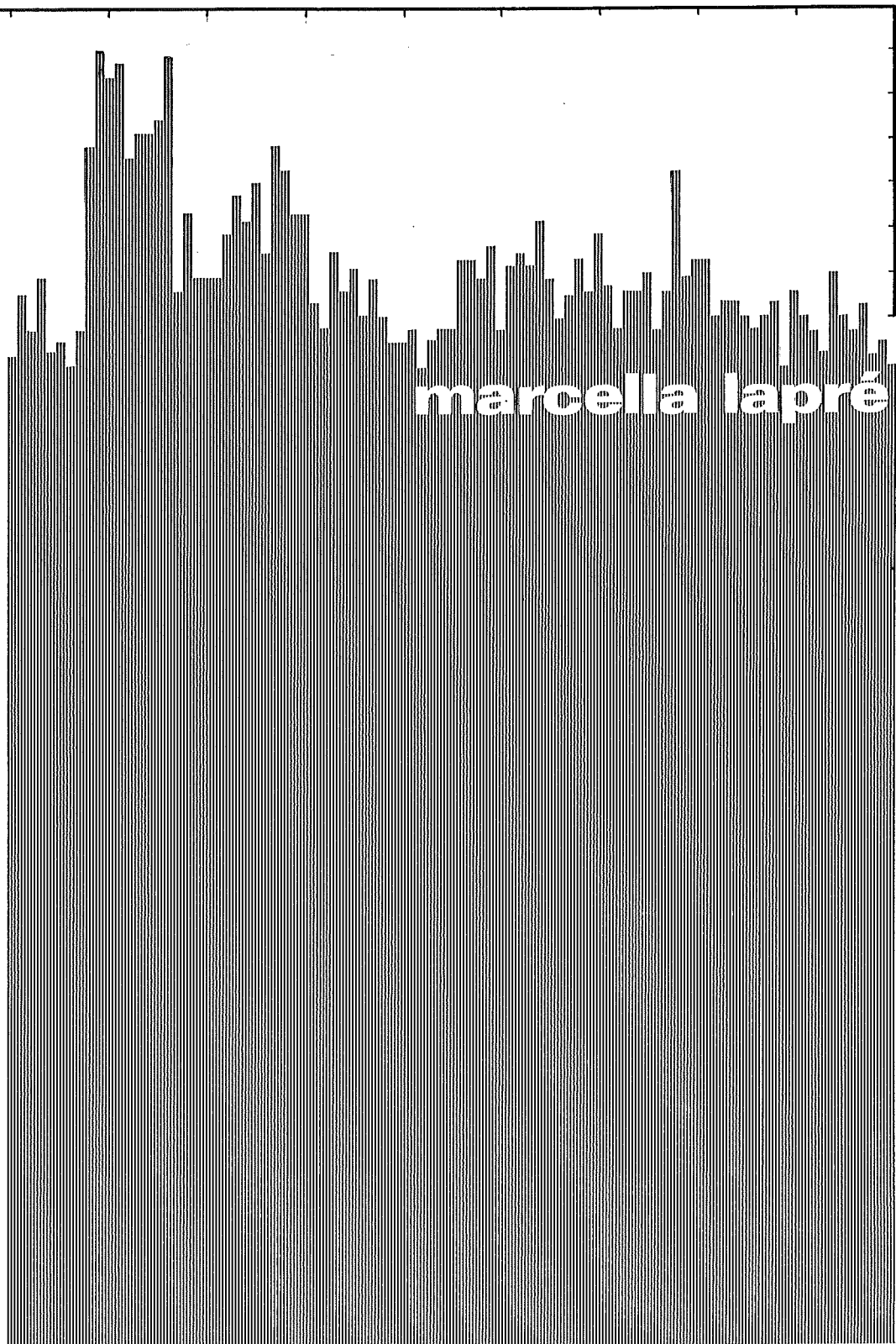


het gebruik van akoestische emissie bij bepaling van de kritische j-integraal



marcella lapré

afstudeerverslag in de opleiding
tot metaalkundig ingenieur aan de
technische hogeschool delft
begeleiding: ir. j. zuidema
met dank aan alle medewerkers van
de vakgroep tmc2 augustus 1986

s u m m a r y

The acoustic emission of three-point bend specimens was monitored during tests with increasing load. Eight materials were investigated: construction steel Fe510, high strength aluminium alloys Al2024 and Al7075, pressure vessel steels Fe510Nb, 22NiMoCr37 and T StE-355, ferritic nodular cast iron and brass Ms58.

All materials gave a similar pattern of emission as a function of time, showing three maxima. The first maximum is ascribed to void formation and the cracking and tearing of inclusions; the second to particle cracking in the slip-planes which form as the load increases; the third, to crack initiation caused by rupture of the ligaments which lie between the blunt crack tip and the nearest internal voids.

Because the third maximum corresponds to the moment of crack initiation, it is possible to deduce a value for the critical J (J_{ae}). This method is discussed in relation to three graphical methods which have been proposed for finding J_{1C} :

- The standard test method for J_{1C} (ASTM) by way of the blunting-line.
- The COD-crack length relationship; the apparant crack length caused by blunting is determined from this relationship and used to determine the J_{1C} from the regression curve.
- The M-line method. The M-line is determined from the relationship between J -integral and COD; it replaces the blunting line in the graph of the J -integral against the crack length. The critical value J_{QM} is found by extrapolation.

It is shown that J_{ae} agrees with J_{QM} . Since acoustic emission detects crack initiation directly, it gives an unambiguous J_{1C} value from a single specimen, and is suitable for both brittle and ductile materials.

s a m e n v a t t i n g

De akoestische emissie is opgenomen tijdens toenemende deformatie van driepuntsbuigstaven. Acht materialen zijn hierbij onderzocht: de constructiestalen Fe510, Fe510Nb, 22NiMoCr37 en T StE-355, de aluminiumlegeringen Al2024 en Al7075, messing Ms58 en ferritisch nodulair gietijzer. Voor alle materialen worden in het patroon van pulsen in de tijd drie maxima aangetroffen. Deze worden mogelijk veroorzaakt door respectievelijk voidsvorming in combinatie met breuk en losscheuren van insluitels bij het eerste maximum, breuk van hardere deeltjes door de combinatie van de beweging van het materiaal langs glijlijnen en belastingstoename bij het tweede maximum, en scheurinitiatie door het breken van het ligament tussen afgebotte scheurtip enerzijds en voids anderzijds bij het derde maximum.

De J -waarde, berekend ten tijde van het derde maximum, wordt de J_{ae} genoemd.

Tevens worden drie grafische J -bepalingsmethoden besproken;

- De standaard J_{IC} -bepaling met de bluntingline (ASTM).
- De relatie tussen COD (δ_t) en scheuruitbreiding Δa , waarbij het punt van maximale blunting, $\Delta a = 0,5 \cdot \delta_t$, door extrapolatie uit de $\delta_t, \Delta a$ -grafiek wordt bepaald.
- De M-lijn, die uit de relatie tussen J -integraal en COD in een begrensd belastingsgebied volgt; het snijpunt van regressie-curve en M-lijn is de kritische J -waarde, J_{QM} .

Aangetoond wordt dat J_{ae} en J_{QM} vrijwel overeenkomen.

Met behulp van akoestische emissie-opnamen is het mogelijk het moment van scheurinitiatie vast te stellen zodat de kritische J -waarde van het materiaal bepaald kan worden uit de opnamen van één proefstuk; dit geldt zowel voor bros als taai materiaal.

i n h o u d s o p g a v e

Inhoudsopgave	4
Symbolenlijst	6
1 Inleiding	8
2 Achtergrond	10
2.1 Akoestische emissie	10
2.2 De grafische J_{1C} -bepaling	13
2.2.1 Plastisch-scharniervorming en blunting	13
2.2.2 Toegepaste grafische methoden	16
De $\delta_t, \Delta a$ -relatie	16
De M-lijn	17
2.3 Beproeving van de materialen	20
2.3.1 Wijze van uitvoering	20
2.3.2 Gebruikte akoestische apparatuur	23
3 Meetgegevens en -resultaten	24
3.1 Onderzochte materialen	26
3.2 J- en AE-gegevens	27
3.2.1 Fe510	27
3.2.2 Al2024	31
3.2.3 Al7075	35
3.2.4 Fe510Nb	40
3.2.5 22NiMoCr37	46
3.2.6 T StE-355	51
3.2.7 messing Ms58	54
3.2.8 ferritisch nodulair gietijzer	58
3.3 De M-lijn	62
3.4 De $\delta_t, \Delta a$ -rechte	69
3.5 De v, q -rechte	78
3.6 De $v, \Delta a$ -rechte	79
3.7 Fe510; de correctie-curven	81
3.8 De J-waarden	83
4 Discussie	84
4.1 De AE-opnamen	84
4.1.1 Het eerste maximum	85
4.1.2 Het tweede maximum	86
4.1.3 Het derde maximum	88
4.2 Afwijkende beproevingen	90
4.2.1 Afwijking van doorbuigingssnelheid	90
De correctie-factor	90
De J_{ae} -bepaling	91
4.2.2 Afwijking van vermoeiingsscheur	92

4.2.3	Afwijking van stabiele scheuruitbreiding	94
4.3	Aflezing van AE-opnamen	96
4.3.1	De nauwkeurigheid	96
4.3.2	Keuze van het maximum	98
4.4	De grafische J_{1C} -bepaling	101
5	Conclusie	104
	Literatuur	106

s y m b o l e n l i j s t

a_o	lengte van kerf en vermoeiingsscheur
Δa	scheuruitbreiding
b	ligament van driepuntsbuigstaaf
B	breedte van proefstuk
c	afstand van bovenkant proefstuk tot tapgat
c_f	correctie-factor
D	BS-grenswaarde voor K_f
E	elasticiteits-modulus
f	doorbuigingssnelheid
G	ASTM-grenswaarde voor P_f "elastic energy release rate"
J	J-integraal
J	kritische J, bepaald met akoestische emissie
J_{ae}	kritische J volgens standaard J_{1C} -bepaling
J_{QM}	kritische J, bepaald met M-lijn
J_{QM}	kritische J, bepaald met $\delta_t, \Delta a$ -relatie
J_z	J-integraal bij scheurinitiatie
J_{1C}	helling van het gecorrigeerde P,v-diagram
k	theoretische waarde van de P,v-helling (ASTM)
k_t	spannings-intensiteitsfactor berekend via P
K_f	spannings-intensiteitsfactor berekend via P_f
M_f	constante in het verband tussen J en δ_t
P	belasting
P_f	maximale vermoeiingsbelasting
P_i	belasting bij afwijking van het lineaire gebied van de P,v-curve
q	insnoering van het proefstuk
s	diepte van de gemachineerde kerf
S	afstand tussen de rollen bij roloplegging
t	tijdsduur
Δt	tijdsinterval
v	doorbuiging van het proefstuk
v_c	voor rolindrukking gecorrigeerde doorbuiging
v_i	proefstuk-doorbuiging bij afwijking van het lineaire gebied van de P,v-curve
v'	scheuropening tgv niet lineair-elastisch materiaalgedrag
v'_{c1}	totale scheuropening
W_{c1}	hoogte van het proefstuk
Y	compliance function (BS)
z	criterium voor de geometrie van het proefstuk (ASTM)
z_o	hoogte van de opzetlipjes van de clipgauge
δ_t	crack opening displacement, ook wel COD
σ_{q2}	vloeispanning

σ_{uts}	breekspanning
σ_y	gemiddelde van vloeï- en breekspanning
ν	Poisson's ratio

inleiding

Breukmechanica is onder te verdelen in de Lineair Elastische Breukmechanica (LEBM) en de Elastisch Plastische Breukmechanica (EPBM).

LEBM beschrijft breuk en scheurgedrag van materiaal onder elastische omstandigheden; EPBM is gericht op materialen waarvan het scheurgedrag gepaard gaat met plastische deformatie rond de scheurtip.

De J-integraal is een bij EPBM gehanteerde breukparameter. De hieraan ten grondslag liggende theorie van het J-concept werd in 1967 ontwikkeld door J.R. Rice (lit.1). De J-integraal is een wegonafhankelijke lijnintegraal rond de scheurtip en zijn waarde is gelijk aan de afname van de potentiële energie per eenheid van scheuruitbreiding:

$$J = - \frac{dU}{da} \quad (1)$$

De standaardmethode voor de J_{1C} -bepaling staat beschreven in ASTM-norm E-813 (lit.2). Hierbij wordt een proefstuk, met een tevoren aangebrachte vermoeiingsscheur, aan een toenemende belasting onderworpen, zodat scheuruitbreiding wordt veroorzaakt.

Gedurende deze beproeving wordt het kracht-doorbuigingsdiagram opgenomen; wanneer is voldaan aan bepaalde voorwaarden betreffende onder andere geometrie van het proefstuk en beproevingssnelheid, dan is het oppervlak onder deze P,v-curve maatgevend voor de J-integraal. In par.2.2.1 wordt hierop nader ingegaan.

Er worden minstens vier proefstukken beproefd waarbij per proefstuk een ander scheurlengte, en derhalve ook een andere J-integraal moet worden bereikt. Scheurlengten en bijbehorende J-waarden moeten in een door de ASTM-norm vastgesteld gebied van het $J, \Delta a$ -diagram vallen. De resultaten van deze beproevingen vormen in dit diagram de regressie-curve.

Door extrapolatie van deze rechte naar de zogenaamde "bluntingline" wordt de J_{1C} gevonden. Dit is de kritische waarde van de J-integraal, kenmerkend voor het materiaalgedrag op het moment van scheurinitiatie. Het begrip "blunting" wordt besproken in par.2.2.1.

elastisch

Deze standaardmethode is een betrouwbare maar wel dure methode, die veel proefstukken en meettijd kost.

Voor het ontwikkelen van een "single specimen" J_{1C} -bepaling wordt de bruikbaarheid van akoestische emissie-opnamen onderzocht.

achtergrond

2.1

A k o e s t i s c h e e m i s s i e

Onder akoestische emissie worden de in het materiaal opgewekte trillingen verstaan, veroorzaakt door het veranderende spanningsveld dat bij een instabiliteit in het materiaal aanwezig is. Zo'n instabiliteit kan ontstaan zijn door onder ander fasetransformaties, plastische deformatie, scheurinitiatie en scheurgroei.

De energie die nodig is voor akoestische emissie is afkomstig van de in het lichaam opgeslagen elastische energie die, door onder andere voornoemde processen, wordt herverdeeld. Het merendeel van deze energie wordt omgezet in warmte; slechts een kleine fractie van de energie is verantwoordelijk voor de akoestische emissie.

Verscheidene mechanismen zijn al voorgesteld als bron van de akoestische emissie die optreedt bij belasting van het materiaal. Enkele hiervan zijn:

- het losbreken van dislocaties van hun pinpunten,
- migratie van magnetische domeinen,
- het breken van cementiet in perliet of op korrelgrenzen zowel als breuk en het gedeeltelijk of geheel losscheuren van insluitels bij staal.

Akoestische activiteit die optreedt bij belastingen onder de vloeispanning wordt mogelijk veroorzaakt door het derde mechanisme; bij belastingen die de vloeigrens overschrijden is zowel het eerste als het laatste mechanisme zeer aannemelijk.

Over het algemeen geldt dat de akoestische activiteit van het materiaal afneemt naarmate dit taaier is en een meer afgeronde kristalstructuur vertoont.

Opname van signalen, die niet door akoestische emissie van het materiaal zelf worden veroorzaakt, moet zoveel

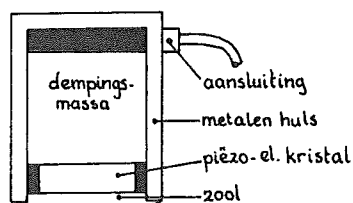
mogelijk worden voorkomen zodat geen verwarring over de interpretatie van de signalen ontstaat.

Ruis of storing kan in drie categorieën worden verdeeld;

- mechanische trillingen en omgevingsgeluid; dit kan bijvoorbeeld worden veroorzaakt door de gebruikte trekbank,
- trillingen afkomstig van de meetopstelling, zoals wrijving tussen proefstuk en opstelling,
- elektronische storing.

Storingen van de eerste categorie blijken het meest voor te komen. Filtering van de signalen kan worden bewerkstelligd door sensoren te gebruiken met een dusdanig frequentiebereik, dat de ongewenste signalen daarbuiten, en de van het materiaal afkomstige akoestische emissie daarbinnen valt. De frequentie van het signaal is hierbij de discriminerende factor; de pulsen van akoestische emissie zijn over het algemeen zeer energierijk. De lagere frequenties afkomstig van storingen worden dan door het op hoge frequenties afgestemde meetsysteem niet opgenomen. Behalve tasterkeuze is filtering ook mogelijk door de keuze van in te stellen drempelwaarde, evenals de versterkingsfactor van de signalen.

De pulsen die uitgezonden worden door het materiaal veroorzaken kleine verplaatsingen aan het oppervlak van het lichaam. Deze verplaatsingen worden gedetecteerd met behulp van een taster. Een schematische afbeelding van een rechte taster staat in figuur 2.1. De meest gebruikte sensor is



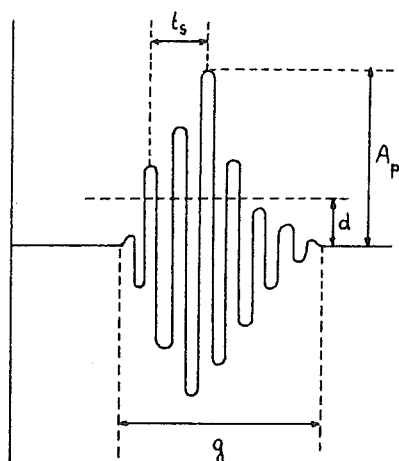
figuur 2.1: Schematische weergave van een rechte taster.

het piëzo-electrisch loodzirkonaat-titanaat-kristal, dat het vermogen bezit om een dikteverandering om te zetten in een elektrische spanningsverandering en vice versa. Een dikteverandering van het kristal ten gevolge van de geluidsdruk van een puls kan zo worden toegevoegd aan een elektronisch meetsysteem.

Het kristal bevindt zich in een metalen huls, met een uitgang voor de

kabel die de signalen doorvoert aan het meetsysteem. Een isolerende zool scheidt het kristal van het te onderzoeken materiaal. Op het kristal is een dempings-massa bevestigd die de trillingsduur van het kristal bekort, waardoor overlapping van signalen wordt voorkomen.

Een schematische weergave van een akoestisch signaal staat in figuur 2.2.



figuur 2.2: Schematische weergave van een akoestisch signaal.

A_p = piekamplitude
 t_p = stijgtijd
 d^s = drempelwaarde
 g = gebeurtenis

aantal counts = 4

Alfabetisch gerangschikt volgen enkele akoestische begrippen:

count	; het aantal counts is het aantal keren dat de amplitude, per puls, boven de ingestelde drempelwaarde uitkomt.
energie	; de energie van één puls wordt berekend door de pulsfunctie te kwadrateren en van die curve het oppervlak te berekenen. De totale energie van een akoestische opname is een sommatie van de afzonderlijke puls-energieën, en deze is afhankelijk van het aantal gebeurtenissen tijdens een beproeving en de hoogte van de piek-amplitude.
gebeurtenis	; één gebeurtenis is één puls, en wordt ook wel aangeduid met "event".
piek-amplitude	; de piek-amplitude is de maximale amplitude van een puls, maar wordt doorgaans aangeduid als de amplitude van de betreffende puls.
stijgtijd	; de stijgtijd, ook wel aangeduid met "rise-time", van de puls is de duur van eerste count tot piek-amplitude van een puls.

Het is mogelijk om tijdens de beproeving het verloop van de akoestische emissie te volgen, doordat de duur van de stijgtijd, de grootte van de amplitude, de hoeveelheid energie en het aantal gebeurtenissen en counts op een beeldscherm worden getoond. Als men een verband wil leggen tussen uitgezon-

den pulsen en J-integraal, of enige andere karakteristieke waarde, dan is het nodig een vast patroon te vinden in de akoestische emissie waarmee het scheurverloop kan worden gevolgd. In dit geval wordt het aantal uitgezonden pulsen tijdens de beproeving tegen de tijd uitgezet om tot dit patroon te komen.

2.2

d e g r a f i s c h e J_{IC} - b e p a l i n g

2.2.1

plastisch-scharnier vorming en blunting

Wanneer een driepuntsbuigstaaf met een vermoeiingsscheur toenemend wordt belast, ontstaat, na het elastisch deformeren van de staaf, plastische deformatie van het materiaal aan de vermoeiingsscheurtip.

Het hierdoor versterkte materiaal aan de tip in het midden van het scheurfront ondervindt weerstand van het omringende, nog niet plastisch gedeformeerde materiaal, zodat aan de scheurtip een drie-assige spanningstoestand ontstaat (plane strain). Aan de beide uiteinden van het scheurfront heerst een twee-assige spanningstoestand (plane stress). Naarmate de belasting toeneemt, neemt de grootte van het plastisch scharnier toe. Eén van de voorwaarden waarbij de J_{IC} bepaald moet worden is dat het plastisch scharnier door het hele ligament van het proefstuk gevormd is; hierdoor is het mogelijk de uitdrukking voor de J-integraal als volgt te vereenvoudigen.

Een uitdrukking voor de J-integraal, als bepaald bij constante doorbuiging is:

$$J = - \int_0^v \frac{\partial P}{\partial a} . dv \quad (2)$$

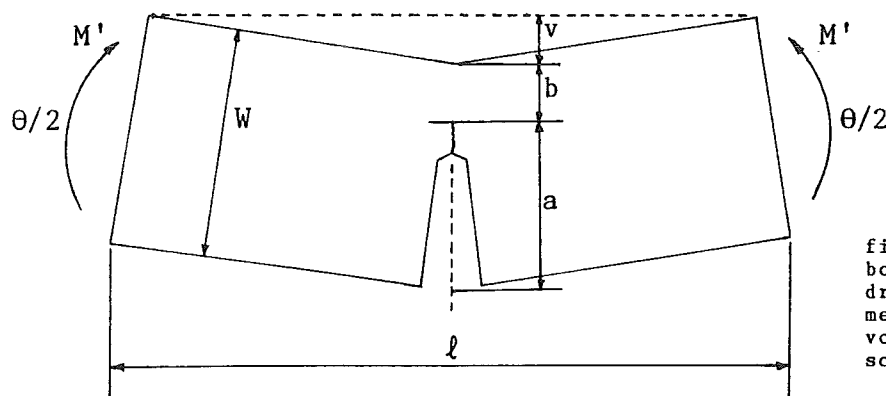
In geval van een volledig gevormd plastisch scharnier mag de doorbuiging van het proefstuk, v , worden geschreven als:

$$v = \frac{\theta_t \cdot l}{4} \quad (3)$$

In figuur 2.3 staan de gebruikte symbolen aangegeven.

In (3) is θ_t de totale doorbuigingshoek ten gevolge van het

*Riet
Paris
Merke
Waarom!*



figuur 2.3: Symboolgebruik bij driepuntsbuigstaaf met volledig gevormd plastisch scharnier.

opgelegde moment per dikte-eenheid, M' . De belasting per dikte-eenheid, P , wordt geschreven als:

$$P = \frac{4 \cdot M'}{1} \quad (4)$$

Als tevens in aanmerking wordt genomen dat het ligament b gelijk is aan het verschil tussen proefstukhoogte en scheurlengte ($W-a$), dan kan (2) met behulp van (3) en (4) geschreven worden als:

$$J = - \int_0^{M'} \frac{\partial \theta_t}{\partial b} \cdot dM' \quad (5)$$

De totale doorbuigingshoek, θ_t , bestaat uit de sommatie van de buiging van een ongescheurd proefstuk, θ_{nc} , en de rotatie van het proefstuk die veroorzaakt wordt door aanwezigheid van de scheur, θ_c . Aangenomen wordt dat dit eerste verwaarloosbaar klein is. Tevens wordt aangenomen dat θ_c een functie is van M'/b^2 . Met deze twee aannamen is het mogelijk een uitdrukking voor $\partial \theta_t / \partial b$ te vinden:

$$- \frac{\partial \theta_t}{\partial b} = \frac{2M'}{b} \cdot \frac{\partial \theta_c}{\partial M'} \quad (6)$$

Met behulp van (6) kan (5) worden geschreven als:

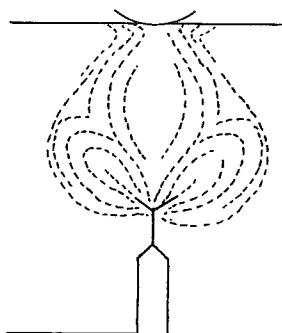
$$J = \int_0^{M'} \frac{2M'}{b} \cdot \frac{\partial \theta_c}{\partial M'} \cdot dM' = \frac{2}{B(W-a)} \int_0^{\theta_c} M \cdot d\theta_c$$

ofwel:

$$J = \frac{2}{Bb} \cdot \int_0^v P \cdot dv \quad (7)$$

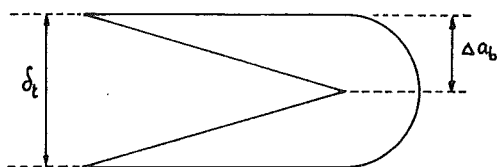
Wanneer het ligament b als plastisch scharnier fungeert, is het mogelijk deze laatste formule te gebruiken voor de bepaling van de J-integraal.

Plastisch-scharnier vorming is visueel herkenbaar aan een ui-vormig contour boven de vermoeiingsscheurtip. Bij het vormen van het scharnier treedt insnoering van het materiaal op. Tijdens of na het voltooiën van het plastisch scharnier worden glijlijnen zichtbaar in de lobben van de ui-contour. Deze treden op onder hoeken van $\pm 45^\circ$ op de richting van de vermoeiingsscheur (figuur 2.4). Op deze glijlijnen wordt teruggekomen bij de bespreking van blunting (par.4.1.2).



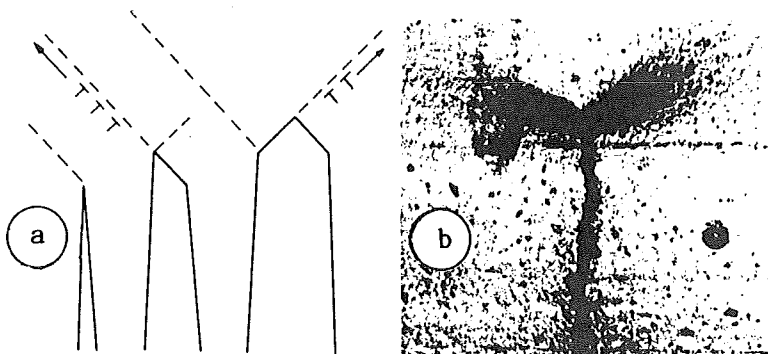
figuur 2.4: Schematische weergave van het glijlijn-patroon aan de scheurtip.

Aan de vermoeiingsscheurtip treedt, onder belasting, blunting op. Hierbij wordt een half-cirkelvormige holte gevormd, waardoor de tip wordt afgebot. De straal van deze holte is kleiner dan of gelijk aan de helft van de δ_t op dat moment (zie figuur 2.5).



figuur 2.5: Schematische weergave van blunting aan de scheurtip.

In de literatuur worden verscheidene theorieën naar voren gebracht, waarmee getracht wordt het blunting-mechanisme te beschrijven. In lit.3 en 4 wordt blunting toegeschreven aan het afschuiven van het materiaal aan de scheurtip (zie figuur 2.6.a). In lit.5 wordt het model van blunting door afschuiving geïllustreerd met behulp van figuur 2.6.b. Dit toont het glijlijnen-model dat in figuur 2.4 schema-

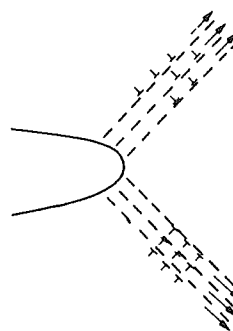


figuur 2.6: a) Illustratie van het blunting-proces via afschuiving van het materiaal aan de scheurtip; de glijlijnen staan in hoeken van 45° op de richting van de scheur. b) Glijlijn-patroon aan de tip van een scheur.

tisch staat aangegeven.

Lit.6 schrijft blunting toe aan dislocatie-emissie vanuit de scheurtip (figuur 2.7).

Door het afbotten van de oorspronkelijke scherpe scheurtip wordt een schijnbare scheuruitbreiding veroorzaakt. De eigenlijke, stabiele, scheuruitbreiding begint door het breken van het materiaal tussen een holte en de afgebote scheurtip. Dit wordt onder andere behandeld in lit.7.



figuur 2.7: Blunting van een scherpe scheurtip door dislocatie-emissie, lit.6.

2.2.2 toegepaste grafische methoden

Bij de standaard J_{IC} -bepaling is het probleem van schijnbare scheuruitbreiding als gevolg van blunting opgevangen door de invoering van de "blunting-line".

In het lineaire gebied van de P, v -curve, voordat scheuri-nitiatie plaatsvindt, wordt uitgegaan van de relatie $J = \delta_t \cdot \sigma_y$ (op deze lineaire relatie wordt later in deze paragraaf teruggekomen). Als hierbij wordt aangenomen dat de hoeveelheid schijnbare scheuruitbreiding Δa_b gelijk is aan de helft van de δ_t , dan volgt daaruit een rechte, de blunting-line:

$$J = 2 \cdot \Delta a \cdot \sigma_y \quad (8)$$

Deze blunting-line wordt in de $J, \Delta a$ -grafiek aangegeven. Resultaten van beproevingen die links van deze lijn liggen worden verondersteld te zijn veroorzaakt door blunting.

Naast het gebruik van de blunting-line worden nog twee methoden overwogen om de invloed van blunting op de gemeten scheuruitbreiding teniet te doen.

de $\delta_t, \Delta a$ -relatie

Aangenomen wordt dat de maximale scheuruitbreiding ten gevolge van blunting, Δa_b , gelijk is aan de helft van de scheuropening δ_t .

Deze maximale scheuruitbreiding wordt bepaald door in de $\delta_t, \Delta a$ -grafiek een rechte, $\delta_t = 2 \cdot \Delta a$, te trekken. De grafiek wordt samengesteld uit de beproevingsresultaten van meerdere proefstukken. Het snijpunt van rechte en grafiek

geeft het punt van maximale scheuruitbreiding door blunting aan. De bij deze scheuruitbreiding horende J zal de waarde van de J -integraal bij scheurinitiatie zijn en deze wordt gevonden middels de regressie-curve.

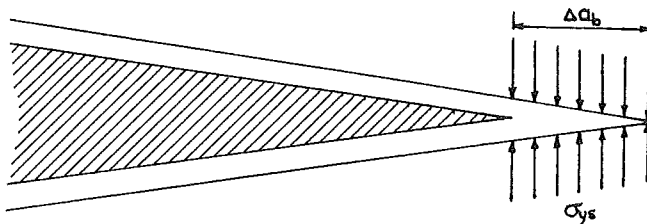
De op deze wijze bepaalde J -waarde wordt de J_z genoemd.

de M-lijn

In de literatuur wordt veelvuldig melding gemaakt van het lineaire verband tussen de J -integraal en de δ_t .

In de Lineair Elastische Breukmechanica wordt de Dugdale-benadering gebruikt om dit verband aan te tonen.

