerd moet worden over het aantal belaste knooppunten. Het differentiequotient in (42) is te bepalen door de resultaten van opeenvolgende FEM-berekeningen met telkens grotere scheurlengtes te combineren.

Dezelfde berekeningen leveren de scheuropening als functie van de halve scheurlengte door telkens het verschil in de verplaatsing van de knooppunten juist boven en onder de scheur te bepalen. Met

$$K = \sqrt{\frac{\pi G E \text{ COD}_{x=0}}{4}} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{G^2}{2G^2 v_1}}} \quad (17)$$

volgt dan direkt de spanningsintensiteitsfaktor.

V.3.1 FEM-berekening van de centraal gescheurde plaat

Als analytisch oplosbaar probleem is de centraal gescheurde vlakke plaat gekozen om twee redenen. In de eerste plaats is deze konstruktie gebruikt als referentie voor de vermoeiingseigenschappen van de gelaste konstruktie en in de tweede plaats is het een eenvoudige in het licht van de eindige elementen methode.

Op grond van symmetrie-overwegingen is het niet nodig het volledige proefstuk te beschrijven in elementen, slechts een oktant volstaat. Dit oktant is opgedeeld in 14 elementen zoals aangegeven in figuur 15. Elk element kent 20 knooppunten (zie figuur 16). De spanningen en rekken worden berekend voor 27 integratiepunten (3*3*3, in x, y en z richting), gelijkelijk verdeeld over het inwendige van het element. De krachten en verplaatsingen worden voor de knooppunten berekend. De verdeling in elementen is juist zo gekozen, omdat bij de scheurgroeiingen de halve scheurlengte zelden groter is geweest dan 50 mm en omdat een berekening van de spanningsintensiteitsfaktor om de 10 mm een redelijk aantal resultaten oplevert.

De tweede laag elementen in de y-richting is aangebracht omdat de diskrete krachten op de knooppunten in het vlak y=100 een uniforme spanning moeten voorstellen.

De scheurgroei in de konstruktie wordt bewerkstelligd door het aantal randvoorwaarden, die de verzameling vergelijkingen oplosbaar maakt, te wijzigen. In de eerste berekening wordt aan alle knooppunten in de vlakken x=0, y=0 en z=0 een verplaatsing $\{\delta\}=0$ opgelegd. In de hele plaat zal dus een spanning σ_y heersen, die gelijk is aan de uniforme spanning resulterend uit de opgelegde krachten. Via de ingevoerde

mechanische eigenschappen (zie appendix A) volgen de verplaatsingen van alle knooppunten in de x,y en z richting. In volgende berekeningen worden telkens randvoorwaarden in het vlak $y=0$, het scheurgroevlak, opgeheven. Door het onbepaald laten van de verplaatsingen in de y-richting van de knooppunten van de elementen 1,3,5, etc. worden halve scheurlengten van 10,20,30,etc. mm gesimuleerd. De overige randvoorwaarden blijven ongewijzigd om de verbinding met de overige oktanten van de constructie te simuleren.

Door een en ander krijgen de knooppunten van het oorspronkelijke vlak $y=0$ een grotere verplaatsing in de y-richting. Uit deze verplaatsingen en uit de krachten op die knooppunten kan eenvoudig $\frac{\Delta \sum (P_i \delta_i)}{\Delta a}$ berekend worden en dus de spanningsintensiteitsfaktor K_{verpl} .

De halve scheuropening volgt direkt uit de verplaatsing van de knooppunten, die oorspronkelijk in het vlak $y=0$ lagen. Met vergelijking (17) is dan K_{COD} te berekenen (zie fig. 17).

In figuur 18 zijn de uitkomsten van beide berekeningen gegeven in vergelijking met de analytische, voor eindige breedte gekorrigeerde, spanningsintensiteitsfaktor K_{FED} .

Het is ondoenlijk gedetailleerde berekeningen te geven, omdat dat impliceert een volledige vermelding van de uitvoer van het MARC-pakket (± 25000 regels).

V.3.2 FEM-berekening van de gelaste constructie

De gelaste constructie is opgedeeld in elementen, waarvan het type en de grootte (in het gebied waar de scheur groeit) gelijk is aan die van het vlakke plaat probleem. Aangenomen is, dat de elementgrootte in belangrijke mate de nauwkeurigheid van de oplossing bepaald (zie o.a. Führung [7]).

De kritische punten van de gelaste constructie liggen in de schetsplaten, de rest van de constructie is opgedeeld in grotere elementen. Een en ander is geschetst in figuur 19. Ook in dit geval is aan de knooppunten in de vlakken $x=0$, $y=0$ en $z=0$ een verplaatsing gelijk aan nul opgelegd. De methode van wijziging van randvoorwaarden is nu niet mogelijk, omdat de scheurgroei niet optreedt in één van die vlakken, maar in het vlak $x=50$. Het MARC-programma biedt de mogelijkheid de verplaatsing van een knooppunt te koppelen aan de verplaatsing van een ander knooppunt en daarvoor een algoritme te geven. Dit kan lopen van totaal ontkoppelen van de verplaatsingen tot het opleggen van gelijke verplaatsing in alle richtingen. De scheurgroei is in dit geval gesimuleerd door ontkoppeling

van de verplaatsing van de knooppunten in het vlak x=50 in de richting loodrecht op het scheurvlak.

Doordat ook in de FEM-berekening van de gelaste konstruktie op grond van symmetrie-overwegingen slechts een oktant wordt beschouwd, wordt een berekening gemaakt van een geometrie met vier scheuren. Deze situatie treedt in werkelijkheid ook op; zij is in principe instabiel. Twee van de vier scheuren, een aan elke zijde van de konstruktie, eventueel versprongen, zullen uitgroeien, de andere twee zullen stoppen. Als een scheur, om wat voor reden dan ook, langer wordt dan de andere scheur in dezelfde schetsplaat wordt de spanning aan de tip van die scheur hoger door de vermindering van de netto-doorsnede. De spanningsverhoging zal een vergroting van de scheurgroeisnelheid tot gevolg hebben. De langere scheur veroorzaakt een spanningsdaling aan de tip van de korte scheur door de verstoring van de krachtdoorleiding. De kortere scheur zal dus langzamer uitgroeien en uiteindelijk stoppen. Op zich veroorzaakt een en ander dezelfde situatie in de andere schetsplaat, omdat door asymmetrie geen zuivere modus I belasting ontstaat. In de berekeningen is met dit effect geen rekening gehouden. In de praktijk treedt deze toestand op bij scheurlengtes groter dan 10 mm. De resultaten van de berekeningen zijn vermeld in de figuren 20 en 21.

V.4 Controle van de FEM-berekeningen

Nibbering [2] geeft de lokale spanning in het gelaste proefstuk, die gevonden is met rekstrookmetingen. Hoewel de afmetingen van het gelaste proefstuk in dit onderzoek afwijkend zijn, is de overeenkomst van de vorm groot genoeg om een vergelijking van gemeten en berekende waarden zinvol te doen zijn. In figuur 22 worden plaats en grootte van beide gegeven, na op gelijke noemer gebracht te zijn.

V.5 Berekening van de elasticiteits- en glijdingsmodulus uit de gedwongen resonantie-frequentie.

De elasticiteitsmodulus, E, en de glijdingsmodulus, G, kunnen berekend worden uit de gedwongen resonantie frequenties volgens de onderstaande betrekkingen:

$$E = \left\{ 1 + 0,822 \nu^2 \frac{h^2 + b^2}{l^2} \right\} 4,0775 \cdot 10^{-8} \frac{m}{h b} f_1^2 \tag{42}$$

$$G = 1,0194 \cdot 10^{-8} F\left(\frac{h}{b}\right) \frac{m}{h b} f_2^2 \tag{43}$$

waarin h, b, l en m resp. de hoogte, breedte, lengte en massa van de proefstaaf zijn, ν de dwarskontraktie, $F\left(\frac{h}{b}\right)$ een geometriefaktor en f_1 en f_2 de gedwongen resonantiefrequenties zijn voor respectievelijk longitudinale en torsietrilling. De geometriefaktor is gelijk aan 4,7424 bij $\frac{h}{b} = 1$.

VI. RESULTATEN

In dit hoofdstuk worden de uitkomsten van de metingen gepresenteerd, eventueel met gebruik van de resultaten van de berekeningen. In de eerste paragraaf wordt de initiatie van de scheur besproken, de daarop volgende paragrafen behandelen de scheurgroeisnelheid van het centraal gescheurde proefstuk, respectievelijk de gelaste constructie. Het effect van de verschillende belastingstypen en van de staalsoort wordt aangeduid.

VI.1 De scheurinitiatie

De scheurinitiatie is moeilijk waarneembaar, in het bijzonder bij de gelaste proefstukken door het ruwe oppervlak van de las. In het algemeen is het aantal belastingswisselingen tot scheurinitiatie slechts op te geven als zijnde kleiner dan het aantal belastingswisselingen nodig om een scheur van ongeveer 1 mm te veroorzaken. De resultaten, die in tabel IV zijn vermeld, zijn dus een indicatie. Tevens is in tabel IV vermeld het aantal initiatiepunten, dat mikroskopisch is waargenomen en het breukvlak uiterlijk.

VI.2 De scheurgroeisnelheid in de centraal gescheurde plaat

De scheurgroeiwaarnemingen, die vermeld zijn in tabel V en in de figuren 23 en 24, zijn met behulp van de berekeningen uit paragraaf V.1 omgewerkt tot scheurgroeisnelheidswaarnemingen (figuren 25 t/m 31).

In figuur 25 wordt het effect van de spanningsratio op de scheurgroeisnelheid als functie van ΔK in Fe510Nb gegeven. Opvalt dat het negatieve deel van de belasting een geringe invloed op de scheurgroeisnelheid heeft. Dit in tegenstelling tot de resultaten in Fe430 in het bijzonder voor hogere waarden van de dubbele amplitude van de spanningsintensiteitsfactor (fig. 26).

Uit de figuren 27 en 28 blijkt dat de gemiddelde spanning, zowel bij Fe430, als bij Fe510Nb, invloed heeft op de scheurgroeisnelheid, zij het een geringe.

In de figuren 29, 30 en 31 wordt de scheurgroeisnelheid in beide staalsoorten als functie van ΔK vergeleken bij de drie spanningsratio. In het algemeen is de scheurgroeisnelheid in Fe510Nb hoger dan in Fe430. Bij $R=-1/3$ en $R=0$ bedraagt het verschil een faktor 1,5, afnemend tot 1 voor hoge ΔK . Voor $R=1/3$ (fig. 31) verloopt deze faktor van 0,7 tot 1,5.

VI.3 De scheurgroeisnelheid in de gelaste constructie

De scheurgroeimetingen zijn vermeld in tabel V en weergegeven in de figuren 32 (Fe510Nb) en 33 (Fe430). De resultaten van de eindige elementen methode zijn gebruikt om in de figuren 34 t/m 37 de scheurgroeisnelheden als functie van de dubbele amplitude van de spanningsintensiteitsfaktor respectievelijk de maximale waarde daarvan te geven.

Als referentie is in de figuren bovendien het resultaat van de scheurgroeisnelheidswaarnemingen aan de vlakke plaat bij $R=0$ aangegeven.

Uit de figuren 34 en 35 blijkt dat het negatieve deel van de belasting bij $R=-1/3$ een bijzonder geringe invloed heeft op de scheurgroeisnelheid in beide staalsoorten. Opvallend is de hoge scheurgroeisnelheid voor lage waarden van ΔK bij $R=-1/3$ en 0 ten opzichte van $R=1/3$. Bij hoge waarden van ΔK zijn de scheurgroeisnelheden bij benadering gelijk aan die in de vlakke plaat, bij kleine scheurlengtes (minder dan 30mm, ΔK kleiner dan $250 \text{ kg/mm}^{3/2}$) is de scheurgroeisnelheid echter belangrijk hoger (tot een faktor 5). Voor het belastingstype met een hoge gemiddelde spanning is dit effect minder uitgesproken aanwezig.

Bij het uitgegloeide proefstuk is het effect in het geheel niet waargenomen, met dien verstande dat de scheurgroeisnelheid over de hele linie hoger ligt dan die in het centraal gescheurde proefstuk.

Uit de figuren 36 en 37 blijkt dat de gemiddelde spanning, zowel bij Fe510Nb als bij Fe430, grote invloed heeft op de scheurgroeisnelheid.

Uit de vergelijking van de scheurgroeisnelheid in de beide staalsoorten (fig.38) wordt duidelijk dat Fe 430 gunstiger is bij lage ΔK en Fe510Nb gunstiger bij hoge ΔK , hoewel de verschillen gering zijn.

VII. DISKUSSIE EN KONKLUSIES

De discussie van de resultaten van dit onderzoek valt in twee delen uiteen. In paragraaf VII.1 wordt het resultaat van de eindige elementen methode op zich en de betrouwbaarheid van de toepassing van de resultaten op het gelaste proefstuk besproken. Het tweede deel van de discussie behandelt het experimentele deel van het onderzoek. Tot slot worden de konklusies samengevat in paragraaf VII.4.

VII.1 De eindige elementen methode

De eindige elementen berekeningen aan de centraal gescheurde plaat geven ondanks het geringe aantal elementen, dat de in berekeningen is gebruikt, bevredigende resultaten. De afwijking ten opzichte van de theoretisch berekende waarden is voor de uit de scheuropening bepaalde spanningsintensiteitsfaktor konstant bij alle scheurlengtes (fig.18). De berekening uit de verplaatsing van de belaste knooppunten blijkt minder nauwkeurig te zijn, in het bijzonder voor grotere scheurlengtes.

De controle van de resultaten door vergelijking met de rekstrookmetingen (fig.22) en met berekeningen met een ander aantal elementen leiden naast de uitkomsten van de K-berekeningen voor de centraal gescheurde vlakke plaat tot de konklusie dat de berekening van de spanningsintensiteitsfaktor voor de gelaste konstruktie betrouwbare resultaten oplevert. Schatting van de spanningsintensiteitsfaktor door het opvatten van de gelaste konstruktie als een centraal gescheurde plaat geeft in elk geval minder onderbouwde resultaten, zeker voor kleine scheurlengtes. Bij grote scheurlengtes is deze schatting meer betrouwbaar, omdat door instabiliteit slechts twee scheuren, in elke schetsplaat één, zullen uitgroeien. Bij grote scheurlengtes zal K niet belangrijk meer worden beïnvloed door de stijve I-balken en de onderbreking daartussen. In het tussenliggende gebied is bij de weergave van de resultaten aangenomen dat toch de berekende spanningsintensiteitsfaktor geldig is, in werkelijkheid zal de spanningsintensiteitsfaktor echter liggen tussen de berekende waarde en de waarde van het vlakke plaat geval (fig.39).

Een en ander impliceert dat de ΔK - en K_{max} -waarden in principe te laag geschat zijn vanaf $a=10$ mm. Voor de bespreking van de scheurgroei-metingen heeft dit alleen invloed op de grootte van de waargenomen effecten.

Naast het opvatten van de gelaste konstruktie als centraal gescheurde vlakke plaat, bestaat nog de mogelijkheid de konstruktie te zien als halve plaat met randscheur, belast met puntkrachten op de rand of met een uniforme spanning. De asymmetrie van dit geval, ontstaan doordat de verplaatsing van de plaatrand boven de scheur verhinderd wordt door de stijve I-balk, maakt een analytische oplossing ondoenlijk.

VII.2 De scheurinitiatie

De scheurinitiatiewaarnemingen (tabel IV) voldoen goed aan het verwachtingspatroon. De gelaste proefstukken initiëren twee keer zo snel als de centraal gescheurde platen bij gelijke spanningsratio. Met stijgende spanningsamplitude wordt de initiatieperiode korter, zowel voor de vlakke plaat als voor de gelaste konstruktie. Het aantal initiatiepunten vertoont dezelfde tendens, het effect van de spanningsratio is echter niet aanwijsbaar.

VII.3 De scheurgroeisnelheid en levensduur

VII.3.1 De centraal gescheurde vlakke plaat

De scheurgroeiingen voldoen niet geheel aan de verwachtingen. Het effect van de gemiddelde spanning op de scheurgroeisnelheid is wel aanwezig, maar zeker niet groot te noemen, zoals door Nibbering [2] is gevonden. Wel is een duidelijk voordeel in levensduur voor Fe510Nb aangetoond (fig.23 en 24). De scheurgroeisnelheid in Fe510 is bij gelijke ΔK en K_{max} een faktor 1 tot 1,5 hoger is als in Fe430, zodat niet gesproken kan worden voordeel voor Fe510Nb ten opzichte van Fe430 op dit gebied. De kleinere scheurgroeisnelheid van Fe430 bij gelijke K kan verklaard worden uit de grotere plastische vervorming bij gelijke spanning.

VII.3.2 De gelaste konstruktie

De vergelijking van de scheurgroeisnelheid in beide staalsoorten leidt tot de konklusie, dat bij hoge waarden van de spanningsintensiteitsfaktor Fe510Nb gunstiger vermoeiingseigenschappen heeft dan Fe430. Bij lage ΔK -waarden is dat juist omgekeerd.

Bij hoge ΔK zijn de scheurgroeisnelheden in de gelaste konstruktie gelijk aan die in de vlakke plaat, bij lage waarden daarentegen aanzienlijk hoger. Vermoedelijk wordt dit veroorzaakt door residuele laspanningen, wat bevestigd wordt door de metingen aan het spanningsarm gegloeide proefstuk en door de abrupte overgang in de scheurgroeisnelheid in de buurt van $\Delta K=200$ à $250 \text{ kg/mm}^{3/2}$, wat overeenkomt met een scheurlengte van 20 à 30 mm.

Een uitzondering wordt hier gevormd door de metingen bij $R=1/3$, zowel bij Fe510Nb als bij Fe430. Een verklaring voor dit verschijnsel is niet gevonden.

Het verschil in levensduur van de gelaste constructie tussen de beide staalsoorten is nihil (fig.32 en 33). Dit is conform de verwachtingen en de konklusie, die in het EGKS-onderzoek is getrokken. De invloed van de gemiddelde spanning op de scheurgroeisnelheid is in tegenstelling tot laatst genoemd onderzoek, maar zoals verwacht, wel duidelijk aanwezig.

VII.4 Samenvatting

De konklusie, die uit de voorgaande paragrafen van dit hoofdstuk volgt, is dat Fe510Nb geen significant betere vermoeiingseigenschappen bezit dan Fe430, anders dan een hogere weerstand tegen scheurinitiatie. In gelaste constructie valt ook dat laatste weg. Het gebruik van Fe510Nb in gelaste constructies, die aan vermoeiing onderhevig zijn, levert niet de voordelen ten opzichte van Fe430 op, die op grond van statische beschouwingen verwacht worden.

De tegenstrijdigheden in het EGKS-onderzoek zijn slechts gedeeltelijk bevestigd. De invloed van de gemiddelde spanning op de scheurgroeisnelheid is in dit onderzoek wel waargenomen bij de gelaste constructie, hoewel geringer bij lage ΔK -waarden dan bij hoge.

VIII. AANBEVELINGEN

De aanbevelingen voor verder onderzoek op het in dit verslag beschreven gebied vallen in twee delen uiteen.

In de eerste plaats is een onderzoek naar de residuele lasspanningen in de konstruktie aanbevelenswaardig. Het grote verschil in scheurgroei-snelheid bij kleine scheurlengtes ten opzichte van het centraal gescheurde proefstuk kan bij bevestiging van de uitgesproken vermoedens worden verklaard. Ook de invloed van de veranderde materiaaleigenschappen in de warmte beïnvloede zone op de scheurgroei-snelheid en scheurinitiatie-periode kan ondanks het feit dat de scheur zich slechts korte tijd in dit gebied bevindt, van belang zijn.

In de tweede plaats is een controle van de eindige elementen berekeningen te noemen. Voor wat betreft de centraal gescheurde plaat kan een literatuuronderzoek en eventueel berekeningen met verschillende elementafmetingen en -type ondernomen worden. In het bijzonder moet aandacht besteed worden aan de behaalde nauwkeurigheid als functie van het element type. In vele onderzoeken op dit gebied wordt de invloed van de elementgrootte beschouwd (o.a. H.Führung [7]), er wordt echter slechts zelden van drie-dimensionale elementen gebruik gemaakt.

IX. LITERATUUR

- [1] Gurney, T.R., fatigue of welded structures, Cambridge University Press, Cambridge (1968)
- [2] Nibbering, J.J.W., Scholte, H.G. and van Lint, J., Synthesis of cooperative fatigue investigations with notched plates and welded ship structures of St42 and St52. Report N.S.S. TNO No.206S, Delft, December 1974
- [3] Paris, P., Tada, H. and Irwin, G., The Stress Analysis of Cracks Handbook, Del Research Corporation, 1973
- [4] Broek, D., Elementary engineering fracture mechanics, Noordhoff International Publishing, Leyden (1974)
- [5] Zienkiwicz, O.C., The finite element method in engineering science, McGraw-Hill (1971)
- [6] MARC-manual, volume A, B, C, D and E, Marc Analysis Research Corporation, Palo Alto (Cal.)
- [7] Führung, H., Finit-Element Lösungen von Kerb- und Rissproblemen mit Hilfe automatischer Netzerzeugung, Institut für Statik und Stahlbau der Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt (1974)
- [8] Euronorm 25-72, Eurpese Gemeenschap voor Kolen en Staal, nov. 1972
- [9] Broek, D. and Schijve, J., The Influence of the mean stress on the propagation of fatigue cracks in aluminium alloy sheet, NLR-TR M.2111, Amsterdam, january 1963
- [10] Gurney, T.R., The effect of mean stress and material yield stress on fatigue crack propagation in steels, Metal Construction and British Welding Journal, february 1969

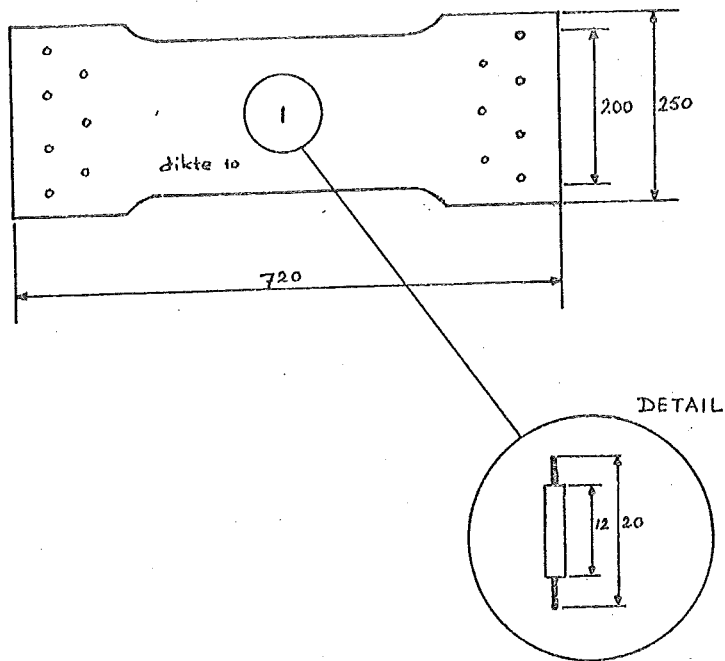


Fig. 12. Centraal gekorfd vlakke plaat.