Hierin wordt aangenomen dat alle plastische deformatie optreedt in een materiaal-strip vlak voor de scheur (strip-yield model). Figuur 2.8 geeft de veronderstelde spanningsverdeling over de schijnbare scheuruitbreiding weer.



figuur 2.8: Spanningsverdeling over het gebied van schijnbare scheuruitbreiding, volgens de Dugdale-benadering.

Met behulp van deze spanningsverdeling wordt in lit.8 de volgende uitdrukking voor de δ_t bereikt:

$$\delta_t = K_1^2 / E \cdot \sigma_y \quad (9)$$

Hierin is K_1 de spannings-intensiteitsfactor.

In geval van een twee-assige spanningstoestand geldt dat J gelijk is aan G (elastic energy release rate) zodat voor J geschreven kan worden:

$$J = G = K_1^2 / E \quad (10)$$

Door combinatie van (9) en (10) wordt de volgende relatie gevonden:

$$J = \delta_t \cdot \sigma_y \quad (11)$$

Bij verregaande plastische deformatie van het materiaal verliest dit Dugdale-model zijn geldigheid.

In de literatuur zijn verscheidene bevestigingen te vinden

bevestigd met vopg. (plast. scharnier)

van een lineair verband tussen J en δ_t bij verregaande plastische deformatie van het materiaal, geschreven als:

$$J = M \cdot \sigma_y \cdot \delta_t \quad (12)$$

In lit.9 wordt een verband gevonden tussen M en de mate van versteviging van het materiaal. Uit lit.10 blijkt dat belasting, geometrie van de proefstukken en materiaal eigenschappen invloed hebben op M .

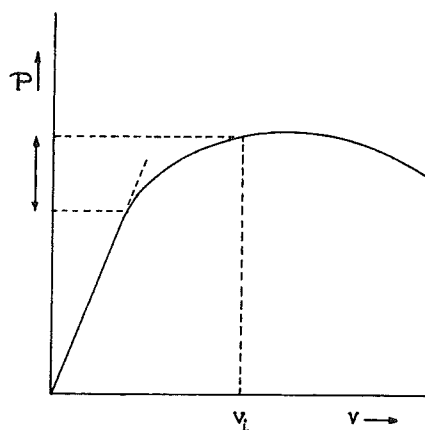
In lit.11 en 12 wordt de geldigheid van een lineaire relatie tussen J en δ_t bij scheuruitbreiding experimenteel bewezen.

In lit.13 wordt met de eindige-elementen methode een theoretische beschouwing gegeven, die een lineair verband tussen J en δ_t aantoont bij plastische deformatie van een onverstevigd materiaal. Dit wordt experimenteel bevestigd door lit.14.

Om gegevens te verkrijgen die bruikbaar zijn in het geval van blunting, wordt de J, δ_t -relatie onderzocht die specifiek hierop betrekking heeft. Hiertoe worden in het P, v -gebied twee grenzen gehanteerd:

- ondergrens: De J_{1C} kan pas dan worden bepaald, wanneer er een plastisch scharnier door het hele ligament van het proefstuk is gevormd. Dit sluit het lineaire gebied van de P, v -curve uit.
- bovengrens: De δ_t is gedefinieerd als scheuropening. Als de scheur groeit moet het meetpunt van de scheuropening dus méé verplaatsen. Omdat dit niet mogelijk is, wordt de bovengrens bepaald door het moment van scheurinitiatie; de hierna gemeten δ_t -waarden kunnen niet voor het J, δ_t -verband worden gebruikt. In dit geval wordt het moment van scheurinitiatie met AE-opnamen bepaald. Bovendien zal door scheuruitbreiding de belasting van het nieuw gevormde scheuroppervlak nul zijn: er vindt dus een belastingsafname van het materiaal plaats. In dat geval is de J -integraal niet gedefinieerd.

In het door deze grenzen besloten gebied op de P, v -curve treedt blunting op (zie figuur 2.9). Het verband tussen J en δ_t zal bepaald worden door één proefstuk aan een toenemende belasting te onderwerpen, zodat scheuruitbreiding ontstaat. Hierbij wordt zowel de scheuropening v' als de doorbuiging v tegen de belasting uitgezet. Met behulp van



figuur 2.9: Het belastingsgebied waarvoor de relatie tussen J en δ_t bepaald wordt, wordt enerzijds begrensd door het lineaire gebied van de P, v -curve, anderzijds door de bij v_t behorende belasting. Hierbij is v_t de middels AE-opnamen bepaalde doorbuiging van het proefstuk waarbij scheurinitiatie optreedt.

het P, v -diagram en de AE-opname wordt de begrenzing van het belastingsgebied vastgesteld en voor meerdere, binnen dat gebied vallende, v -waarden worden de δ_t -waarden bepaald.

De J wordt berekend voor de in het begrensde gebied vallende v -waarden. Door de J - en δ_t -waarden in een grafiek uit te zetten wordt, uit de gegevens van de beproeving van één proefstuk, de M -waarde voor het materiaal bepaald. Deze M -waarde zal gebruikt worden om een blunting-line, voortaan naar verwezen als M -lijn, in het $J, \Delta a$ -diagram aan te geven volgens de relatie:

$$J = M \cdot \sigma_y \cdot \delta_t \quad (12)$$

Het snijpunt van regressie-curve en M -lijn wordt de J_{QM} genoemd.

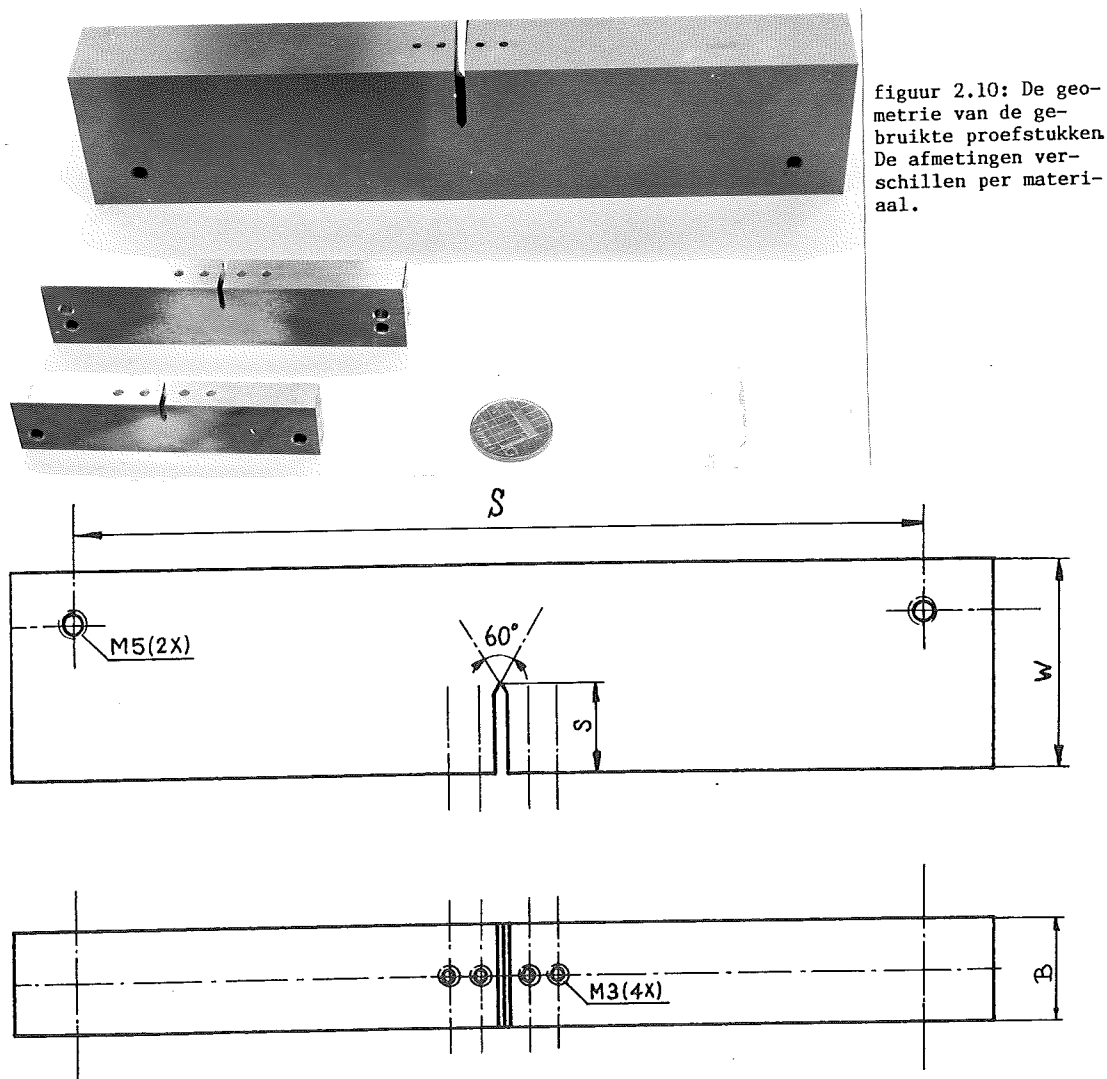
De δ_t wordt bepaald volgens de norm, opgesteld door Britisch Standard (lit.15).

2.3 b e p r o e v i n g v a n d e m a t e r i a l e n

2.3.1 wijze van uitvoering

De beproeving geschiedt volgens de richtlijnen van zowel ASTM E-813 (lit.2) als BS 5762 (lit.15) zodat voor elk materiaal een standaard J_{IC} kan worden bepaald. Tevens is het dan mogelijk geldige σ_t -waarden te berekenen waarmee een eventueel verband met de J-integraal kan worden bepaald.

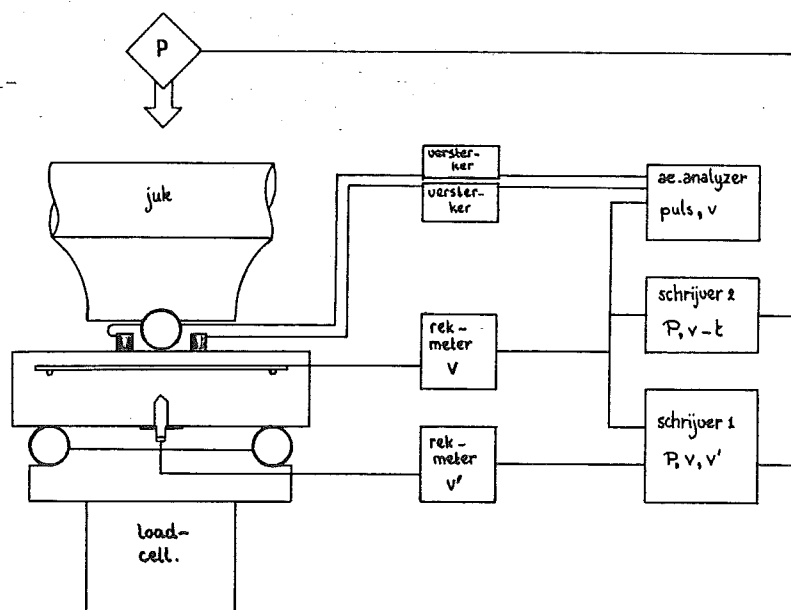
Er wordt gebruik gemaakt van driepuntsbuigproefstukken, als afgebeeld in figuur 2.10.



De proefstukken zijn van tevoren vermoeid op een vermoeiingsbank (Schenck, 2,5 of 10 ton) zodat een vermoeiingscheur met een scherpe tip in het materiaal aanwezig is. Bij de beproeving ondervindt het proefstuk een constant toenemende, door een trekbank (Instron, model 1115 TT-DM) opgelegde, doorbuiging. Hierdoor neemt de belasting van het proefstuk toe, hetgeen resulteert in plastische deformatie, scheurinitiatie en scheurgroei.

In de zijkant van het proefstuk zijn twee schroefgaten aangebracht, waarmee twee schroeven zodanig bevestigd kunnen worden, dat zij een bladveer kunnen dragen. Deze bladveer is aangesloten op een rekmeter en geeft de doorbuiging van het proefstuk weer. Het openen van de scheur, ten gevolge van de toenemende belasting, wordt gemeten met behulp van een bij de kerf aangebrachte displacement gauge (clipgauge). Een schematische weergave van de meetopstelling geeft figuur 2.11.

figuur 2.11.: Schematische weergave van de meetopstelling.

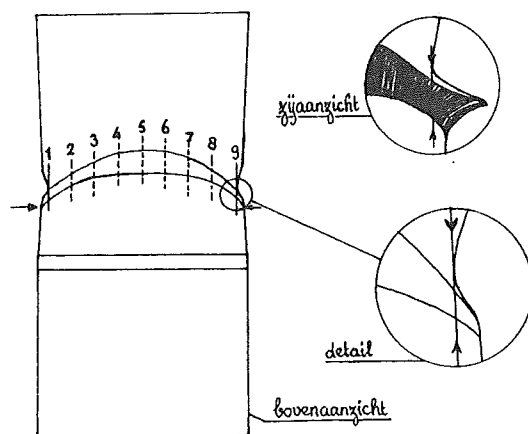


Zowel doorbuiging als scheuropening worden tijdens de beproeving uitgezet tegen de belasting. De doorbuiging wordt naderhand gecorrigeerd voor de rolindrukking: de indrukking van het materiaal door de rol van de trekbank (zie par.4.2.1). Hiertoe wordt een correctiefactor bepaald uit het belasting-doorbuigings-diagram van een proefstuk zonder kerf.

Aan beide zijden van de kerf in het proefstuk is een tas-

ter bevestigd; van de door de tasters tijdens de proef ondervonden trillingen worden gegevens als amplitude, aantal counts of pulsen, energie en dergelijke door een AE-analyzer geregistreerd. Deze opnamen kunnen naderhand per kanaal, zowel als gecombineerd, bekeken worden. Op een tweede schrijver wordt het verloop van doorbuiging en belasting in de tijd geregistreerd.

Na de beproeving wordt het oppervlak van de belasting-doorbuigingscurve bepaald door een aantal gecorrigeerde meetpunten toe te voeren aan een sommatie-proces dat stapsgewijs, per meetpunt, de J-integraalwaarde berekent. Het proefstuk wordt gebroken, door middel van bros-breken op lage temperatuur dan wel door vermoeiing, en eigenschappen als breedte, hoogte, scheuruitbreiding, vermoeiingsscheurlengte en dergelijke worden opgemeten. De scheuruitbreiding wordt bepaald door middel van negen meetpunten, verdeeld over de breedte van het proefstuk, zoals voorgeschreven wordt door de ASTM-norm. Bij de beproefde materialen waren er enkele, die een verregaande insnoering vertoonden, hetgeen de meting van de scheuruitbreiding aanzienlijk bemoeilijkt. Voor deze materialen is het probleem van toenemende insnoering bij toenemende scheuruitbreiding ondervangen door het gebied van insnoering uit te sluiten bij meting van de scheuruitbreiding (zie figuur 2.12).



figuur 2.12: Schets ter verduidelijking van de wijze waarop de scheuruitbreiding wordt gemeten bij een ingesnoerd proefstuk. Op de genummerde breedten wordt de scheuruitbreiding gemeten: twee extra metingen voor de vermoeiingsscheurlengte worden verricht op de plaatsen, aangegeven met een pijl.

Hierbij worden negen metingen verricht in het gebied waar scheuruitbreiding optreedt. Twee extra metingen worden op de uiterste punten gedaan; niet voor de scheuruitbreiding maar alleen voor de lengte van de vermoeiingsscheur met kerf. Op deze manier wordt voldaan aan de vereiste negen

meetpunten, als voorgeschreven door de ASTM-norm.

Alle materialen zijn beproefd met gelijkvormige proefstukken, maar, zoals figuur 2.10 toont, per materiaal wordt een afwijkend stel op elkaar afgestemde afmetingen gebruikt.

2.3.2 gebruikte akoestische apparatuur

Er wordt gebruik gemaakt van PAC-breedbandtasters W68D (nummers WD183 en WD200), voorzien van een piëzo-electrisch kristal (PA-1) met een diameter van 12,7 mm, en een keramische zool. Het frequentie-bereik van de taster loopt van 600 tot 1000 kHz. De totale diameter van de taster is 17,46 mm.

De contactvloeistof is een hoge-temperatuur siliconenvet (Dow Corning).

Het signaal dat door de taster wordt uitgezonden wordt extern versterkt door een versterker, type 1220A (nummers 185 en 186). Deze versterker biedt de keuze uit een versterking van 40 of 60 dB. Het frequentie-bereik loopt van 20 tot 1200 kHz.

Het ruisniveau aan de ingang van de versterker bedraagt minder dan $2 \cdot 10^{-6}$ V.

Het extern versterkte signaal wordt, nogmaals gefilterd door versterking en drempelwaarde van de analyzer zelf, opgenomen op een floppie-disc met een maximaal geheugen van 5.400 gebeurtenissen.

De analyzer is een Four Channel AE-Analyzer 3400 (PAC). De drempelwaarde is hiermee variabel van 0,1V tot 0,9V met een stapgrootte van 0,1V en kan een factor 10 verhoogd worden.

De versterking is variabel van 0dB tot 21dB met een stapgrootte van 3dB; een extra versterking van 20dB kan aangebracht worden.

meetgegevens en -resultaten

De resultaten van de beproevingen worden per paragraaf gegeven, en wel als volgt;

- 3.1 De beproefde materialen en hun mechanische eigenschappen.
- 3.2 Per materiaal:
 - Een tabel met meetresultaten, gegevens voor de J-bepaling, de correctiefactor en de doorbuigings-snelheid.
 - De aan de hand van bovengenoemde tabel opgestelde regressie-curve, waarin tevens enkele andere J-waarden worden afgeleid; dit wordt toegelicht in par.2.2.2 en besproken in par.4.4.
 - De AE-opnamen van de proefstukken en een tabel met de uit deze opnamen afgeleide significante tijden, doorbuigingen en J-waarden.
- 3.3 Een tabel met materialen, proefstuknummers en meetwaarden die gebruikt zijn voor de bepaling van de M-waarden. Verdere gegevens voor de bepaling van de δ_t volgen in par.3.4. De uit de tabel opgestelde grafieken volgen na de tabel.
- 3.4 De tabellen met de benodigde gegevens voor de bepaling van het δ_t - Δa -verband en de grafieken waaruit de Δa_t -waarden zijn afgeleid volgens de methode behandeld in par.2.2.2.
- 3.5 Voor Fe510 en Fe510Nb is de doorbuiging van het proefstuk uitgezet tegen de insnoering. Dit wordt nader toegelicht in par.4.1.1.
- 3.6 Voor de materialen Fe510Nb, Al2024, Al7075, Fe510 en Ms58 volgen grafieken waarin de doorbuiging tegen de scheuruitbreiding is uitgezet. Dit wordt toegelicht in par.4.1.3.
- 3.7 De correctie-curven van Fe510 en een grafische weergave van het verband tussen correctiefactor en doorbuigingsnelheid. Dit wordt toegelicht in par.4.2.1.

3.8 Een tabel met de J-waarden als bepaald volgens drie grafische methoden (de J_0 , J_{QM} en J_z) en de J-waarde die bepaald is volgens de AE-opnamen, J_{ae} , voor alle beproefde materialen.

Ter bevordering van de overzichtelijkheid worden per materiaal de chemische samenstelling, P,v-curven, P,v-t-grafieken en de J-tabellen waarmee tot de gegevens van par.3.2 is gekomen, vermeld in een bijlage.

3.1

o n d e r z o c h t e m a t e r i a l e n

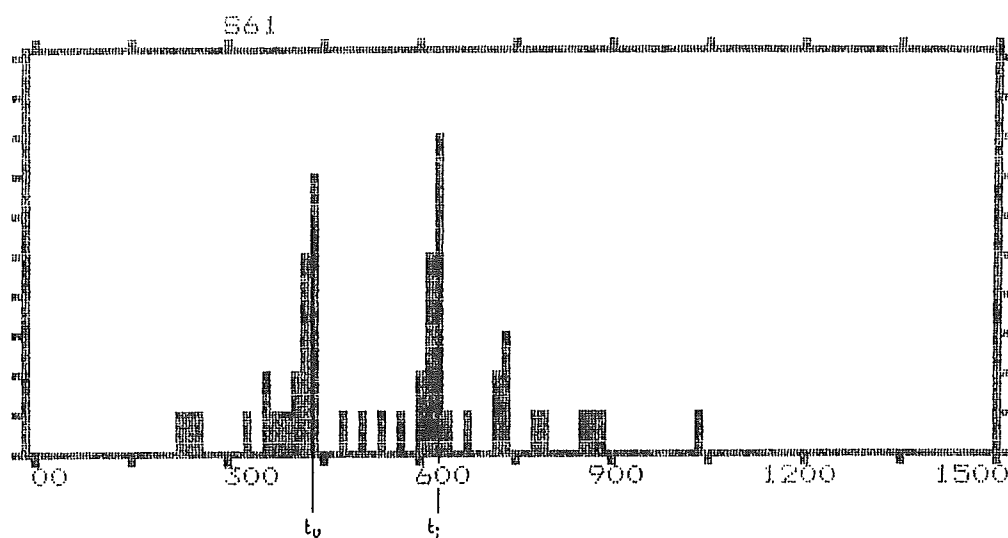
Tabel 3.1 vermeldt de beproefde materialen en de bijhorende mechanische eigenschappen als vloeï- en breukspanning, $\sigma_{0,2}$ en σ_{uts} , het gemiddelde van deze spanningen, σ_y , de elasticiteitsmodulus, E, en Poisson's ratio, ν .

Tabel 3.1: De beproefde materialen en hun mechanische eigenschappen. * ferritisch nodulair gietijzer.

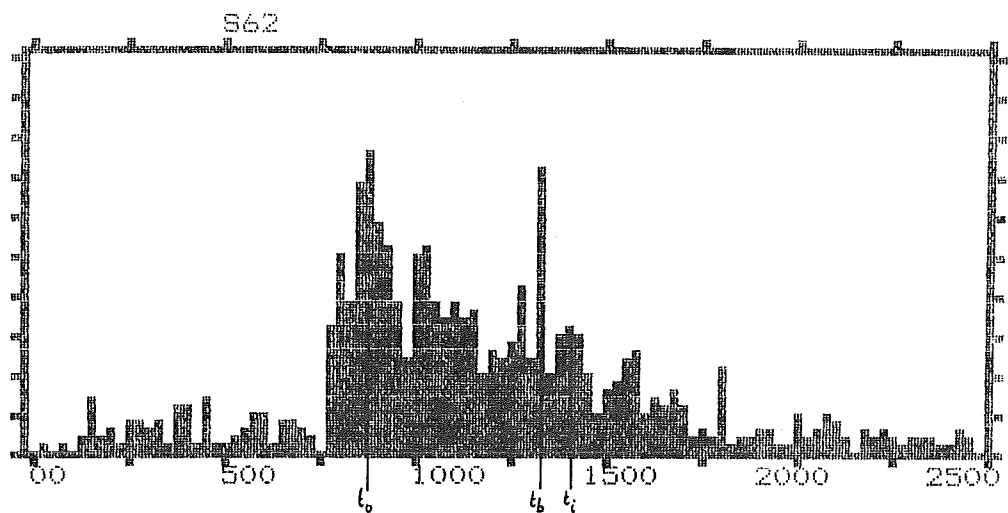
materiaal	σ_{uts}	σ_y	$\sigma_{0,2}$	E	ν
-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	kN/mm ²	-
Fe510	520	455	390	210,0	0,26
Al2024	469	397	324	72,4	0,33
Al7075	538	504	469	71,0	0,33
Fe510Nb	596	501	405	210,0	0,28
22NiMoCr37	630	560	490	211,0	0,28
T StE-355	490	413	336	210,0	0,28
Ms58	489	441	392	109,2	0,30
f.n.g *	435	374	313	157,0	0,26

Tabel 3.3 : De uit de AE-opnamen bepaalde significante tijden voor Fe510, alsmede de doorbuigingen en J-waarden. Uit de resultaten volgt;
 $v_i = 0,81 \text{ mm}$ en $J_{ae} = 85,1 \text{ N/mm}$,
 $v_v = 0,45 \text{ mm}$.

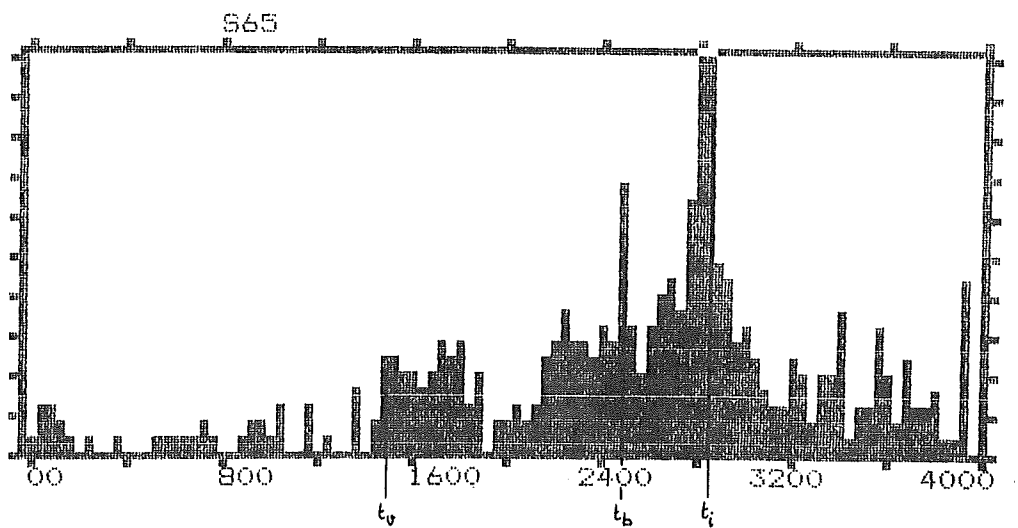
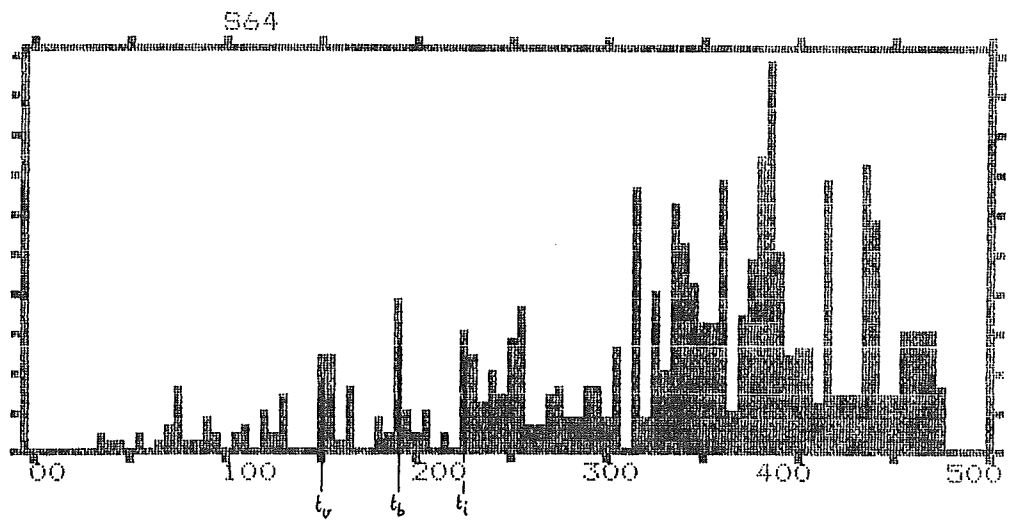
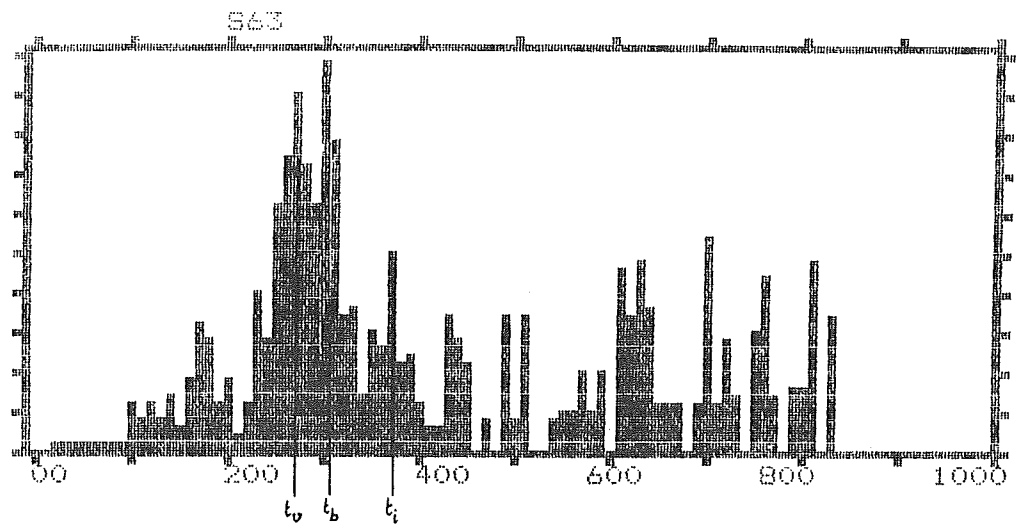
nr	t	v	P	v_c	J
-	sec	mm	kN	mm	N/mm
S61	420	0,417			
	-	-			
	642	0,763	7,04	0,740	76,94
S62	870	0,442			
	1330	0,783			
	1400	0,833	6,54	0,810	85,63
S63	268	0,500			
	307	0,616			
	368	0,813	8,07	0,767	87,15
S64	150	0,475			
	192	0,670			
	226	0,825	7,55	0,809	88,29
S65	1536	0,423			
	2496	0,725			
	2848	0,837	7,08	0,801	87,43



Een erg lage instelling en daarom maar weinig opnamen (54); het tweede maximum ontbreekt. In het lineair-elastisch deformatie-gebied is de proef even onderbroken, waarmee rekening moet worden gehouden bij aflezing van het v, t -diagram.



Vrij veel opnamen in het elastische- en vloeigebied van de P, v -curve omdat S62 een lagere maximale vermoeiingsbelasting had dan S61, zodat het materiaal minder verstevigd is en al vroeg reageert.



3.2.2
A12024

Tabel 3.4 : De resultaten verkregen uit de beproeving ter bepaling van de J-integraal volgens ASTM norm, de voorwaarden waaraan voldaan moet worden en meetgegevens als maten en scheuruitbreiding va de proefstukken van A12024.

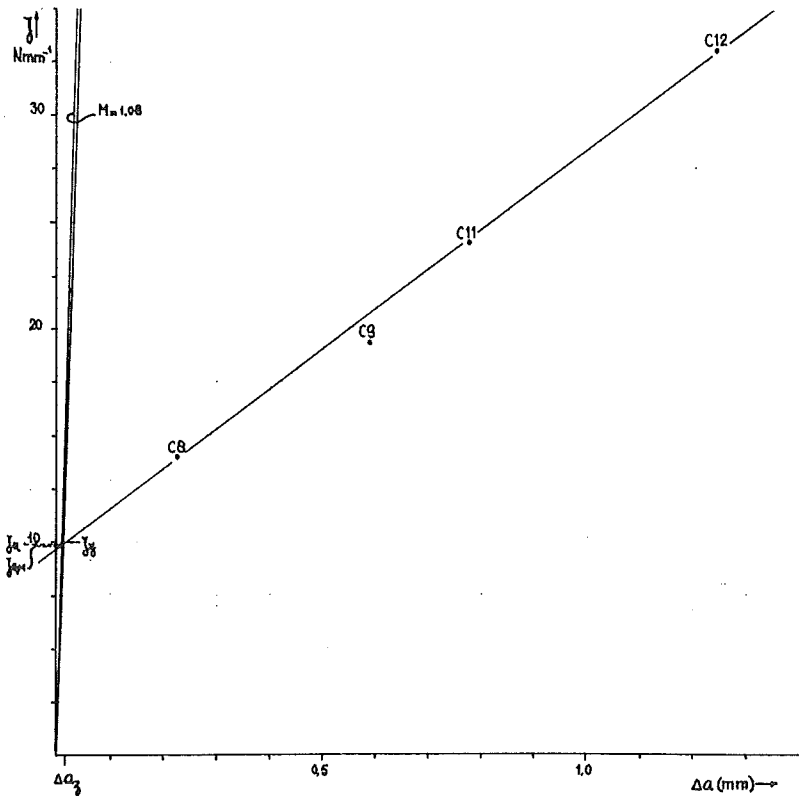
nr	B	W	a _o	b	a _o /W	k	k _t	Δa	G	v	J	z
-	mm	mm	mm	mm	-	-	-	mm	N	mm	N/mm	mm
C7	10,470	20,060	10,079	9,981	0,502	50,92	47,04-54,12	1,923	2760	0,606	34,763	1,313
C8	10,400	19,940	9,971	9,969	0,500	44,89	46,58-53,60	0,226	2735	0,350	13,947	0,527
C9	10,405	19,960	9,984	9,976	0,500	52,53	46,58-53,60	0,583	2741	0,460	19,318	0,730
C11	10,323	19,955	10,516	9,439	0,527	60,11	52,41-60,29	0,772	2434	0,520	24,041	0,908
C12	10,355	20,000	10,478	9,522	0,524	57,08	51,76-59,56	1,238	2485	0,595	33,074	1,250

f = 0,1 mm/min
cf = 13,18 nm/N
S = 80,0 mm
P_f = 2.000 N

z = 15.J/σ_y
k = E.B.v_i/P_i
G = 0,4.4.B.b².σ_y
3 S

voorwaarden ASTM:
k_t(min) < k < k_t(max)
0,5 < a_o/W < 0,75
B, b > z;
G > P_f

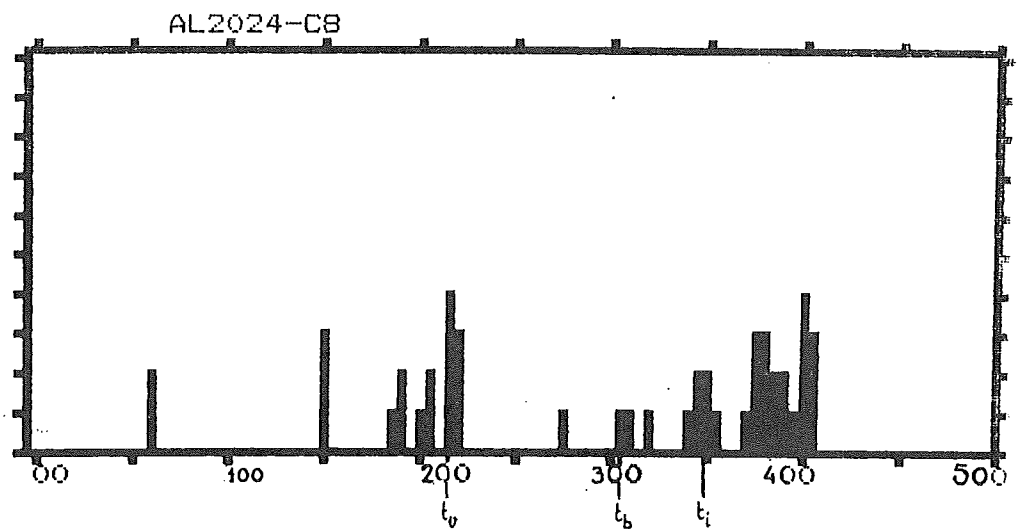
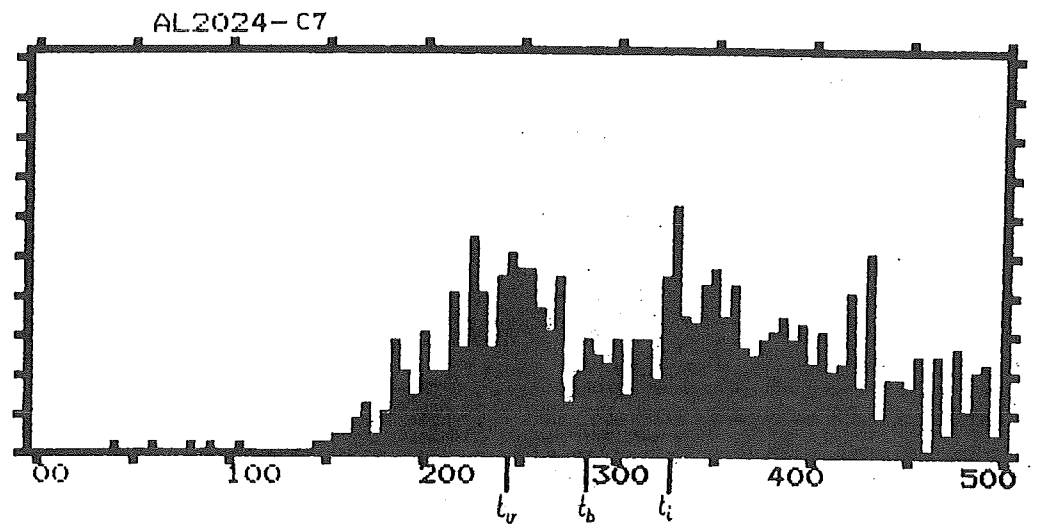
J_Q = J_{1C} mits:
B, b > 25.J_Q/σ_y
dJ/da < σ_y



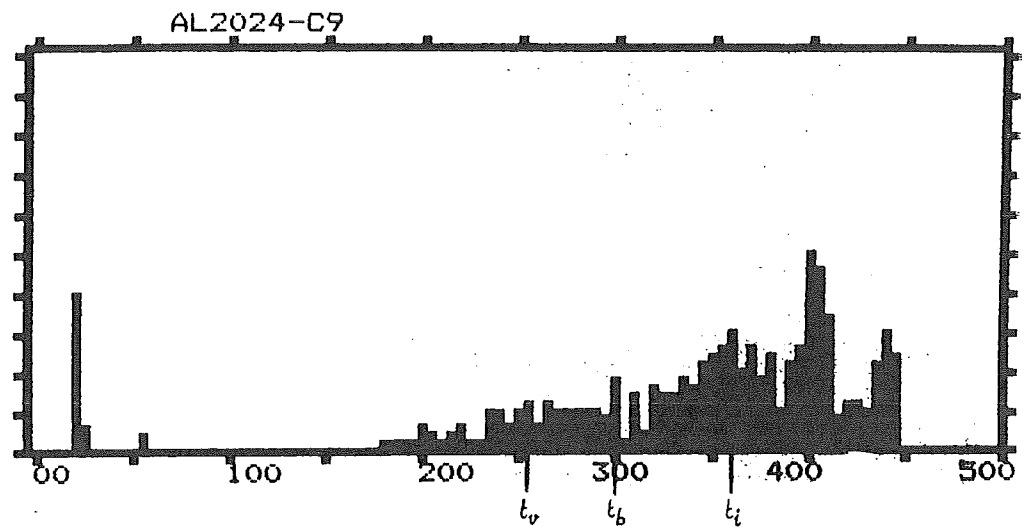
figuur 3.2: De regressie-curve van A12024. Benevens de J₀ (9,95 N/mm) staan aangegeven de J_z (10,0 N/mm) en de J_{QM} (9,90 N/mm).

Tabel 3.5 : De uit de AE-opnamen bepaalde significante tijden voor Al2024, alsmede de doorbuigingen en J-waarden. Uit de resultaten volgt; $v_i = 0,325$ mm en $J_{ae} = 9,98$ N/mm.

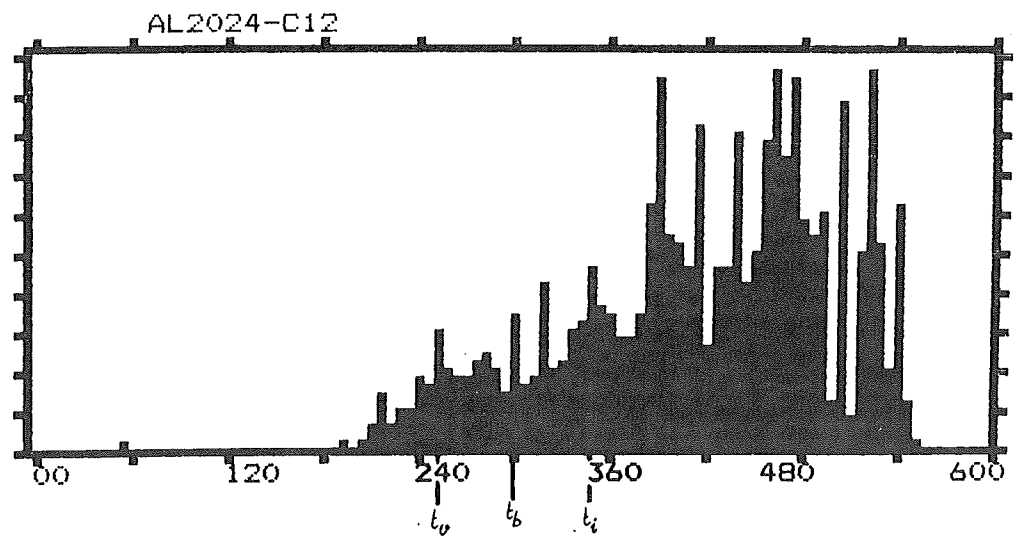
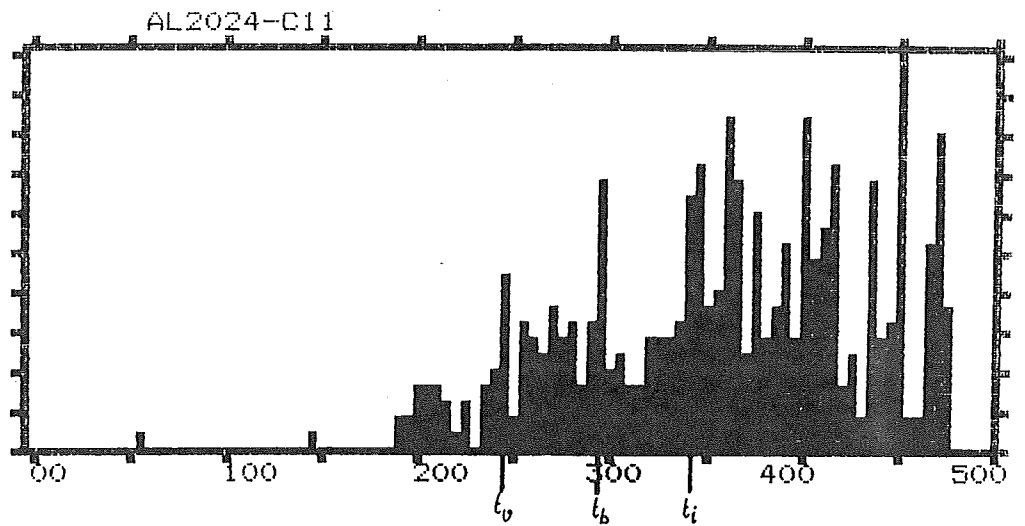
nr	t	v	P	v_c	J
-	sec	mm	kN	mm	N/mm
C 7	246	0,220			
	-				
	336	0,310	4,03	0,257	9,49
C 8	216	0,167			
	-				
	350	0,294	4,18	0,239	9,71
C 9	256	0,257			
	300	0,297	3,53		
	360	0,357	4,30	0,300	10,67
C11	246	0,248			
	294	0,295	3,13		
	346	0,350	3,70	0,301	10,15
C12	254	0,206			
	300	0,255	2,98		
	353	0,315	3,63	0,267	9,90



Het piekje op 50 sec. is veroorzaakt door een tikje, dat gegeven werd om te controleren of wel werd opgenomen. Bij 150 sec. werd de taster van het derde kanaal op het proefstuk aangedrukt, want deze had losgelaten. De maxima zijn aan de hand van de opname van C7 gekozen.



In het begin van de beproeving treedt een piek op omdat een taster wordt aangedrukt.



3.2.3
A17075

Tabel 3.6 : De resultaten verkregen uit de beproeving ter bepaling van de J-integraal volgens ASTM-norm, de voorwaarden waaraan voldaan moet worden en meetgegevens als maten en scheuruitbreiding van de proefstukken van A17075.

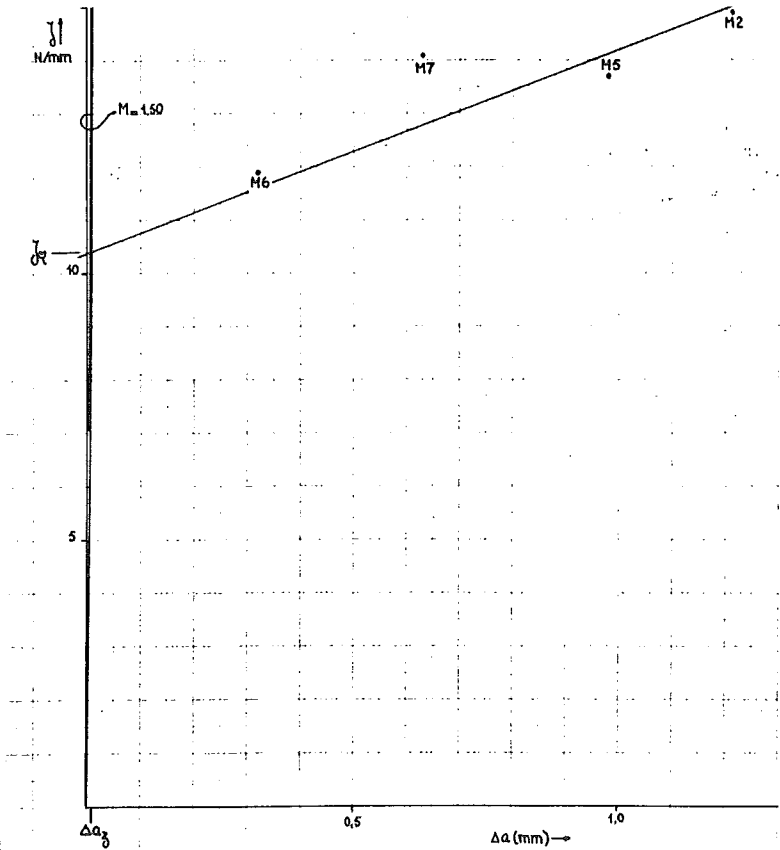
nr	B	W	a _o	b	a _o /W	k	k _t	Δa	G	v	J	z
-	mm	mm	mm	mm	-	-	-	mm	N	mm	N/mm	mm
M1	12,904	24,944	12,783	12,161	0,512	-	49,08-56,47	0,614	6035	0,483	20,168	0,600
M2	12,900	24,910	12,459	12,451	0,500	51,35	46,58-53,60	1,210	6324	0,448	14,899	0,443
M5	12,955	24,850	12,558	12,292	0,505	52,27	47,72-54,90	0,980	6190	0,431	13,688	0,407
M6	12,915	24,975	13,381	11,594	0,536	59,34	54,50-62,70	0,319	5490	0,397	11,884	0,354
M7	12,955	24,980	13,351	11,629	0,534	57,60	53,99-62,12	0,628	5540	0,410	14,108	0,420
M8	12,935	24,915	12,863	12,052	0,516	52,39	49,90-57,41	1,581	5941	0,466	16,627	0,495

S = 100,0 mm
f = 0,05 mm/min
cf = 10,60 nm/N
P_f = 5.200 N

$z = 15 \cdot J / \sigma_y$
 $k = E \cdot B \cdot v_i / P_i$
 $G = 0,4 \cdot \frac{4 \cdot B \cdot b^2 \cdot \sigma_y}{3 \cdot S}$

voorwaarden ASTM:
 $k_t(\min) < k < k_t(\max)$
 $0,5 < a_o / W < 0,75$
 $B, b > z; G > P_f$

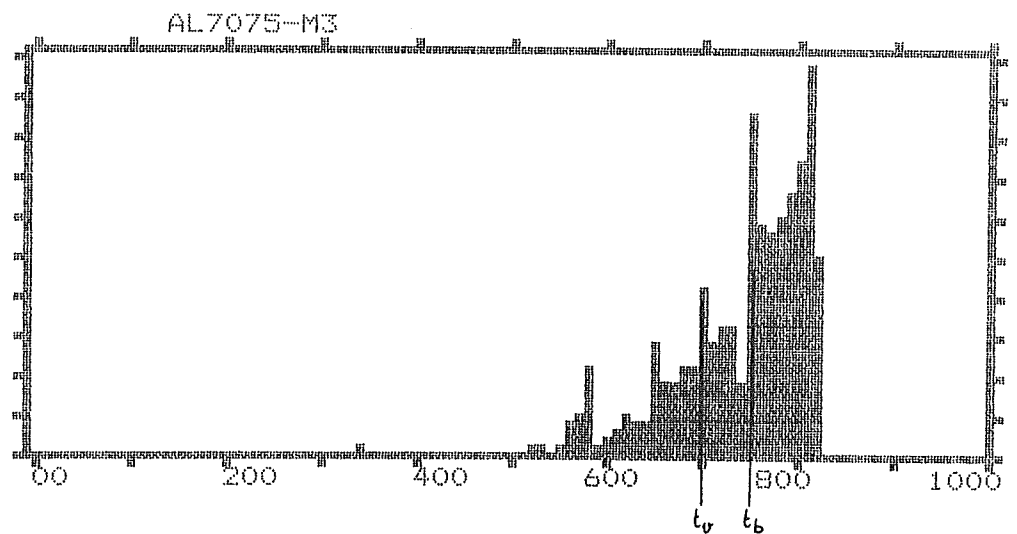
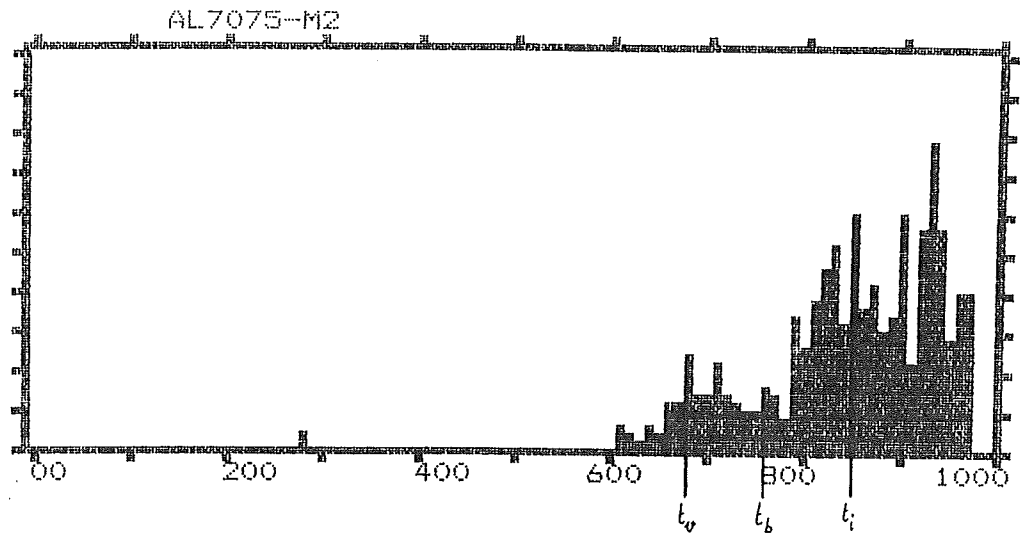
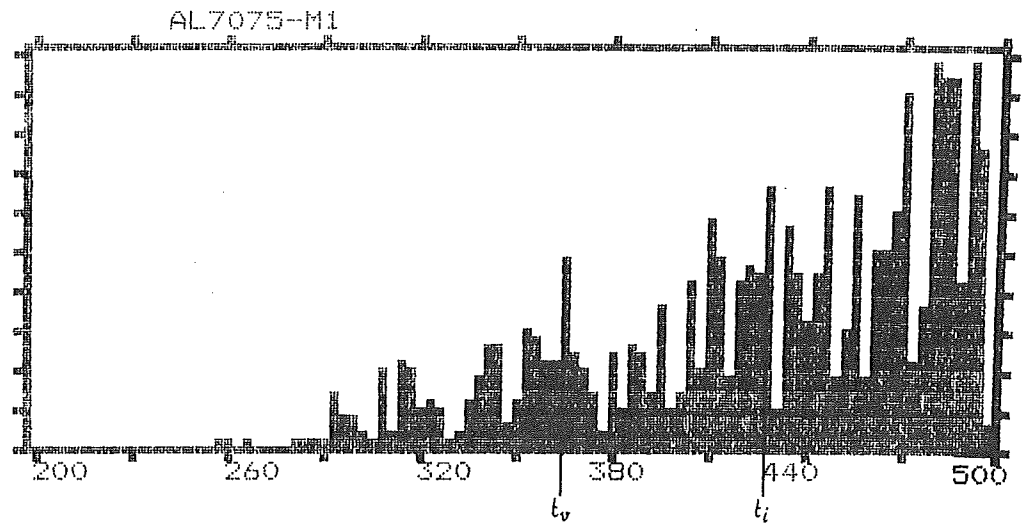
$J_Q = J_{IC}$ mits:
 $B, b > 25 \cdot J_Q / \sigma_y$
 $dJ / da < \sigma_y$



figuur 3.3: De regressie-curve van A17075. Hierin staat de J_Q (10,4 N/mm) aangegeven, maar om het geheel leesbaar te houden niet de J_{QM} (10,38 N/mm) noch de J_Z (10,4 N/mm).

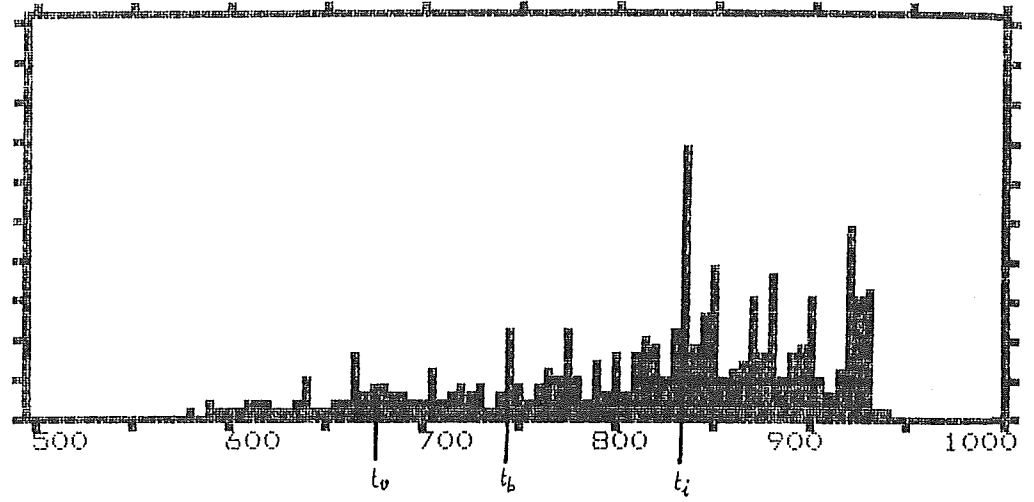
Tabel 3.7 : De uit de AE-opnamen bepaalde significante tijden voor A17075, alsmede de doorbuigingen en J-waarden. Uit de resultaten volgt; $v_i = 0,355$ mm en $J_{ae} = 9,61$ N/mm.

nr	t	v	P	v_c	J
-	sec	mm	kN	mm	N/mm
M1	314,1	0,227			
	426,2	0,337	5,30	0,281	9,95
M2	687,9	0,290			
	768,1	0,328	4,75		
	860,2	0,376	5,33	0,320	10,02
M3	700,0	0,340			
	741,0	0,362	4,43		
M5	677,8	0,290			
	745,0	0,320	4,60		
	838,1	0,368	5,32	0,312	9,52
M6	682,0	0,285			
	732,9	0,312	4,13		
	796,0	0,345	4,58	0,297	8,85
M7	673,9	0,258			
	755,1	0,300	4,34		
	830,1	0,339	4,87	0,287	9,45
M8	650,0	0,263			
	731,9	0,303	4,35		
	856,0	0,365	5,23	0,310	9,88

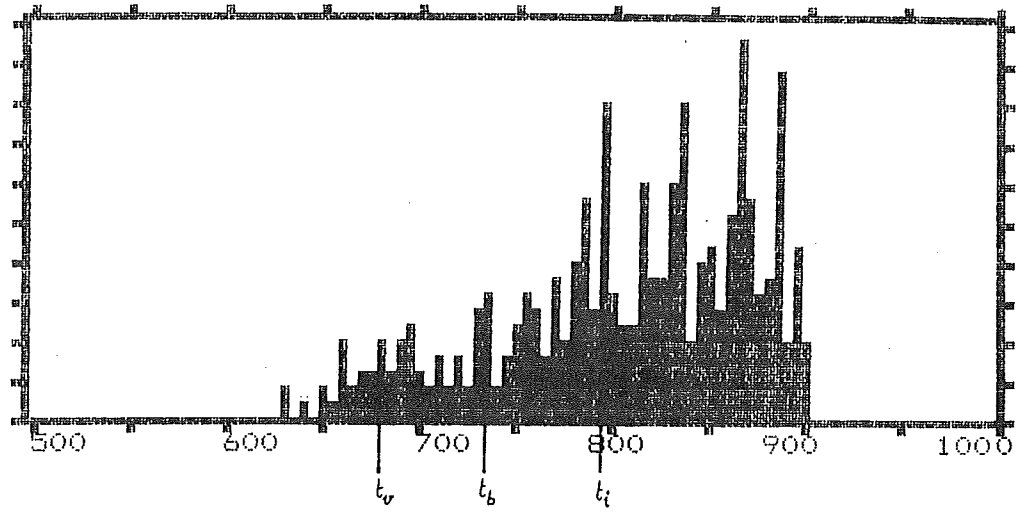


De opname is gestopt tijdens aanloop van het derde maximum; het breukvlak vertoont geen stabiele scheuruitbreiding (zie par.4.1.3).

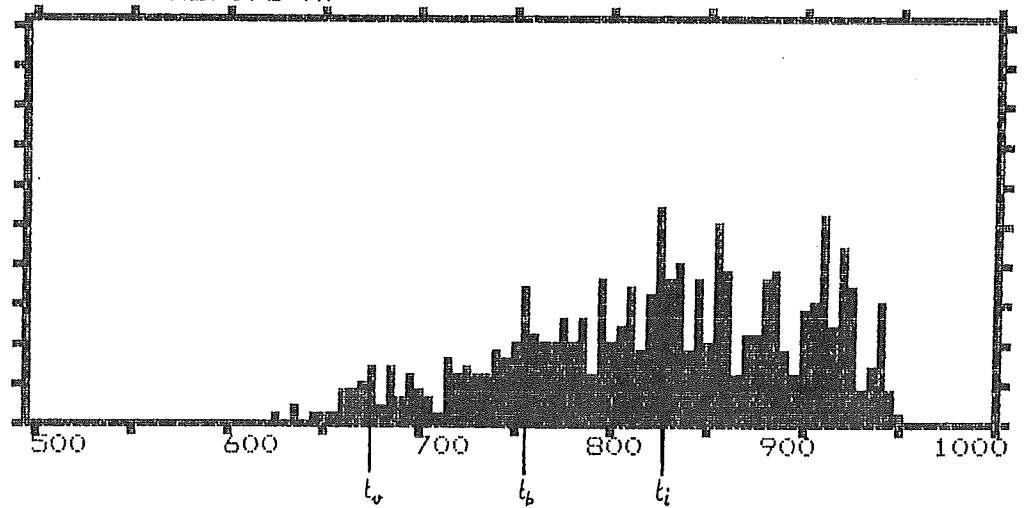
AL7075-M5

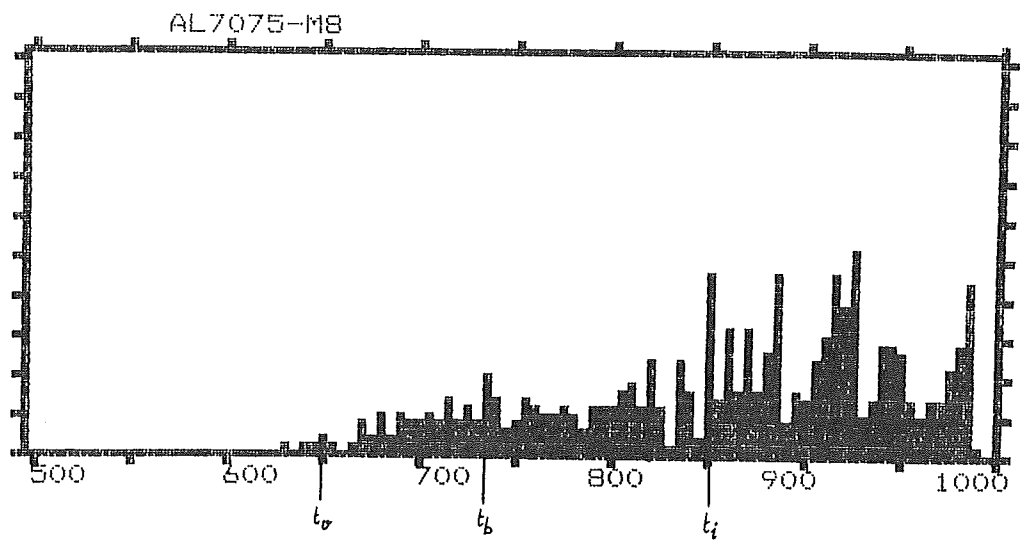


AL7075-M6



AL7075-M7





3.2.4
Fe510Nb

Tabel 3.8: De resultaten verkregen uit de beproeving ter bepaling van de J-integraal volgens ASTM-norm, de voorwaarden waaraan voldaan moet worden en meetgegevens als maten en scheuruitbreiding van de proefstukken van Fe510Nb.