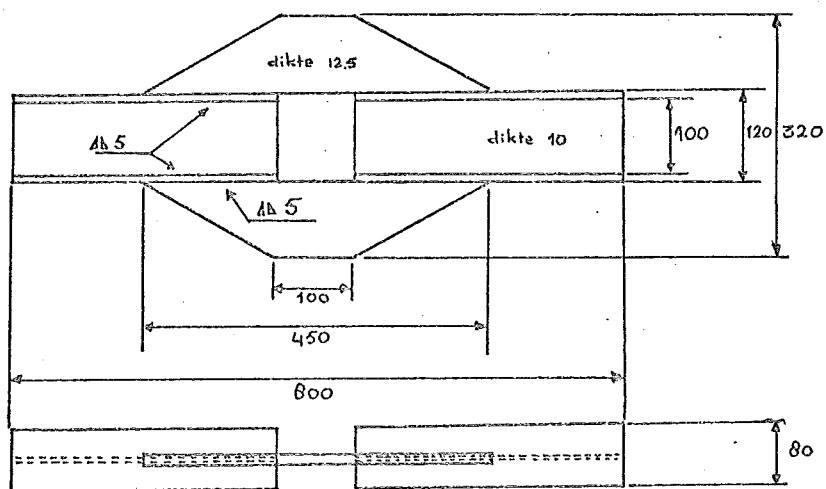


Fig. 13. Gelast proefstuk

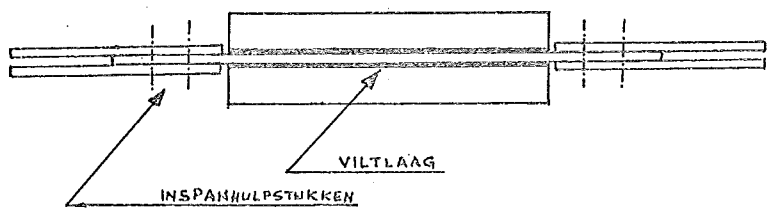
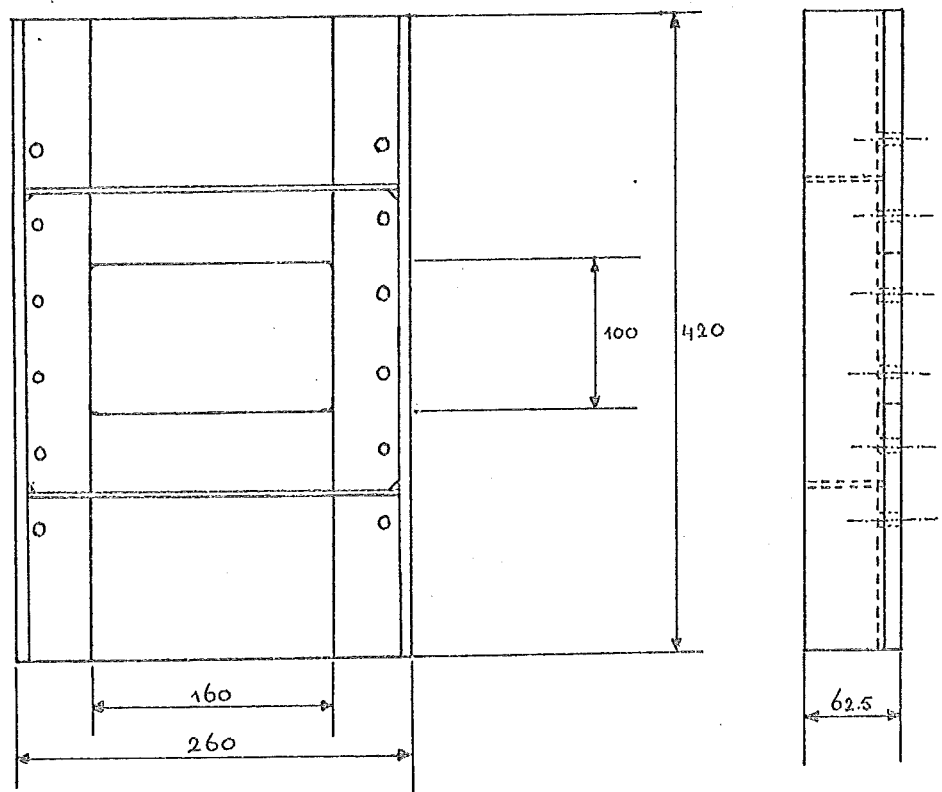


Fig. 14. Het "anti-buckling device".

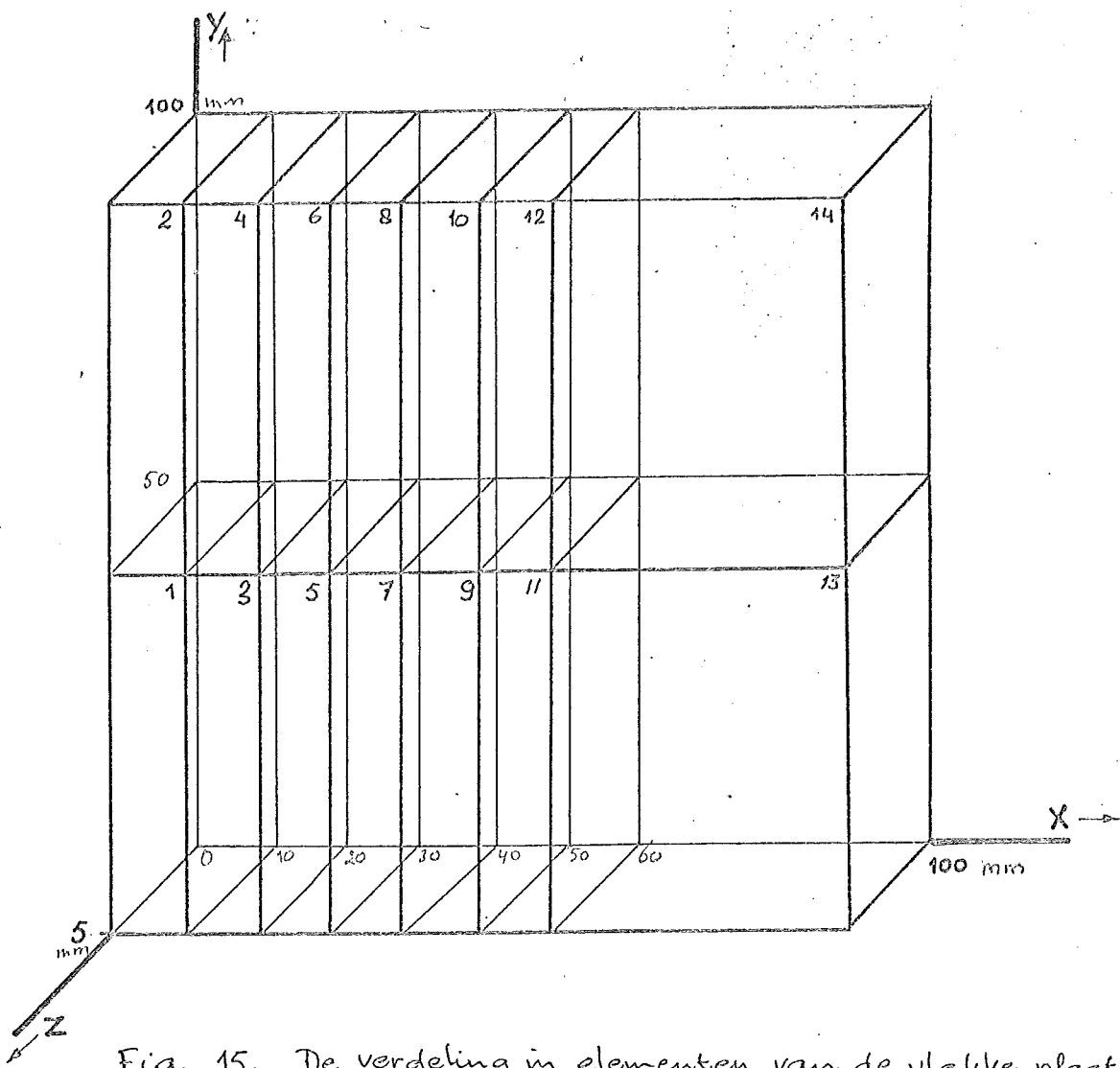


Fig. 15. De verdeling in elementen van de vlakke plaat

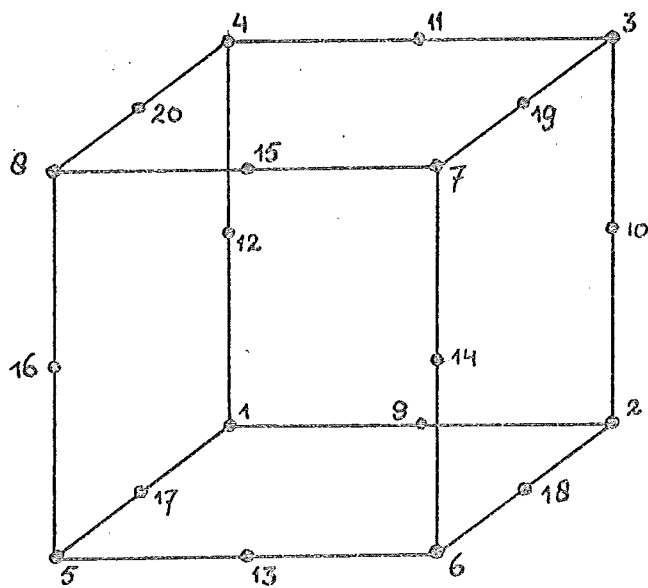


Fig. 16. Een element met 20 knooppunten.

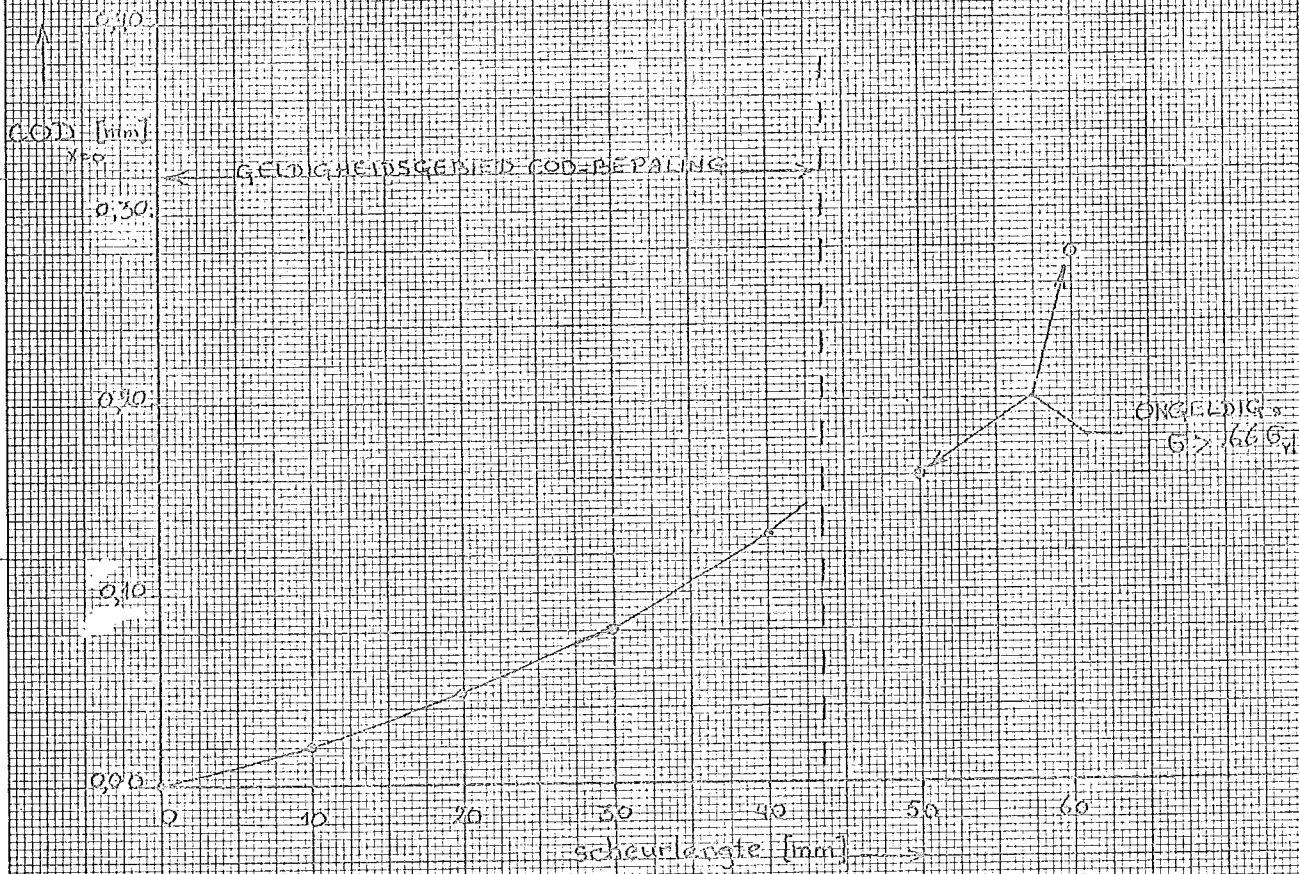


Fig. 17 Scheuropening als functie van de scheurlengte in de centraal gescheurde plaats FEM-berekening

GLEICHHEITSGESIEB-GOD-BEPANUNG

IDEALE VERBANDLUSSEN K_{VERB} K_{GOD} EN K_{ED}

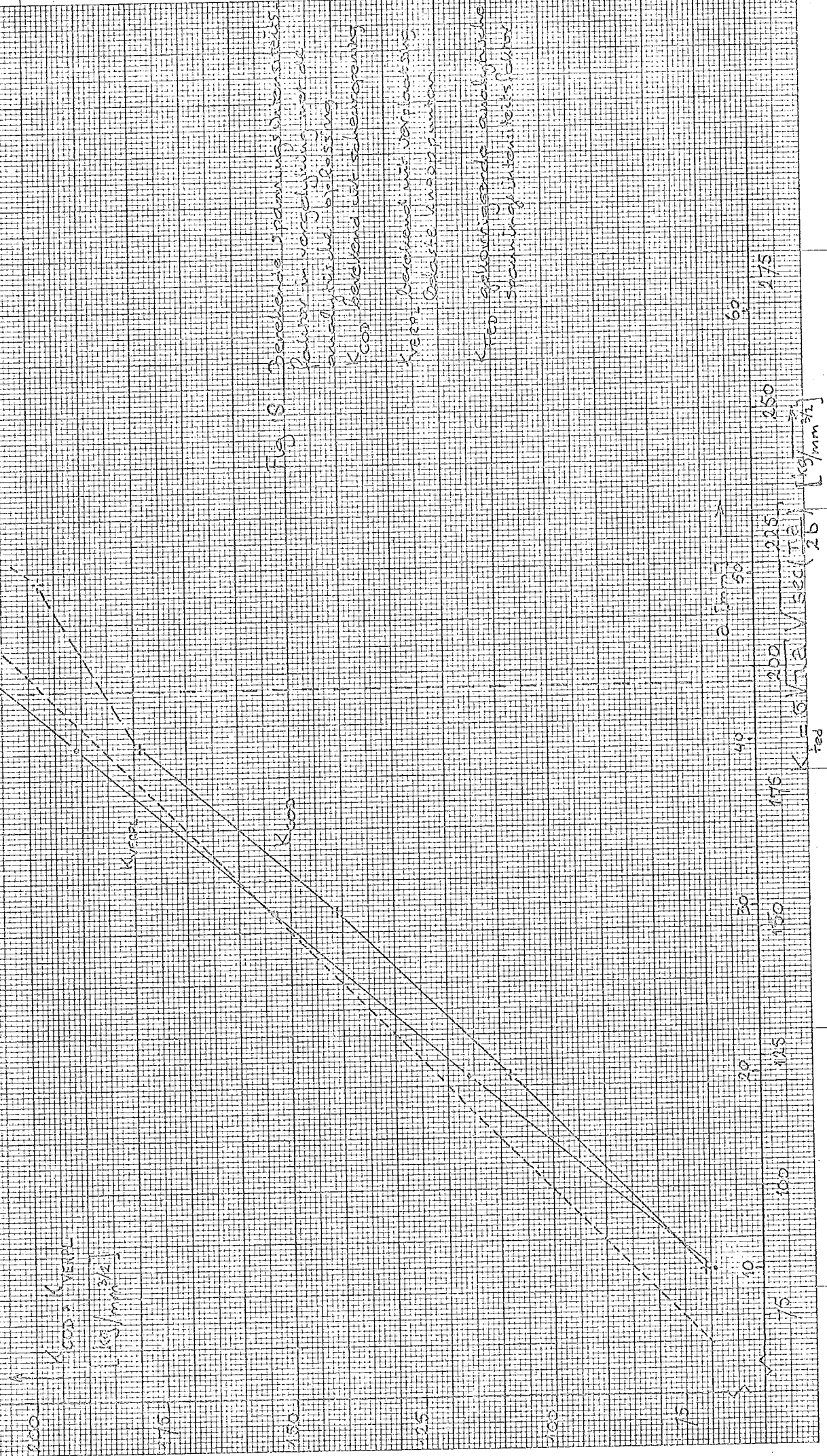


Fig. 8 Berekenne spanningsgrenzen
 2. manier om vaststelling van de
 nauwkeurigste bepaling
 K_{GOD} berekend uit scherpe grens
 K_{VERB} berekend uit verplaatste
 laatste kassopspanning
 K_{ED} gekorreerde analytische
 spanning-intensiteitsfactor

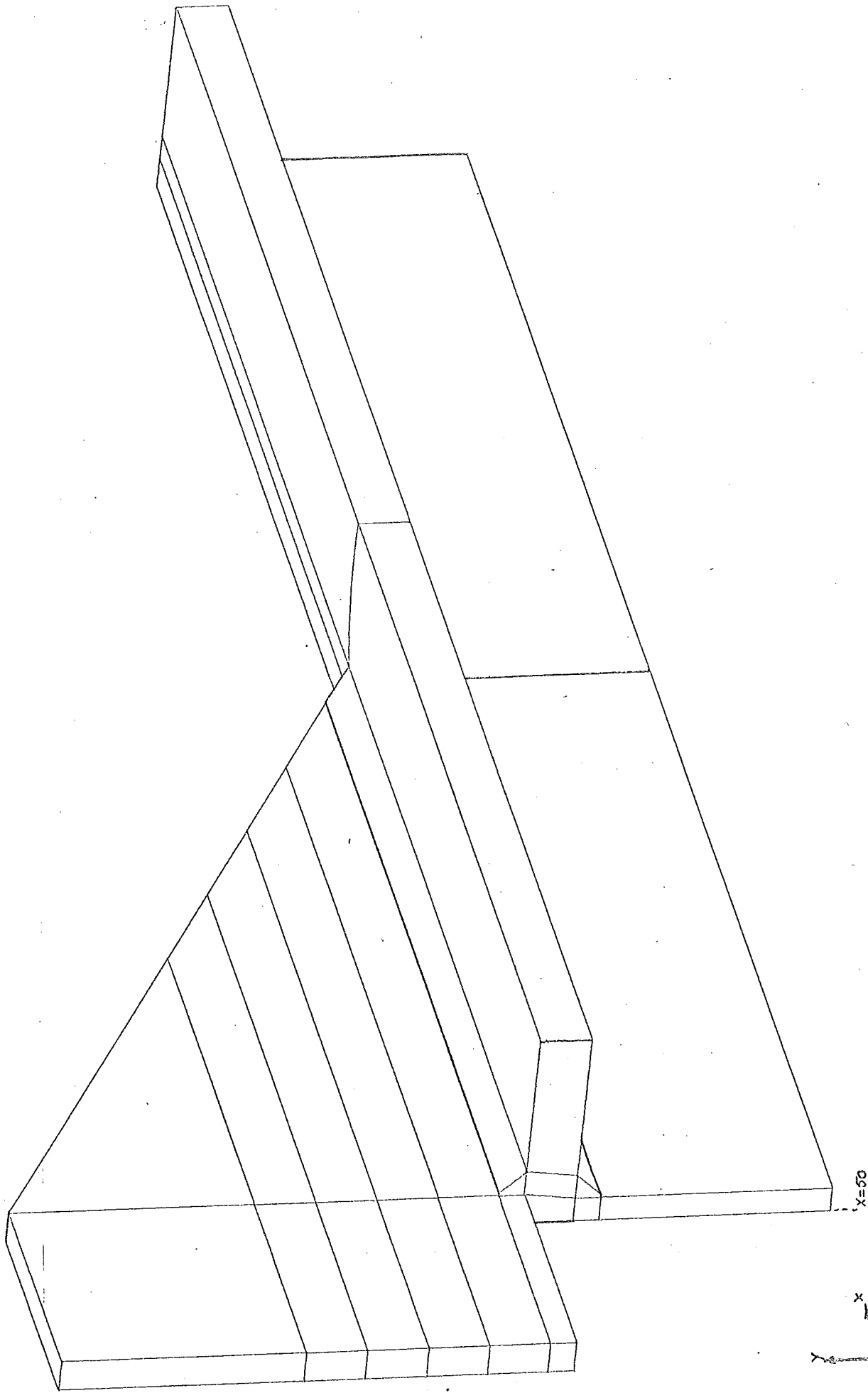


Fig. 19. De verdeling in elementen van het gelaste proefstuk.