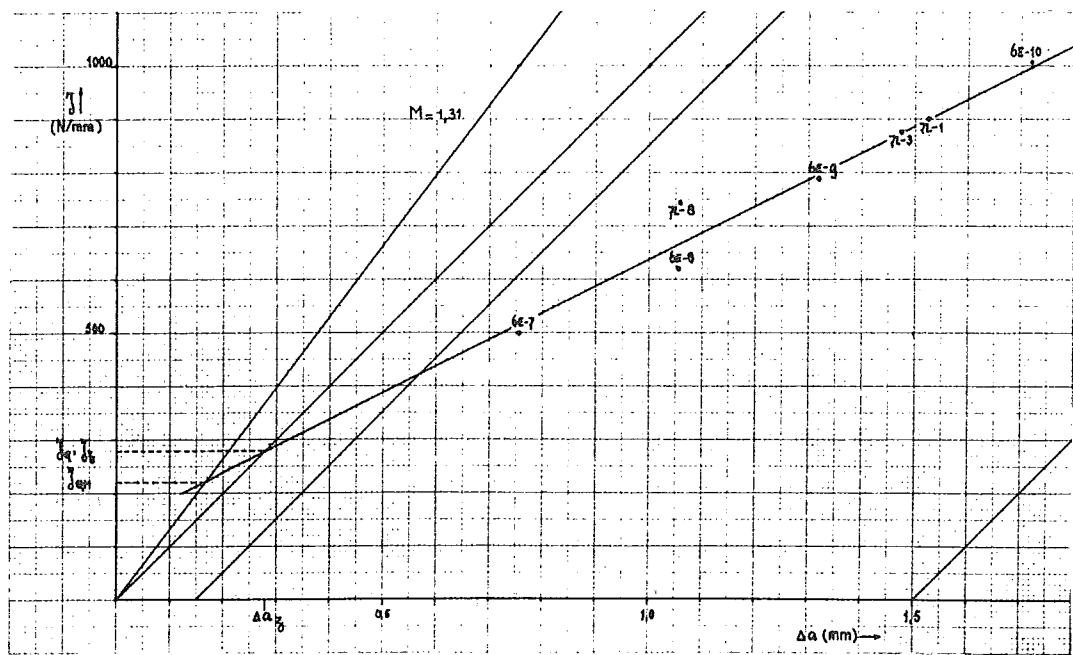
nr	B	W	a _o	b	a _o /W	k	k _t	q	Δa	P _c	G	v	J	z
-	mm	mm	mm	mm	-	-	-	mm	mm	kN	kN	mm	N/mm	mm
6E-7	27,663	56,017	31,643	24,374	0,565	68,60	61,01-70,19	0,33	0,754	14,4	21,5	4,28	502,53	15,046
6E-8	27,925	55,975	33,142	22,833	0,592	73,30	72,09-82,94	0,51	1,056	14,4	19,0	5,49	618,49	18,518
6E-9	27,695	56,050	32,177	23,873	0,574	65,74	64,02-73,66	0,62	1,319	14,4	20,6	6,50	793,01	23,743
6E-10	27,725	56,005	29,673	26,332	0,530	72,78	53,07-61,05	0,81	1,721	14,4	25,1	7,26	1007,03	21,502
7L-1	27,855	56,043	28,752	27,291	0,513	53,70	49,27-56,68	0,74	1,529	23,5	30,8	6,00	900,27	26,954
7L-2	27,715	56,007	27,964	28,043	0,499	47,56	46,36-53,34	0,83	1,681	23,5	32,4	7,20	1003,80	30,054
7L-3	27,900	56,050	29,666	26,384	0,529	59,51	53,07-61,05	0,74	1,475	23,5	28,8	6,60	869,23	26,025
7L-4	27,950	55,998	29,131	26,867	0,520	53,59	50,96-58,64	0,40	0,699	23,5	29,9	4,35	550,49	16,482
7L-5	27,990	56,031	28,271	27,760	0,505	55,93	47,72-54,90	0,38	0,865	23,5	32,0	5,08	663,29	19,859
7L-7	27,880	56,085	27,800	28,285	0,496	51,44	46,49-53,49	0,41	0,823	23,5	29,1	4,09	504,57	15,107
7L-8	27,980	55,960	29,514	26,446	0,527	56,03	52,40-60,29	0,65	1,062	23,2	25,6	5,79	745,58	22,323
7L-9	27,790	56,040	27,737	28,303	0,495	49,95	45,41-52,25	0,36	0,613	23,5	29,1	3,74	457,84	13,708
7L-10	27,700	56,015	26,953	29,062	0,481	56,05	46,13-53,07	0,31	0,311	23,5	30,6	2,74	303,30	9,081
7L-11	28,045	55,917	29,323	26,594	0,524	52,20	51,76-59,55	0,35	0,452	23,3	25,9	3,58	424,95	12,723

S = 224 mm
cf = 3,93 nm/N
f = 0,20 mm/min

z = 15.J/σ_y
k = E.B.v_i/P_i
G = 0,4.4.B.b'.σ_y
3 S

voorwaarden ASTM:
k_t(min)<k<k_t(max)
0,5<a_o/W<0,75
B,b>z; G>P_f

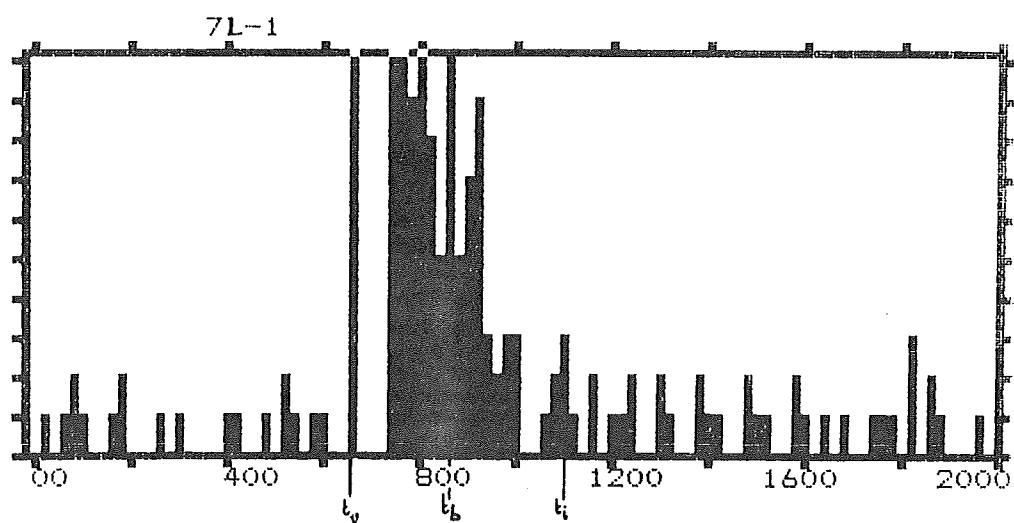
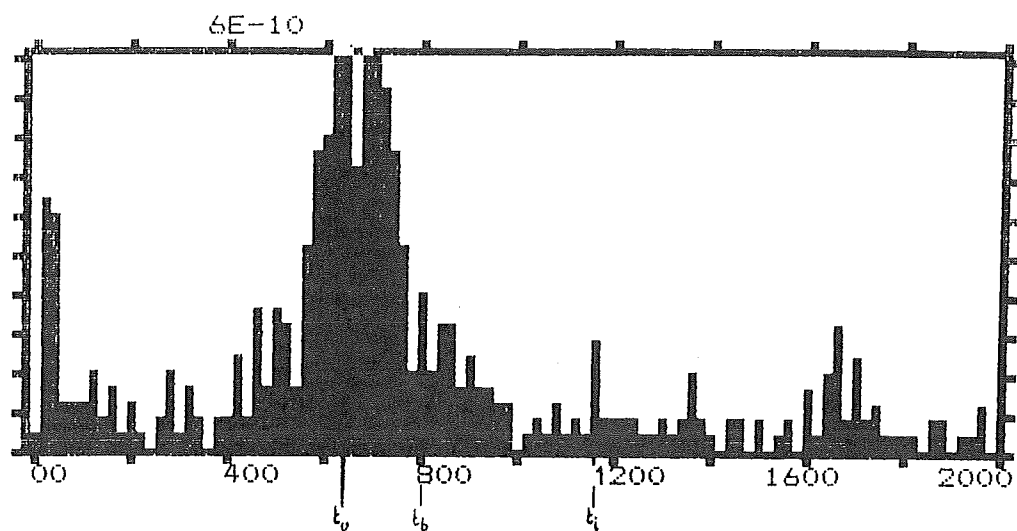
J_Q=J_{1C} mits:
B,b>25.J_Q/σ_y
dJ/da<σ_y



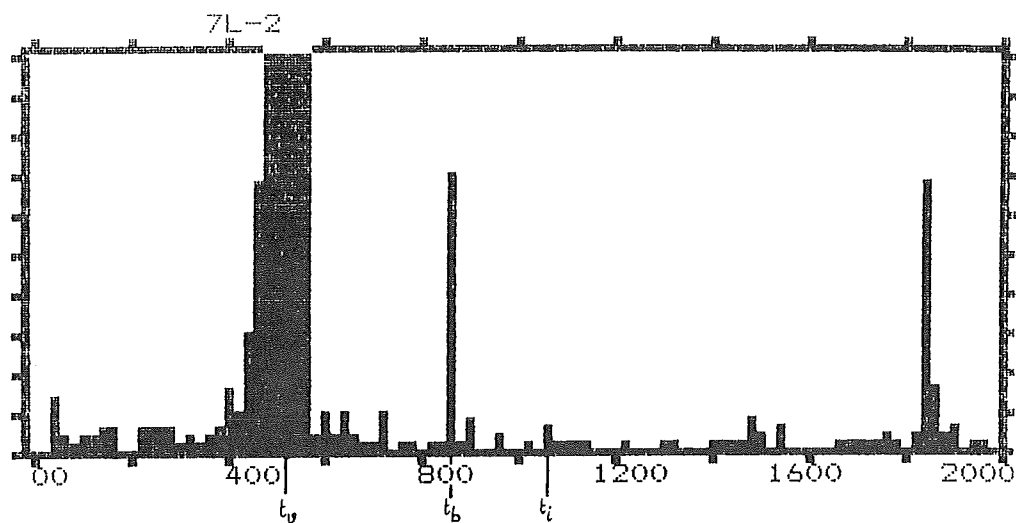
figuur 3.4 : De regressie-curve van Fe510Nb. Benevens de J_Q (280 N/mm) staan aangegeven de J_z (280 N/mm) en de J_{QM} (220 N/mm).

Tabel 3.9 : De uit de AE-opnamen bepaalde significante tijden voor Fe510Nb, alsmede de doorbuigingen en J-waarden. Uit de resultaten volgt; $v = 0,612$ mm, $v_i = 2,061$ mm en $J_{ae} = 216,8$ N/mm.

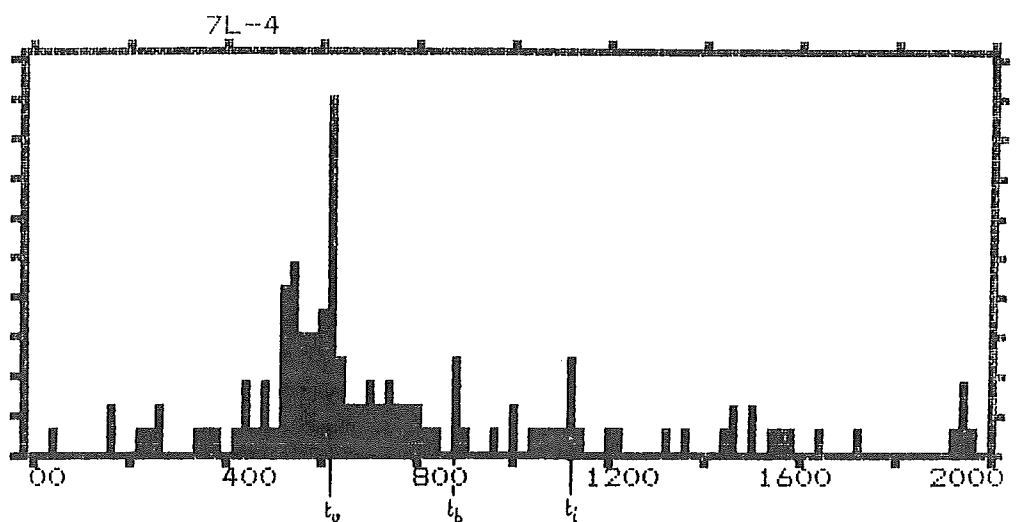
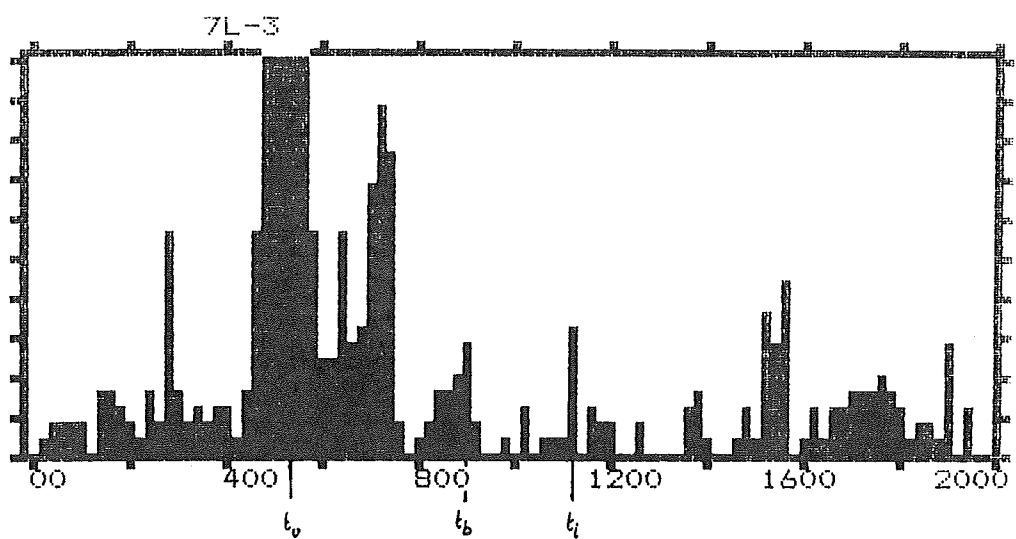
nr -	t sec	v mm	P kN	v_c mm	J N/mm
6E-10	648	0,825			
	800	1,190	47,0		
	1152	2,100	50,4	1,902	225,39
7L- 1	656	0,775			
	863	1,250	56,4		
	1104	1,870	57,8	1,643	213,60
7L- 2	528	0,575			
	855	1,350	48,9		
	1088	2,020	51,2	1,819	213,51
7L- 3	512	0,500			
	895	1,400	45,6		
	1136	2,025	47,0	1,840	206,46
7L- 4	600	0,705			
	879	1,363	48,8		
	1140	2,088	49,5	1,894	213,23
7L- 5	470	0,423			
	841	1,300	49,0		
	1120	2,033	51,7	1,830	211,35
7L- 7	600	0,650			
	902	1,450	50,3		
	1176	2,160	60,0	1,924	225,96
7L- 8	562	0,600			
	918	1,517	45,4		
	1136	2,093	47,4	1,907	214,69
7L- 9	523	0,500			
	863	1,315	50,5		
	1123	1,988	52,8	1,781	210,45
7L-10	570	0,613			
	816	1,250	49,5		
	1190	2,200	53,7	1,989	229,86
7L-11	528	0,563			
	783	1,175	45,8		
	1136	2,095	49,0	1,903	219,90

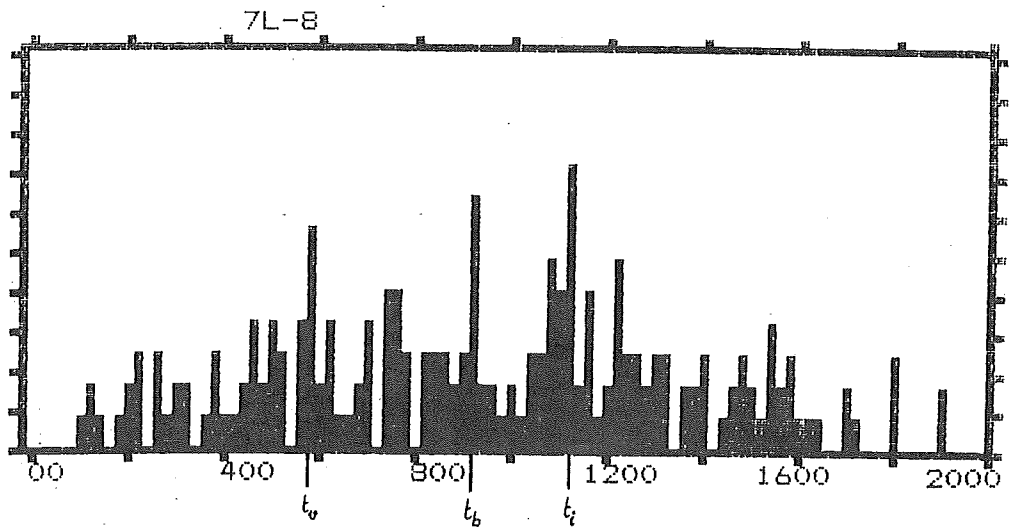
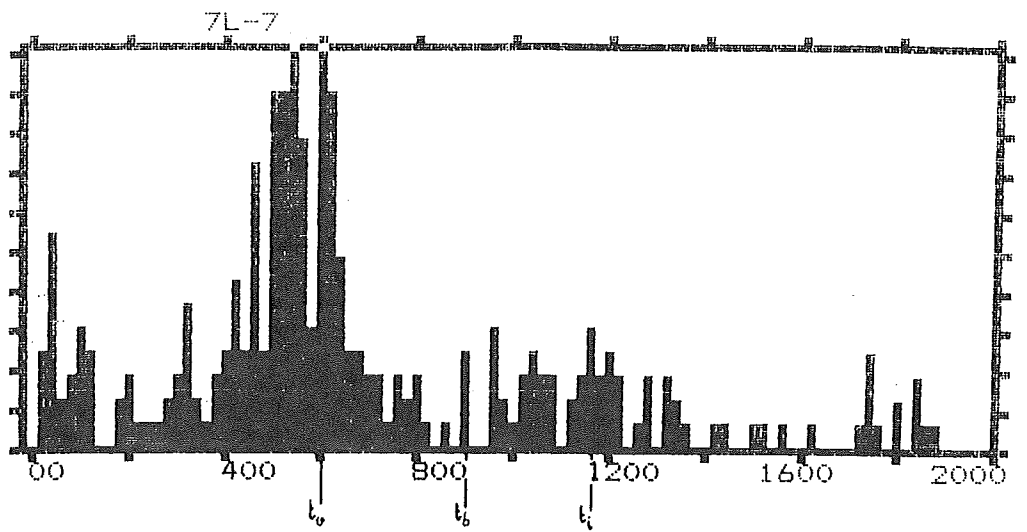
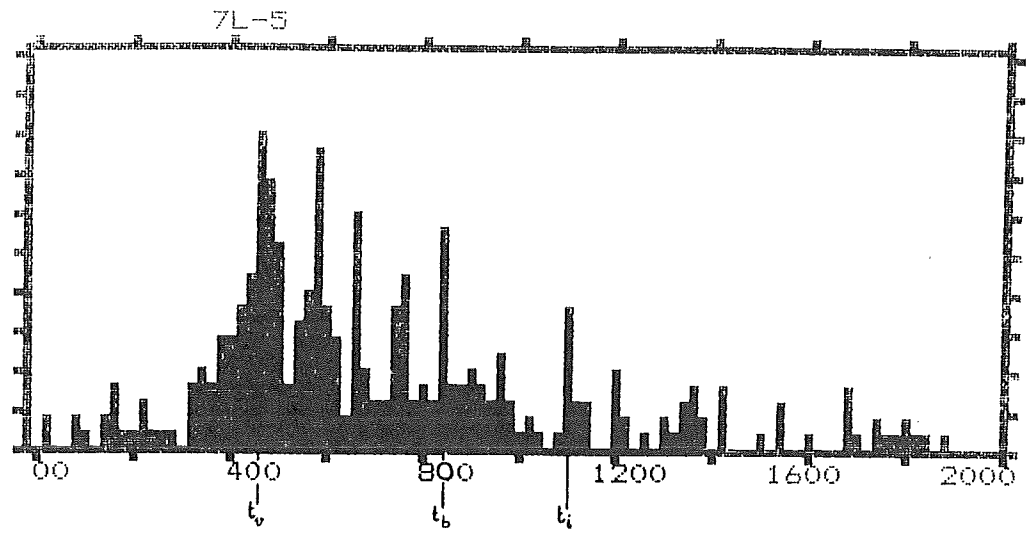


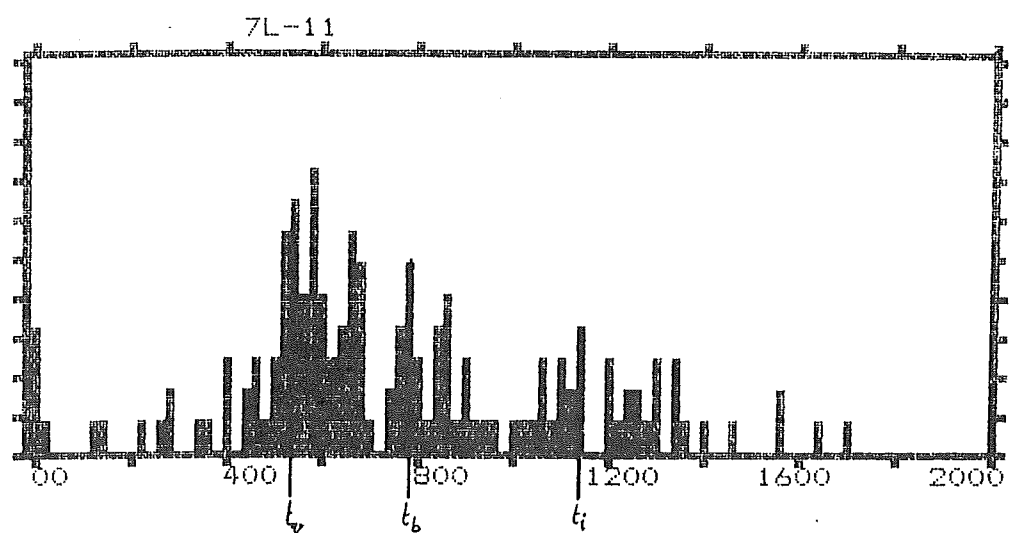
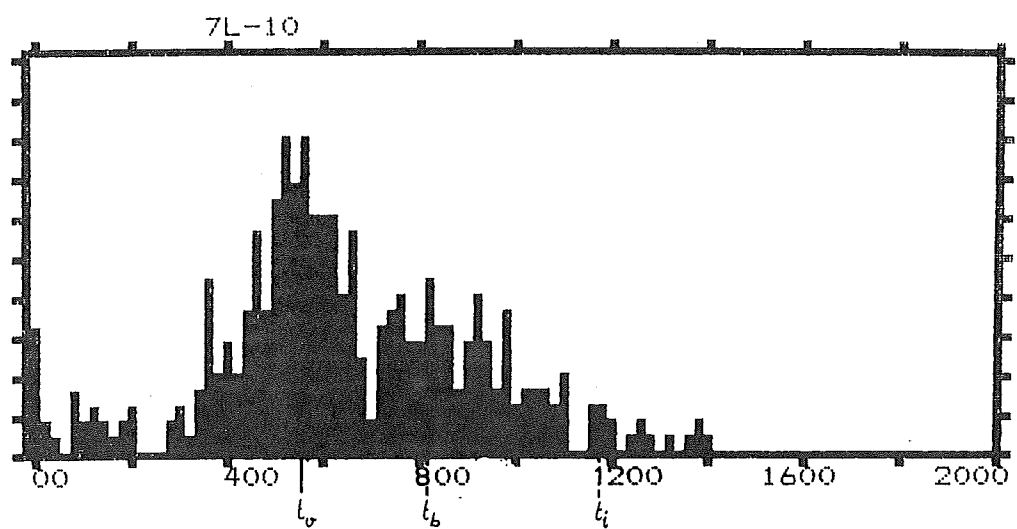
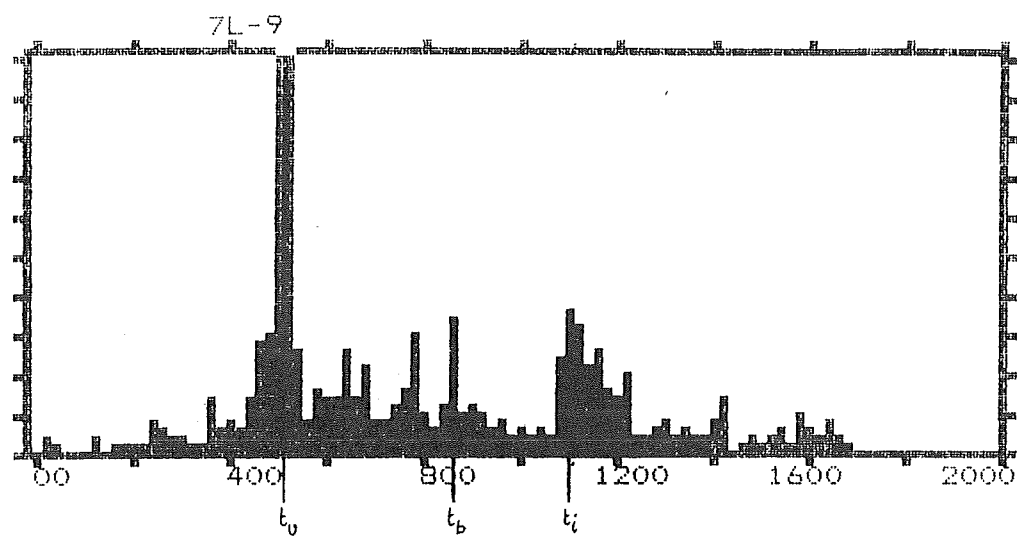
Omdat het aantal pulsen, dat tijdens het lineair-elastisch gedrag van het materiaal opgenomen wordt, zo gering is, wordt de instelling veranderd. Op circa 670 sec neemt de activiteit dusdanig toe dat de instelling weer verlaagd moet worden; op circa 740 sec is de juiste instelling gevonden, en de daling van het aantal gebeurtenissen na het eerste maximum is nog net te zien.



Bij het eerste maximum blijkt de activiteit van het materiaal zó hoog te zijn, dat de instelling verlaagd moet worden, hetgeen drastisch is gebeurd.







3.2.5
22NiMoCr37

Het materiaal 22NiMoCr37 is zeer taai en zou normaliter bij een lagere temperatuur dan kamertemperatuur zijn beproefd, waardoor een brosser gedrag en derhalve lagere J-waarden worden bereikt.
De bij kamertemperatuur bereikte resultaten voldoen niet aan de ASTM-voorwaarden; zowel ligament b als breedte B zijn kleiner dan de z-waarde.
Ondanks dat is met deze resultaten gewerkt, ook omdat zowel grotere proefstukken als een koelingsmogelijkheid die het gebruik van tasters toelaat ontbreken.

Tabel 3.10: De resultaten verkregen uit de beproeving ter bepaling van de J-integraal volgens ASTM-norm, de voorwaarden waaraan voldaan moet worden en meetgegevens als maten en scheuruitbreiding van de proefstukken van 22NiMoCr37.

nr	B mm	W mm	a _o mm	b mm	a _o /W	Δa mm	k	k _t	v mm	z mm	J N/mm	G N
01	19,685	40,110	21,396	18,714	0,533	0,900	54,54	53,76-61,85	5,72	26,020	971,4	13.284
02	20,020	39,940	21,408	18,532	0,536	1,193	53,90	54,50-62,70	6,82	31,465	1174,7	13.248
03	20,015	39,970	21,339	18,631	0,534	1,253	54,66	53,99-62,12	7,50	32,949	1230,1	13.387
04	19,805	39,870	21,047	18,823	0,528	2,467	57,64	52,62-60,55	12,51	61,264	2287,2	13.520
05	19,755	40,005	21,234	18,771	0,531	1,962	55,06	53,30-61,32	11,00	53,767	2007,3	13.412
37	19,965	39,995	20,915	19,080	0,523	1,888	51,53	51,56-59,32	12,28	61,189	2284,4	13.996
38	19,890	40,005	21,267	18,738	0,532	2,722	56,98	53,53-61,59	14,48	65,778	2455,7	13.457
40	19,865	39,930	21,567	18,363	0,540	2,870	36,08	55,62-64,00	16,02	75,391	2814,6	12.899

$P_f = 13.250\text{ N}$
 $S = 155\text{ mm}$
 $f = 0,20\text{ mm/min}$
 $cf = 6,55\text{ nm/N}$

$z = 15 \cdot J / \sigma_y$
 $k = E \cdot B \cdot v_i / P_i$
 $G = 0,4 \cdot \frac{4 \cdot B \cdot b^2 \cdot \sigma_y}{3 \cdot S}$

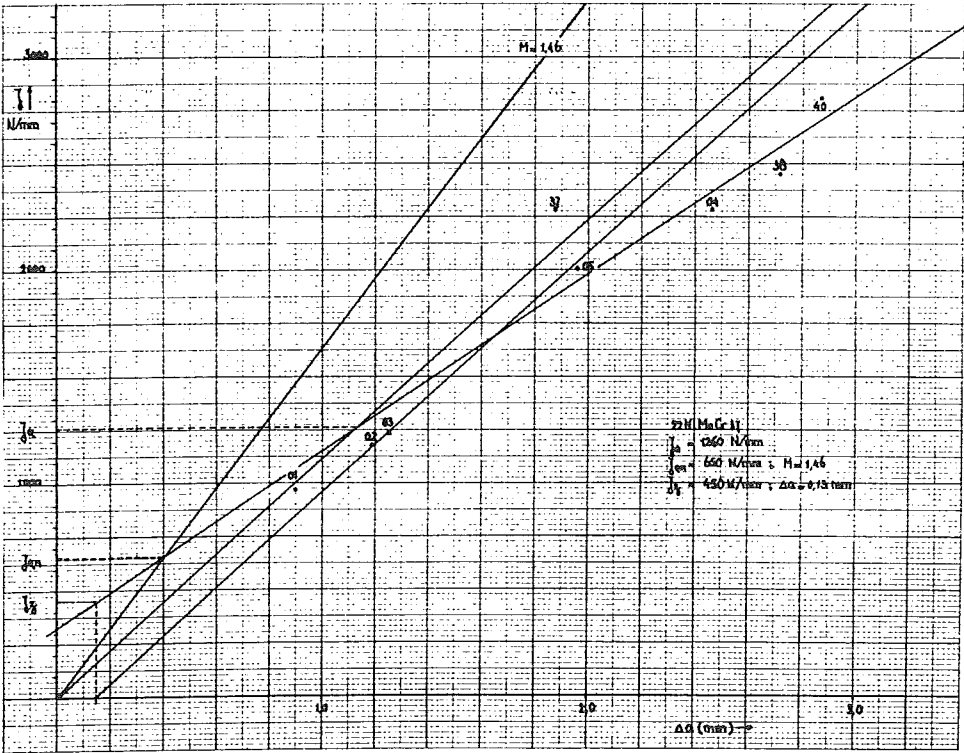
voorwaarden ASTM:
 $k_t(\min) < k < k_t(\max)$
 $0,5 < a_o / W < 0,75$
 $B, b > z; G > P_f$

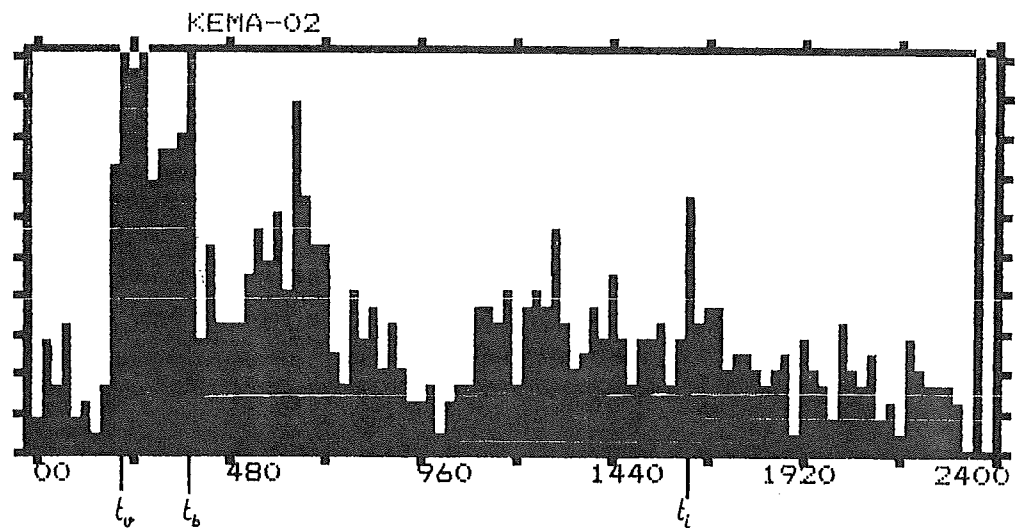
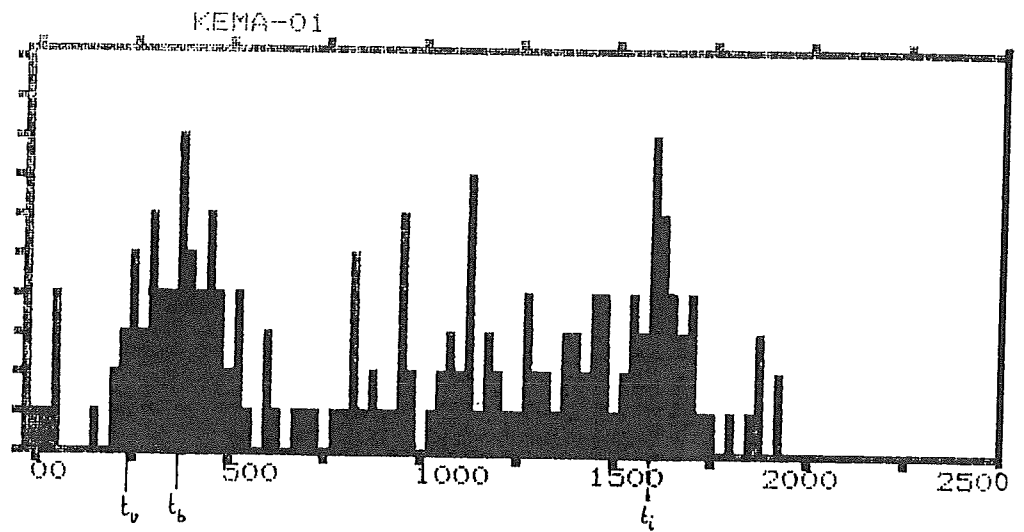
$J_Q = J_{1C}$ mits:
 $B, b > 25 \cdot J_Q / \sigma_y$
 $dJ/da < \sigma_y$

Tabel 3.11: De uit de AE-opnamen bepaalde significante tijden, doorbuigingen en J-waarden. Uit de resultaten volgt: $v_i = 4,19 \text{ mm}$ en $J_{ae} = 668,5 \text{ N/mm}$, voor 22NiMoCr37.

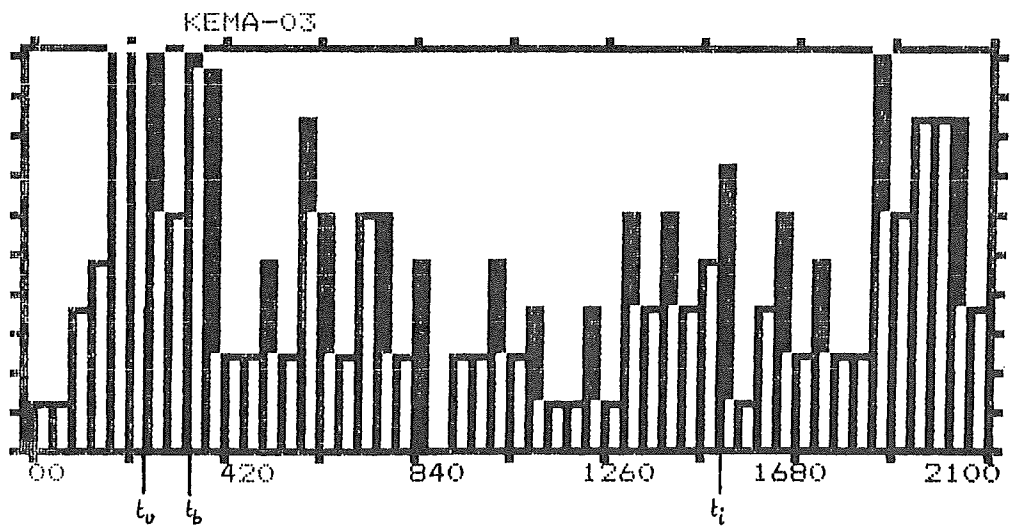
nr	t	v	P	v	J
-	sec	mm	kN	mm	N/mm
01	240	0,28			
	384	0,57	26,0	0,403	35,6
	1608	4,51	35,8	4,280	734,9
02	204	0,23			
	379	0,54	26,0	0,373	31,8
	1629	4,44	33,9	4,222	691,4
03	240	0,28			
	347	0,48	24,3	0,324	26,7
	1508	4,09	32,7	3,880	610,1
04	-	-			
	519	0,68	28,9	0,494	64,4
	1508	3,79	34,6	3,568	616,1
05	107	0,20			
	390	0,61	26,0	0,443	39,8
	1520	4,04	36,1	3,808	659,8
37	240	0,26			
	435	0,55	29,0	0,364	30,0
	1680	4,05	39,8	3,794	668,4
38	252	0,28			
	330	0,43	23,3	0,280	20,2
	1680	4,65	34,0	4,431	729,0
40	435	0,25			
	542	0,40	26,3	0,231	18,7
	1856	3,95	34,9	3,726	637,9

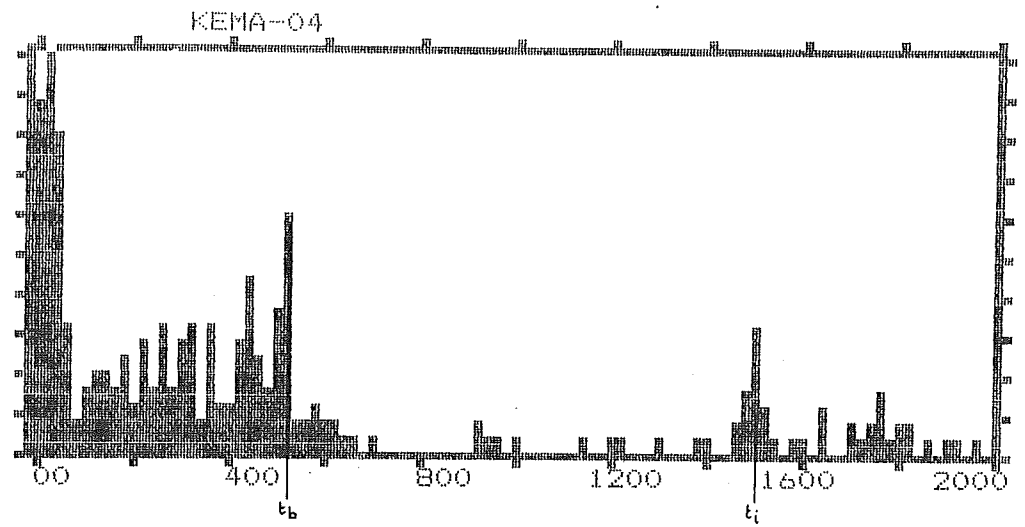
figuur 3.5 : De regressie-curve van 22NiMoCr37. Benevens de J_0 (1260 N/mm) staan aangegeven de J_z (450 N/mm) en de J_{QM} (650 N/mm).



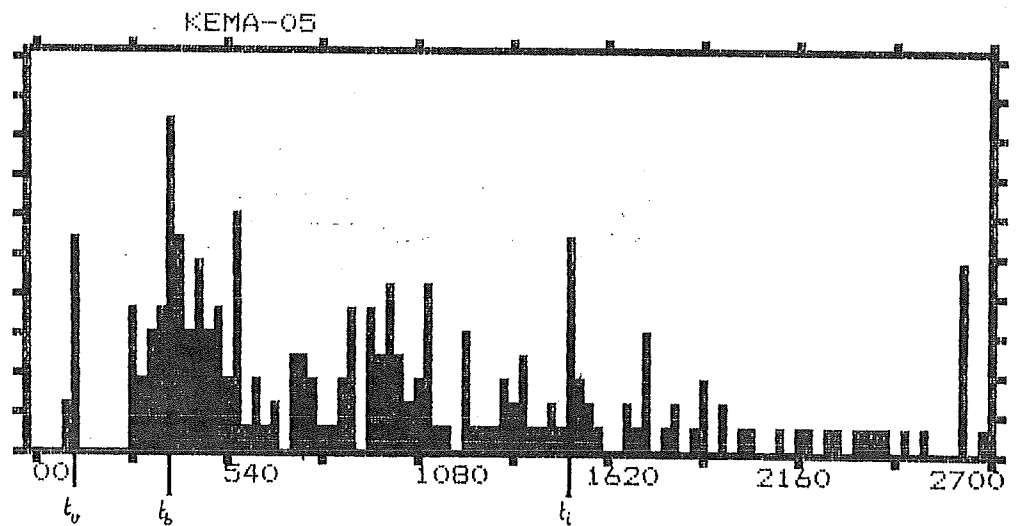


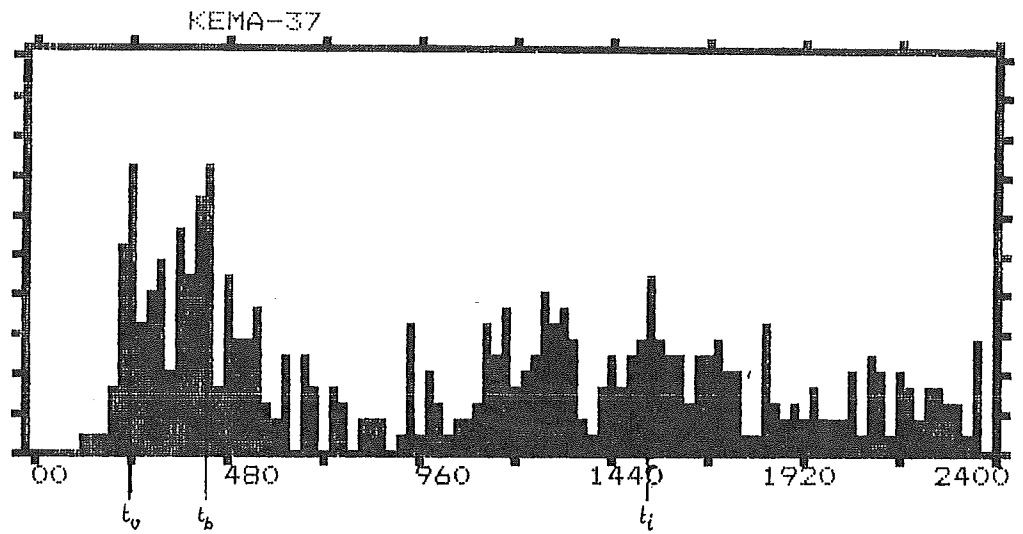
Het maximum op 2350 seconden is veroorzaakt doordat na de beproeving het juk versneld omhoog werd bewogen.



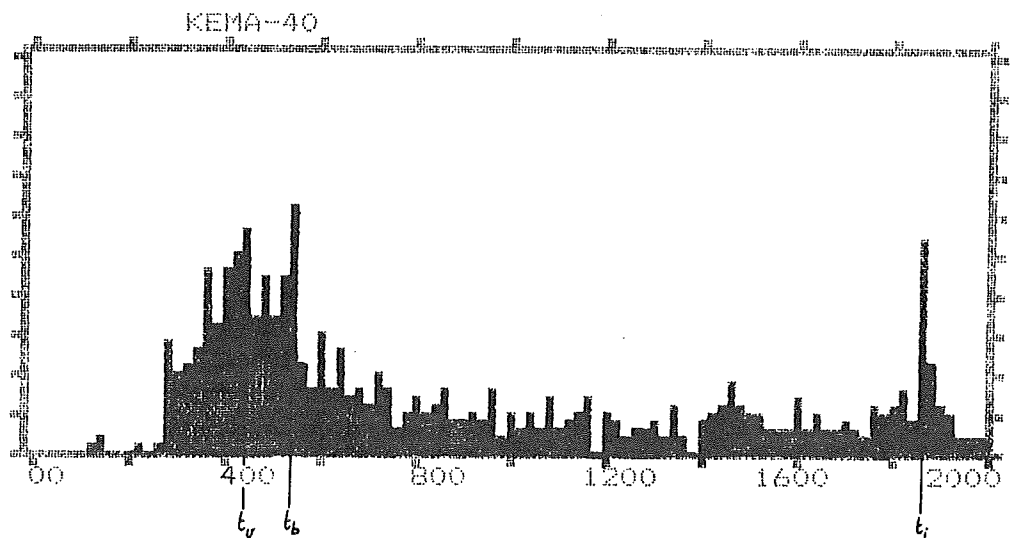
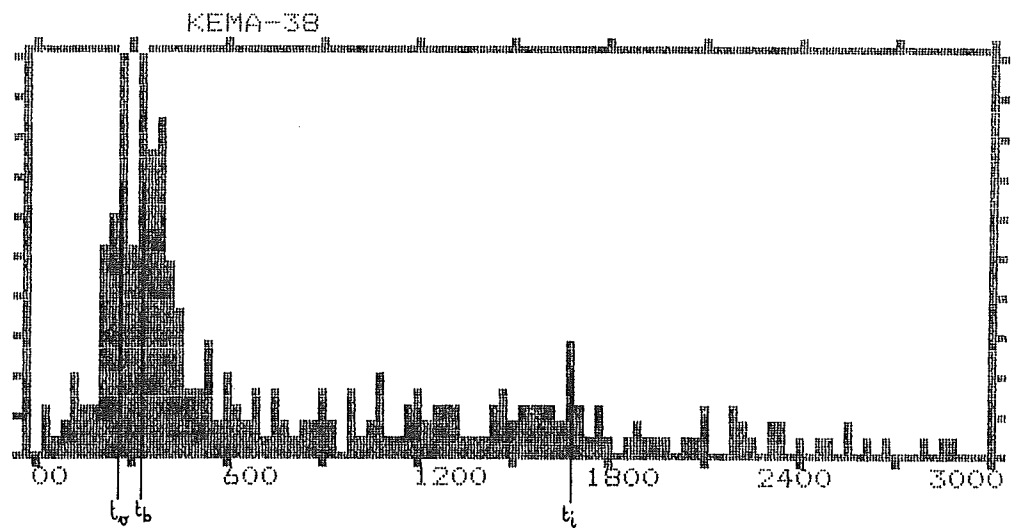


De vele pulsen aan het begin zijn het gevolg van het instellen van de apparatuur, nadat een losgeraakte taster weer is vastgeplakt.





De instelling is bij 1340 seconden verlaagd omdat de activiteit plots erg toenam; de helling loopt na dat tijdstip gewoon door, met een maximum op 1536 seconden.



3.2.6
T StE-355

De resultaten die gebruikt zijn voor de berekening van de J-integraal en de δ_t -bepaling zijn ontleend aan lit.16. Om verschillende redenen voldoen de metingen niet aan de ASTM-eisen, zodat de J_{1C} niet kan worden bepaald; duidelijkst wordt dit geïllustreerd door de $J_{\Delta a}$ -curve. Alle meetpunten vallen buiten de grenzen van het gebied dat wordt aangegeven door de parallellen. Tevens voldoet in enkele gevallen de k niet aan de gestelde eisen. Bij het merendeel van de beproevingen is de z-waarde groter dan B of b.

Hoewel de resultaten, evenals die van 22NiMoCr37, niet aan de ASTM-eisen voor de J_{1C} -bepaling beantwoorden, is toch getracht tot een kritische J-waarde voor T StE-355 te komen.

Tabel 3.12: De resultaten verkregen uit de beproeving ter bepaling van de J-integraal volgens ASTM-norm, de voorwaarden waaraan voldaan moet worden en meetgegevens als maten en scheuruitbreiding van de proefstukken van T StE-355.

nr	B	W	a _o	b	a _o /W	Δa	k	k _t	v	z	f	cf	J	P _f	G
-	mm	mm	mm	mm	-	mm	-	-	mm	mm	mm/min	nm/N	N/mm	kN	kN
TL-1	20,045	40,020	21,099	18,921	0,527	0,256	57,00	52,51-60,42	3,00	12,729	0,10	1,2	350,46	9,62	9,90
TL-2	20,045	40,020	21,380	18,640	0,534	0,542	50,33	53,94-62,06	4,90	22,852	0,06	1,3	629,19	9,62	9,61
TL-3	20,045	40,020	21,360	18,660	0,534	1,720	54,50	53,10-61,10	9,66	50,687	0,06	"	1395,59	9,64	9,63
TL-4	20,045	40,020	21,510	18,510	0,537	1,150	58,70	54,92-63,18	7,97	39,818	0,06	"	1096,31	9,48	9,47
TL-5	20,045	40,020	21,210	18,810	0,530	2,240	52,43	53,07-61,05	11,41	60,920	0,06	"	1677,34	9,79	9,78

S = 159,6 mm

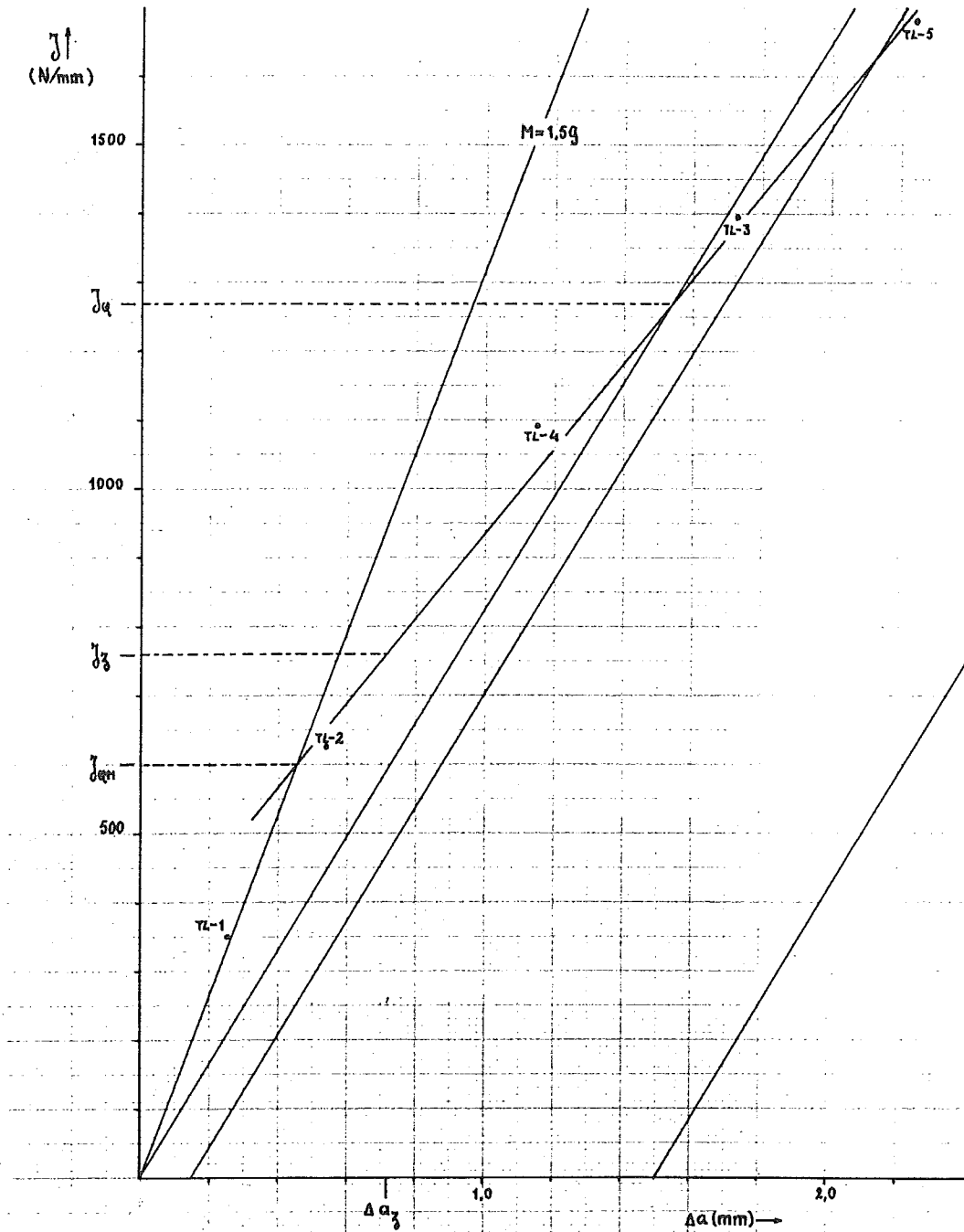
$$z = 15 \cdot J / \sigma_y$$
$$k = E \cdot B \cdot v_i / P_i$$
$$G = 0,4 \cdot \frac{4 \cdot B \cdot b^2 \cdot \sigma_y}{3 \cdot S}$$

voorwaarden ASTM:

$$k_t(\min) < k < k_t(\max)$$
$$0,5 < a_o / W < 0,75$$
$$B, b > z; \quad G > P_f$$

$J_Q = J_{1C}$ mits:

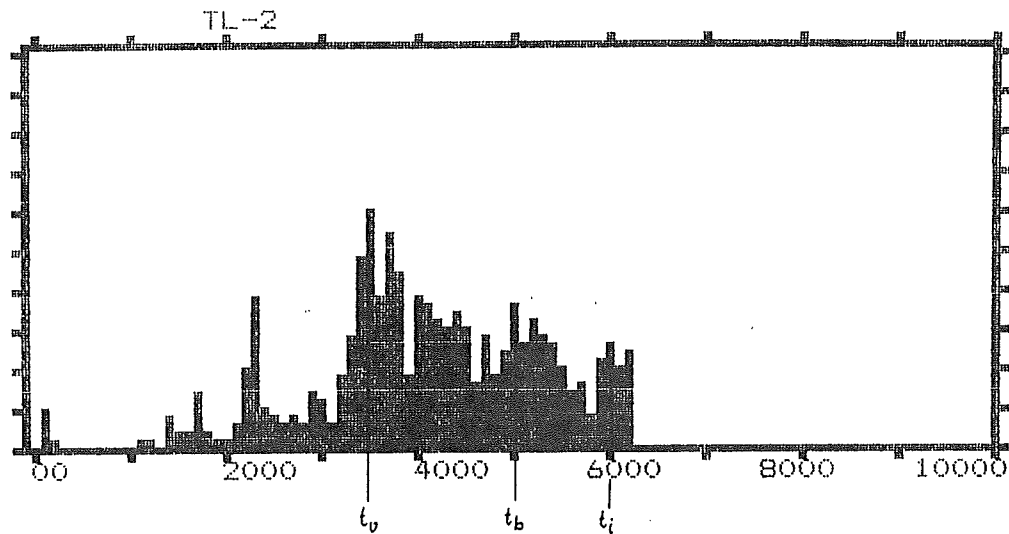
$$B, b > 25 \cdot J_Q / \sigma_y$$
$$dJ / da < \sigma_y$$



figuur 3.6 : De regressie-curve van T StE-355. Benevens de J_Q (1.270 N/mm) staan tevens aangegeven de J_Z (760 N/mm) en de J_{QM} (600 N/mm).

Tijdens de beproeving van T StE-355 zijn twee AE-opnamen gemaakt. Hiervan voldeed de eerste opname (TL-1) niet, omdat de instelling tijdens de opname gevarieerd is. De opname van proefstuk TL-2 is wél gelukt en levert de volgende significante tijden:

nr	t	v	P	v	J
-	sec	mm	kN	mm ^c	N/mm
TL-2	3480	2,225			
	5000	3,690			
	6000	4,650	27,7	4,615	591,4



3.2.7
messing Ms58

Tabel 3.13: De resultaten verkregen uit de beproeving ter bepaling van de J-integraal volgens ASTM-norm, de voorwaarden waaraan voldaan moet worden en meetgegevens als maten en scheuruitbreiding van de proefstukken van messing (Ms58).

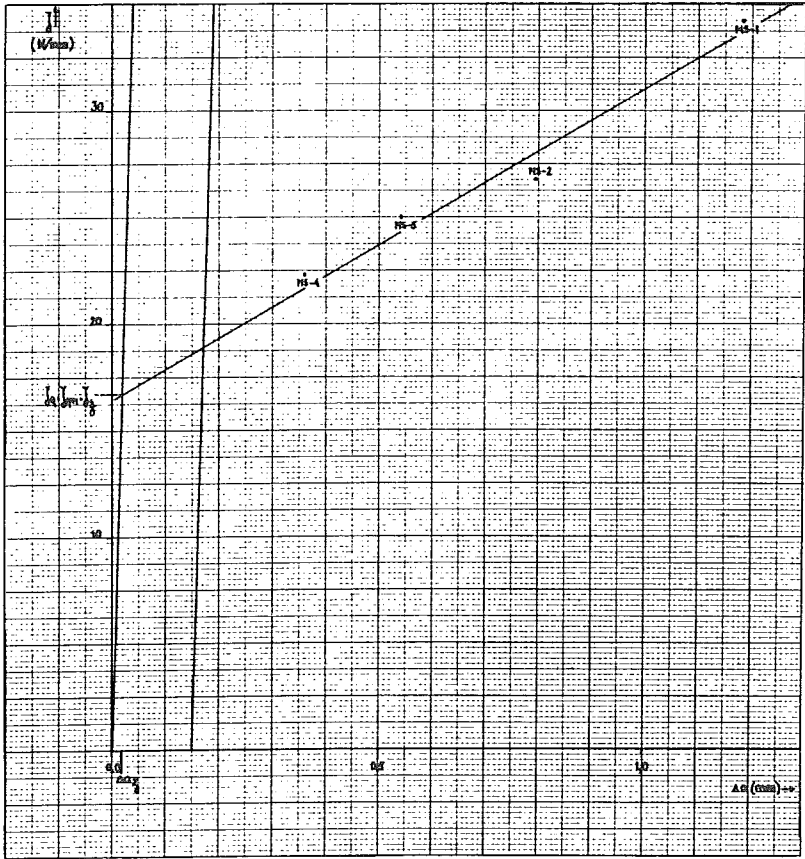
nr	B mm	W mm	a _o mm	b mm	a _o /W	Δa mm	k	k _t	v mm	z mm	J N/mm	G N
MS-1	13,995	24,920	13,010	11,910	0,522	1,185	58,40	51,36-59,09	0,639	1,166	34,24	6433
MS-2	13,022	24,785	13,610	11,175	0,549	0,794	64,90	57,97-66,70	0,546	0,912	26,77	5270
MS-3	13,112	24,780	13,266	11,514	0,535	-	62,00	54,22-62,38	0,352	0,374	10,98	5633
MS-4	13,010	25,080	13,633	11,447	0,544	0,359	64,40	56,69-64,96	0,492	0,760	22,32	5524
MS-5	12,930	24,891	13,621	11,270	0,547	0,541	66,10	57,47-66,12	0,523	0,854	25,08	5322

$P_f = 4.750\text{ N}$
 $S = 72,5\text{ mm}$
 $f = 0,08\text{ mm/min}$
 $cf = 2,036\text{ nm/N}$

$z = 15 \cdot J / \sigma_y$
 $k = E \cdot B \cdot v_i / P_i$
 $G = 0,4 \cdot \frac{4 \cdot B \cdot b^2 \cdot \sigma_y}{3 \cdot S}$

voorwaarden ASTM:
 $k_t(\text{min}) < k < k_t(\text{max})$
 $0,5 < a_o / W < 0,75$
 $B, b > z; G > P_f$

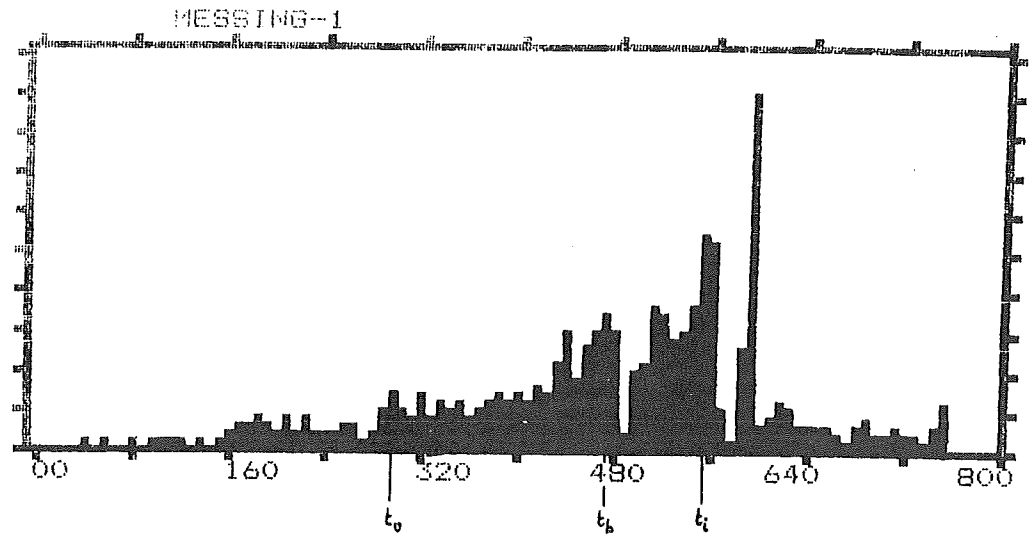
$J_Q = J_{1C}$ mits:
 $B, b > 25 \cdot J_Q / \sigma_y$
 $dJ / da < \sigma_y$



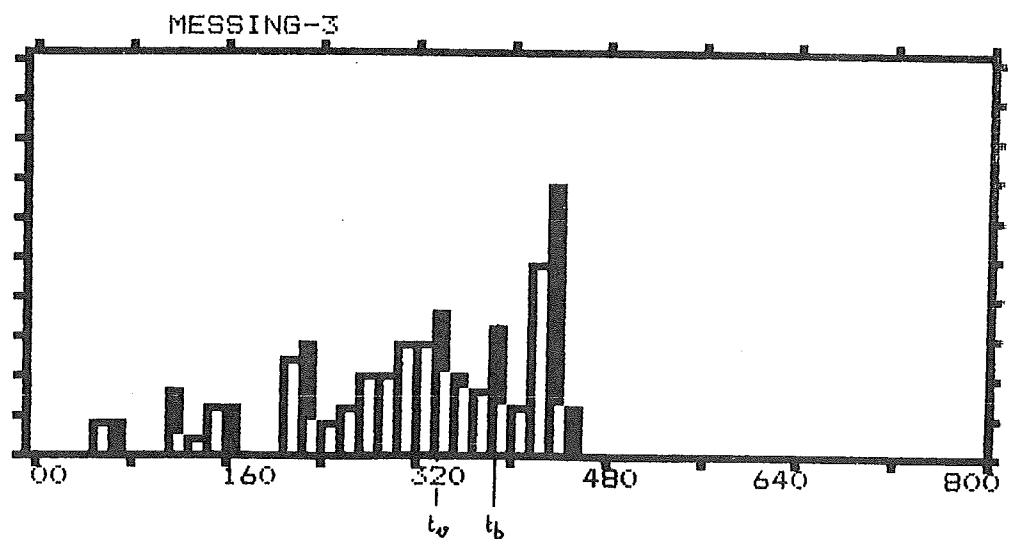
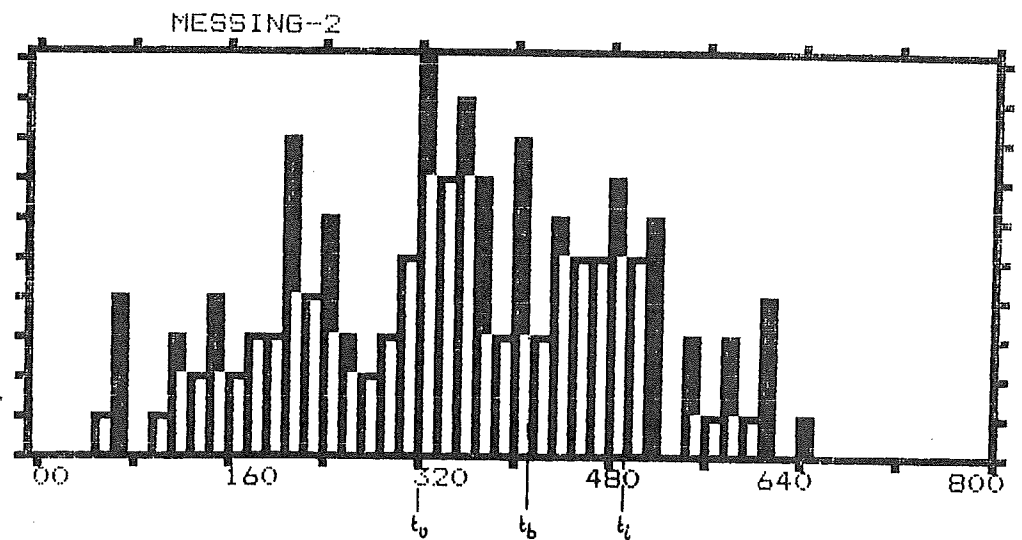
figuur 3.7 : De regressie-curve van messing Ms58. Naast de J_Q zijn tevens aangegeven de J en de J_{QM} . Allen^z bedragen 16,75 N/mm.