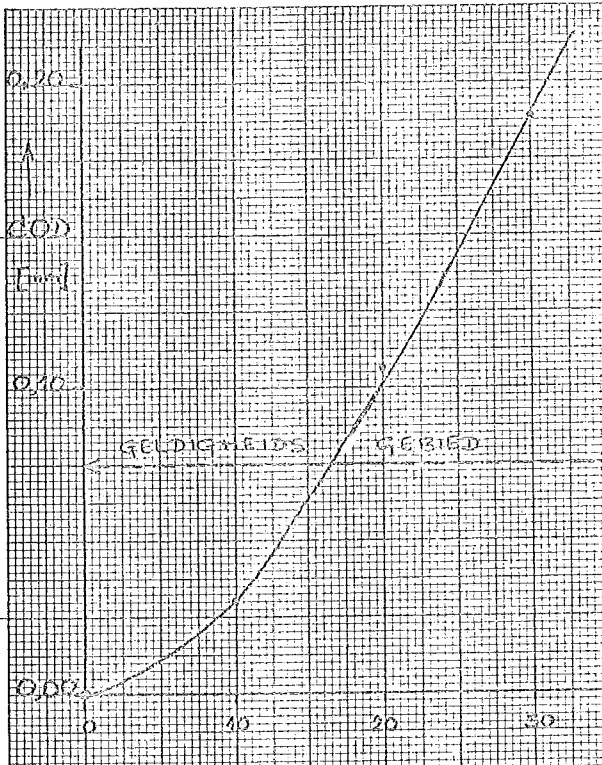


Fig. 20 Scheurverplaatsing als functie van de scheurlengte in het geëtte proefstuk
FEM-beredkening

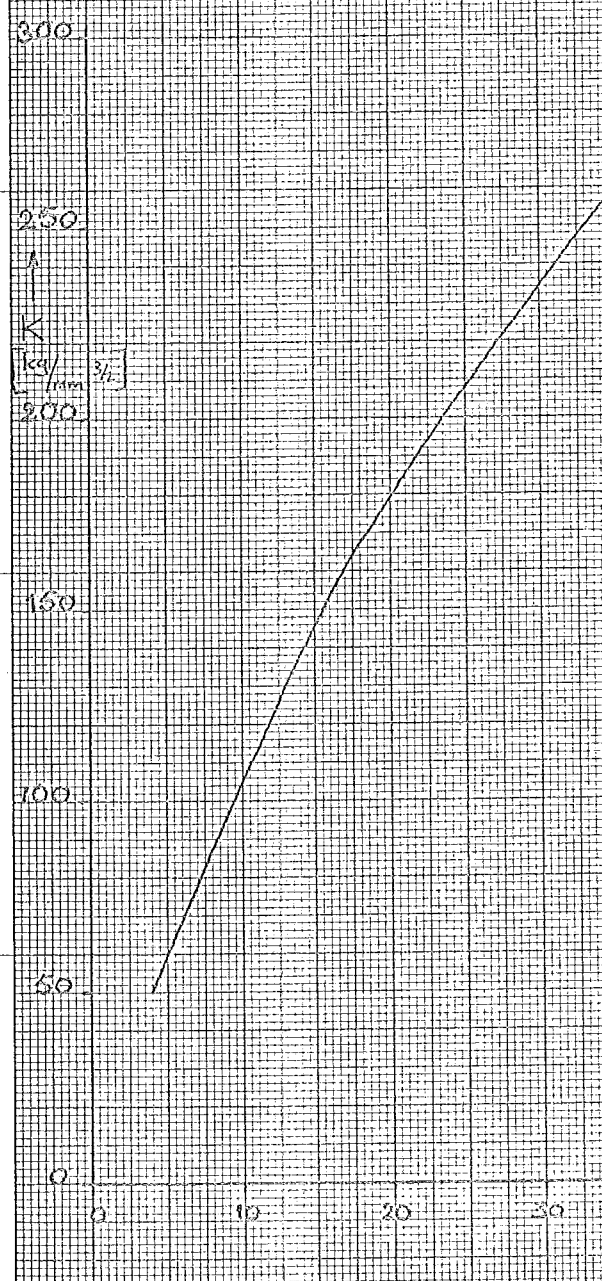
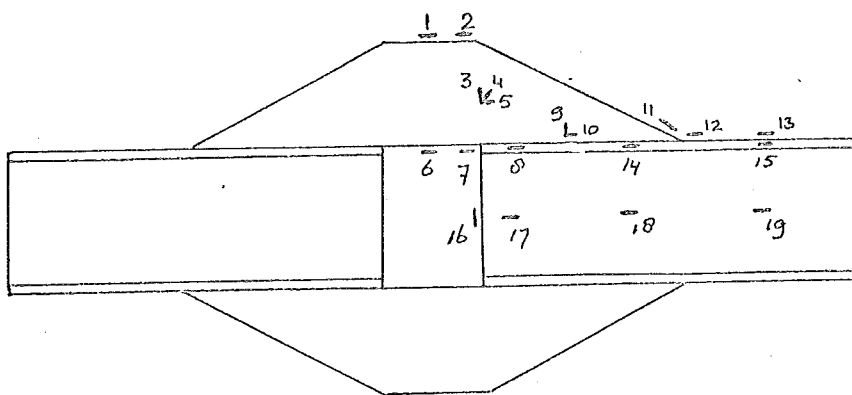


Fig. 21 Spanningsintensiteitsfactor als functie van de scheurlengte in het geëtte proefstuk
FEM-beredkening



| | Rekstrook | FEM |
|----|-----------|-------|
| 1 | - 5,0 | - 4,2 |
| 2 | - 2,8 | - 1,6 |
| 3 | - 6,0 | - 2,0 |
| 4 | 6,0 | 3,6 |
| 5 | 23,0 | 25,7 |
| 6 | 63,0 | 71,0 |
| 7 | 85,0 | 96,4 |
| 8 | 10,0 | 7,3 |
| 9 | - 5,0 | -10,6 |
| 10 | 18,3 | 24,0 |
| 11 | -11,9 | -13,9 |
| 12 | 42,0 | 28,7 |
| 13 | 23,0 | 26,2 |
| 14 | 18,9 | 24,2 |
| 15 | 25,7 | 25,8 |
| 16 | -35,0 | -26,8 |
| 17 | 4,8 | - 1,1 |
| 18 | 11,0 | 17,4 |
| 19 | 25,0 | 25,8 |

Fig.22. Vergelijking van rekstrookmetingen uit Nibbering [2].
met de FEM-resultaten.

Spanning per 10 ton kracht in kg/mm^2

Fig. 13 Schwingungsdiskrommen
 carbolo-scheu
 Fe-SiO-Ni

- 1 $R=0$
- 2 $R=1/8$
- 3 $R=1/4$
- 4 $R=0$
- 5 $R=0$
- 6 $R=1/8$
- 7 $R=1/4$

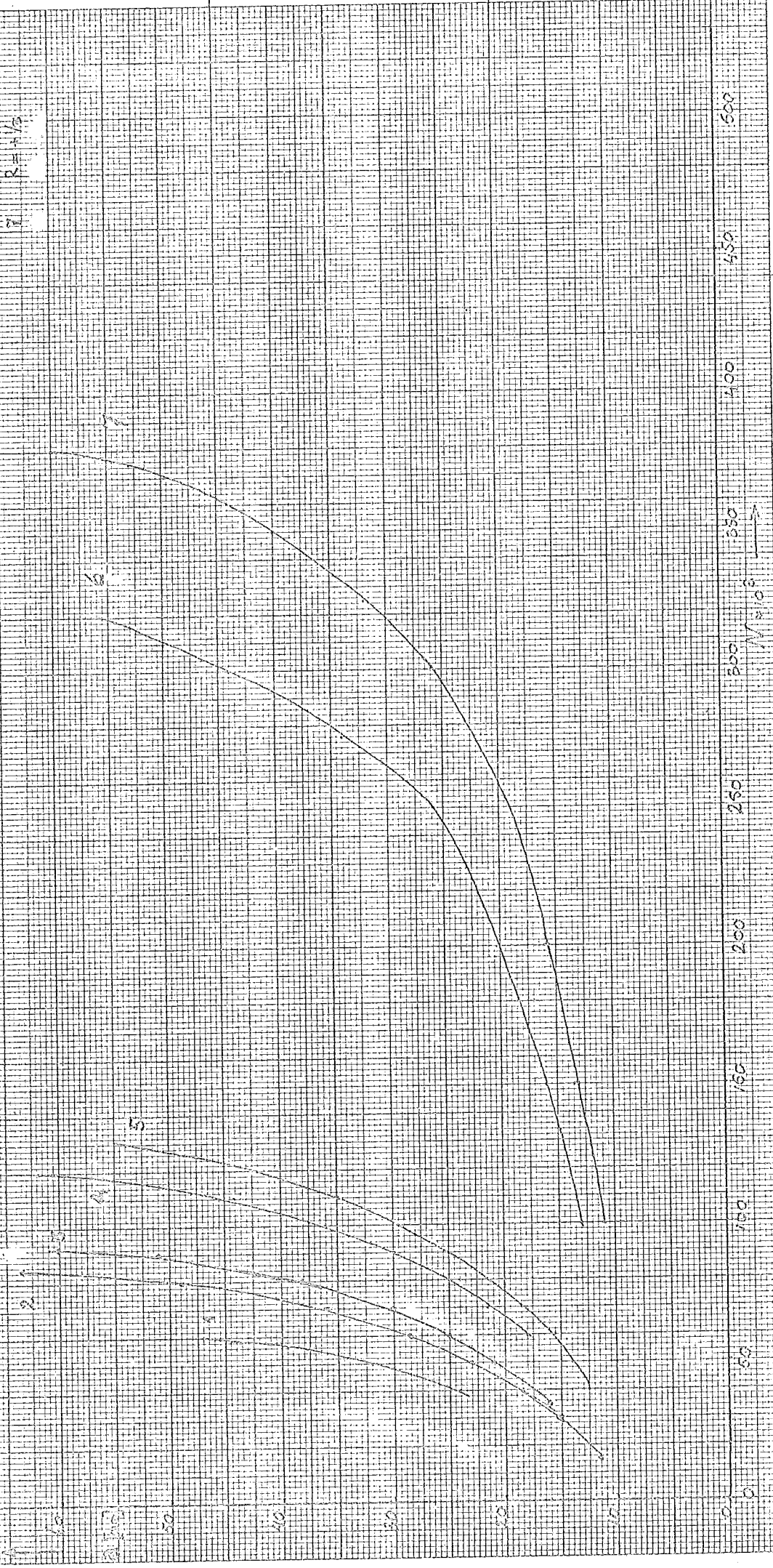
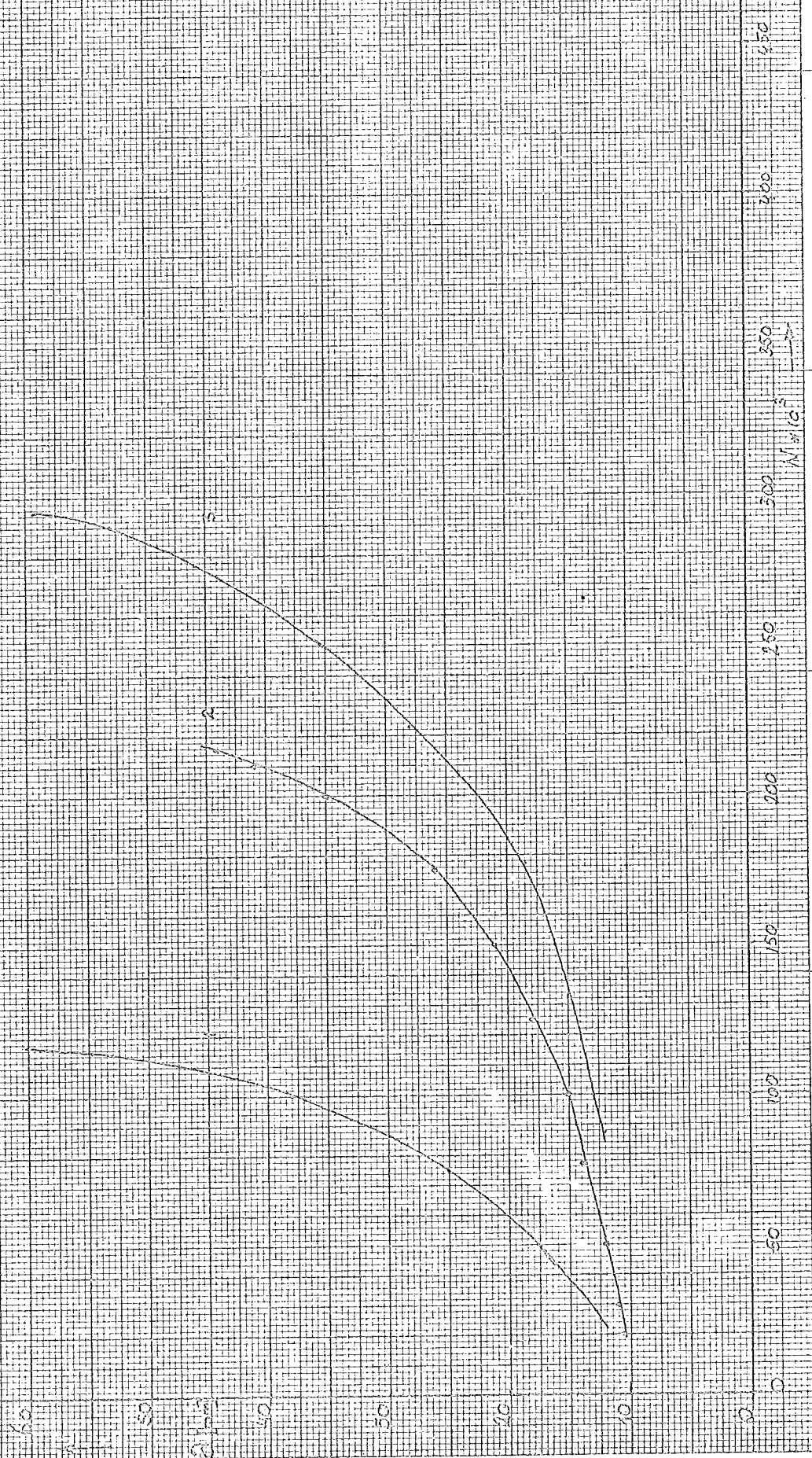
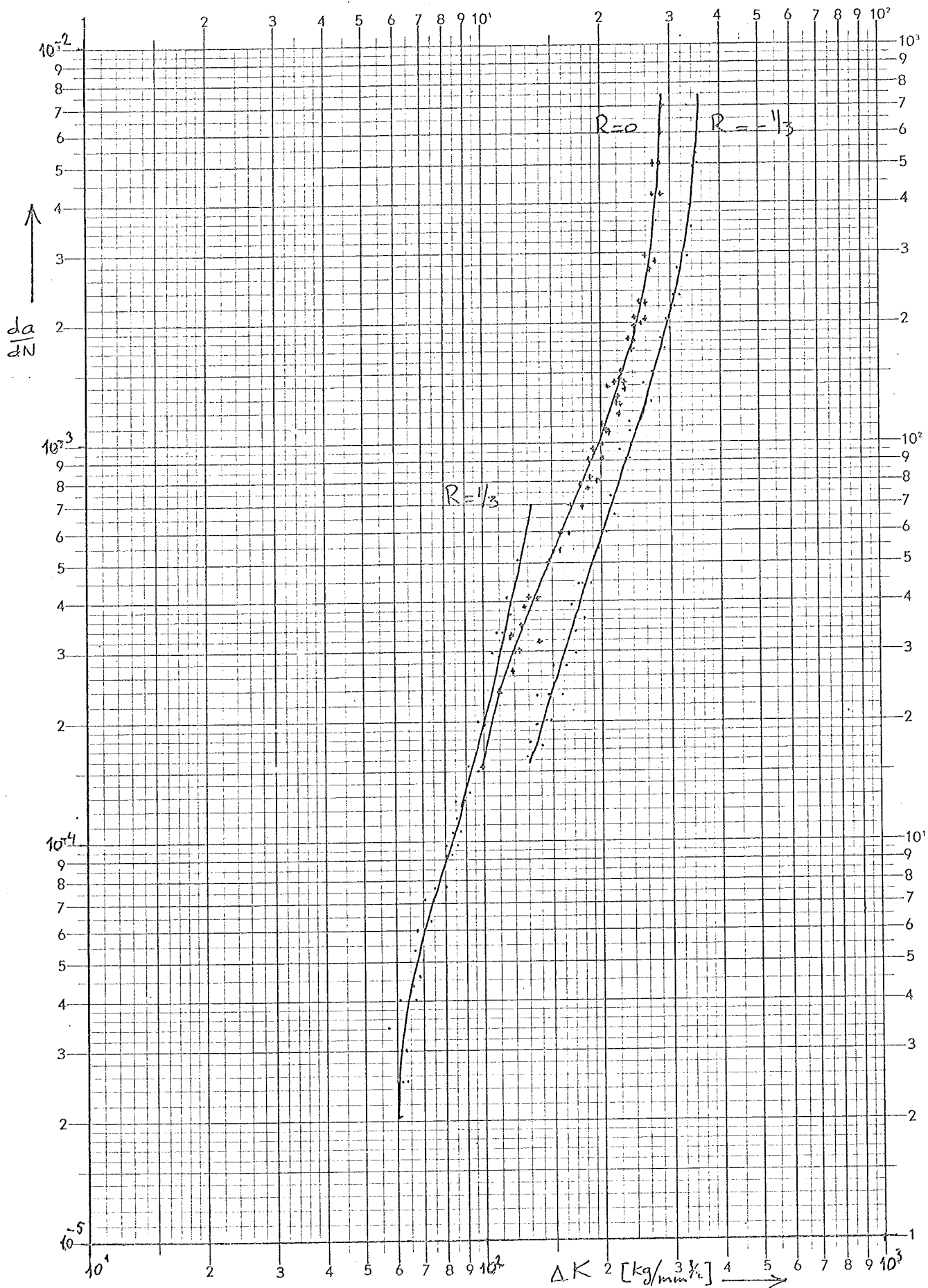


Fig. 2. Schwingungskrommen
 central geschweide pleat
 F₂ 130

- 1 $R = -1/5$
- 2 $R = 0$
- 3 $R = +1/5$

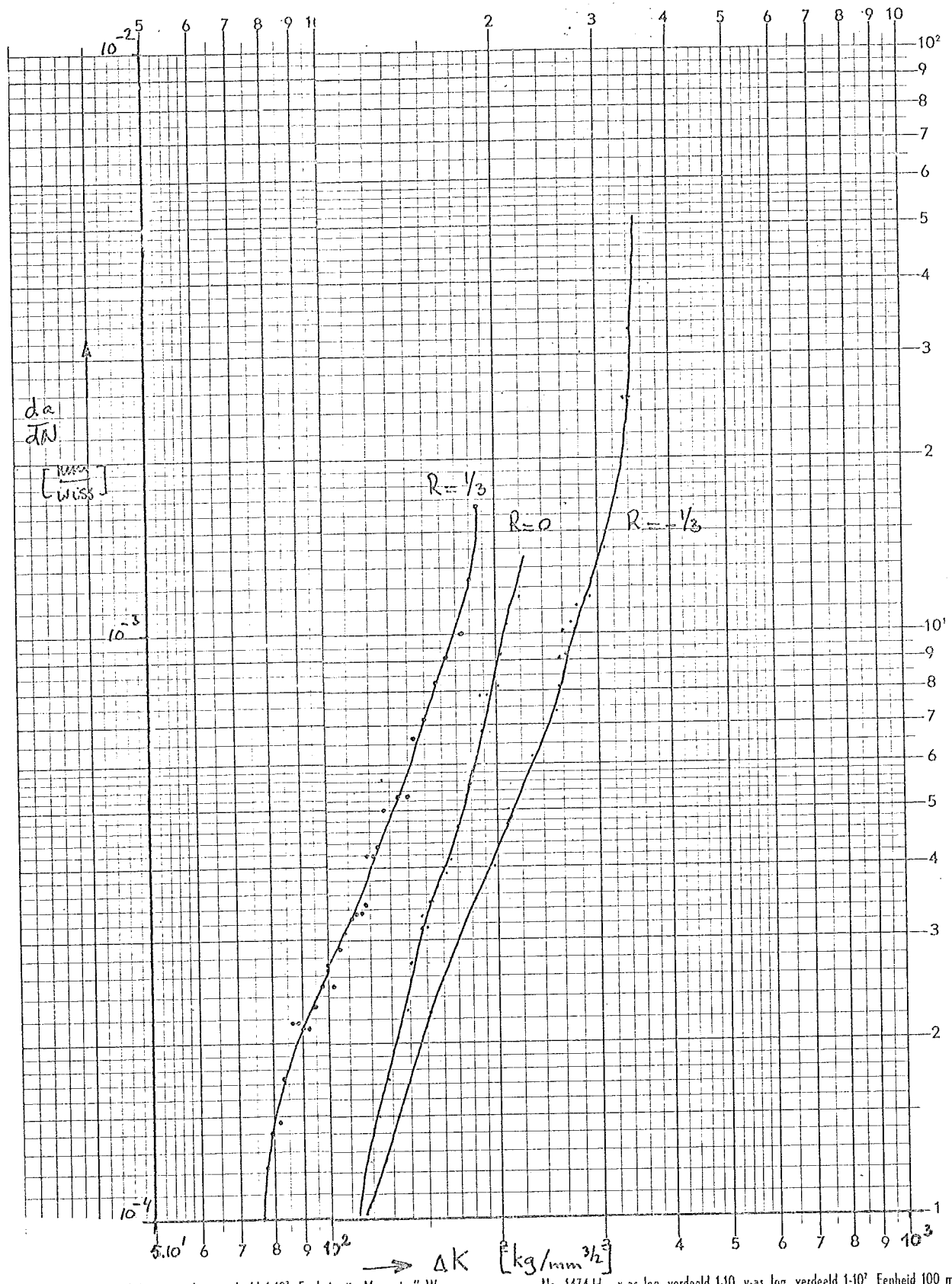




meetpapier - wormerveer

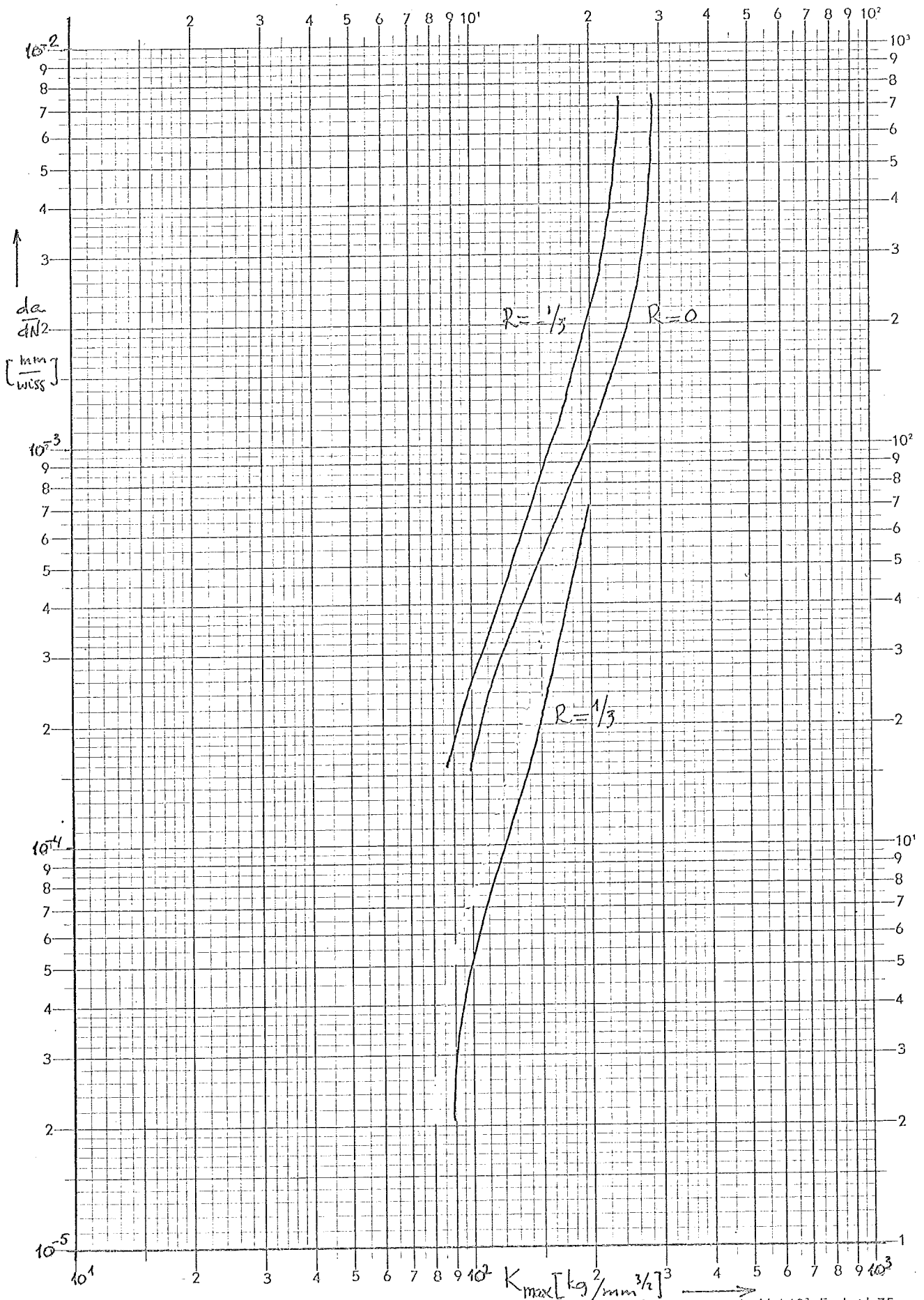
No. 1472 H x-as log. verdeeld $1 \cdot 10^2$ y-as log. verdeeld $1 \cdot 10^3$ Eenheid 75 mm

Fig. 25. De scheurgroeisnelheid in Fe 510Nb als functie van ΔK bij de centraal gescheurde plaat.



x-as log. verdeeld 1-10 y-as log. verdeeld 1-10² Eenheiterij „Mercurius“ Wormerveer No. 1474 H x-as log. verdeeld 1-10 y-as log. verdeeld 1-10² Eenheid 100 mm