Tabel 3.14: De uit de AE-opnamen bepaalde significante tijden voor messing Ms58, alsmede de doorbuigingen en J-waarden. Uit de resultaten volgt; $v_i = 0,421$ mm en $J_{ae} = 16,9$ N/mm.

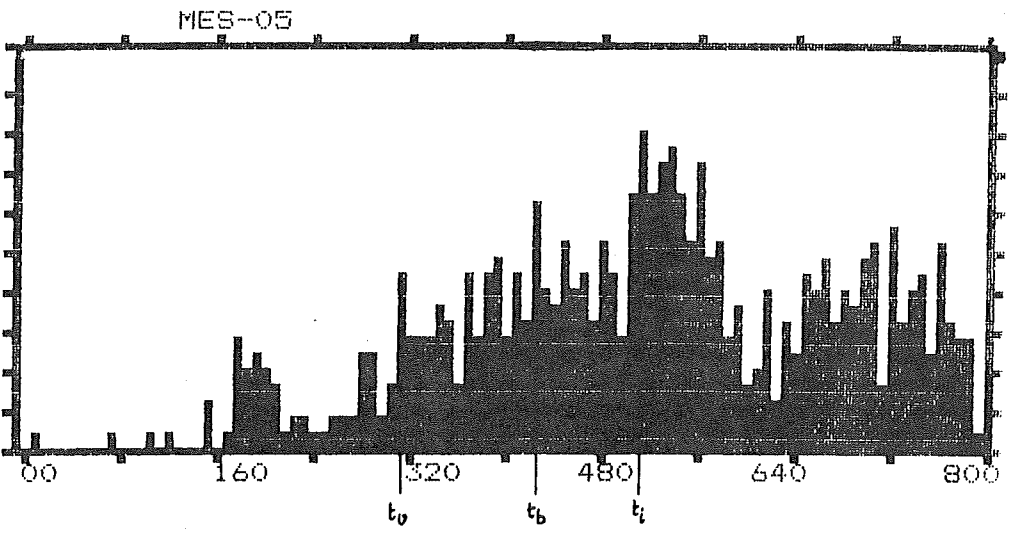
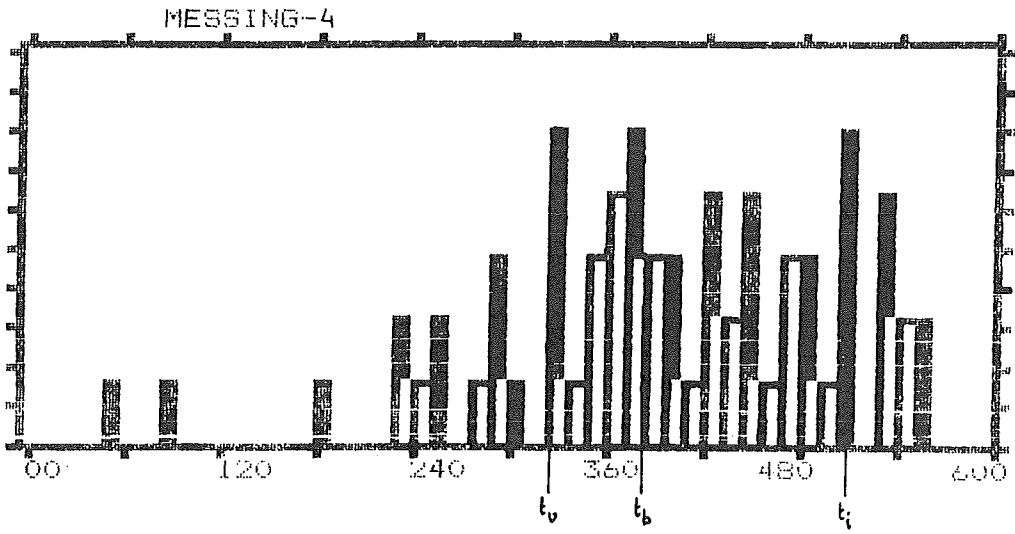
nr -	t sec	v mm	P kN	v_c mm	J N/mm
MS-1	295	0,216			
	471	0,345			
	552	0,420	6,29	0,407	17,12
MS-2	320	0,245			
	414	0,323			
	501	0,410	5,475	0,399	16,17
MS-3	332	0,263			
	396	0,315			
	441	-			
MS-4	325	0,260			
	381	0,306			
	504	0,425	5,65	0,413	16,87
MS-5	310	0,244			
	420	0,340			
	508	0,428	5,83	0,416	17,24



Voor de keuze van het derde maximum zie par.4.3.2.



De opname is gestopt tijdens aanloop van het derde maximum; het breukvlak vertoont geen stabiele scheuruitbreiding (zie par.4.1.3).



3.2.8
ferritisch nodulair gietijzer

Tabel 3.15: De resultaten verkregen uit de beproeving ter bepaling van de J-integraal volgens ASTM-norm, de voorwaarden waaraan voldaan moet worden en meetgegevens als maten en scheuruitbreiding van de proefstukken van ferritisch nodulair gietijzer.

nr	B	W	a _o	b	a _o /W	Δa	f	cf	k	k _t	v	z	J	G
-	mm	mm	mm	mm	-	mm	mm/min	nm/N	-	-	mm	mm	N/mm	N
G.IJ-0	9,950	19,930	10,869	9,061	0,545	0,877	0,04	16,4	62,49	56,96-65,54	1,00	3,092	77,09	2248
G.IJ-1	9,975	20,000	10,229	9,771	0,511	0,697	0,06	11,2	57,90	48,90-56,26	0,99	3,267	81,45	2620
G.IJ-2	10,050	19,905	11,313	8,592	0,568	-	0,09	8,4	89,30	62,00-71,33	1,50	4,541	113,22	2041
G.IJ-3	9,995	19,940	11,227	8,713	0,563	0,498	0,04	16,4	65,67	60,46-69,57	0,90	2,559	63,81	2088
G.IJ-4	9,945	19,875	11,012	8,863	0,554	1,204	0,04	16,4	62,50	58,80-67,65	1,30	4,166	103,88	2149
G.IJ-5	10,020	19,890	11,135	8,755	0,560	0,403	0,04	16,4	65,70	59,65-68,63	0,80	2,212	55,16	2113

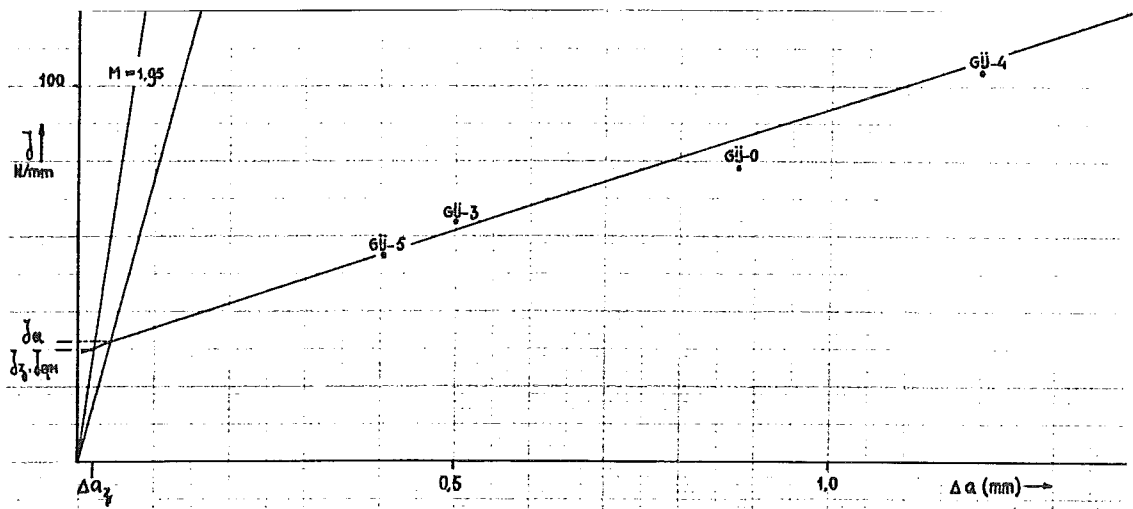
$$P_f = 2.000 \text{ N}$$
$$S = 72,5 \text{ mm}$$

$$z = 15 \cdot J / \sigma_y$$
$$k = E \cdot B \cdot v_i / P_i$$
$$G = \frac{0,4 \cdot B \cdot b^2 \cdot \sigma_y}{3 \cdot S}$$

voorwaarden ASTM:
 $k_t(\min) < k < k_t(\max)$
 $0,5 < a_o / W < 0,75$
 $B, b > z; G > P_f$

$J_Q = J_{1C}$ mits:
 $B, b > 25 \cdot J_Q / \sigma_y$
 $dJ / da < \sigma_y$

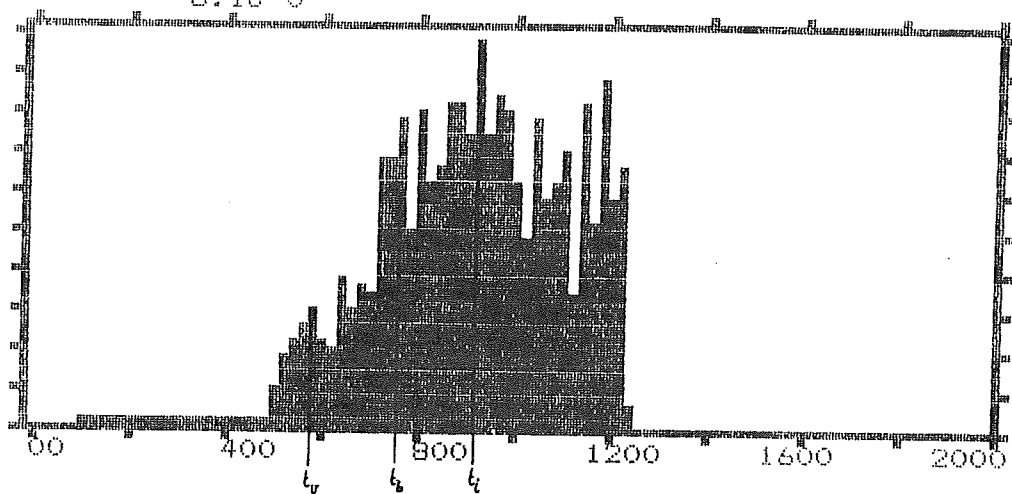
figuur 3.8 : De regressie-curve van ferritisch nodulair gietijzer. Benevens de J_Q (32 N/mm) staan tevens aangegeven de J_z (30 N/mm) en de J_{QM} (30 N/mm).



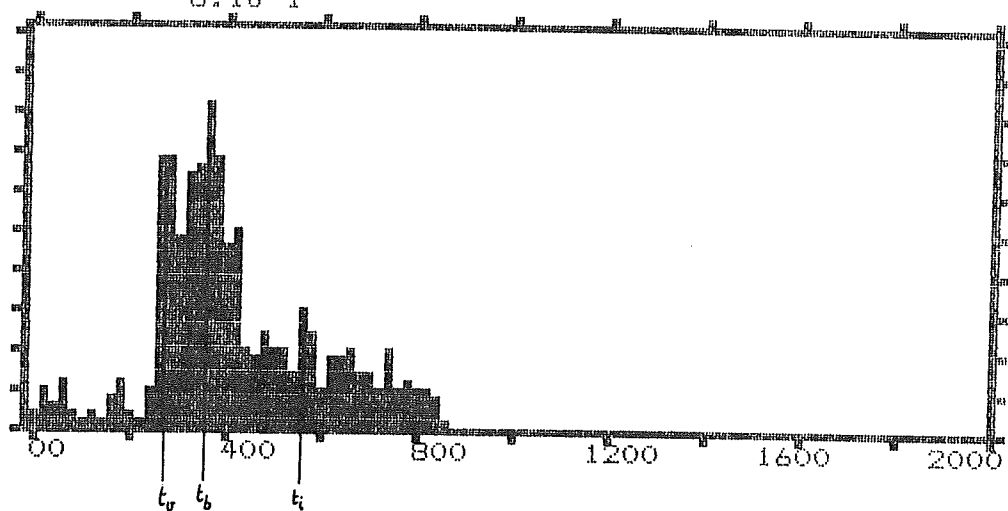
Tabel 3.16: De uit de AE-opnamen bepaalde significante tijden voor ferritisch nodulair gietijzer, alsmede de doorbuigingen en J-waarden. Uit de resultaten volgt; $v_i = 0,495$ mm en $J_{ae} = 28,2$ N/mm.

nr -	t sec	v mm	P kN	v_c mm	J N/mm
G.IJ-0	573,2	0,210			
	762,2	0,350			
	918,1	0,465	4,15	0,397	27,17
G.IJ-1	278,7	0,196			
	369,3	0,280			
	569,3	0,463	4,70	0,410	28,80
G.IJ-2	247,2	0,206			
	325,0	0,300			
	466,9	0,525	3,77	0,494	26,42
G.IJ-3	510,2	0,235			
	839,4	0,386			
	941,7	0,559	3,95	0,494	32,24
G.IJ-4	512,6	0,213			
	718,1	0,325			
	863,4	0,438	4,10	0,371	24,00
G.IJ-5	536,2	0,215			
	765,4	0,385			
	935,4	0,520	3,79	0,458	30,52

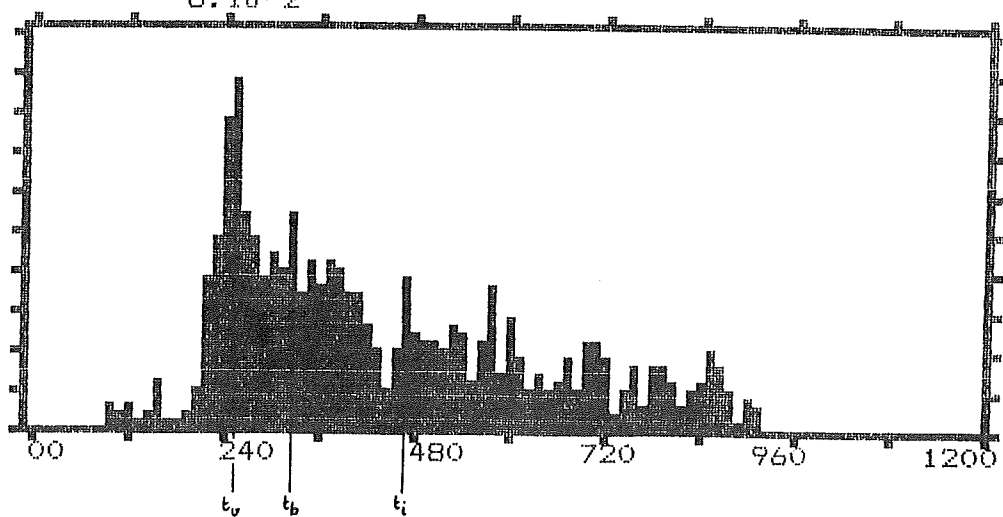
G.1J-0



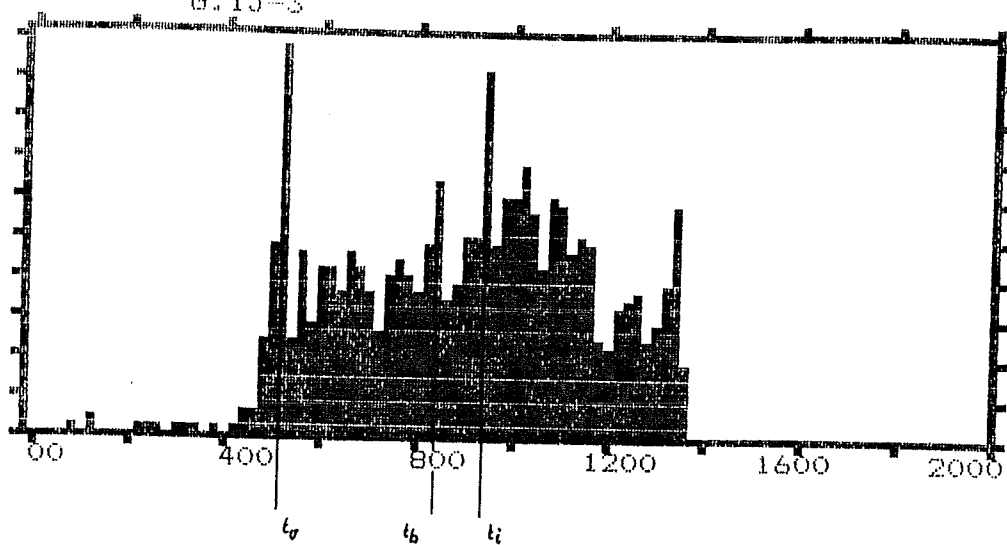
G.1J-1



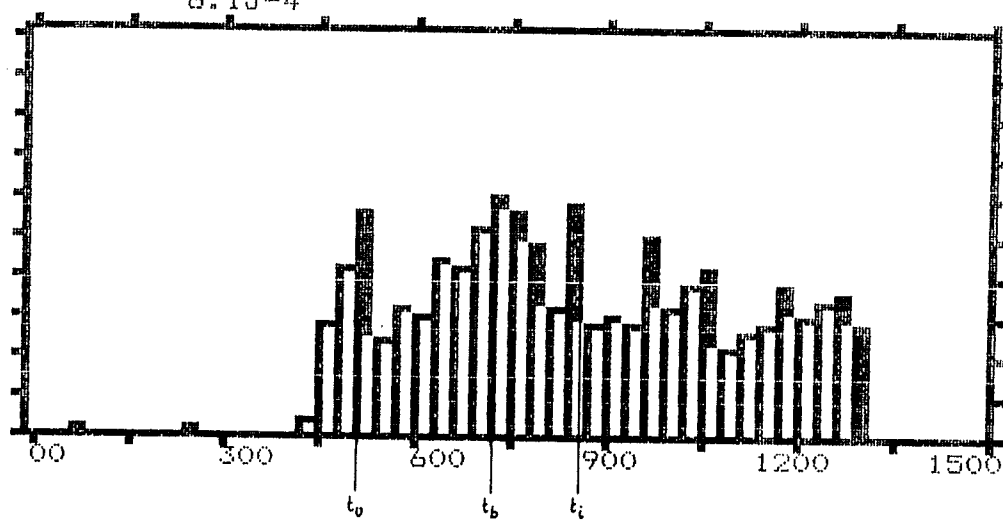
G.1J-2



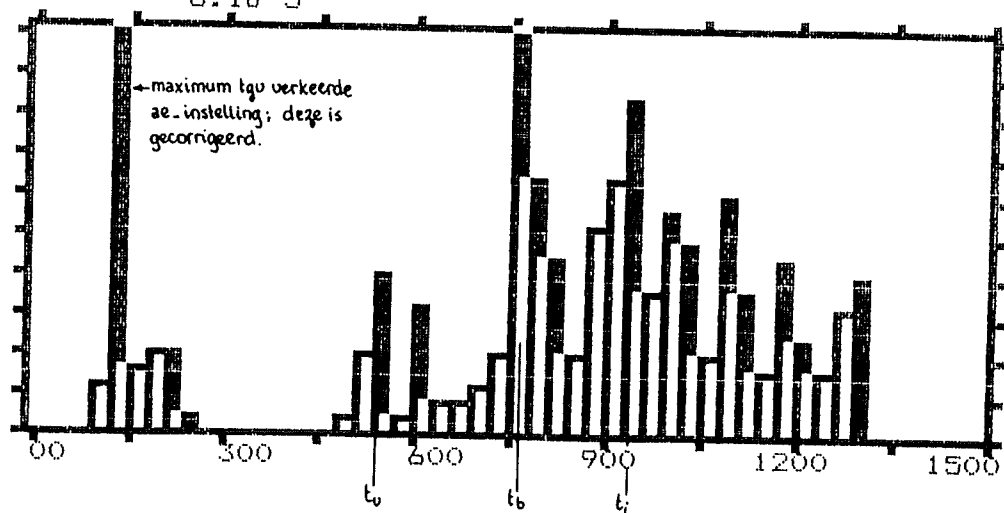
G. IJ-3



G. IJ-4



G. IJ-5



3.3
de M - l i j n

Tabel 3.17: Materialen, proefstuknummers en meetwaarden die gebruikt zijn voor de bepalingen van de M-waarden. Hierin is v'_{cl} de volledige scheuropening, in tegenstelling tot v' hetgeen alleen het plastische gedeelte daarvan is.
*f.n.g staat voor ferritisch nodulair gietijzer, en $\delta_1 = K^2(1-\nu^2)/(2E.\sigma_{q2})$.

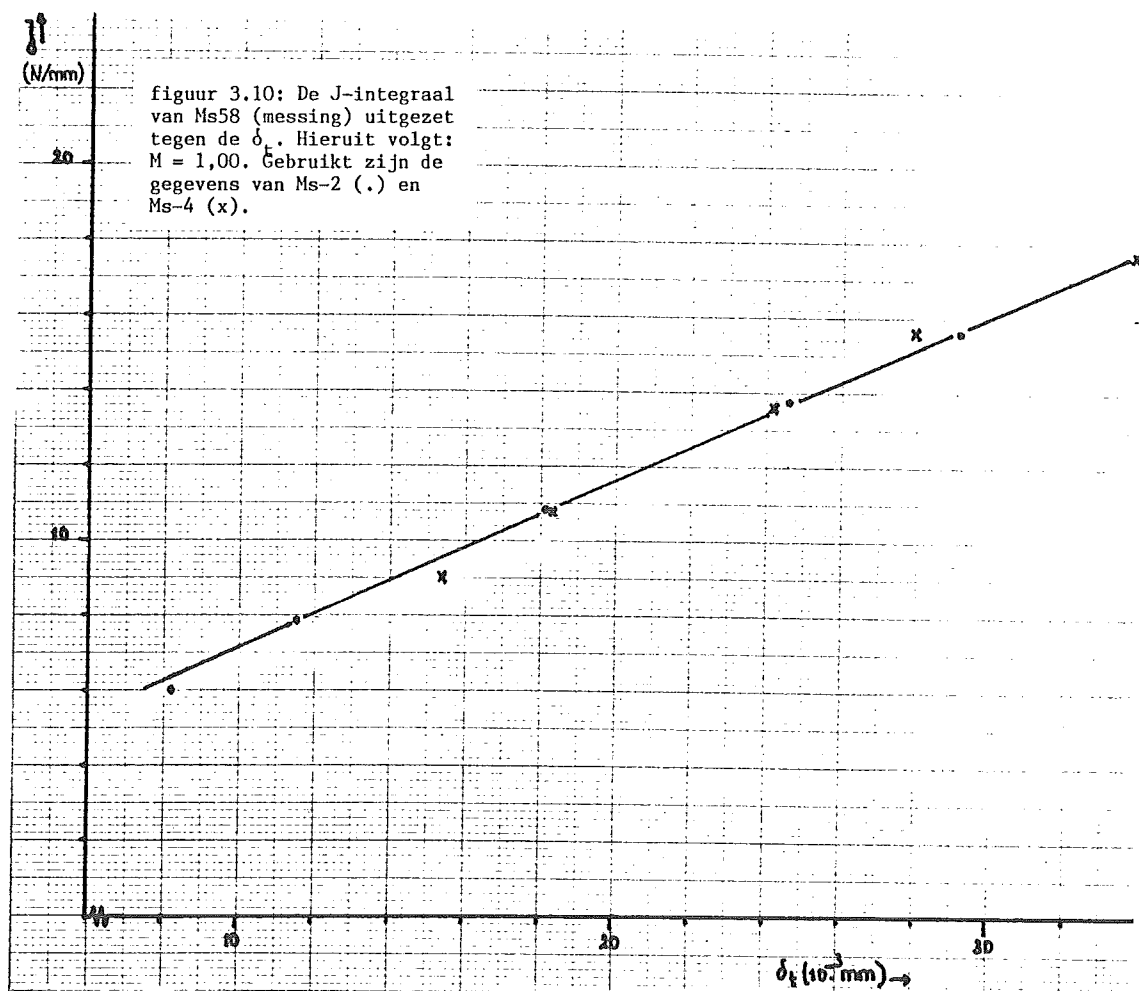
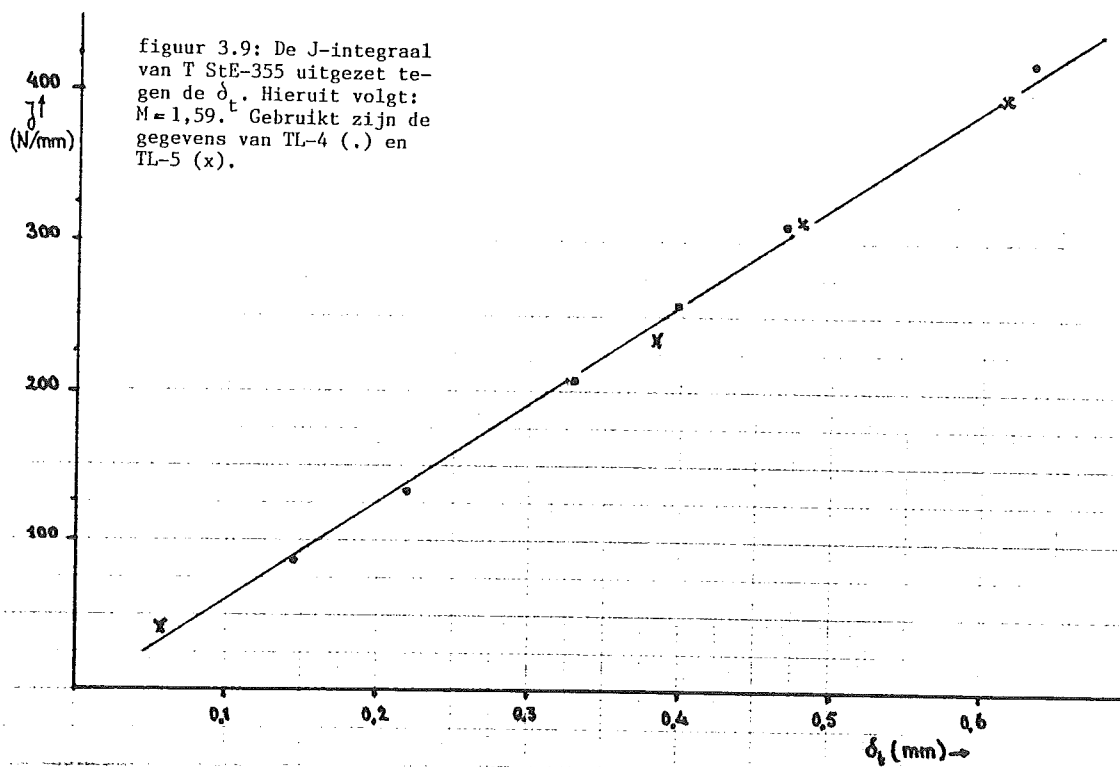
materiaal	nr	P kN	J N/mm	v'_{cl} mm	v' mm	K N/mm ^{3/2}	δ_1 μm	δ_t μm	M -
Fe510	S62	6,06	28,0	0,313	0,170	1450,7	12,0	49,3	1,50
		6,19	38,5	0,383	0,237	1481,9	12,5	64,5	
		6,32	49,3	0,473	0,324	1513,0	13,0	84,1	
		6,43	60,4	0,533	0,381	1539,3	13,5	97,1	
		6,47	66,0	0,553	0,400	1548,9	13,7	101,4	
	S65	6,63	28,2	0,333	0,163	1451,8	10,3	48,8	
		6,78	37,4	0,393	0,219	1484,6	10,8	62,6	
		6,85	42,1	0,427	0,251	1499,9	11,0	70,3	
		6,95	46,8	0,456	0,278	1521,8	11,3	81,9	
		7,02	51,6	0,480	0,300	1537,2	11,5	84,7	
Al2024	C7	3,57	7,0	0,191	0,013	813,1	12,6	15,9	1,08
		3,76	7,8	0,203	0,015	856,3	13,9	17,7	
		3,93	8,8	0,214	0,018	895,1	15,2	19,8	
		4,08	9,8	0,226	0,022	919,2	16,4	22,0	
		4,24	10,8	0,238	0,026	965,7	17,7	24,4	
	C9	3,33	5,9	0,177	0,006	760,0	11,0	12,5	
		3,50	6,6	0,186	0,007	798,8	12,1	13,9	
		3,66	7,2	0,196	0,008	835,4	13,3	15,4	
		3,81	7,9	0,205	0,010	869,6	14,4	17,0	
		3,96	8,7	0,215	0,012	903,8	15,5	18,6	
Al7075	M5	4,90	7,31	0,205	-	817,9	8,95	8,95	1,50
		5,00	7,68	0,211	0,001	834,6	9,32	9,47	
		5,12	8,13	0,217	0,002	854,6	9,77	10,17	
		5,20	8,39	0,220	0,001	868,0	10,08	10,38	
	M2	4,27	5,48	0,191	-	703,7	-	6,63	
		4,47	5,97	0,200	-	736,6	-	7,26	
		4,67	6,48	0,209	-	769,6	-	7,92	
		4,86	7,07	0,217	-	800,9	-	8,58	
		5,05	7,63	0,226	-	832,2	-	9,27	
Fe510Nb	7L-7	48,60	55,7	0,602	0,311	2439,4	32,2	118,8	1,31
		48,90	68,1	0,680	0,387	2454,4	32,6	140,4	
		49,70	91,8	0,847	0,549	2494,6	33,7	186,6	
		50,05	104,5	0,903	0,607	2512,2	34,2	203,3	
		50,40	117,2	0,980	0,678	2529,7	34,7	223,5	