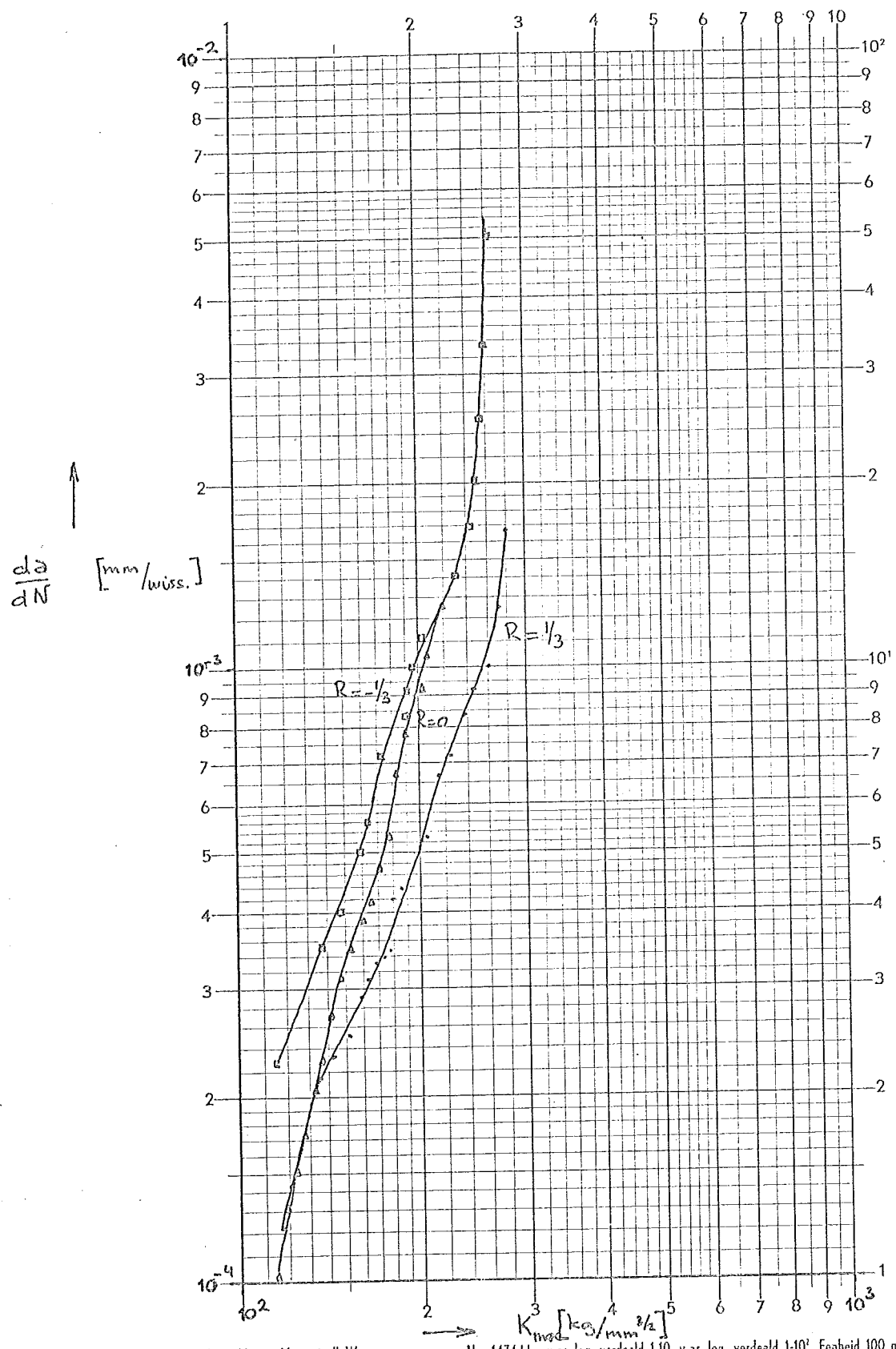
Fig. 26. De scheurgroeisnelheid in Fe 430 als functie van ΔK centraal gescheurde plaat.



meetpapier - wormerveer

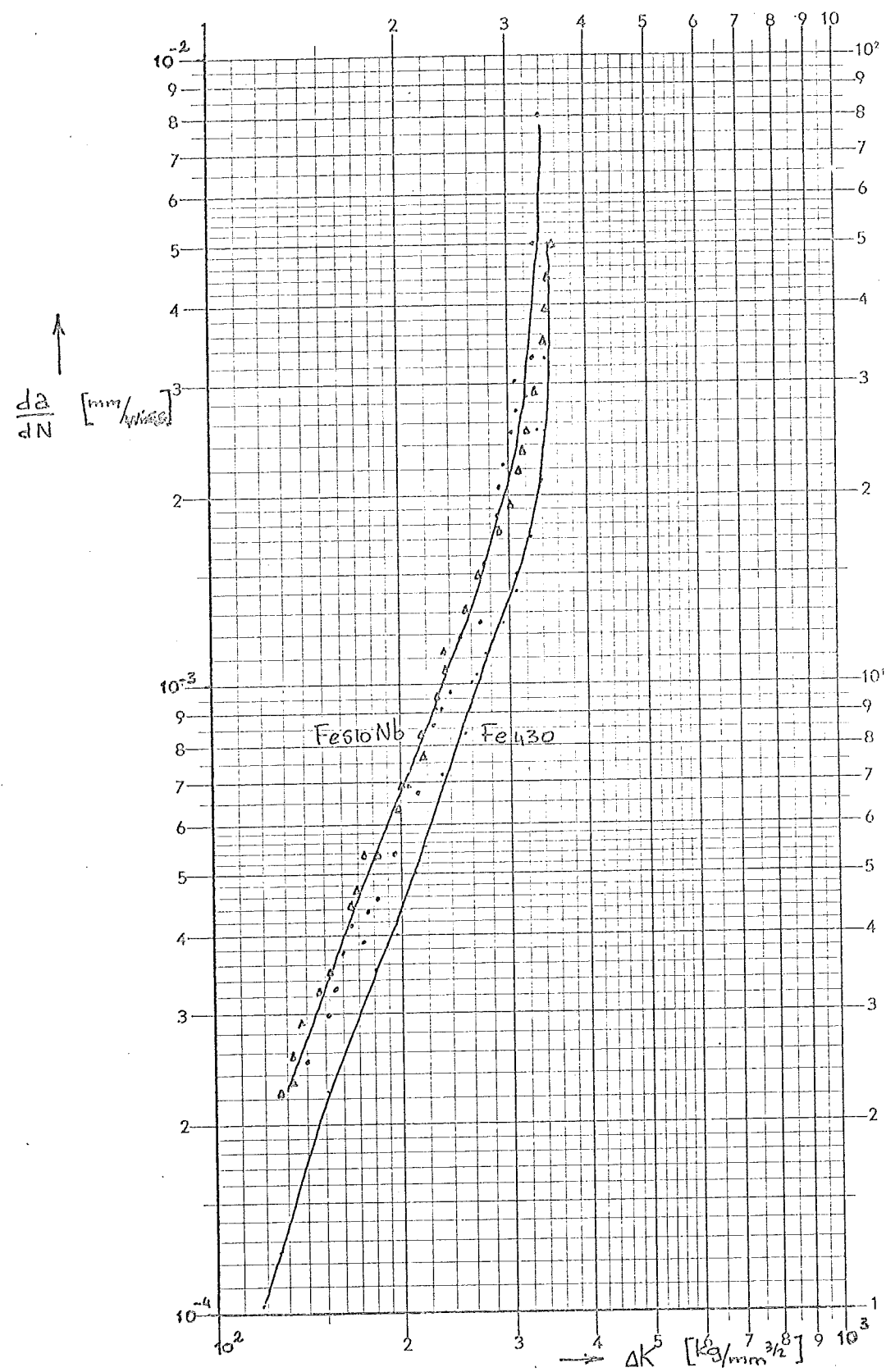
No. 1472 H x-as log. verdeeld $1 \cdot 10^2$ y-as log. verdeeld $1 \cdot 10^3$ Eenheid 75 mm

Fig. 27. De scheurgroei snelheid van F0510Nb als functie van K_{\max} in de centraal gescheurde plaats.



N.V. Drukkerij „Mercurius“ Wormerveer No. 1474 H x-as log. verdeeld 1-10 y-as log. verdeeld 1-10⁴ Eenheid 100 mm

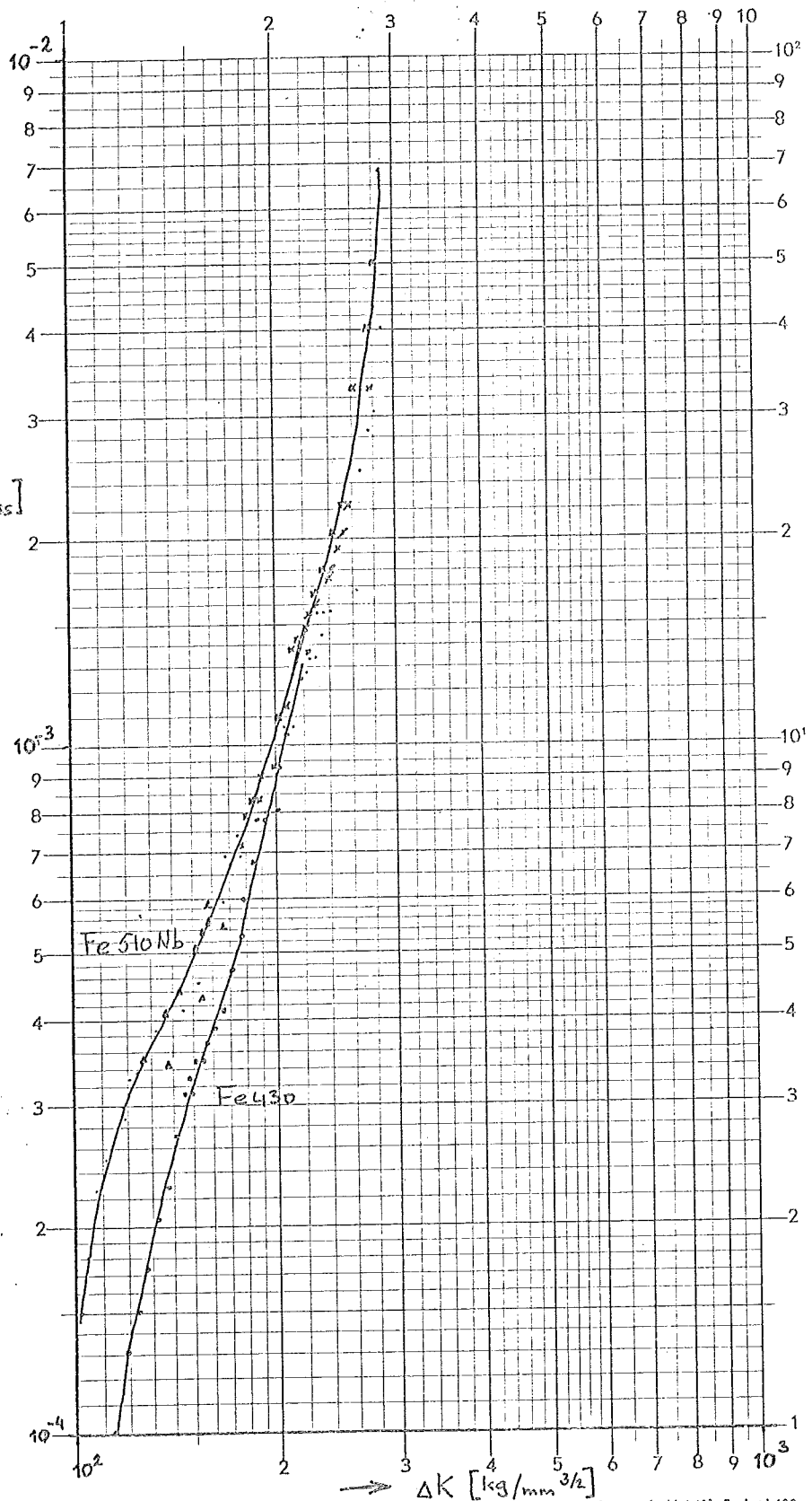
Fig. 28 De scheurgroei snelheid van Fe430 als functie van K_{max} in de centraal gescheurde plaat



N.V. Drukkerij „Mercurius“ Wormerveer No. 1474 H x-as log. verdeeld 1:10 y-as log. verdeeld 1:10² Eenheid 100 mm

Fig. 29. Vergelijking van de scheurgroeisnelheid tussen Fe510Nb en Fe430 bij $R = -1/3$ in de centraal gescheurde plaat

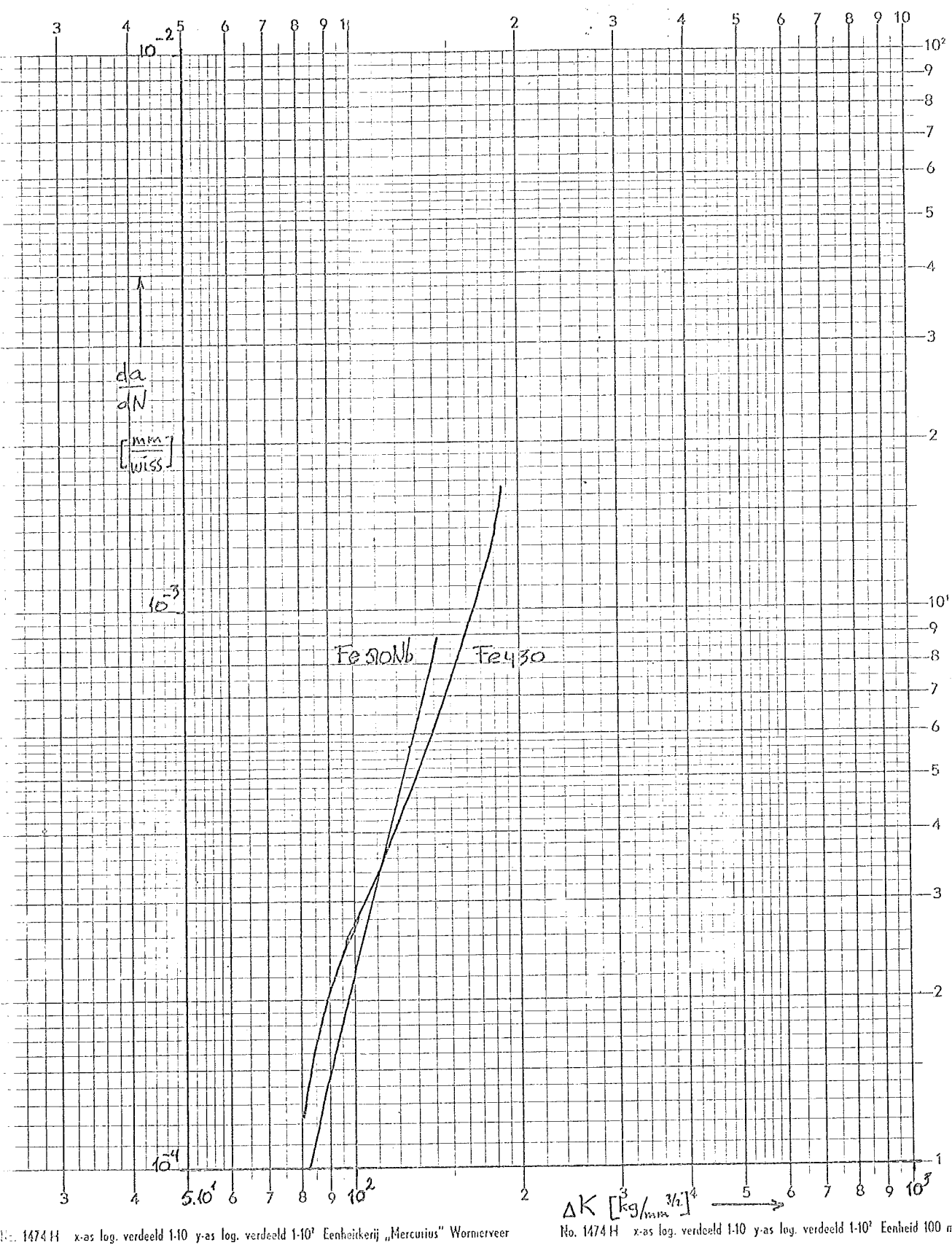
$\frac{da}{dN}$ [mm/wiss]



N.V. Drukkerij „Mercurius“ Wormerveer

No. 1474 H ΔK [$\text{kg/mm}^{3/2}$] x-as log. verdeeld 1-10 y-as log. verdeeld 1-10³ Eenheid 100 mm

Fig. 30. Vergelijking van de scheurgroei-snelheid tussen Fe 510 Nb en Fe 430 bij $R=0$ in de centraal gescheurde plaat.



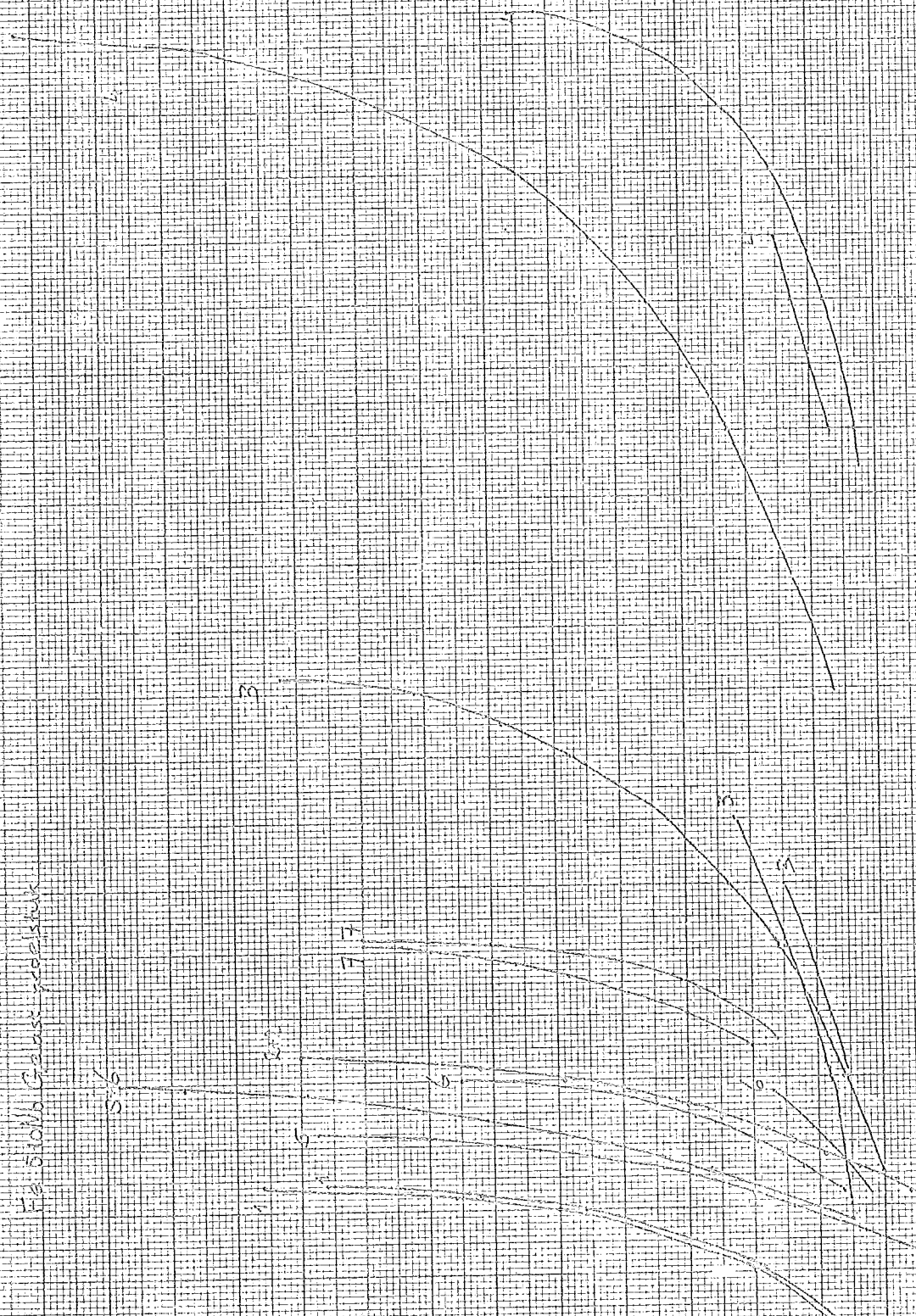
No. 1474 H x-as log. verdeeld 1-10 y-as log. verdeeld 1-10³ Eenheikenrij „Mercurius“ Wormerveer

No. 1474 H x-as log. verdeeld 1-10 y-as log. verdeeld 1-10³ Eenheid 100 mm

Fig. 31. Vergelijking van de scheurgroei-snelheid in Fe50Nb en Fe430 bij $R = 1/3$ in de centraal gescheurde plaat

1) $R=0$
 2) $R=0$
 3) $R=1/3$
 4) $R=1/3$
 5) $R=1/3$
 6) $R=1/3$
 7) $R=0$
 8) $R=0$

50 50
 100 100
 150 150
 200 200
 250 250
 300 300
 350 350
 400 400
 450 450
 500 500
 550 550
 600 600
 650 650
 700 700
 750 750
 800 800
 850 850
 900 900
 950 950
 1000 1000