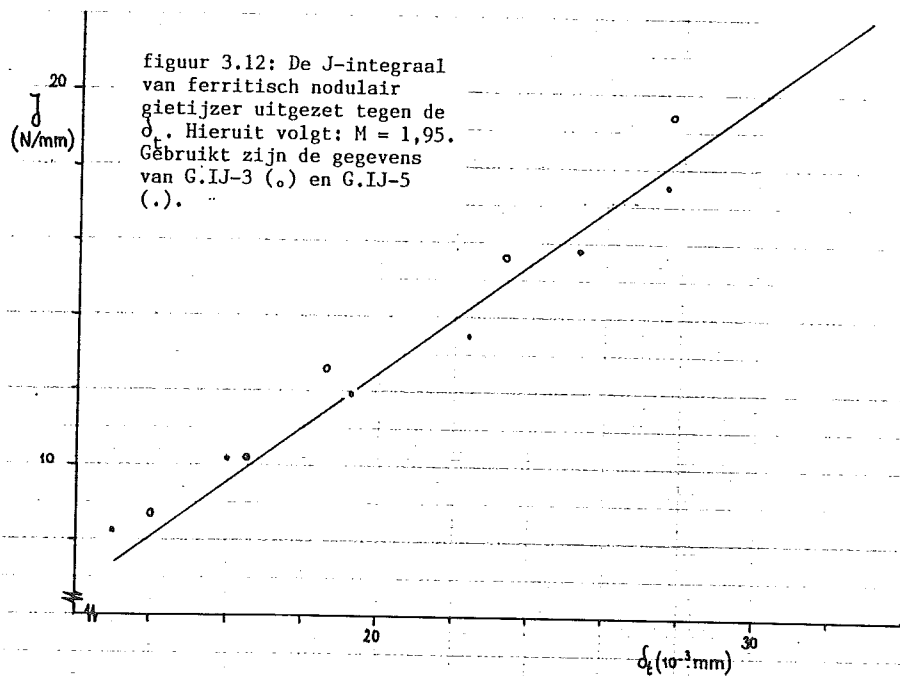
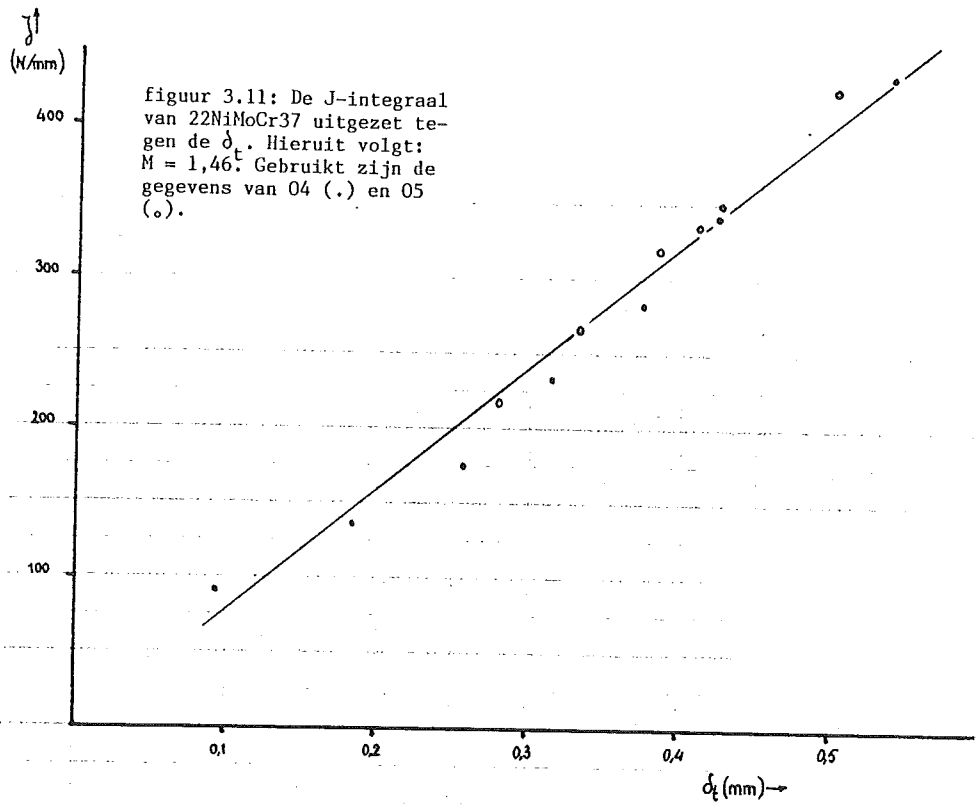
vervolgt

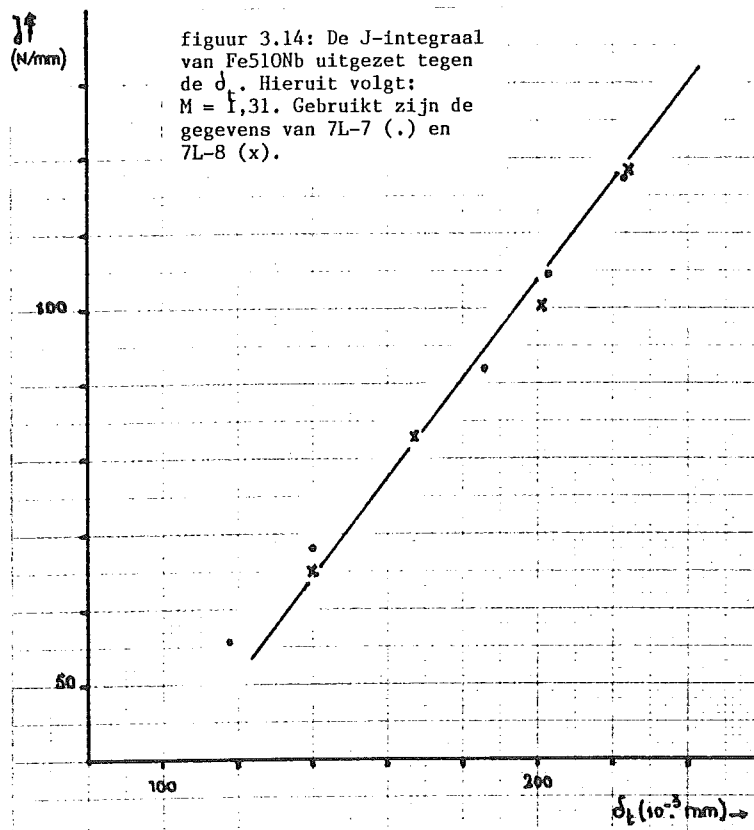
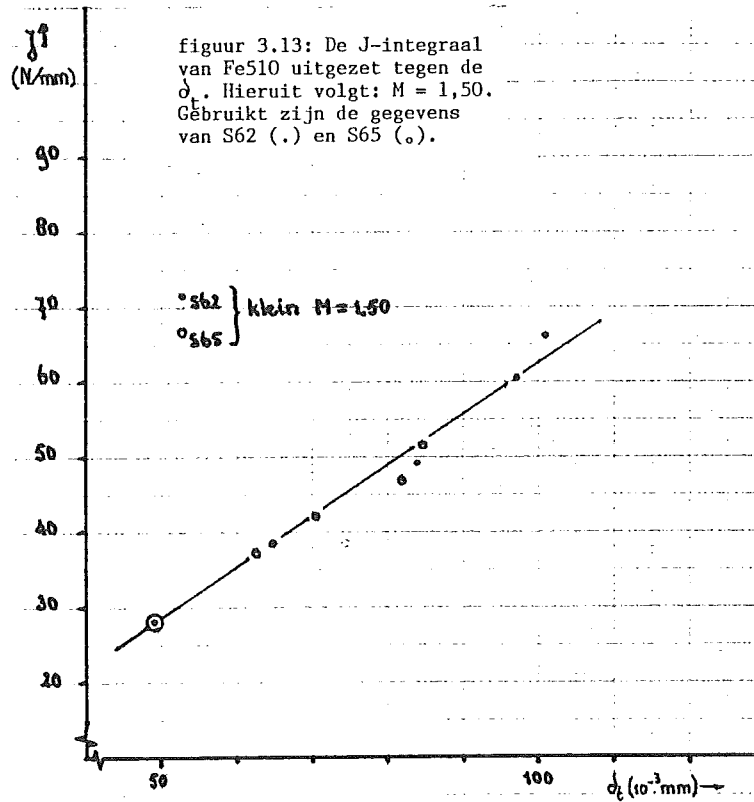
vervolg tabel 3.17

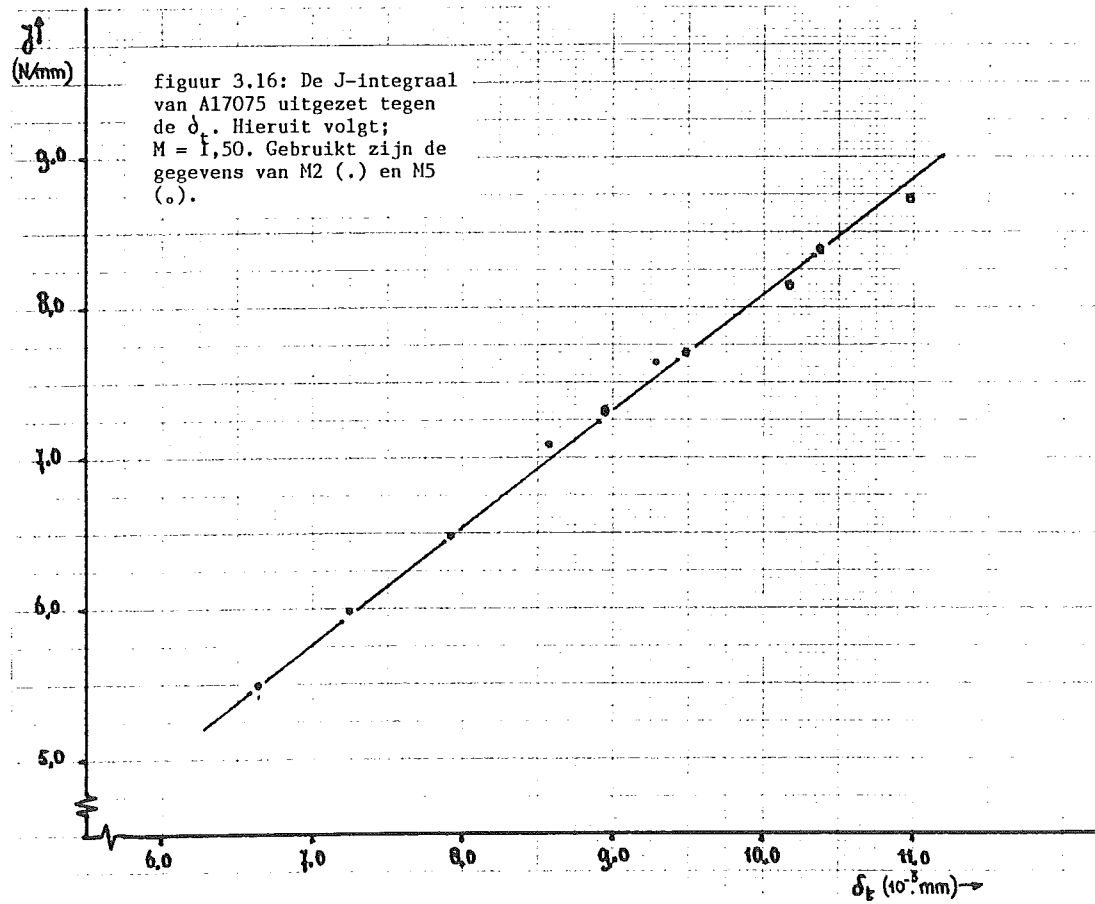
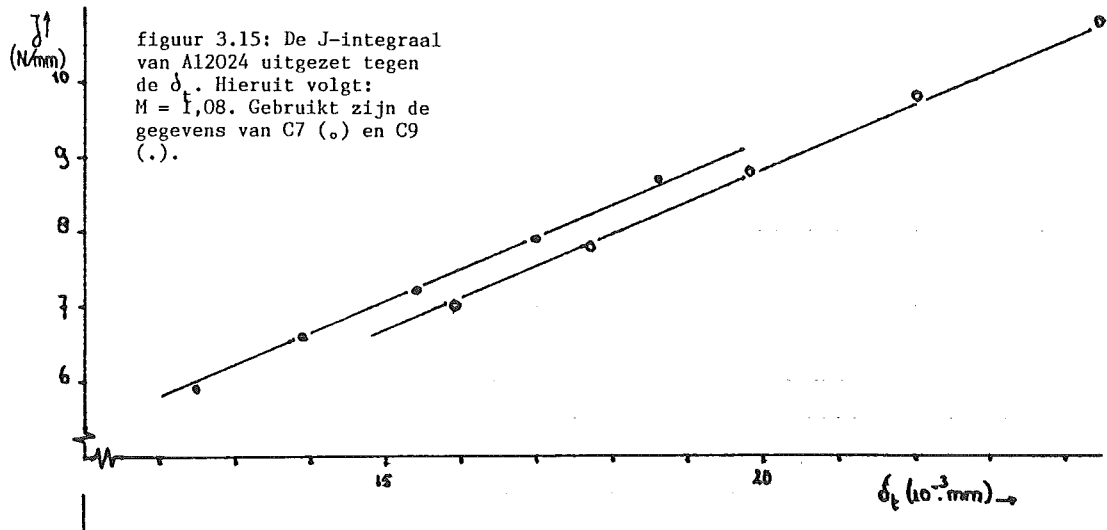
materiaal -	nr -	P kN	J N/mm	v'_{c1} mm	v' mm	K N/mm ^{3/2}	δ_l μm	δ_t μm	M -
Fe510Nb	7L-8	44,2 44,6 45,2 45,7	65,3 82,8 100,2 118,1	0,742 0,850 0,983 1,075	0,423 0,528 0,657 0,745	2449,6 2471,8 2505,0 2532,7	32,5 33,1 34,0 34,8	140,0 167,2 200,9 224,1	1,31
T StE-355	TL-4	21,45 22,25 23,40 24,15 24,85 26,00	86,1 133,1 206,5 257,4 310,0 419,5	0,845 1,155 1,620 1,901 2,197 2,859	0,509 0,807 1,254 1,523 1,808 2,450	2029,9 2105,6 2214,4 2285,4 2351,6 2474,6	21,9 23,6 26,1 27,8 29,4 32,5	145,8 220,1 331,4 398,6 469,5 628,9	1,59
	TL-5	21,35 24,60 25,70 26,75	41,7 235,5 315,0 398,1	0,408 1,690 2,070 2,606	0,164 1,409 1,776 2,300	1971,6 2271,7 2373,3 2470,2	25,4 33,7 36,8 39,8	66,2 384,3 478,8 612,2	
Ms58	MS-2	4,000 4,495 5,040 5,390 5,535	6,00 7,87 10,82 13,76 15,63	0,169 0,196 0,238 0,274 0,297	0,008 0,015 0,035 0,057 0,075	771,3 866,7 971,8 1039,3 1067,2	6,32 7,98 10,04 11,48 12,11	8,20 11,48 18,13 24,57 29,12	1,00
	MS-4	5,000 5,267 5,614 5,832 5,990	9,04 10,76 13,61 15,68 17,75	0,210 0,228 0,260 0,280 0,308	0,026 0,034 0,053 0,065 0,087	943,9 994,3 1059,8 1101,0 1130,8	9,47 10,51 11,94 12,88 13,59	15,41 18,35 24,24 27,96 33,82	
f.n.g*	G.IJ-3	3,40 3,50 3,60 3,70 3,83	8,71 10,26 12,65 15,59 19,42	0,130 0,142 0,153 0,175 0,196	0,021 0,030 0,037 0,056 0,073	1001,0 1030,4 1059,9 1089,3 1127,6	4,51 6,45 7,95 12,04 15,69	14,00 16,50 18,59 23,28 27,73	1,95
	GIJ-5	3,29 3,40 3,50 3,59 3,67 3,73	8,25 10,17 11,93 13,50 15,79 17,51	0,123 0,137 0,153 0,168 0,182 0,192	0,020 0,031 0,044 0,056 0,067 0,075	957,1 989,1 1018,1 1044,4 10 1085,1	4,34 6,73 9,55 12,15 14,54 16,28	13,01 15,99 19,37 22,48 25,33 27,64	

vervolgt









3.4
d e $\delta_t, \Delta a$ - r e c h t e

Voor de onderzochte materialen staan op de volgende bladzijden de grafieken gegeven, waarin de δ_t van de proefstukken is uitgezet tegen de Δa . Uit deze grafieken wordt de Δa_z bepaald.

Eveneens vermeld zijn de tabellen waaruit deze grafieken zijn samengesteld.

Tabel 3.18: De gegevens, gebruikt voor de bepaling van de Δa_z voor T StE-355, en de voorwaarden waaraan deze gegevens moeten voldoen volgens de BS-norm.

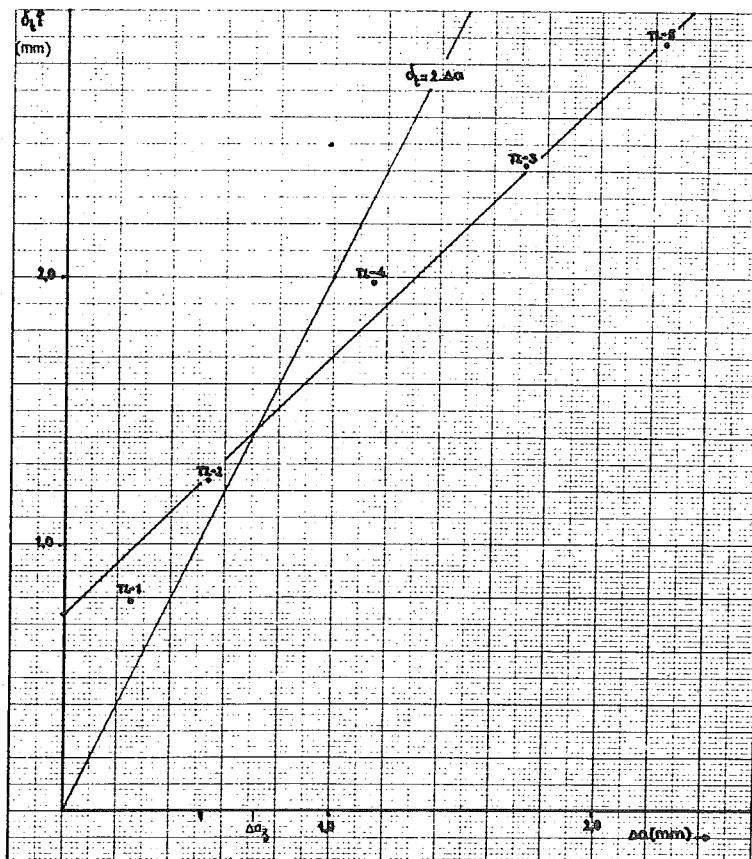
nr	v' mm	P kN	Y	D N/mm ^{3/2}	K_f N/mm ^{3/2}	K N/mm ^{3/2}	δ_t mm
TL-1	2,969	26,0	11,60	947,7	880,0	2378,4	0,782
TL-2	4,864	28,5	11,87	947,7	900,5	2667,8	1,242
TL-3	9,627	31,0	11,87	947,7	902,4	2901,8	2,425
TL-4	7,930	29,9	12,00	947,7	897,1	2831,4	1,983
TL-5	11,370	30,9	11,71	947,7	904,1	2853,5	2,883

$$D = 0,63 \cdot \sigma_{0,2} \cdot B^{\frac{1}{2}} \quad \text{voorwaarden: } 0,45 \leq a_0/W \leq 0,55$$

$$K_i = Y \cdot P_i / B \cdot W^{\frac{1}{2}} \quad z_0 = 1,5 \text{ mm}$$

$$K_f < D$$

$$\delta_t = \frac{K^2 \cdot (1-\nu)^2}{2 \cdot \sigma_{0,2} \cdot E} + \frac{0,4 \cdot b \cdot v'}{0,4 \cdot W + 0,6 \cdot a_0 + z_0}$$



figuur 3.17: De δ_t uitgezet tegen de Δa_z voor T StE-355; de hieruit bepaalde Δa_z bedraagt 0,72 mm.

Tabel 3.19: De gegevens, gebruikt voor de bepaling van de Δa_z voor 22NiMoCr37, en de voorwaarden waaraan deze gegevens moeten voldoen volgens de BS-norm.

nr	v' mm	P kN	Y -	D N/mm ^{3/2}	K_f N/mm ^{3/2}	K N/mm ^{3/2}	δ_t mm
01	3,843	36,0	11,83	1369,6	1257,3	3416,1	0,999
02	5,357	34,2	11,96	1381,2	1252,5	3232,9	1,356
03	5,447	34,2	11,87	1381,1	1242,9	3208,1	1,386
04	9,674	32,7	11,64	1373,8	1233,3	3043,7	2,463
05	8,103	34,1	11,75	1372,1	1246,0	3206,7	2,058
37	9,605	36,7	11,44	1379,3	1200,5	3320,7	2,489

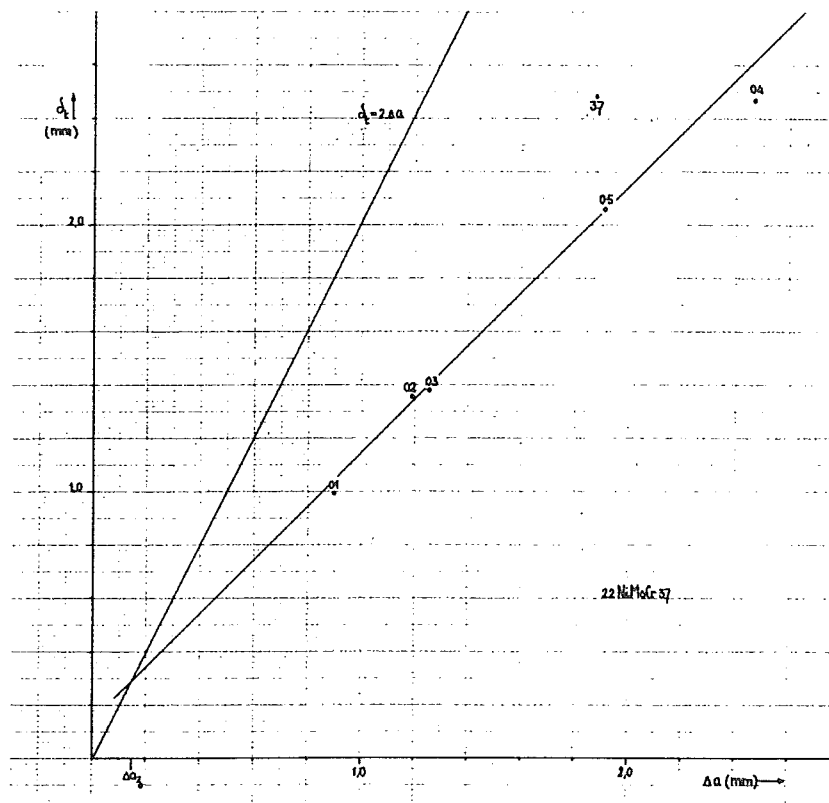
$$D = 0,63 \cdot \sigma_{0,2} \cdot B^{\frac{1}{2}}$$

voorwaarden: $0,45 \leq a_0/W \leq 0,55$

$$K_i = Y \cdot P_i / B \cdot W^{\frac{1}{2}} \quad z_0 = 1,5 \text{ mm}$$

$$K_f < D$$

$$\delta_t = \frac{K^2 \cdot (1 - \nu^2)}{2 \cdot \sigma_{0,2} \cdot E} + \frac{0,4 \cdot b \cdot v'}{0,4 \cdot W + 0,6 \cdot a_0 + z_0}$$



figuur 3.18: De δ_t uitgezet tegen de Δa voor 22NiMoCr37; de hieruit bepaalde Δa_z bedraagt 0,15 mm.

Tabel 3.20: De gegevens, gebruikt voor de bepaling van de Δa_z voor nodulair ferritisch gietijzer, en de voorwaarden waaraan deze gegevens moeten voldoen volgens de BS-norm (lit.15).

nr	v' mm	P kN	Y -	D N/mm ^{3/2}	K_f N/mm ^{3/2}	K N/mm ^{3/2}	δ_t mm
G.IJ-2	0,915	3,43	13,38	625,1	895,2	1023,5	0,203
G.IJ-3	0,410	4,04	13,14	623,4	883,2	1189,4	0,102
G.IJ-5	0,355	3,85	13,00	624,2	872,7	1120,0	0,089

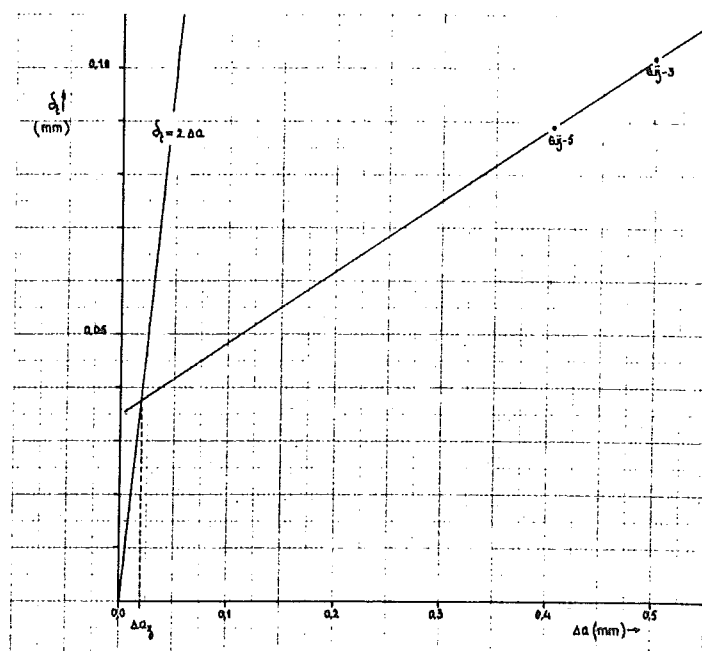
$$D = 0,63 \cdot \sigma_{0,2} \cdot B^{\frac{1}{2}}$$

voorwaarden: $0,45 \leq a_o/W \leq 0,55$

$$K_f = Y \cdot P_i / B \cdot W^{\frac{1}{2}} \quad z_o = 1,5 \text{ mm}$$

$$K_f < D$$

$$\delta_t = \frac{K^2 \cdot (1 - \nu^2)}{2 \cdot \sigma_{0,2} \cdot E} + \frac{0,4 \cdot b \cdot v'}{0,4 \cdot W + 0,6 \cdot a_o + z_o}$$



figuur 3.19: De δ_t uitgezet tegen de Δa voor f.h.g; de hieruit bepaalde Δa_z bedraagt 0,02 mm.

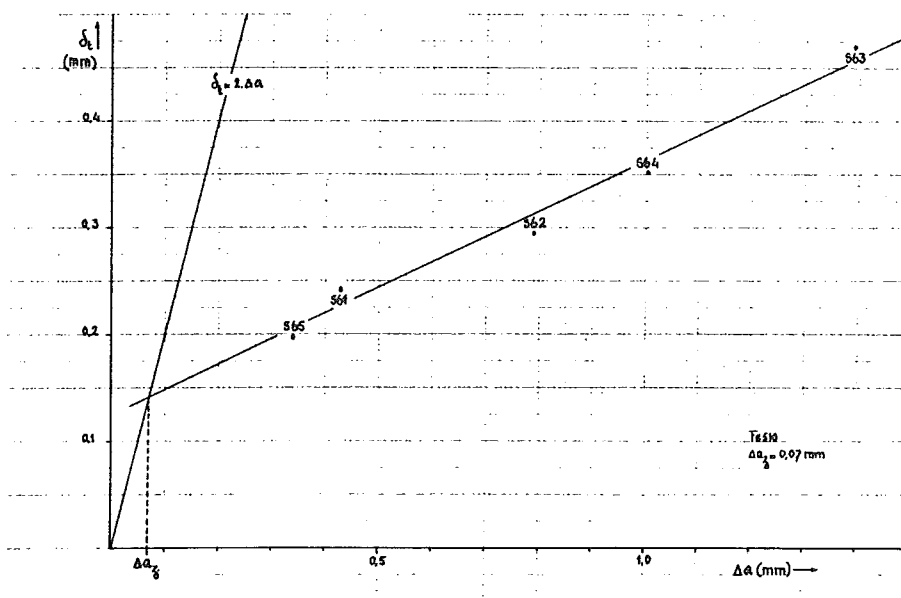
Tabel 3.21: De gegevens, gebruikt voor de bepaling van de Δa_z voor Fe510, en de voorwaarden waaraan deze gegevens moeten voldoen volgens de BS-norm.

nr	v' mm	P kN	Y -	D N/mm ^{3/2}	K_f N/mm ^{3/2}	K N/mm ^{3/2}	δ_t mm
S61	0,987	7,34	12,16	849,5	866,7	1674,0	0,243
S62	1,295	6,58	12,82	851,1	718,2	1575,2	0,298
S63	1,810	7,64	10,89	852,2	830,5	1547,6	0,471
S64	1,424	7,77	11,75	850,4	659,4	1707,9	0,353
S65	0,776	7,26	11,75	851,0	656,9	1589,7	0,198

$$D = 0,63 \cdot \sigma_{q2} \cdot B^{\frac{1}{2}} \quad \text{voorwaarden: } 0,45 \leq a_o/W \leq 0,55$$

$$K_i = Y \cdot P_i / B \cdot W^{\frac{1}{2}} \quad z_o = 1,5 \text{ mm} \quad K_f < D$$

$$\delta_t = \frac{K^2 \cdot (1 - \nu^2)}{2 \cdot \sigma_{0,2} \cdot E} + \frac{0,4 \cdot b \cdot v'}{0,4 \cdot W + 0,6 \cdot a_o + z_o}$$



figuur 3.20: De δ_t uitgezet tegen de Δa voor Fe510; de hieruit bepaalde Δa_z bedraagt 0,07 mm.