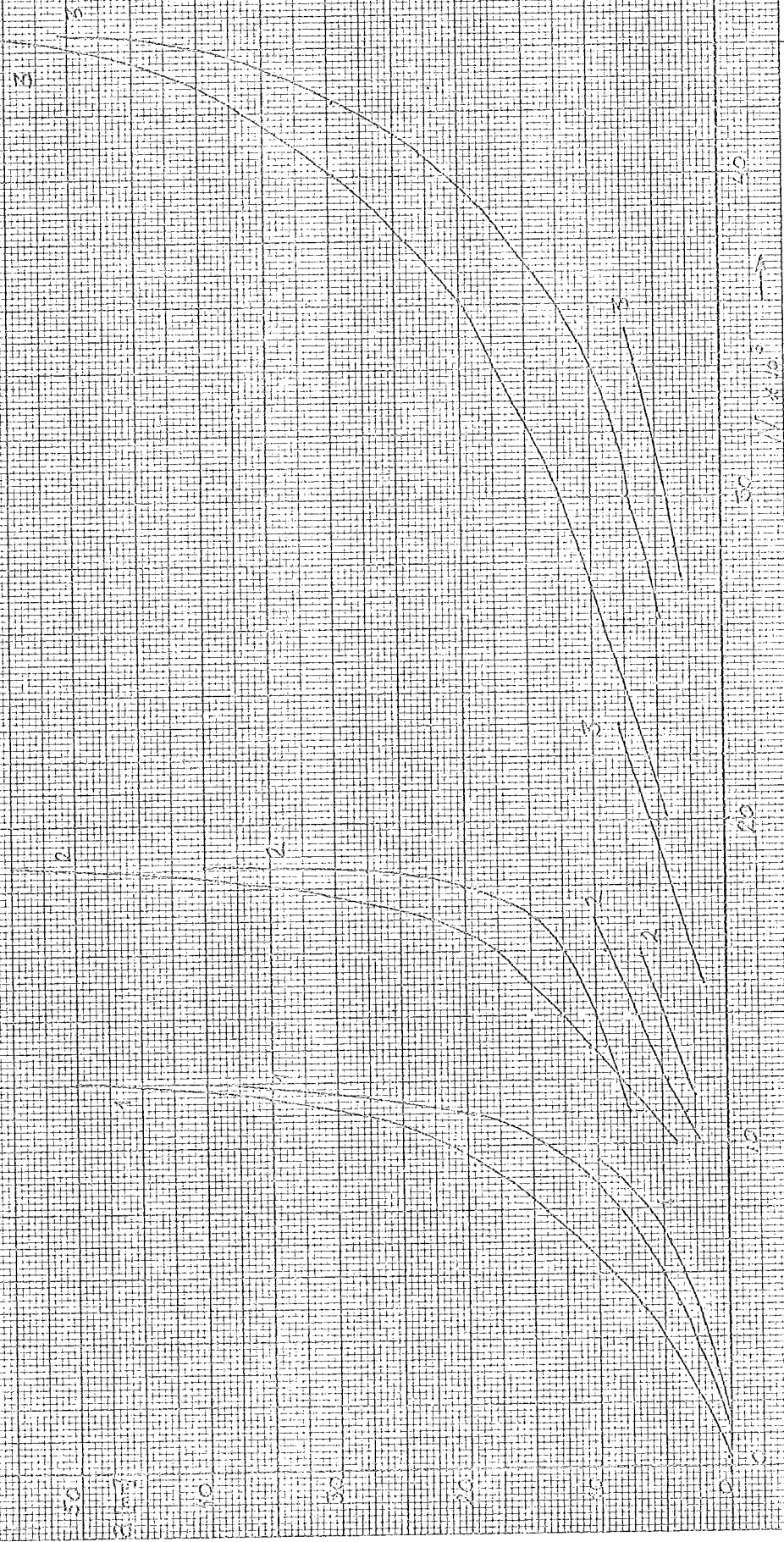


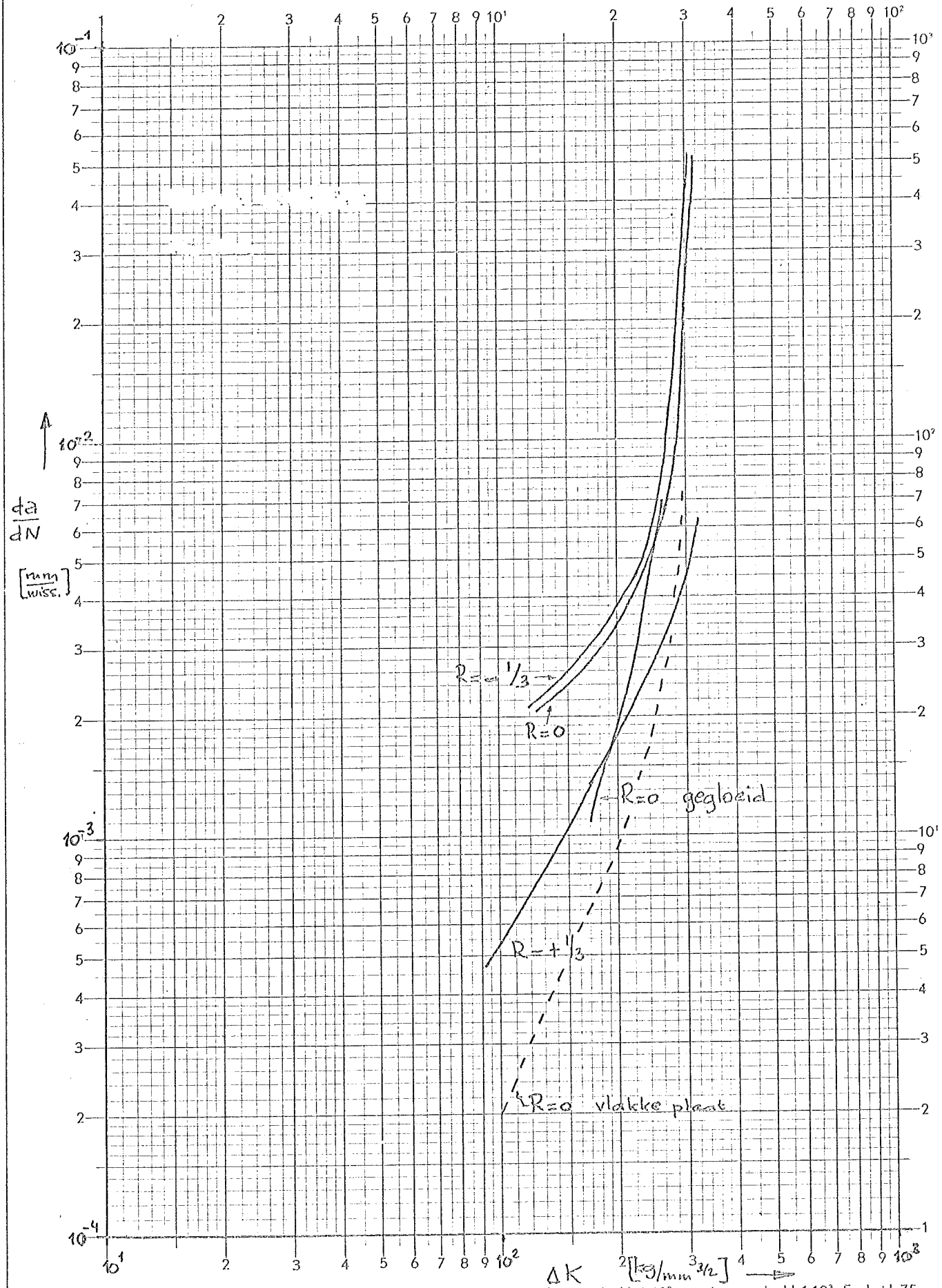
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120
 0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000
 11.11.13

Fig. 33. Sicherungseffektivitäten

Teil 50 - Gleitsproben

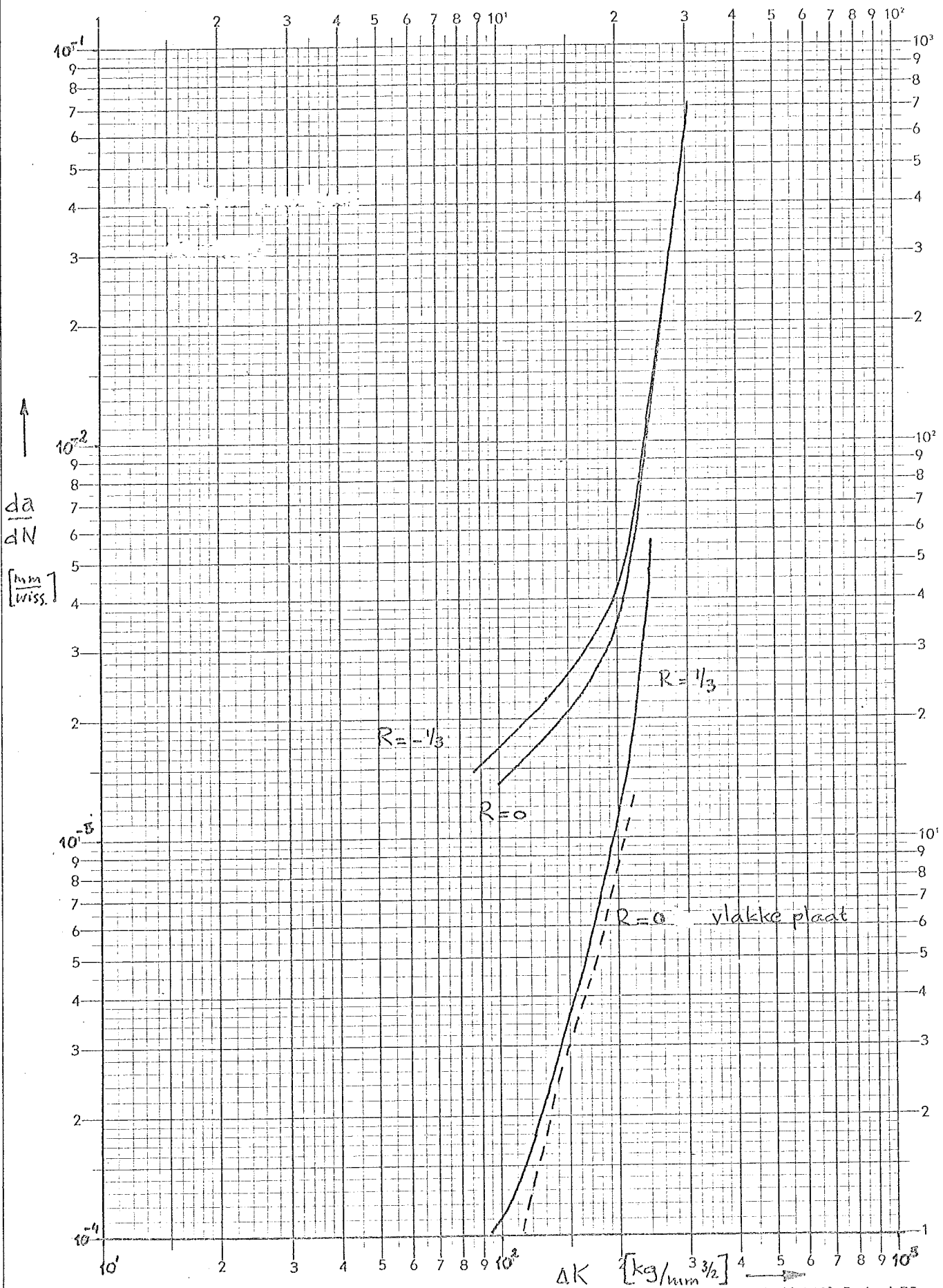
- 1 $R = 1/3$
- 2 $R = 0$
- 3 $R = 1/3$





meetpapier - wormerveer No. 1472 H x-as log. verdeeld 1-10³ y-as log. verdeeld 1-10⁴ Eenheid 75 mm

Fig. 34. De scheurgroei snelheid van Fe 510 Nb als functie van ΔK in het gelaste proefstuk.

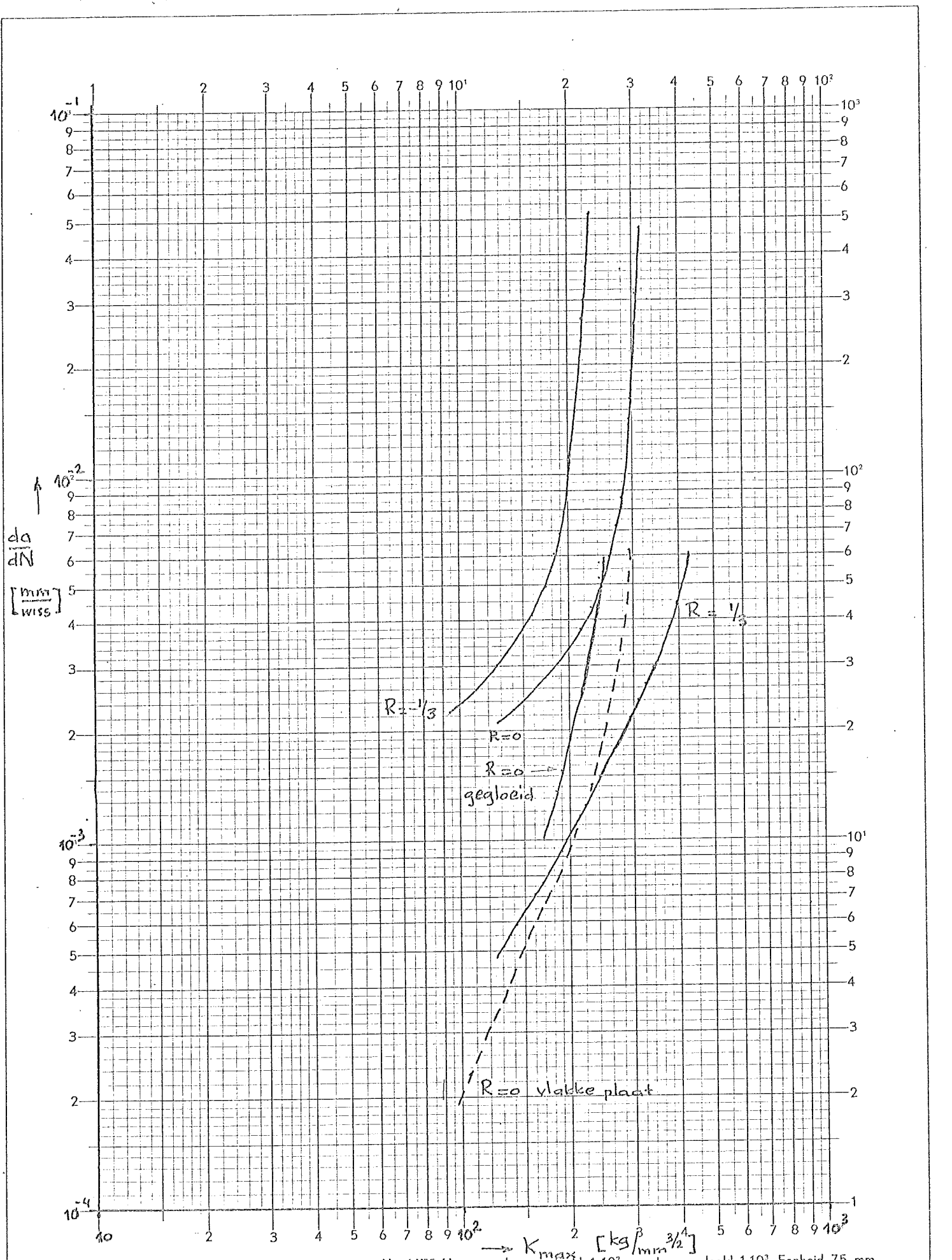


meetpapier - wormerveer

No. 1472 H

x-as log. verdeeld $1 \cdot 10^2$ y-as log. verdeeld $1 \cdot 10^3$ Eenheid 75 mm

Fig. 35. De scheurgroei'snelheid van Fe 430 als functie van ΔK in het gelaste proefstuk



meetpapier - wormerveer

No. 1472 H

$\rightarrow K_{max}$ $[kg/mm^{3/2}]$
 x-as log. verdeeld $1 \cdot 10^2$ y-as log. verdeeld $1 \cdot 10^3$ Eenheid 75 mm

Fig. 36. De scheurgroeisnelheid van Fe 510 Nb als functie van K_{max} in het gelaste proefstuk

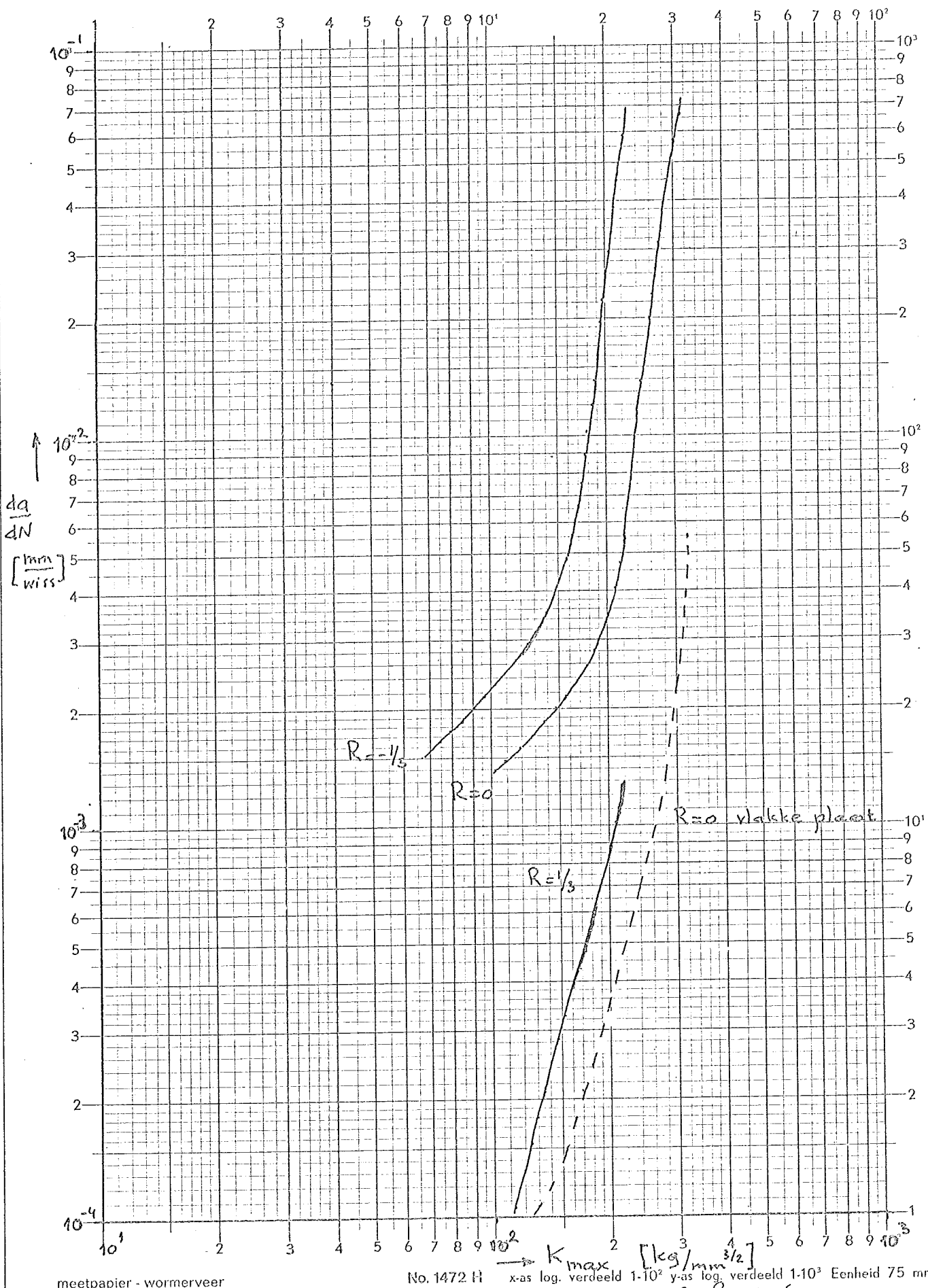
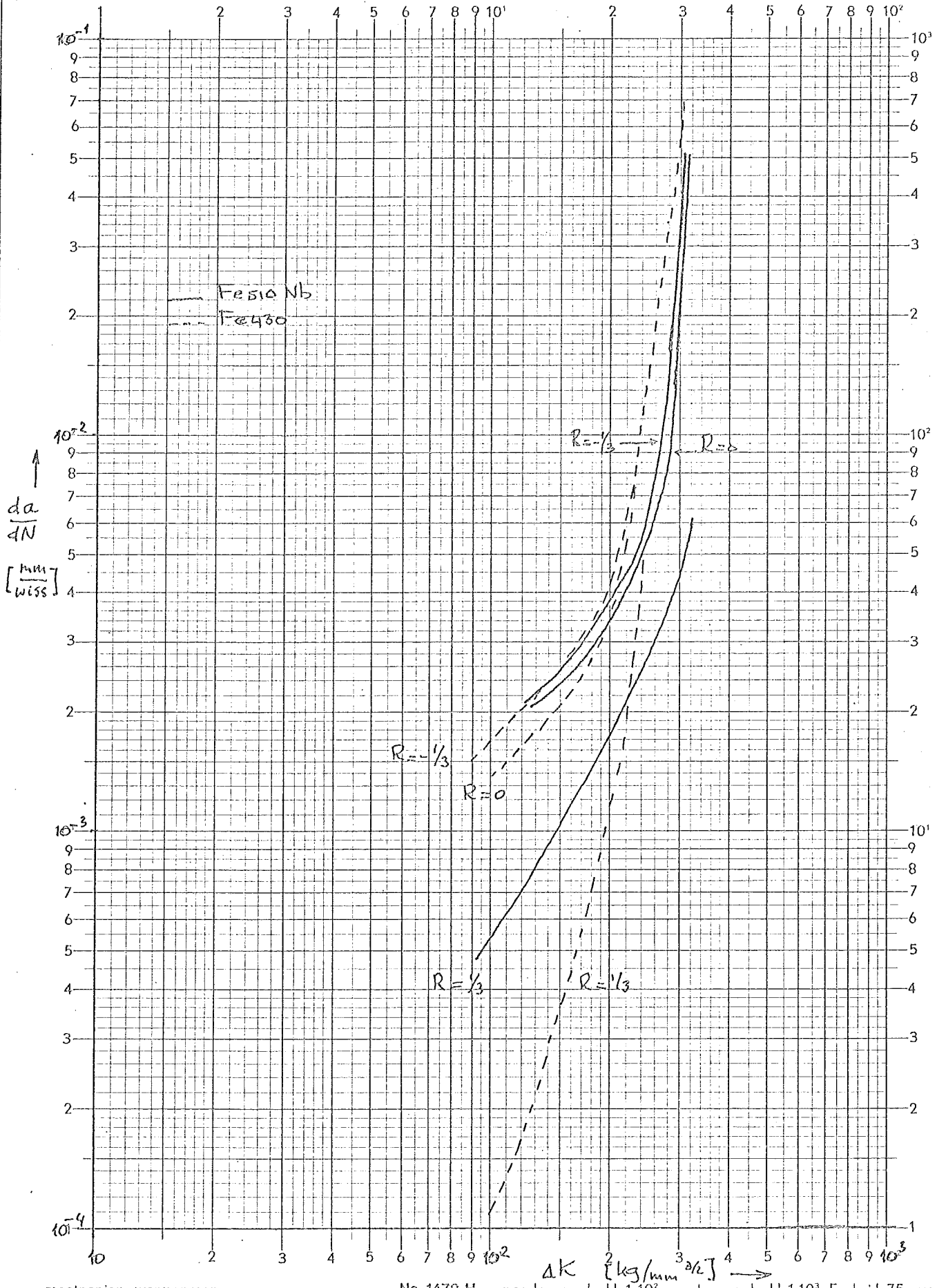


Fig. 37. De scheurgroeisnelheid van Fe430 als functie van K_{max} in het gelaste proefstuk



meelpapier - wormerveer

No. 1472 H x-as log. verdeeld 1-10² y-as log. verdeeld 1-10³ Eenheid 75 mm

Fig. 38. De vergelyking van de scheurgroeisnelheid in FeSi0Nb en Fe 430 in het gelaste proefstuk.

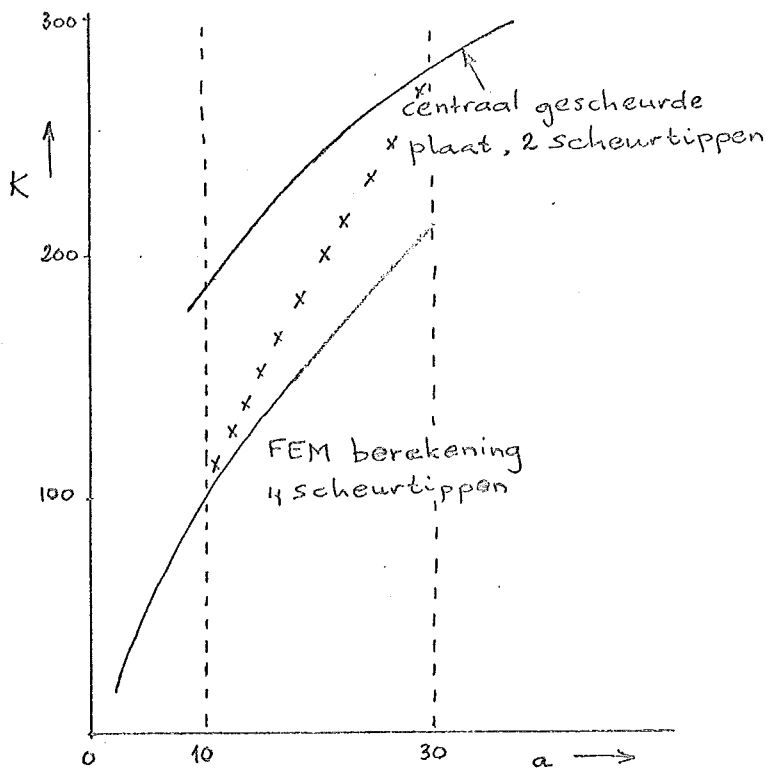


Fig. 39. Bij de beschouwing van K van de gelaste constructie en de instabiliteit van de scheurvorming.

TABEL I
 Uitgevoerde scheurgroeimetingen

| Nummer | Proefstuk | Staalsoort | Spanningsratio |
|--------|---|---------------------|----------------|
| 1 | Centraal gescheurde vlakke plaat | Fe510Nb | 0 |
| 2 | | | 0 |
| 3 | | | 0 |
| 4 | | | 1/3 |
| 5 | | | 1/3 |
| 6 | | | -1/3 |
| 7 | | | -1/3 |
| 8 | | Fe430 | 0 |
| 9 | | | 1/3 |
| 10 | | | -1/3 |
| 11 | Gelaste konstruktie | Fe510Nb | 0 |
| 12 | | | 0 |
| 13 | | | 1/3 |
| 14 | | | 1/3 |
| 15 | | | -1/3 |
| 16 | | | -1/3 |
| 17 | | Fe510Nb gegloeïd | 0 |
| 18 | | Fe430 | 0 |
| 19 | | | 1/3 |
| 20 | | | -1/3 |

TABEL II

Chemische samenstelling en materiaaleigenschappen

Chemische samenstelling

| Materiaal | Dikte mm | %C | %Mn | %P | %S | %Si | %Al | %Cr | %Nb | C _{eq} |
|-----------|-------------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-----------------|
| Fe430 | 10 | 0,12 | 1,14 | 0,013 | 0,012 | 0,30 | 0,050 | 0,015 | - | 0,31 |
| Fe510Nb | 10 | 0,17 | 1,50 | 0,014 | 0,011 | 0,52 | 0,032 | 0,016 | 0,037 | 0,42 |
| Fe510Nb | 12,5 | 0,17 | 1,46 | 0,015 | 0,012 | 0,48 | 0,032 | 0,017 | 0,034 | 0,42 |

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

Mechanische eigenschappen

| | Fe430 | Fe510Nb |
|---|-------|---------|
| Vloeigrens kg/mm ² | 34 | 41,5 |
| Breuksterkte kg/mm ² | 47 | 54,5 |
| Breukrek % | 36 | 34 |
| Insnoering % | 40 | 38 |
| Kerfslagwaarde Charpy-V 20°C kg/cm ² | 7,5 | 8,4 |
| Elasticiteitsmodulus kg/mm ² | 20990 | 21560 |
| Glijdingsmodulus kg/mm ² | 8165 | 8335 |

Beide materialen voldoen aan Euronorm 25-72 [8]

TABEL III

Lasparameters

Elektroden: Varios BHV 6,3 mm

Stroomsterkte: 260 ampère

Lasvolgorde: -I-balken van het midden naar het uiteinde
-schetsplaten van het midden naar het uiteinde

Laspositie: staande hoeknaad

Inspanhulpstukken zijn aan de konstruktie gelast met Philips 36S, 4 mm elektroden. Stroomsterkte 160 ampère, 4 lagen per naad.

TABEL IV

Scheurinitiatie en breukvlak uiterlijk

| Proefstuk nummer | Belastingswisselingen tot initiatie | Aantal initiatie punten | Breukvlak uiterlijk |
|------------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 1 | < 36000 | 2 | glad tot fijnkorrelig |
| 2 | < 60000 | 2 | glad tot fijnkorrelig |
| 3 | < 35000 | 2 | glad tot fijnkorrelig |
| 4 | 60000 | 3 | glad tot fijnkorrelig |
| 5 | 34500 | 1 | glad tot zeer fijn korrelig |
| 6 | < 15000 | 1 | zeer fijn tot fijn korrelig |
| 7 | < 35000 | 1 | zeer fijn tot fijn korrelig |
| 8 | 12000 | 2 | fijn korrelig |
| 9 | 60000 | 1 | glad tot fijnkorrelig |
| 10 | 5000 | 2 | fijnkorrelig |
| 11 | < 15000 | - | - |
| 12 | 22000 | 6 | glad tot fijnkorrelig |
| 13 | < 22000 | 5 | glad tot korrelig |
| 14 | < 63000 | - | - |
| 15 | 16000 | 7 | glad tot korrelig |
| 16 | 7500 | - | - |
| 17 | 5000 | 5 | glad tot fijnkorrelig |
| 18 | 6000 | 6 | fijnkorrelig |
| 19 | 5000 | 4 | fijnkorrelig |
| 20 | 3000 | 5 | fijnkorrelig |

Alle scheuren initiëren in de warmte beïnvloede zone of juist in de las, zoals aangegeven is in figuur 6.

TABEL V

Scheurgroeimetingen
Notatie zie pagina 71.

Proef 1

Proef 2

| N | a _l | a _r | N | a _l | a _r | N | a _l | a _r |
|-------|----------------|----------------|--------|----------------|----------------|--------|----------------|----------------|
| 38000 | 21,5 | | 62600 | 19 | | 113200 | 48,4 | 46,4 |
| 38400 | 21,7 | | 65500 | 20 | | 113700 | 48,9 | 47,1 |
| 38800 | 21,9 | | 67400 | 21 | | 114200 | 50 | 47,5 |
| 39000 | 22,1 | | 73370 | 22,5 | | 114700 | 50,6 | 48,2 |
| 39500 | 22,5 | | 75670 | 23,3 | | 115200 | 51,5 | 49 |
| 40000 | 23,1 | | 76480 | 24 | | 115700 | 52 | 49,6 |
| 40500 | 23,7 | | 79200 | 25 | | 116200 | 53 | 50 |
| 41000 | 23,8 | | 80800 | 25,5 | | 116700 | 54 | 51 |
| 41500 | 23,9 | | 81700 | 26 | | 117200 | 55 | 52 |
| 42000 | 24 | | 82200 | 26,5 | | 117700 | 56 | 53 |
| 42500 | 24,5 | | 83200 | 26,8 | | 118200 | 57 | 54 |
| 43000 | 24,6 | | 84300 | 27 | | 118700 | 58 | 54,7 |
| 43500 | 25 | | 86200 | 27,5 | | 119200 | 59,2 | 55,5 |
| 44000 | 25,5 | | 87300 | 28,5 | 27,5 | 119700 | 61 | 57 |
| 44500 | 25,8 | | 88200 | 29 | 28 | 120200 | 62,5 | 58,5 |
| 45000 | 26,1 | | 89200 | 30 | 28,5 | 120700 | 65,5 | 61 |
| 45500 | 26,7 | | 90350 | 30,5 | 29 | 121200 | 70 | 64 |
| 46000 | 27 | | 91200 | 31 | 30 | | | |
| 46500 | 27,5 | | 92200 | 31,5 | 30,2 | | | |
| 47000 | 28,5 | | 93200 | 32 | 31 | | | |
| 47500 | 28,5 | | 94200 | 32,5 | 31,5 | | | |
| 48000 | 29,1 | | 95200 | 33 | 32 | | | |
| 48500 | 29,8 | | 96200 | 33,7 | 33 | | | |
| 49000 | 30,0 | | 97200 | 34 | 33,5 | | | |
| 49500 | 30,4 | | 98200 | 34,5 | 34 | | | |
| 50000 | 31 | | 99200 | 35 | 34 | | | |
| 50500 | 31,5 | | 100200 | 36,4 | 34,5 | | | |
| 51000 | 32 | | 100700 | 37,0 | 35,4 | | | |
| 51500 | 32 | | 101200 | 37,6 | 35,4 | | | |
| 52000 | 33,1 | | 101700 | 38,1 | 36 | | | |
| 52500 | 33,5 | | 102200 | 38,7 | 36,3 | | | |
| 53000 | 34,3 | | 102700 | 38,7 | 36,8 | | | |
| 53500 | 34,6 | | 103200 | 38,7 | 37 | | | |
| 54000 | 35,2 | | 103700 | 39 | 37,5 | | | |
| 54500 | 35,5 | | 104200 | 39,5 | 38 | | | |
| 55000 | 36 | | 104700 | 40 | 38,6 | | | |
| 55500 | 36,8 | | 105200 | 40,5 | 39,0 | | | |
| 56000 | 37,5 | | 105700 | 41 | 39,5 | | | |
| 56500 | 38,8 | | 106200 | 41,5 | 39,7 | | | |
| 57000 | 39,9 | | 106700 | 42 | 40 | | | |
| 57500 | 40,8 | | 107200 | 42,8 | 40,2 | | | |
| 58000 | 41,7 | | 107700 | 42,5 | 40,5 | | | |
| 58500 | 42 | | 108200 | 43 | 41,3 | | | |
| 59000 | 42,7 | | 108700 | 43,5 | 41,7 | | | |
| 59500 | 43,5 | | 109200 | 44 | 42 | | | |
| 60000 | 45 | | 109700 | 44,5 | 42,7 | | | |
| 60500 | 46 | | 110200 | 45 | 43,3 | | | |
| | | | 110700 | 46 | 44 | | | |
| | | | 111200 | 46,4 | 44,2 | | | |
| | | | 111700 | 46,9 | 44,6 | | | |
| | | | 112200 | 47,5 | 45 | | | |
| | | | 112700 | 48 | 45,5 | | | |

Proef 3

Proef 4

| Proef 3 | | | Proef 4 | | | Proef 4 | | |
|---------|----------------|----------------|---------|----------------|----------------|---------|----------------|----------------|
| N | a _l | a _r | N | a _l | a _r | N | a _l | a _r |
| 43000 | 13 | 13 | 105750 | 32 | 32 | 60000 | 10,1 | 10,1 |
| 51000 | 14 | 14 | 107250 | 33 | 33 | 80000 | 10,3,, | 10,3 |
| 57000 | 15 | 15 | 108000 | 33,5 | 33,5 | 88000 | 10,5 | 10,5 |
| 60000 | 16 | 15,5 | 109500 | 34,2 | 34,3 | 96000 | 11 | 11 |
| 61500 | 16,3 | 15,7 | 110250 | 34,5 | 35 | 100000 | 11,2 | 11,2 |
| 62250 | 16,5 | 16 | 111000 | 35 | 35,3 | 108000 | 11,5 | 11,5 |
| 63000 | 16,6 | 16,2 | 111750 | 35,5 | 36 | 115000 | 11,6 | 11,9 |
| 63750 | 16,7 | 16,4 | 112500 | 36 | 36,5 | 117000 | 12,1 | 12 |
| 64500 | 17 | 16,5 | 114000 | 37,2 | 37,3 | 120000 | 12,5 | 12,3 |
| 65250 | 17,2 | 16,6 | 114750 | 37,5 | 38 | 124000 | 12,7 | 13 |
| 66000 | 17,5 | 17 | 115500 | 38 | 38,5 | 130000 | 13 | 13 |
| 66750 | 17,8 | 17,1 | 116250 | 38,5 | 39 | 136000 | 13,2 | 13,3 |
| 67500 | 17,6 | 17,3 | 117750 | 40 | 40,5 | 150000 | 13,5 | 13,5 |
| 68250 | 17,8 | 17,5 | 118500 | 40,5 | 41 | 160000 | 14 | 14 |
| 69000 | 18 | 17,7 | 119250 | 41 | 41,5 | 174000 | 14,3 | 14,5 |
| 69750 | 18,2 | 17,8 | 120000 | 41,6 | 42,1 | 187000 | 15 | 15 |
| 70500 | 18,5 | 18 | 120750 | 42,1 | 42,7 | 193000 | 15 | 15,7 |
| 71250 | 18,6 | 18,4 | 121500 | 43 | 43,5 | 195000 | 15,2 | 16 |
| 72000 | 18,8 | 18,5 | 122250 | 43,5 | 44 | 197000 | 15,4 | 16,2 |
| 72750 | 19 | 18,7 | 123000 | 44 | 45 | 202000 | 16 | 16,5 |
| 73500 | 19,2 | 19 | 123750 | 45 | 46 | 205000 | 16,4 | 16,6 |
| 74250 | 19,5 | 19,2 | 124500 | 45,9 | 46,6 | 211000 | 16,5 | 17 |
| 75000 | 19,7 | 19,5 | 125250 | 46,6 | 47,4 | 215000 | 17 | 17 |
| 75750 | 20 | 19,8 | 126750 | 48,5 | 49,5 | 222000 | 17,3 | 17,3 |
| 76500 | 20,2 | 20 | 127500 | 50 | 51 | 229000 | 17,5 | 17,6 |
| 77250 | 20,5 | 20,1 | 128250 | 50,8 | 51,5 | 233000 | 17,7 | 18 |
| 78000 | 20,7 | 20,5 | 129000 | 51,6 | 53 | 244000 | 19 | 19 |
| 78750 | 21 | 20,7 | 129750 | 52,5 | 54 | 265000 | 21 | 20,9 |
| 79500 | 21,1 | 21,1 | 130500 | 53,6 | 55 | 268000 | 21,3 | 21,5 |
| 80250 | 21,3 | 21,3 | 132250 | 56,5 | 58,5 | 271000 | 21,5 | 22 |
| 81000 | 21,5 | 21,5 | 134250 | 63 | 66 | 273000 | 22 | 22 |
| 81750 | 22 | 21,8 | | | | 276000 | 22,2 | 22,2 |
| 82500 | 22,1 | 22 | | | | 279000 | 22,5 | 22,3 |
| 83250 | 22,3 | 22,2 | | | | 281000 | 22,7 | 22,6 |
| 84000 | 22,5 | 22,4 | | | | 283000 | 22,9 | 23,1 |
| 84750 | 22,9 | 22,9 | | | | 286000 | 23,2 | 23,5 |
| 86250 | 23,5 | 23,5 | | | | 290000 | 23,6 | 24,1 |
| 87750 | 24 | 24 | | | | 293000 | 24 | 24,7 |
| 88500 | 24,2 | 24,3 | | | | 298000 | 25 | 25,5 |
| 89250 | 24,5 | 24,5 | | | | 302000 | 25,8 | 26,4 |
| 90000 | 25 | 24,6 | | | | 304000 | 26,2 | 27 |
| 91500 | 25,2 | 25,1 | | | | 307000 | 27 | 27,5 |
| 92250 | 25,8 | 25,5 | | | | 309000 | 27,3 | 27,9 |
| 93750 | 26,5 | 26,5 | | | | 311000 | 27,8 | 28,3 |
| 94500 | 26,9 | 26,9 | | | | 324000 | 31 | 31,8 |
| 96000 | 28 | 27,5 | | | | 326000 | 31,5 | 32 |
| 96750 | 28,2 | 28 | | | | 330000 | 32,6 | 33 |
| 97500 | 28,3 | 28,1 | | | | 332000 | 33,2 | 33,8 |
| 98250 | 28,5 | 28,3 | | | | 334000 | 34,3 | 34,5 |
| 99000 | 29 | 28,6 | | | | 337000 | 34,9 | 35,4 |
| 100500 | 30 | 29 | | | | 339000 | 35,5 | 36,2 |
| 101250 | 30,3 | 29,2 | | | | 341000 | 36,2 | 37,1 |
| 103500 | 31 | 31 | | | | 343000 | 36,8 | 37,5 |
| 104250 | 31,5 | 31,3 | | | | 345000 | 38,1 | 38,2 |
| 105000 | 31,6 | 31,5 | | | | 347000 | 38,5 | 39 |

Proef 4 vervolg

Proef 5

Proef 6

| Proef 4 vervolg | | | Proef 5 | | | Proef 6 | | |
|-----------------|----------------|----------------|---------|----------------|----------------|---------|----------------|----------------|
| N | a _l | a _r | N | a _l | a _r | N | a _l | a _r |
| 353000 | 41 | 41,8 | 65000 | 10,5 | 10,5 | 15250 | 11,8 | 11,7 |
| 355000 | 41,7 | 42,3 | 76000 | 11,0 | 10,9 | 16000 | 12 | 12 |
| 357000 | 42,8 | 43,4 | 85000 | 11,2 | 11,3 | 17500 | 12,3 | 12,2 |
| 359000 | 43,5 | 44,2 | 88000 | 11,5 | 11,5 | 19000 | 12,5 | 12,5 |
| 361000 | 44,5 | 45 | 99000 | 12,5 | 12,6 | 20500 | 13 | 13 |
| 364000 | 46 | 47 | 105000 | 13 | 12,9 | 22000 | 13,2 | 13,3 |
| 368000 | 48,5 | 48,8 | 108000 | 13,5 | 13,1 | 23500 | 13,5 | 13,5 |
| 370000 | 49,5 | 50,2 | 110000 | 13,9 | 13,3 | 24250 | 13,8 | 13,7 |
| 372000 | 50,6 | 51,5 | 115000 | 14,2 | 13,4 | 25000 | 14 | 13,9 |
| 374000 | 52 | 52,8 | 120000 | 14,5 | 13,8 | 26500 | 14,5 | 14,2 |
| 376000 | 53,5 | 54,3 | 125000 | 14,7 | 14 | 30250 | 15,5 | 15 |
| 377000 | 54,2 | 55 | 130000 | 14,9 | 14,2 | 31000 | 15,9 | 15,5 |
| 378000 | 55,4 | 56 | 135000 | 15,1 | 14,3 | 31750 | 16 | 15,8 |
| 379000 | 56 | 57 | 140000 | 15,5 | 14,4 | 32500 | 16,3 | 16 |
| 380000 | 57 | 57,5 | 145000 | 15,9 | 15 | 34000 | 16,9 | 16,3 |
| 381000 | 58 | 58,3 | 155000 | 16,8 | 15,8 | 35500 | 17,2 | 16,5 |
| 382000 | 58,9 | 59,2 | 160000 | 17 | 16,2 | 37000 | 17,9 | 17 |
| 383000 | 60,1 | 60,5 | 165000 | 17,3 | 16,5 | 38500 | 18,5 | 17,5 |
| | | | 170000 | 17,8 | 16,9 | 40000 | 19 | 18 |
| | | | 175000 | 18,2 | 17,2 | 41500 | 19,5 | 18,3 |
| | | | 181000 | 19 | 18 | 43000 | 20 | 18,9 |
| | | | 191000 | 19,8 | 18,9 | 44500 | 20,8 | 19,5 |
| | | | 203000 | 21 | 20 | 46000 | 21,4 | 20,5 |
| | | | 210000 | 21,8 | 20,7 | 47500 | 22,2 | 21,3 |
| | | | 216000 | 22,5 | 21,5 | 49750 | 23,3 | 22,2 |
| | | | 225000 | 23,8 | 22,6 | 51250 | 24,2 | 23,3 |
| | | | 228000 | 24,3 | 22,9 | 52000 | 24,5 | 23,6 |
| | | | 235000 | 25,2 | 23,8 | 53500 | 25 | 24,2 |
| | | | 240000 | 26 | 24,7 | 55000 | 25,9 | 25 |
| | | | 245000 | 27,2 | 25,6 | 57250 | 27 | 26,4 |
| | | | 250000 | 27,9 | 27,2 | 58000 | 27,5 | 27 |
| | | | 255000 | 29,3 | 28,3 | 59500 | 28,3 | 27,8 |
| | | | 260000 | 31 | 29,9 | 61000 | 29,2 | 29 |
| | | | 265000 | 32 | 31 | 63250 | 30,5 | 30,1 |
| | | | 270000 | 33,2 | 32 | 64000 | 31,3 | 31 |
| | | | 275000 | 34,5 | 33,5 | 65500 | 32,2 | 32,1 |
| | | | 277000 | 35, | 34,2 | 67000 | 33,5 | 33,5 |
| | | | 280000 | 36,1 | 35 | 68500 | 34,9 | 35 |
| | | | 290000 | 40,5 | 39,2 | 70000 | 36,2 | 36,1 |
| | | | 292500 | 41 | 40 | 71500 | 37,8 | 38 |
| | | | 295000 | 42,5 | 41 | 73000 | 39,5 | 39,5 |
| | | | 297500 | 43,6 | 42,2 | 74500 | 40,8 | 41,5 |
| | | | 300000 | 45 | 43,5 | 75250 | 42,2 | 42,5 |
| | | | 302500 | 46 | 45 | 76000 | 43 | 43,2 |
| | | | 305000 | 47,8 | 46,5 | 76750 | 43,8 | 44,1 |
| | | | 307500 | 49,3 | 47,9 | 77500 | 44,5 | 45,5 |
| | | | 310000 | 51 | 49,5 | 78250 | 45,5 | 46,5 |
| | | | 312500 | 52,5 | 51 | 79000 | 46,5 | 47,8 |
| | | | 315000 | 54,2 | 53 | 79750 | 47,8 | 49,3 |
| | | | 317500 | 56,6 | 55 | 80500 | 49 | 50,7 |
| | | | 320000 | 58 | 57 | 81250 | 51,5 | 52,2 |
| | | | 321500 | 61 | 59 | 82000 | 52,3 | 53,5 |
| | | | | | | 82750 | 53,8 | 55,9 |
| | | | | | | 83500 | 56 | 58 |
| | | | | | | 84250 | 59 | 62 |
| | | | | | | 85000 | 62 | 65 |

Proef 7

| N | a_l | a_r |
|-------|-------|-------|
| 36500 | 16,5 | 16,2 |
| 40000 | 17,8 | 17 |
| 42500 | 18,5 | 17,5 |
| 44000 | 19 | 18 |
| 45500 | 19,5 | 18,3 |
| 47000 | 20 | 18,7 |
| 48500 | 20,4 | 19,3 |
| 50000 | 21 | 20 |
| 51500 | 22 | 20,2 |
| 53000 | 22,5 | 20,7 |
| 54500 | 23,1 | 21 |
| 56000 | 24 | 21,5 |
| 57500 | 24,5 | 22 |
| 59000 | 25,3 | 22,7 |
| 60500 | 26 | 23,2 |
| 62000 | 26,8 | 23,9 |
| 63500 | 27,5 | 24,5 |
| 65000 | 26,9 | 24,9 |
| 65750 | 29 | 25,2 |
| 66500 | 29,5 | 25,5 |
| 67250 | 30 | 26 |
| 68000 | 30,2 | 26,5 |
| 68750 | 30,5 | 27 |
| 69500 | 31 | 27,3 |
| 70250 | 31,6 | 27,6 |
| 71000 | 32,2 | 28 |
| 71750 | 32,4 | 28,5 |
| 72500 | 33 | 29 |
| 73250 | 33,3 | 29,5 |
| 74000 | 34,2 | 30 |
| 75500 | 35 | 31 |
| 76250 | 35,9 | 31,5 |
| 77000 | 36,3 | 32 |
| 77750 | 38 | 33 |
| 78500 | 38,3 | 33,8 |
| 78250 | 39 | 34,5 |
| 79000 | 39,8 | 35 |
| 79750 | 40,3 | 36 |
| 80500 | 41 | 36,5 |
| 81250 | 42 | 37 |
| 82000 | 42,8 | 38 |
| 82750 | 43,6 | 38,9 |
| 83500 | 44,5 | 39,5 |
| 84250 | 45 | 40,5 |
| 85000 | 46,2 | 41,3 |
| 85750 | 47,1 | 42 |
| 86500 | 48,5 | 43 |
| 87250 | 49,5 | 44 |
| 88000 | 50,7 | 45 |
| 88750 | 52 | 46 |
| 89500 | 53,5 | 47,5 |
| 90250 | 55 | 49 |
| 91000 | 57,5 | 51 |
| 91750 | 60 | 52,5 |
| 92500 | 64 | 55,5 |
| 93250 | 70 | 60 |

Proef 8

| N | a_l | a_r |
|--------|-------|-------|
| 20000 | 11 | 10 |
| 30000 | 12 | 10,3 |
| 35000 | 12 | 10,4 |
| 40000 | 12,3 | 10,5 |
| 45000 | 13 | 10,7 |
| 50000 | 13,5 | 10,9 |
| 59000 | 14 | 11 |
| 63500 | 14,3 | 11,2 |
| 70000 | 15 | 11,8 |
| 72500 | 15,2 | 12,1 |
| 82000 | 16,5 | 12,3 |
| 93000 | 17,5 | 12,5 |
| 100000 | 18 | 12,6 |
| 107000 | 19,2 | 12,7 |
| 113000 | 21 | 12,8 |
| 123000 | 22 | 13 |
| 130000 | 23 | 13,5 |
| 137000 | 24,2 | 13,6 |
| 140000 | 25 | 13,8 |
| 145000 | 26,3 | 14 |
| 150000 | 27,5 | 14,4 |
| 155000 | 29 | 14,6 |
| 160000 | 30 | 15 |
| 165000 | 31,5 | 15,3 |
| 169000 | 33,2 | 15,5 |
| 174000 | 35,3 | 15,8 |
| 180000 | 38 | 17 |
| 194000 | 45 | 20,5 |
| 199000 | 48,1 | 22,6 |
| 207000 | 55 | |
| 211500 | 60 | |
| 212500 | 61,7 | 24 |
| 214000 | 63 | 25 |
| 215000 | 65 | 26 |
| 216000 | 67 | 27 |
| 217000 | 70 | 28 |

Proef 9

| N | a_l | a_r |
|--------|-------|-------|
| 75000 | 11 | 11 |
| 80000 | 11 | 12 |
| 85000 | 11,3 | 12,8 |
| 90000 | 11,5 | 13,2 |
| 95000 | 11,7 | 13,5 |
| 100000 | 12 | 14 |
| 105000 | 12,5 | 14,3 |
| 110000 | 12,6 | 14,5 |
| 115000 | 12,8 | 14,7 |
| 120000 | 13 | 15 |
| 132000 | 13,4 | 16 |
| 135000 | 13,6 | 16,5 |
| 140000 | 14 | 16,8 |
| 145000 | 14,5 | 17,2 |
| 150000 | 14,9 | 17,5 |
| 155000 | 15,2 | 18 |
| 160000 | 15,5 | 18,5 |
| 165000 | 16 | 19 |
| 170000 | 16,4 | 19,6 |
| 175000 | 17 | 20 |
| 180000 | 17,8 | 20,7 |
| 185000 | 18,5 | 21,4 |
| 190000 | 19 | 22 |
| 195000 | 20 | 23 |
| 200000 | 20,9 | 23,8 |
| 205000 | 22 | 25 |
| 210000 | 23 | 26 |
| 215000 | 24 | 27 |
| 220000 | 25 | 28,2 |
| 225000 | 26,3 | 29,4 |
| 230000 | 27,5 | 31 |
| 235000 | 29 | 32,3 |
| 240000 | 30,4 | 33,6 |
| 245000 | 32,0 | 35,4 |
| 250000 | 33,5 | 37 |
| 260000 | 37,2 | 40,8 |
| 265000 | 40 | 43 |
| 270000 | 41,7 | 45 |
| 272500 | 42,8 | 46,5 |
| 275000 | 44 | 48 |
| 277500 | 45,5 | 49 |
| 280000 | 47 | 50,8 |
| 282500 | 48,5 | 52,2 |
| 285000 | 50 | 54 |
| 287500 | 52 | 56 |
| 280000 | 54 | 58,3 |
| 292500 | 56 | 60,5 |
| 295000 | 59,5 | 63,5 |
| 296000 | 60,5 | 64,5 |

Proef 10

| N | a ₁ | a _r |
|--------|----------------|----------------|
| 7000 | 10,5 | 10,5 |
| 10000 | 11 | 10,8 |
| 12500 | 11,3 | 11 |
| 15000 | 11,5 | 11,2 |
| 17500 | 11,8 | 11,5 |
| 20000 | 12 | 11,8 |
| 22500 | 12,2 | 12 |
| 25000 | 12,7 | 12,2 |
| 27500 | 13 | 12,7 |
| 30000 | 13,3 | 13 |
| 35000 | 14,2 | 14 |
| 40000 | 15,7 | 15 |
| 42500 | 16,2 | 15,3 |
| 45000 | 16,7 | 15,7 |
| 47500 | 17 | 16,5 |
| 50000 | 17,8 | 17,2 |
| 55000 | 19 | 19 |
| 60000 | 21 | 21 |
| 65000 | 23 | 22 |
| 70000 | 24 | 23,8 |
| 72500 | 24,5 | 24,3 |
| 77500 | 26 | 25,8 |
| 83500 | 28,4 | 28,3 |
| 85000 | 29,2 | 29 |
| 87500 | 30,2 | 30,2 |
| 90000 | 31,3 | 31,5 |
| 92500 | 32,8 | 33 |
| 96000 | 34,5 | 35 |
| 97500 | 36 | 36,5 |
| 100000 | 37,5 | 38 |
| 102500 | 40 | 40 |
| 104000 | 41 | 41,2 |
| 105000 | 42 | 42 |
| 106000 | 43 | 43 |
| 107000 | 44 | 44 |
| 108000 | 45 | 45 |
| 109000 | 45,9 | 46 |
| 110000 | 47 | 47,5 |
| 111000 | 48,5 | 49 |
| 112000 | 49,8 | 50 |
| 113000 | 51 | 51,5 |
| 114000 | 52,5 | 52,8 |
| 115000 | 54,3 | 54,8 |
| 116000 | 56,8 | 57 |
| 117000 | 59,5 | 60,2 |

Proef 11

| N | a ₁ | a ₃ | a ₄ |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 15000 | 14,5 | 6,0 | 14 |
| 16000 | 17 | | 15,2 |
| 17000 | 19 | | 18,3 |
| 18000 | 21,5 | | 22,3 |
| 19000 | 24 | | 25 |
| 20000 | 30 | | 28 |
| 21000 | 36 | | 35,3 |
| 21250 | 41 | | 39 |
| 21500 | 43,5 | | 41 |
| 21750 | 48 | | 44,2 |
| 22000 | 53 | | 49 |
| 22100 | 58 | | 55 |
| 22150 | 64,5 | | 58 |

a₂=0

Proef 12

| N | a ₁ | a ₄ |
|-------|----------------|----------------|
| 24000 | 10,5 | |
| 25000 | 13,4 | 3,8 |
| 25500 | | 11,2 |
| 26000 | | 13,3 |
| 26500 | 16,6 | |
| 27000 | 18,2 | |
| 27300 | | 16,1 |
| 28000 | 21,4 | 18,9 |
| 28500 | 24,1 | |
| 28800 | | 21,4 |
| 29000 | 25,9 | |
| 29500 | | 23,5 |
| 29800 | 29,9 | |
| 30200 | | 27,9 |
| 30500 | 35,2 | |
| 30900 | | 32,2 |
| 31000 | 39 | |
| 31100 | | 35,3 |
| 31200 | 41,7 | |
| 31400 | | 39,5 |
| 31570 | | 41,5 |
| 31620 | 44,5 | |
| 31680 | | 43,8 |
| 31780 | 46,5 | |
| 31820 | | 46 |
| 31860 | 49,8 | |
| 31900 | | 48,6 |
| 31950 | 52,1 | |
| 31970 | | 51 |
| 32100 | 55 | |
| 32120 | | 58,3 |

a₂=a₃= 0

Proef 13

| N | a ₁ | N | a ₂ | N | a ₃ | N | a ₄ |
|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|
| 25000 | 7,5 | 27500 | 7 | 31100 | 8 | 22000 | 5 |
| 21600 | 7,8 | 30300 | 8,5 | 40200 | 10,5 | 25000 | 6 |
| 34400 | 10 | 33800 | 9,5 | 43100 | 12 | 26300 | 7 |
| 37400 | 10,5 | 36000 | 11 | | | 31900 | 9 |
| 39900 | 13 | 39300 | 12 | | | 35400 | 10 |
| 43300 | 15,8 | 42750 | 13 | | | 38600 | 12 |
| 44800 | 17 | 45800 | 14 | | | 41000 | 14 |
| 46000 | 17,8 | 46900 | 14,5 | | | 43450 | 16,5 |
| 47300 | 19 | 49700 | 16 | | | 45400 | 17,2 |
| 48750 | 20,5 | | | | | 47750 | 18 |
| 49850 | 21,9 | | | | | 49200 | 19,5 |
| 50350 | 23 | | | | | 50200 | 20,5 |
| 51000 | 25 | | | | | 51350 | 22 |
| 51500 | 25,5 | | | | | 52100 | 23 |
| 52500 | 21,7 | | | | | 53000 | 24,5 |
| 53850 | 29 | | | | | 53600 | 26 |
| 54550 | 30,5 | | | | | 54750 | 27,3 |
| 55650 | 32 | | | | | 55800 | 28,5 |
| 56150 | 33,2 | | | | | 56400 | 30 |
| 57200 | 35,5 | | | | | 57400 | 31,2 |
| 58000 | 37,5 | | | | | 58300 | 33 |
| 58600 | 38,8 | | | | | 58800 | 35 |
| 59000 | 40,5 | | | | | 59300 | 36,5 |
| 59500 | 42 | | | | | 59900 | 38 |
| 60100 | 43,5 | | | | | 60300 | 39,3 |
| 60500 | 45,5 | | | | | 60800 | 41 |
| 61000 | 47 | | | | | 61500 | 43,2 |
| 61700 | 50 | | | | | 61850 | 45 |
| 62000 | 51,5 | | | | | 62300 | 48,3 |
| 62450 | 54 | | | | | 62700 | 49 |
| 62900 | 57 | | | | | 63100 | 51,5 |
| 63200 | 59 | | | | | 63400 | 54 |
| 63800 | 62,5 | | | | | 63600 | 57 |

Proef 14

| N | a_2 | N | a_3 |
|---------|-------|--------|-------|
| 78000 | 6,5 | 63000 | 8,5 |
| 88500 | 8 | 66500 | 10,5 |
| 90300 | 9 | 68250 | 12 |
| 92500 | 10 | 71000 | 13 |
| 94500 | 11 | 75000 | 14 |
| 99000 | 11,5 | 78400 | 16 |
| 101500 | 13,5 | 82400 | 18 |
| 103500 | 15 | 84000 | 19,5 |
| 104600 | 16 | 86500 | 20 |
| 105600 | 17 | 88000 | 21 |
| 106250 | 18,5 | 89000 | 22 |
| 107650 | 20 | 90000 | 23 |
| 108600 | 21,5 | 92000 | 24 |
| 109200 | 23 | 94000 | 26 |
| 109800 | 23,5 | 96400 | 27 |
| 110700 | 24 | 97000 | 28,5 |
| 111300 | 25 | 100000 | 31 |
| 1116500 | 26 | 101400 | 34 |
| 112000 | 28 | 103350 | 37 |
| 112400 | 29 | 104000 | 40,5 |
| 112650 | 31 | 104800 | 42 |
| | | 105300 | 45 |
| | | 105800 | 46 |
| | | 106500 | 47 |
| | | 107350 | 49,5 |
| | | 107800 | 51 |
| | | 108500 | 53 |
| | | 109000 | 55 |
| | | 109500 | 56 |
| | | 110000 | 57,5 |
| | | 110400 | 59 |
| | | 110800 | 60,5 |
| | | 111200 | 62 |
| | | 111500 | 64 |
| | | 112000 | 66 |
| | | 112300 | 68 |
| | | 112550 | 71 |

$a_1 = a_4 = 0$

Proef 15

| N | a_1 | N | a_4 |
|-------|-------|-------|-------|
| 17000 | 4 | 20000 | 12 |
| 18750 | 7 | 20900 | 15 |
| 20400 | 13,5 | 21600 | 18 |
| 20700 | 14,5 | 22200 | 19,3 |
| 21000 | 16 | 22600 | 20 |
| 21500 | 17,5 | 22900 | 21 |
| 22000 | 19 | 23200 | 22 |
| 22400 | 20,5 | 23500 | 24 |
| 22700 | 21,5 | 23700 | 25 |
| 23000 | 22,5 | 24000 | 26 |
| 23300 | 23,3 | 24100 | 27 |
| 23600 | 25,5 | 24300 | 28,2 |
| 23800 | 26,2 | 24500 | 30 |
| 24000 | 28 | 24650 | 31 |
| 24200 | 29 | 24850 | 32,5 |
| 24400 | 30,3 | 25000 | 34 |
| 24600 | 31,2 | 25200 | 36,5 |
| 24750 | 32,5 | 25400 | 38 |
| 25000 | 34 | 25500 | 39 |
| 25100 | 36 | 25650 | 41,5 |
| 25300 | 37,2 | 25800 | 44 |
| 25450 | 39 | 25950 | 46 |
| 25600 | 41,5 | 26100 | 49 |
| 25700 | 43 | 26200 | 54 |
| 25850 | 45,8 | 26300 | 60 |
| 26000 | 49 | | |
| 26150 | 53 | | |
| 26300 | 57 | | |

$a_2 = a_3 = 0$

Proef 16

| N | a ₁ | N | a ₂ | N | a ₄ |
|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|
| 20000 | 11,5 | 20500 | 7,5 | 21000 | 6 |
| 21300 | 14 | 22600 | 10,5 | 24200 | 9 |
| 22100 | 16,2 | 23300 | 12,2 | 27500 | 12 |
| 23000 | 18,2 | 24000 | 13 | 28700 | 13 |
| 23500 | 19,5 | 24900 | 14 | | |
| 24300 | 22,3 | 25400 | 15 | | |
| 24700 | 25,5 | 25800 | 16,3 | | |
| 25150 | 27,3 | 26250 | 17,5 | | |
| 25550 | 29 | 26850 | 18 | | |
| 26100 | 30,8 | 27150 | 20 | | |
| 26550 | 33,5 | 27650 | 21 | | |
| 27000 | 36 | 28150 | 23 | | |
| 27350 | 38 | 28500 | 24 | | |
| 27750 | 40 | 29000 | 26 | | |
| 28000 | 42 | 29200 | 28 | | |
| 28370 | 44 | 29450 | 29,5 | | |
| 28900 | 48,2 | 29650 | 31 | | |
| 29100 | 49,9 | 29800 | 32,3 | | |
| 29300 | 52 | 29950 | 34 | | |
| 29550 | 54,6 | 30050 | 38 | | |
| 29700 | 57,3 | | | | |
| 29850 | 60 | | | | |
| 30000 | 64 | | | | |
| 30100 | 67 | | | | |

$a_3=0$

Proef 17

| N | a ₃ | N | a ₄ |
|-------|----------------|-------|----------------|
| 35900 | 21,5 | 35900 | 16 |
| 36400 | 23 | 36550 | 17 |
| 36750 | 24 | 36950 | 18 |
| 37200 | 26 | 37300 | 19 |
| 37450 | 26,5 | 37700 | 20 |
| 37850 | 28 | 38000 | 20,5 |
| 38200 | 28,5 | 38400 | 21 |
| 38600 | 31,2 | 38700 | 22 |
| 39000 | 34 | 39100 | 23,3 |
| 39400 | 35 | 39500 | 25,2 |
| 39700 | 37,4 | 39850 | 27,5 |
| 40000 | 39 | 40150 | 30 |
| 40250 | 41,5 | 40350 | 32 |
| 40450 | 44 | 40550 | 35 |
| 40650 | 47 | 40750 | 36,5 |
| 40850 | 50 | 41000 | 39,4 |
| 41100 | 56,5 | 41150 | 45 |
| | | 41200 | 50 |

$a_1=a_2=0$

Proef 18

| N | a ₁ | N | a ₂ | N | a ₃ | N | a ₄ |
|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|
| 9500 | 3 | 11800 | 3 | 10000 | 2 | 11100 | 7 |
| 10500 | 5,2 | 13850 | 6 | 13950 | 7 | 14900 | 11 |
| 11400 | 7 | 16500 | 7 | 16700 | 9,2 | 16750 | 13 |
| 13700 | 12 | | | | | 17050 | 14,8 |
| 15000 | 15 | | | | | 17250 | 15,5 |
| 15500 | 17 | | | | | 17550 | 18 |
| 16350 | 18 | | | | | 17800 | 19 |
| 16900 | 22 | | | | | 18000 | 20,5 |
| 17150 | 24 | | | | | 18200 | 23,5 |
| 17450 | 27 | | | | | 18500 | 28 |
| 17700 | 29,6 | | | | | 18600 | 30,5 |
| 17900 | 32,3 | | | | | 18700 | 34 |
| 18100 | 35 | | | | | | |
| 18350 | 40 | | | | | | |
| 18530 | 44 | | | | | | |
| 18650 | 48,5 | | | | | | |
| 18740 | 53,5 | | | | | | |

Proef 19

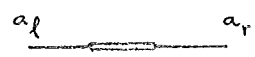
| N | a ₁ | N | a ₂ | N | a ₃ | N | a ₄ |
|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|
| 16800 | 2 | 10000 | 2,5 | 16500 | 3 | 27000 | 2 |
| 20000 | 4,5 | 14000 | 7 | 18000 | 5 | 30000 | 4 |
| 22000 | 6 | 16000 | 9 | 19750 | 7 | 33250 | 5 |
| 25000 | 8 | 21000 | 11,5 | 26500 | 8 | 36000 | 6,5 |
| | | 26000 | 4 | 29800 | 10,8 | | |
| | | 29600 | 6 | 31200 | 12 | | |
| | | 33000 | 8 | 33100 | 14 | | |
| | | 35900 | 10 | 34200 | 15 | | |
| | | 36800 | 11,5 | 35800 | 17,5 | | |
| | | 38200 | 14 | 36650 | 19 | | |
| | | 39000 | 15 | 38000 | 20,5 | | |
| | | 40050 | 16,5 | 39100 | 22,5 | | |
| | | 40340 | 18 | 39400 | 24 | | |
| | | 41320 | 19,5 | 40150 | 25 | | |
| | | 41830 | 21,5 | 40680 | 27 | | |
| | | 42400 | 23,5 | 41150 | 28 | | |
| | | 43150 | 25,5 | 41640 | 29,5 | | |
| | | 43700 | 27,5 | 42250 | 31 | | |
| | | 44050 | 29,5 | 42750 | 33 | | |
| | | 44350 | 31 | 43420 | 35 | | |
| | | 44750 | 32,5 | 43800 | 36 | | |
| | | 45050 | 34,5 | 44200 | 38 | | |
| | | 45370 | 36 | 44480 | 39,9 | | |
| | | 45620 | 38 | 44870 | 42 | | |
| | | 45800 | 39,5 | 45200 | 43,5 | | |
| | | 45980 | 42 | 45460 | 46,5 | | |
| | | 46200 | 45 | 45700 | 49 | | |
| | | | | 45880 | 51,5 | | |
| | | | | 46050 | 55 | | |
| | | | | 46140 | 57,5 | | |

Op de plaats a₂ zijn twee scheuren ontstaan.

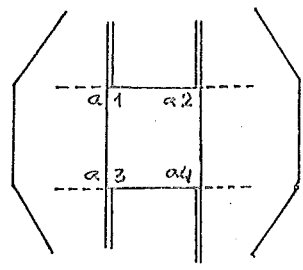
Proef 20

| N | a ₁ | N | a ₂ | N | a ₄ |
|-------|----------------|------|----------------|-------|----------------|
| 3750 | 3 | 5500 | 6 | 5300 | 1,5 |
| 4300 | 6 | 6250 | 8 | 6050 | 4 |
| 4750 | 7 | 6850 | 10 | 7050 | 7 |
| 5700 | 8,3 | 8000 | 5,5 | 7820 | 9,8 |
| 6350 | 9,5 | 8850 | 8 | 9500 | 11,7 |
| 6940 | 11 | 9400 | 10 | 9850 | 13,2 |
| 7200 | 12 | | | 10200 | 15,5 |
| 7700 | 13 | | | 10500 | 17,9 |
| 8200 | 14 | | | 10850 | 19 |
| 8700 | 16 | | | 11050 | 21,2 |
| 9250 | 18 | | | 11320 | 24 |
| 9700 | 19,5 | | | 11460 | 26,3 |
| 10000 | 21 | | | 11680 | 28 |
| 10400 | 23,5 | | | 11700 | 31,5 |
| 10640 | 25,3 | | | 11800 | 34 |
| 10950 | 27,2 | | | 11900 | 37 |
| 11240 | 31 | | | 12070 | 45 |
| 11390 | 33 | | | | |
| 11520 | 35 | | | | |
| 11640 | 37,5 | | | | |
| 11750 | 40,2 | | | | |
| 11850 | 43 | | | | |
| 12000 | 49 | | | | |

a₃=0
 Op de plaats a₂ zijn twee scheuren ontstaan



vlakke plaat



gelaste constructie

APPENDIX
OVERZICHT VAN DE BELANGRIJKSTE DETAILS
EN DE INVOER VOOR HET MARC-PROGRAMMA

Overzicht van de belangrijkste details van de invoer

Algemeen

| | |
|---------------------------|--------------------------|
| Mechanische eigenschappen | |
| Elasticiteitsmodulus | 21000 kg/mm ² |
| Vloei grens | 40 kg/mm ² |
| Element type | |
| Isoparametrisch element | 20 knooppunten |
| | 27 integratiepunten |

Centraal gescheurde plaat

| | |
|-------------------------|-------------------------|
| Aantal elementen | 14 |
| Element grootte x*y*z | 10*50*5 mm ³ |
| Stapgrootte scheurgroei | 10 mm |
| Maximale scheurlengte | 60 mm |
| Belasting | 15 kg/mm ² |

Simulatie scheurgroei door het opheffen van randvoorwaarden

Gelaste constructie

| | |
|-------------------------|------------------------------|
| Aantal elementen | 25 |
| Element grootte x*y*z | 50*5*6,25 mm ³ |
| | 50*10,3*6,25 mm ³ |
| Stapgrootte scheurgroei | 5 resp. 10,3 mm |
| Maximale scheurlengte | 46,2 mm |
| Belasting | 15 kg/mm ² |

Simulatie scheurgroei door het loskoppelen van elementen

JOB CONTROL CARD, TOEVOEGEN EIGEN WERKZADEP CODE ETC.
 DUMP VAN HET MARC SYSTEEM NAAR DISK00
 EENMAAL PER ETMAAL UIT TE VOEREN
 (FORDSF IS GEEEN NORMALE GEBALIKERS SOFTWARE :
 DIT STUK NIET GEBRUIKEN ZONDER TOESTEMMING VAN
 DR. G. WISSE
 REKENCENTRUM TH DELFT)

JOB CONTROL VOOR 3D MESH GENERATOR

INVOER VOOR 3D MESH GENERATOR

VLAKKE PLAAT
 14 ELEMENTEN

HET MESH WORDT IN AFZONDERLIJKE DELEN GEGENEREERD
 (DEFINE KAART : NIEUW PEEEL)

DE GEOMETRISCHE COORDINATEN WORDEN AAN EEN DEEL
 TOEGEVOEGD DOOR VERWYJZEN NAAR DE COORDINATEN
 IN HET POINT-BLOCK

```

//MKAM JOB [REDACTED] , REGION=950K, TIME=210
//JOBNAME L=2, TAPES=1
//DUM FACC PGMEFDRDSF
//STEP111 DD DSN=SYS2, TOOLBOX, DISP=SHR
//SYSJOB DD SYSOUT=4
//TAP1 DD UNIT=TAP16, DISP=SHR, VOL=(,PRTAIN,SFR=MKAT05),
// DCHDEFN=3, LABEL=(1,SU), DSN=MKAM, MARC
//DISK1 DD UNIT=DISK, VOL=(,PRTAIN,SFR=DISK00), DISP=OLD
//DD1 DD DSN=MKAM, MARC, DISP=(,CATLG), VOL=SFR=DISK00,
// UNIT=DISK, SPACE=(TRK,(120,10,1))
//SYSJOB DD *
RESTORE DSN=MKAM, 4, 10
/*
//RO EXEC PGM=MFESH10
//STEP111 DD DSN=MKAM, MARC, DISP=SHR
//FT06F001 DD SYSOUT=4
//FT04F001 DD DSN=SYS2, VOL=(,PRTAIN,SFR=MKAT05), DISP=(,PASS), SPACE=(TRK,(2,1)),
// DCH=(MFCC=1, LRFCL=40, HXSI/F=3120)
// FT05F001 DD DSN=SYS2, UNIT=SYS04, DISP=(,DELETE),
// SPACE=(40,(2000,10))
//FT01F001 DD DSN=SYS2, UNIT=SYS04, DISP=(,PASS),
// SPACE=(TRK,(2,1)), DCH=(RECFM=F, LRECL=40, BLKSIZE=3120)
//FT10F001 DD *
50000

```

| POINT | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|-------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0. | 60. | 0. | 0. | 50. | 0. | 0. | 100. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. |
| | 100. | 0. | 0. | 50. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. |
| | 0. | 0. | 50. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. |
| | 0. | 100. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. |
| | 0. | 0. | 0. | 100. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. |
| | 0. | 0. | 0. | 0. | 100. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. |
| | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 100. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. |
| | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 100. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. |
| | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 100. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. |
| | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 100. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. |
| | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 100. | 0. | 0. | 0. | 0. |
| | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 100. | 0. | 0. | 0. |
| | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 100. | 0. | 0. |
| | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 100. | 0. |
| | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 100. |
| | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. |

```

DEFINE 1 1 1 21 3 6 2 1 0 0 0 0
MAP 0 8
1 1 1
2 2 2
3 3 3
4 4 4
5 5 5
6 6 6
7 7 7
8 8 8
13 130 21 3 1 2 1 12 0 0
DEFINE 2 13 130 21 3 1 2 1 12 0 0

```

MAP

0
1
2
3
9
4
5
11
12
6
7
18
8
17

MERGE 1
DATA 1
END

/*

```

//GO EXEC PG=STRESS
//STEPLIB DD DSN=KAM.MARC,UNIT=SYSDA,DISP=(OLD,DELETE),
//FT01F001 DD DSN=KTEMP01,UNIT=SYSDA,DISP=(TRK,(2,1))
// DCB=(RECFM=FB,LRECL=40,RLKSIZE=3120),SPACE=(TRK,(2,1))
//FT03F001 DD DSN=KTEMP03,DISP=(NEW,DELETE),UNIT=SYSDA,
// SPACE=(TRK,(40,10))
//FT05F001 DD DSN=KTEMP05,UNIT=SYSDA,SPACE=(TRK,(2,1)),DISP=(,DELETE),
// DCB=(RECFM=FB,LRECL=40,RLKSIZE=400)
//FT06F001 DD SYSJU=K,DCB=(RECFM=FB,LRECL=133)
//FT11F001 DD DSN=KTEMP11,DISP=(NEW,DELETE),UNIT=SYSDA,
// DCB=(RECFM=FB,LRECL=13012,RLKSIZE=13016,RLFN0=1),
// SPACE=(13016,(40,20))
//FT12F001 DD DSN=KTEMP12,DISP=(NEW,DELETE),UNIT=SYSDA,
// DCB=(RECFM=FB,LRECL=13012,RLKSIZE=13016,RLFN0=1),
// SPACE=(13016,(40,20))
//FT13F001 DD DSN=KTEMP13,DISP=(NEW,DELETE),UNIT=SYSDA,
// DCB=(RECFM=FB,LRECL=13012,RLKSIZE=13016,RLFN0=1),
// SPACE=(13016,(40,20))
//FT14F001 DD DSN=KTEMP14,UNIT=SYSDA,DISP=(,DELETE),
// SPACE=(3254,(300,100))
//FT15F001 DD DSN=KTEMP15,DISP=(NEW,DELETE),UNIT=SYSDA,
// DCB=(RECFM=FB,LRECL=13012,RLKSIZE=13016,RLFN0=1),
// SPACE=(13016,(40,20))
//PLTDS DD SYSOUT=(1,ASPL)
//FT10F001 DD *

```

TITLE VLAKKE PLAAT MET CENTRALE SCHEUR 7 21
SIZING 100000 14 146 192 7 21
INPUT TAPE 1
NO LOADCOOL 1
ALL POINTS
END
CONNECTIVITY

COORDINATES

PROPERTY

| | | | |
|---|--------|------|------|
| 1 | 21.0F3 | .393 | 40.0 |
| 1 | 14 | | |
| 0 | 1 | | |
| 7 | 10 | | |
| 7 | 8 | 9 | 10 |
| | | 11 | 12 |
| | | 13 | 14 |

BOUNDARY CONDITIONS

| | | | | |
|-----|-----|---|---|-----|
| 1 | 53 | 3 | 3 | 0.0 |
| 129 | 135 | 3 | 3 | 0.0 |

SAMENVOGEN VAN TWEE DELEN

HET GEGENEREEDE MESH WORDT HAAR DE DISTAET
LTEMP1 GESCHREVEN VOOR GEBRUIK IN HET REKEN-
GEDEELTE

JOB CONTROL VOOR DE SPANNINGSEN VERPLAATINGS-
BEREKENINGEN

JOB CONTROL VOOR EVENTUELE PLOTS OP SMAL PAPIER
VOOR PAREED PAPIER WORDT DE TWEEDE KAART:
//PLTPB DD etc.

INVOER VOOR DE BEREKENINGEN
AAN DE VLAKKE PLAAT

DEFINIEN VAN DE MECHANISCHE EIGENSCHAPPEN

HET AANBRENGEN VAN DE BELASTING

HET SPECIFICEREN VAN DE BEPERKINGEN IN DE
VERPLAATINGS VAN KNOOPPUNTEN

```

-13 1 14 21 34 41 54 61 68 75 82 89 96 103 110 115
-23 2 13 140 13 128 40 87 139 11 12 50 85 86 9 10 58
83 84 7 0 57 81 82 5 6 56 79 80 3 4 55 77
78 1 2 54 75 76
CONTROL
6 115 2
2
END OPTION
BOUNDARY CHANGE
-5
TRACTIONS
0 1
7 10
7 8 9 10 11 12 14
0.0
CONTINUE
BOUNDARY CHANGE
-5
TRACTIONS
0 1
7 10
7 8 9 10 11 12 14
0.0
CONTINUE
BOUNDARY CHANGE
-5
TRACTIONS
0 1
7 10
7 8 9 10 11 12 14
0.0
CONTINUE
BOUNDARY CHANGE
-5
TRACTIONS
0 1
7 10
7 8 9 10 11 12 14
0.0
CONTINUE
BOUNDARY CHANGE
-5
TRACTIONS
0 1
7 10
7 8 9 10 11 12 14
0.0
CONTINUE
BOUNDARY CHANGE
-5
TRACTIONS
0 1
7 10
7 8 9 10 11 12 14
0.0
CONTINUE

```

SIMULATIE SCHEURGROEI
DOOR VERMINDERING VAN HET AANTAL
BOUNDARY CONDITIONS

EINDE BEREKENINGEN VLAKKE PLaat
JOB CONTROL VOOR MESH GENERATOR

```

//GO EXEC PGM=MESH30
//STEPLIB DD DSN=SYSM,MACR=DISP=SHR
//FOUFOU1 DD DSN=KATEMP1,UNIT=SYSDA,DISP=(,PASS),
// SPACE=(TRK,(2,1)),DCB=(RECFM=FB,LRECL=40,PLKSIZE=3120)
//FTR4FOU1 DD DSN=KATEMP4,UNIT=SYSDA,DISP=(,DELETE),SPACE=(TRK,(2,1)),
// DCB=(RECFM=FB,LRECL=40,PLKSIZE=3120)

```

```
// SPACE=(AU,(2000,10))
//FT06F001 DD SYSOUT=A
//PLTDS DD SYSOUT=(I,SPPL)
//PLTDS DD SYSOUT=(I,SHPL)
//FT10F001 DD *
```

| POINT | X | Y | Z | ... |
|-------|----------|--------|-------|-----|
| 1 | 0. | 140. | 0. | |
| 2 | 25. | 140. | 0. | |
| 3 | 50. | 140. | 0. | |
| 4 | 0. | 112.5 | 0. | |
| 5 | 25. | 112.5 | 0. | |
| 6 | 50. | 112.5 | 0. | |
| 7 | 133.125 | 112.5 | 0. | |
| 8 | 0. | 65. | 0. | |
| 9 | 25. | 65. | 0. | |
| 10 | 50. | 65. | 0. | |
| 11 | 133.125 | 65. | 0. | |
| 12 | 216.25 | 65. | 0. | |
| 13 | 0. | 160. | 6.25 | |
| 14 | 25. | 160. | 6.25 | |
| 15 | 50. | 160. | 6.25 | |
| 16 | 0. | 112.5 | 6.25 | |
| 17 | 25. | 112.5 | 6.25 | |
| 18 | 50. | 112.5 | 6.25 | |
| 19 | 133.125 | 112.5 | 6.25 | |
| 20 | 0. | 65. | 6.25 | |
| 21 | 25. | 65. | 6.25 | |
| 22 | 50. | 65. | 6.25 | |
| 23 | 133.125 | 65. | 6.25 | |
| 24 | 216.25 | 65. | 6.25 | |
| 25 | 0. | 62.5 | 0. | |
| 26 | 220.625 | 62.5 | 0. | |
| 27 | 0. | 60. | 0. | |
| 28 | 225.0 | 60. | 0. | |
| 29 | 0. | 62.5 | 5.625 | |
| 30 | 220.625 | 62.5 | 5.625 | |
| 31 | 0. | 60. | 6.25 | |
| 32 | 225.0 | 60. | 6.25 | |
| 33 | 91.5625 | 136.25 | 0. | |
| 34 | 91.5625 | 136.25 | 6.25 | |
| 35 | 174.6875 | 88.75 | 0. | |
| 36 | 174.6875 | 88.75 | 6.25 | |
| 37 | 50. | 62.5 | 8.75 | |
| 38 | 216.125 | 62.5 | 8.75 | |
| 39 | 50. | 60.0 | 11.25 | |
| 40 | 220.625 | 60.0 | 11.25 | |
| 41 | 220.625 | 60.0 | 8.75 | |
| 42 | 50.0 | 65. | 6.25 | |
| 43 | 50.0 | 60. | 6.25 | |
| 44 | 400.0 | 60. | 0. | |
| 45 | 50. | 50. | 0. | |
| 46 | 225. | 50. | 0.0 | |
| 47 | 400. | 50. | 0.0 | |
| 48 | 400. | 50. | 6.25 | |
| 49 | 50. | 50. | 5. | |
| 50 | 225. | 50. | 5. | |
| 51 | 400. | 50. | 5. | |
| 52 | 50. | 60. | 0. | |
| 53 | 400. | 60. | 11.25 | |
| 54 | 50. | 50. | 10. | |
| 55 | 216.25 | 50. | 10. | |

INVOER MESH GENERATOR

GELASTE KONSTRUKTIE

25 ELEMENTEN

```

56 400. 50. 10.
57 50. 40.
58 220. 50. 40.
59 400. 50. 40.
60 50. 40.
61 225. 40.
62 400. 40.
63 50. 45.
64 225. 45.
65 400. 45.
66 50. 47.5
67 225. 47.5
68 400. 47.5
69 50. 45.
70 225. 45.
71 400. 45.
72 50. 0.0
73 225. 0.0
74 400. 0.0
75 50. 0.0
76 225. 0.0
77 400. 0.0
78 216.25 160.
79 216.25 160.
80 216.25 65.
81 50.0 65.
82 50. 45.
83 225. 45.
84 400. 45.
85 133.625 112.5
86 133.625 112.5
87 50.5 160.
88 50.5 160.
89 50.0 65.
90 50.0 65.
91 50.00 60.
92 50.0 60.

```

```

DEFINE 1 1 21 3 1 4 1 2 8 0
MAP 0 8
1 10
2 12
3 7
4 6
5 22
6 24
7 19
8 18
DEFINE 2 26 501 21 3 1 1 1 2 16 0
MAP 0 8
1 6
2 7
3 17
4 3
5 18
6 19
7 18
8 15
MERGE 1 2
DEFINE 2 26 501 21 3 1 4 1 0 8 0

```

MAP 0 8
1 8
2 89
3 6
4 4
5 20
6 90
7 18
8 16
MERGE 1 2
DEFINE 2 26 501 21 3 1 1 1 1 1 0 16 0
MAP 0 8
1 4
2 6
3 3
4 1
5 16
6 18
7 15
8 13
MERGE 1 2
DEFINE 2 26 501 21 3 1 1 1 1 1 0 6 0
MAP 0 8
1 27
2 92
3 89
4 8
5 31
6 91
7 90
8 20
MERGE 1 2
DEFINE 2 26 501 21 3 1 1 1 1 1 2 6 0
MAP 0 8
1 52
2 28
3 12
4 10
5 43
6 32
7 24
8 22
MERGE 1 2
DEFINE 2 26 501 21 3 1 1 1 1 1 2 6 2
MAP 0 8
1 43
2 32
3 24
4 42
5 39
6 40
7 97

MERGE 2
DEFINE 1
MAP 2 26 501 21 3 2 1 1 1 2 4 0
0 8
1 45
2 47
3 44
4 52
5 49
6 51
7 48
R 43
MERGE 2
DEFINE 1
MAP 2 26 501 21 3 2 1 1 1 2 4 2

0 8
1 49
2 51
3 46
4 43
5 54
6 56
7 53
R 39
MERGE 2
DEFINE 1
MAP 2 26 501 21 3 2 1 1 1 2 4 4

0 8
1 54
2 56
3 53
4 39
5 57
6 59
7 62
R 60
MERGE 2
DEFINE 1
MAP 2 26 501 21 3 2 1 1 1 2 2 0

0 8
1 69
2 71
3 47
4 45
5 63
6 65
7 51
R 49
MERGE 2
DEFINE 1
MAP 2 26 501 21 3 1 1 1 1 2 2 2

0 8
1 63
2 64
3 50

MESH WORDT BEWAARD OP DATASET 18TEMP1

JOB CONTROL VOOR DE BEREKENING VAN DE GEELASTE KONSTRUKTIE

INVOER SPANNINGS EN VERPLAATSINGS BEREKENING
GEELASTE KONSTRUKTIE

```

6 83
7 55
8 54
MERGE 1 2
DEFINE 26 501 21 3 1 1 1 4 2 2
MAP 0 8
1 64
2 65
3 51
4 50
5 83
6 84
7 56
8 55
MERGE 1 2
DEFINE 26 501 21 3 2 1 1 2 0 0
MAP 0 8
1 72
2 74
3 71
4 69
5 75
6 77
7 65
8 63
MERGE 1 2
DATA 1
END 1
/
//GO EXEC PGM=STRESS
//STEP1 DD DSN=K14.MARC,DISP=SHR
//FT01F001 DD DSN=K1TEMP1,UNIT=SYSDA,DISP=(OLD,DELETE),
// DCB=(RECFM=FB,LRECL=40,RLKSIZE=3120),SPACE=(TRK,(2,1))
//FT03F001 DD DSN=K1TEMP3,DISP=(NEW,DELETE),UNIT=SYSDA,
// SPACE=(TRK,(40,20))
//FT05F001 DD DSN=K1TEMP5,UNIT=SYSDA,SPACE=(TRK,(2,1)),DISP=(,DELETE),
// DCB=(RECFM=FB,LRECL=40,RLKSIZE=400)
//FT06F001 DD SYSOUT=A,DCB=(RECFM=FA,LRECL=133)
//FT11F001 DD DSN=K1TEMP11,DISP=(NEW,DELETE),UNIT=SYSDA,
// DCB=(RECFM=FB,LRECL=13012,RLKSIZE=13016,BUFNO=1),
// SPACE=(13016,(40,20))
//FT12F001 DD DSN=K1TEMP12,DISP=(NEW,DELETE),UNIT=SYSDA,
// DCB=(RECFM=FB,LRECL=13012,RLKSIZE=13016,HUFNO=1),
// SPACE=(13016,(40,20))
//FT13F001 DD DSN=K1TEMP13,DISP=(NEW,DELETE),UNIT=SYSDA,
// DCB=(RECFM=FB,LRECL=13012,RLKSIZE=13016,HUFNO=1),
// SPACE=(13016,(40,20))
//FT14F001 DD DSN=K1TEMP14,UNIT=SYSDA,DISP=(,DELETE),
// SPACE=(254,(30,100))
//FT15F001 DD DSN=K1TEMP15,DISP=(NEW,DELETE),UNIT=SYSDA,
// DCB=(RECFM=FB,LRECL=13012,RLKSIZE=13016,BUFNO=1),
// SPACE=(13016,(40,20))
//FT10F001 DD *
TITLE 9 GLASIE KONSTRUKTIE
SIZING 100000 25 270 135 6 21
INPUT TAPE 1
SUBJOB

```

DE SEQUELS WORDEN TOEGEN DE BESCHRIJVING GERECHTIGD
OP DIJK BEWAARD TER BESPARING VAN GEBIEDENRUIMTE
(ELSTO kaart)

SCHERFGROEI WORD GESIMULEERD DOOR EEN SCHEUR
AAN TE BRENGEN

TWEEDE SET COORDINATES
CONNECTIVITY

DEZE DICHT TE HOUDEN:

TIE en
TYING

EN TELKENS DE DOOR TIE EN TYING GEKOPPELDE
KNOOPPUNTEN LOS TE KOPPELEN:

TYING CHANGE

25 1 2

COORDINATES

CONNECTIVITY

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|
| 5 | 5 | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 21 | 69 | 246 | 248 | 72 | 88 | 258 | 260 | 91 | 70 | 247 | 73 | 71 | 89 | 259 |
| 92 | 90 | 83 | 254 | 255 | 84 | | | | | | | | | | |
| 7 | 21 | 72 | 244 | 250 | 75 | 91 | 260 | 262 | 94 | 73 | 249 | 76 | 74 | 92 | 261 |
| 95 | 93 | 84 | 255 | 256 | 85 | | | | | | | | | | |
| 8 | 21 | 75 | 250 | 252 | 78 | 94 | 262 | 264 | 97 | 75 | 251 | 79 | 77 | 95 | 263 |
| 98 | 96 | 85 | 250 | 257 | 86 | | | | | | | | | | |
| 9 | 21 | 74 | 252 | 21 | 81 | 97 | 264 | 54 | 100 | 79 | 253 | 82 | 80 | 98 | 265 |
| 101 | 99 | 86 | 257 | 32 | 87 | | | | | | | | | | |
| 11 | 21 | 109 | 266 | 246 | 69 | 115 | 269 | 258 | 88 | 110 | 267 | 70 | 112 | 117 | 270 |
| 89 | 119 | 114 | 266 | 254 | 83 | | | | | | | | | | |

COORDINATES

| | | |
|-----|-----|----------|
| 3 | 25 | 5 |
| 246 | 50. | 0. |
| 247 | 50. | 70.9375 |
| 248 | 50. | 75.875 |
| 249 | 50. | 82.8125 |
| 250 | 50. | 88.7500 |
| 251 | 50. | 94.6875 |
| 252 | 50. | 100.6250 |
| 253 | 50. | 106.5625 |
| 254 | 50. | 65. |
| 255 | 50. | 75.875 |
| 256 | 50. | 84.75 |
| 257 | 50. | 100.625 |
| 258 | 50. | 65.0 |
| 259 | 50. | 70.9375 |
| 260 | 50. | 76.8750 |
| 261 | 50. | 82.8125 |
| 262 | 50. | 88.7500 |
| 263 | 50. | 94.6875 |
| 264 | 50. | 100.6250 |
| 265 | 50. | 106.5625 |
| 266 | 50. | 60.0000 |
| 267 | 50. | 62.5000 |
| 268 | 50. | 60.0000 |
| 269 | 50. | 60.0000 |
| 270 | 50. | 62.5000 |

PROPERTY

| | | |
|---|---------|---------|
| 1 | 21.0E03 | 40.0E00 |
| 1 | 25 | |

TRACIONS

| | | | | | |
|----------|----|----|----|----|----|
| 15 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 |
| -15.0E00 | | | | | |

BOUNDARY CONDITIONS

| | | | | |
|-----|-----|---|---|-----|
| 30 | 30 | | | |
| 1 | 23 | 3 | 3 | 0.0 |
| 57 | 61 | 3 | 3 | 0.0 |
| 59 | 62 | 3 | 3 | 0.0 |
| 102 | 104 | 3 | 3 | 0.0 |
| 109 | 113 | 3 | 3 | 0.0 |
| 121 | 123 | 3 | 3 | 0.0 |
| 140 | 149 | 3 | 3 | 0.0 |
| 197 | 204 | 3 | 3 | 0.0 |

| | | | |
|-----|-----|---|-----|
| 227 | 231 | 2 | 0.0 |
| 235 | 242 | 2 | 0.0 |
| 69 | 69 | 1 | 0.0 |
| 71 | 72 | 1 | 0.0 |
| 74 | 75 | 1 | 0.0 |
| 77 | 78 | 1 | 0.0 |
| 80 | 81 | 1 | 0.0 |
| 83 | 88 | 1 | 0.0 |
| 90 | 91 | 1 | 0.0 |
| 93 | 94 | 1 | 0.0 |
| 96 | 97 | 1 | 0.0 |
| 99 | 100 | 1 | 0.0 |
| 102 | 103 | 1 | 0.0 |
| 105 | 107 | 1 | 0.0 |
| 109 | 109 | 1 | 0.0 |
| 112 | 112 | 1 | 0.0 |
| 114 | 114 | 1 | 0.0 |
| 116 | 116 | 1 | 0.0 |
| 119 | 119 | 1 | 0.0 |
| 246 | 253 | 3 | 0.0 |
| 265 | 267 | 3 | 0.0 |

TYING

| | | |
|-----|-----|--|
| 100 | 1 | |
| 100 | 19 | |
| 253 | | |
| 100 | 52 | |
| 265 | | |
| 100 | 15 | |
| 252 | | |
| 100 | 30 | |
| 257 | | |
| 100 | 49 | |
| 264 | | |
| 100 | 14 | |
| 251 | | |
| 100 | 47 | |
| 263 | | |
| 100 | 11 | |
| 250 | | |
| 100 | 28 | |
| 256 | | |
| 100 | 44 | |
| 252 | | |
| 100 | 9 | |
| 249 | | |
| 100 | 42 | |
| 261 | | |
| 100 | 6 | |
| 248 | | |
| 100 | 26 | |
| 255 | | |
| 100 | 39 | |
| 260 | | |
| 100 | 4 | |
| 247 | | |
| 100 | 37 | |
| 259 | | |
| 100 | 1 | |
| 245 | | |
| 100 | 24 | |
| 264 | | |
| 100 | 34 | |
| 264 | | |
| 100 | 113 | |

```

100 120
270
100 111
266
100 115
268
100 118
269
CONTROL
  6 231 1
    2.
END OPTION
TYING CHANGE
  1 20
TRACTIONS
  0 1
  6 8
 15 17 19 21 23 25
0.00E00
CONTINUE
TYING CHANGE
  1 15
TRACTIONS
  0 1
  6 8
 15 17 19 21 23 25
0.00E00
CONTINUE
TYING CHANGE
  1 10
TRACTIONS
  0 1
  6 8
 15 17 19 21 23 25
0.00E00
CONTINUE
TYING CHANGE
  1 5
TRACTIONS
  0 1
  6 8
 15 17 19 21 23 25
0.00E00
CONTINUE
TYING CHANGE
  1 0
TRACTIONS
  0 1
  6 8
 15 17 19 21 23 25
0.00E00
CONTINUE
/*
//

```

EINDE BEREKENINGEN GEELASTE KONSTRUKTIE
EINDE BEREKENINGEN