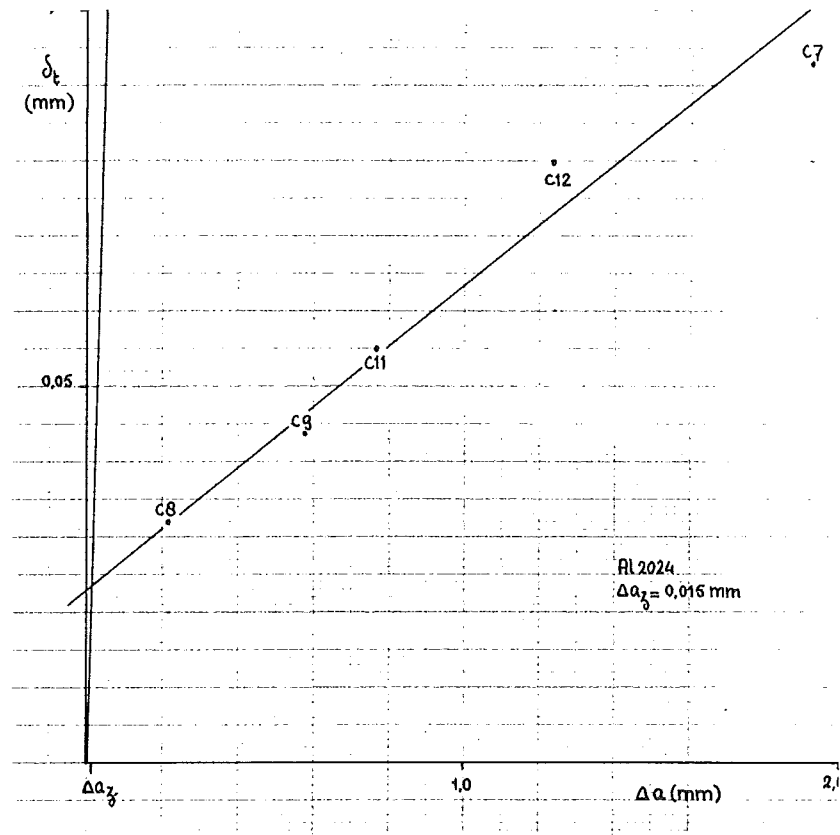
Tabel 3.22: De gegevens, gebruikt voor de bepaling van de Δa_z voor Al2024, en de voorwaarden waaraan deze gegevens moeten voldoen volgens de BS-norm.

nr	v' mm	P kN	Y -	D N/mm ^{3/2}	K_f N/mm ^{3/2}	K N/mm ^{3/2}	δ_t mm
C7	0,298	4,12	10,68	660,5	455,5	938,3	0,0931
C8	0,034	4,81	10,61	658,3	456,9	1098,9	0,0317
C9	0,080	4,88	10,61	658,4	456,5	1113,8	0,0442
C11	0,135	4,34	11,60	655,8	503,1	1091,7	0,0549
C12	0,255	4,02	11,48	656,8	495,8	996,6	0,0804

$$D = 0,63 \cdot \sigma_{q2} \cdot B^{\frac{1}{2}} \quad \text{voorwaarden: } 0,45 \leq a_o/W \leq 0,55$$

$$K_i = Y \cdot P_i / B \cdot W^{\frac{1}{2}} \quad z_o = 1,5 \text{ mm} \quad K_f < D$$

$$\delta_t = \frac{K^2 \cdot (1 - \nu^2)}{2 \cdot \sigma_{q2} \cdot E} + \frac{0,4 \cdot b \cdot v'}{0,4 \cdot W + 0,6 \cdot a_o + z_o}$$



figuur 3.21: De δ_t uitgezet tegen de Δa_z voor Al2024; de hieruit bepaalde Δa_z bedraagt 0,015 mm.

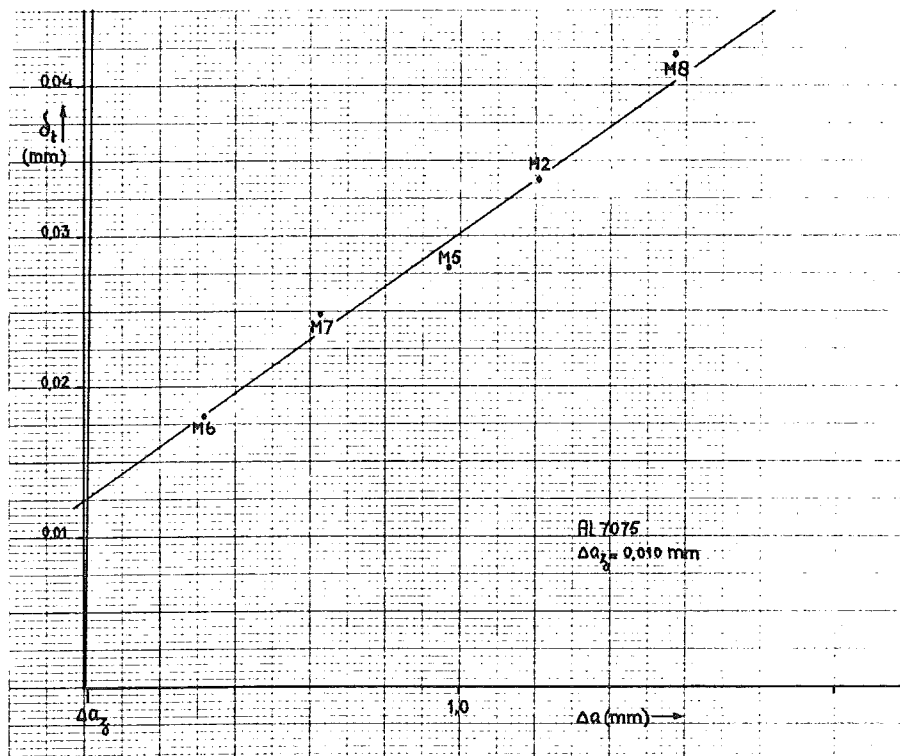
Tabel 3.23: De gegevens, gebruikt voor de bepaling van de Δa_z voor Al7075, en de voorwaarden waaraan deze gegevens moeten voldoen volgens de BS-norm.

nr	v'	P	Y	D	K_f	K	δ_t
-	mm	kN	-	N/mm ^{3/2}	N/mm ^{3/2}	N/mm ^{3/2}	mm
M1	0,120	5,00	11,03	1061,4	890,0	855,7	0,0403
M2	0,085	5,52	10,61	1061,2	856,9	909,7	0,0334
M5	0,064	5,52	10,78	1063,5	868,0	921,4	0,0279
M6	0,025	5,18	11,96	1061,8	963,6	959,9	0,0183
M7	0,051	5,27	11,87	1063,5	953,3	966,1	0,0247
M8	0,124	5,14	11,18	1062,7	900,4	890,0	0,0418

$$D = 0,63 \cdot \sigma_{0,2} \cdot B^{\frac{1}{2}} \quad \text{voorwaarden: } 0,45 \leq a_0/W \leq 0,55$$

$$K_i = Y \cdot P_i / B \cdot W^{\frac{1}{2}} \quad z_0 = 1,5 \text{ mm} \quad K_f < D$$

$$\delta_t = \frac{K^2 \cdot (1 - \nu^2)}{2 \cdot \sigma_{0,2} \cdot E} + \frac{0,4 \cdot b \cdot v'}{0,4 \cdot W + 0,6 \cdot a_0 + z_0}$$



figuur 3.22: De δ_t uitgezet tegen de Δa voor Al7075; de hieruit bepaalde Δa_z bedraagt 0,010 mm.

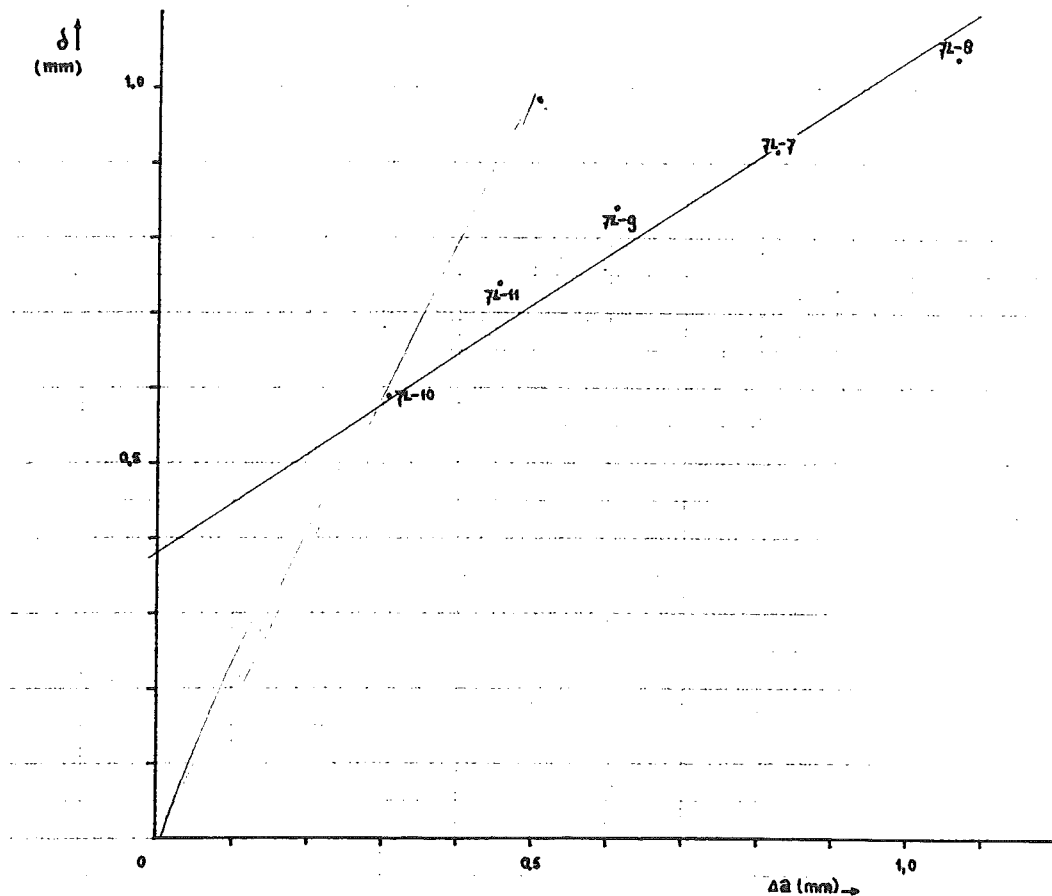
Tabel 3.24: De gegevens, gebruikt voor de bepaling van de Δa_z voor Fe510Nb, en de voorwaarden waaraan deze gegevens moeten voldoen volgens de BS-norm.

nr	v' mm	P kN	Y -	D N/mm ^{3/2}	K_f N/mm ^{3/2}	K N/mm ^{3/2}	δ_t mm
7L-7	3,095	60,2	10,48	1347	1180	3021,6	0,9117
7L-8	3,856	58,0	11,60	1350	1286	3214,4	1,0367
7L-9	2,838	60,4	10,44	1345	1179	3031,1	0,8420
7L-10	1,896	56,7	9,99	1343	1132	2732,2	0,5904
7L-11	2,706	54,6	11,48	1351	1276	2988,9	0,7427

$$D = 0,63 \cdot \sigma_{0,2} \cdot B^{\frac{1}{2}} \quad \text{voorwaarden: } 0,45 \leq a_0/W \leq 0,55$$

$$K_i = Y \cdot P_i / B \cdot W^{\frac{1}{2}} \quad z_0 = 1,5 \text{ mm} \quad K_f < D$$

$$\delta_t = \frac{K^2 \cdot (1 - \nu^2)}{2 \cdot \sigma_{0,2} \cdot E} + \frac{0,4 \cdot b \cdot v'}{0,4 \cdot W + 0,6 \cdot a_0 + z_0}$$



figuur 3.23: De δ_t uitgezet tegen de Δa voor Fe510Nb; de hieruit bepaalde Δa_z is 0,280 mm.

Tabel 3.25: De gegevens, gebruikt voor de bepaling van de Δa_z voor messing (Ms58), en de voorwaarden waaraan deze gegevens moeten voldoen volgens de BS-norm.

nr	v' mm	P kN	Y -	D N/mm ^{3/2}	K_f N/mm ^{3/2}	K N/mm ^{3/2}	δ_t mm
MS-1	0,294	6,32	11,40	1038,2	775,1	1031,3	84,0
MS-2	0,206	5,74	12,50	1001,4	915,9	1106,8	60,0
MS-4	0,134	6,08	12,30	890,8	896,7	1147,8	45,1
MS-5	0,156	6,08	12,42	888,0	914,5	1170,6	50,4

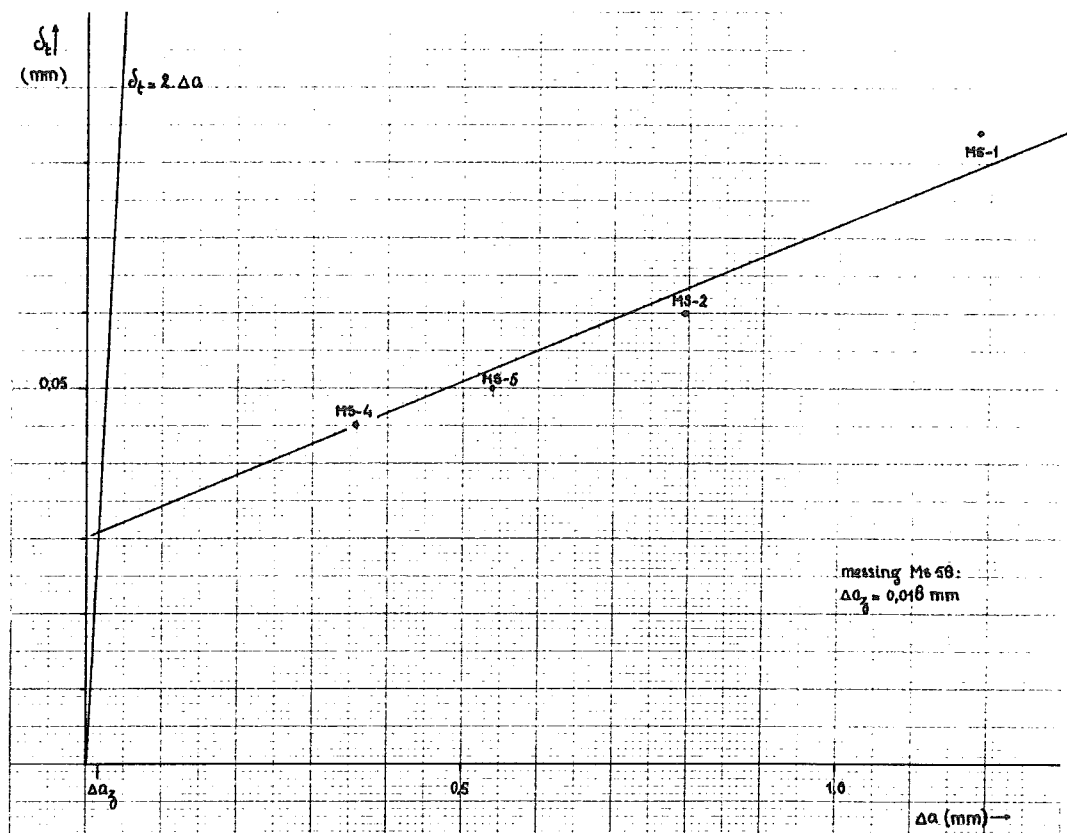
$$D = 0,63 \cdot \sigma_{0,2} \cdot B^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{voorwaarden: } 0,45 \leq a_0/W \leq 0,55$$

$$K_i = Y \cdot P_i / B \cdot W^{\frac{1}{2}} \quad z_0 = 1,5 \text{ mm}$$

$$K_f < D$$

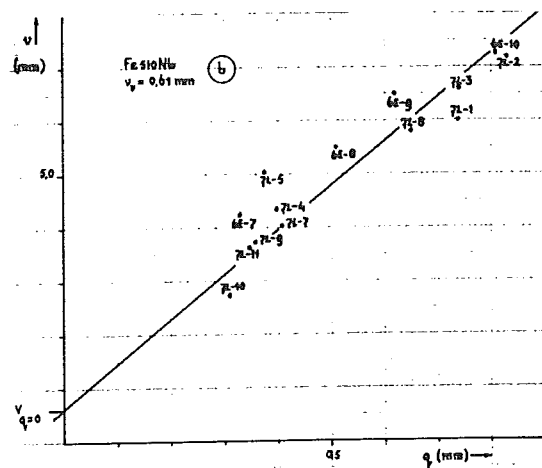
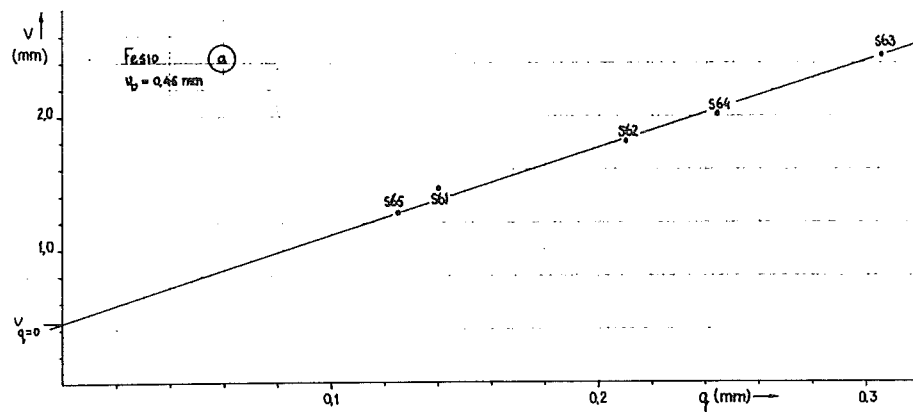
$$\delta_t = \frac{K^2 \cdot (1 - \nu^2)}{2 \cdot \sigma_{0,2} \cdot E} + \frac{0,4 \cdot b \cdot v'}{0,4 \cdot W + 0,6 \cdot a_0 + z_0}$$



figuur 3.24: De δ_t uitgezet tegen de Δa voor messing Ms58; de hieruit bepaalde Δa_z is 0,018 mm.

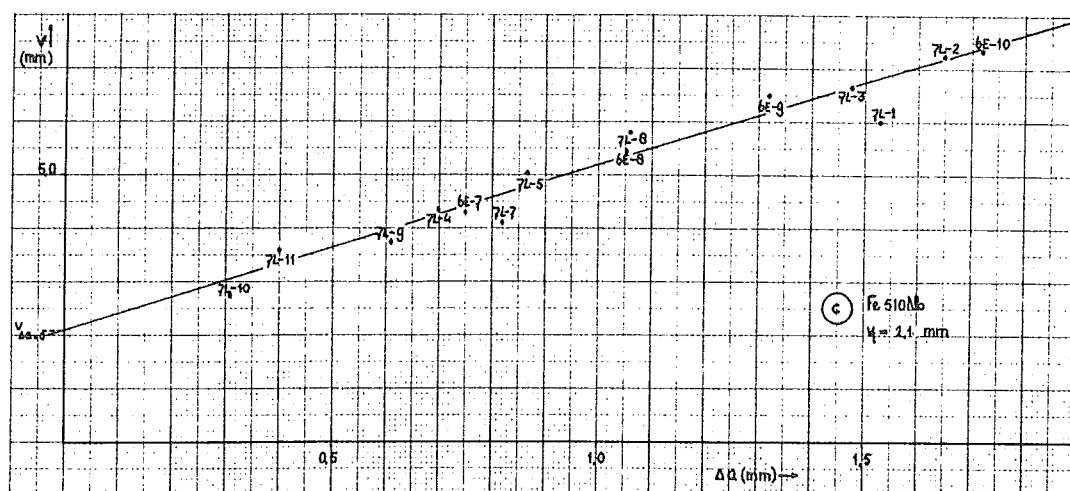
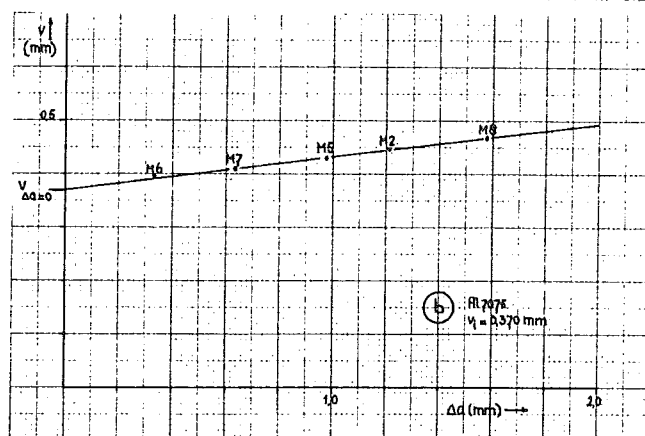
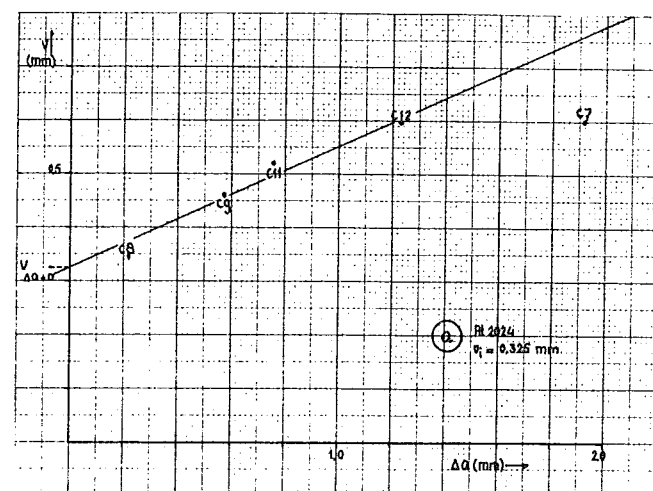
3.5 d e v , q - r e c h t e

In onderstaande figuur is de doorbuiging van het proefstuk uitgezet tegen de insnoering q . Het snijpunt met de as $q=0$ staat aangegeven als $v_{q=0}$. Tevens is de v_v vermeld. Deze figuur wordt toegelicht in par.4.1.1.



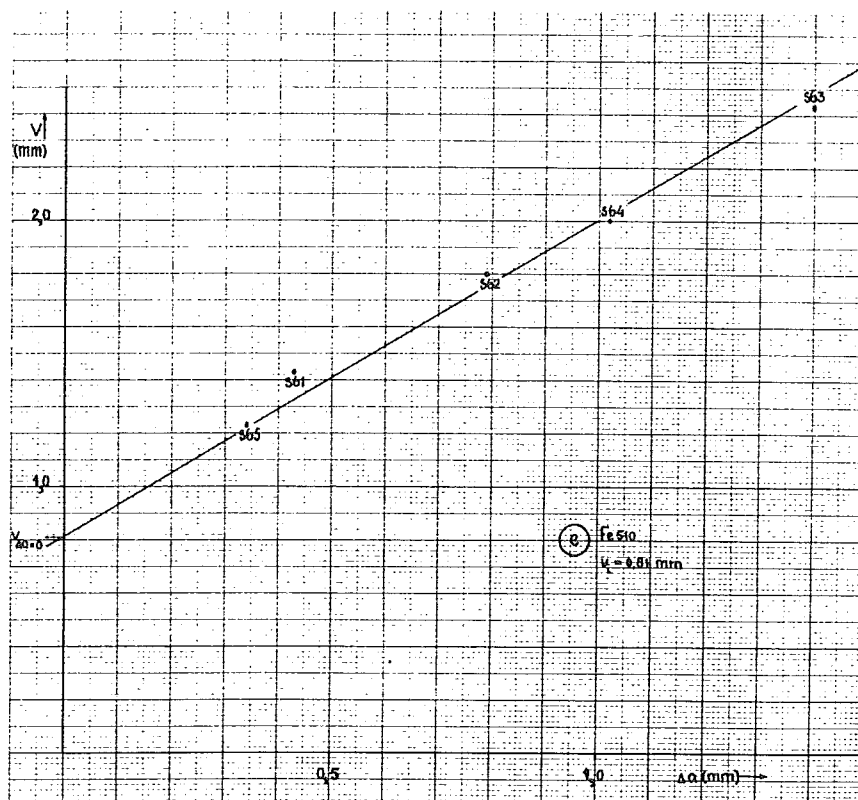
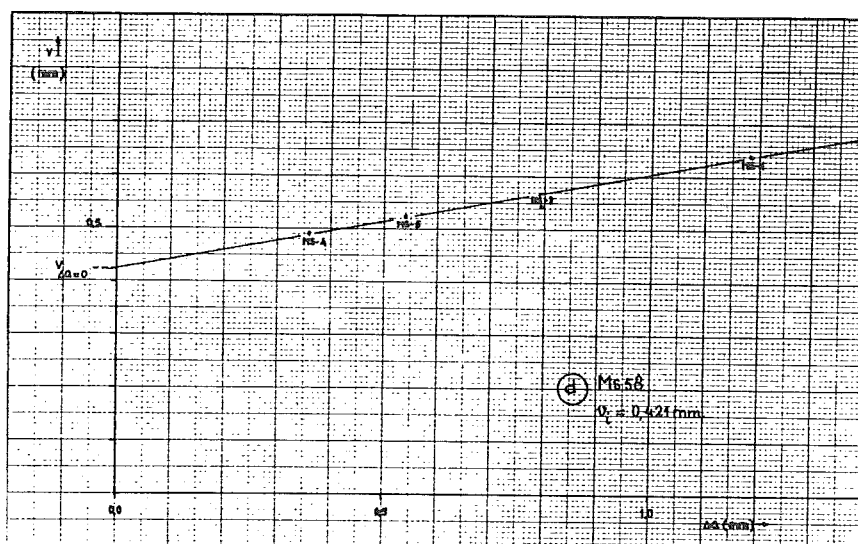
figuur 3.25:
De doorbuiging van het proefstuk v uitgezet tegen de insnoering q voor Fe510 (a) en Fe510Nb (b).

3.6 de $v, \Delta a$ - rechte



figuur 3.26: Voor de materialen Al2024 (a), Al7075 (b), Fe510Nb (c), Ms58 (d) en Fe510 (e) is de doorbuiging van het proefstuk uitgezet tegen de scheuruitbreiding. Het snijpunt van de rechte met de as $\Delta a=0$, $v_{\Delta a=0}$, staat op de grafiek aangegeven. Tevens is de v_i vermeld. Toelichting op deze figuur volgt in par.4.1.3.

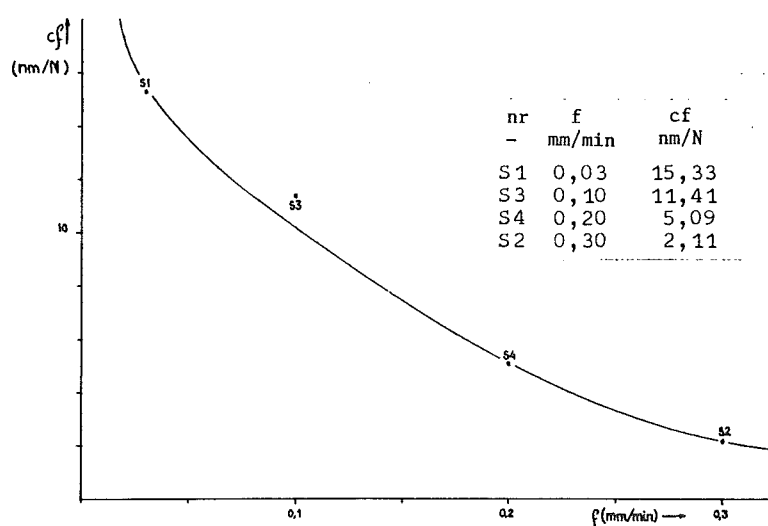
vervolg figuur 3.26:



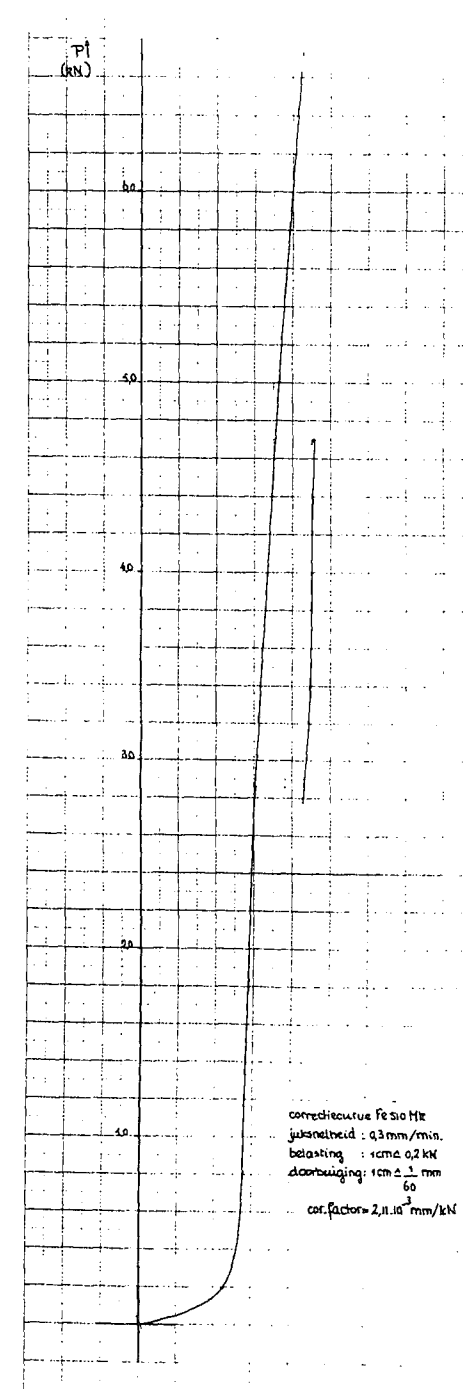
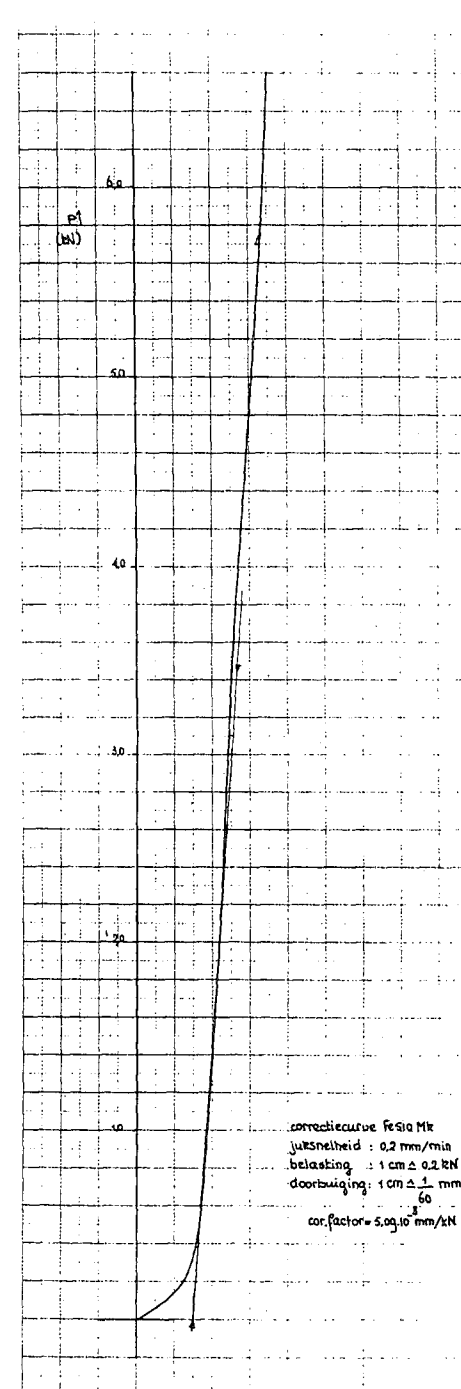
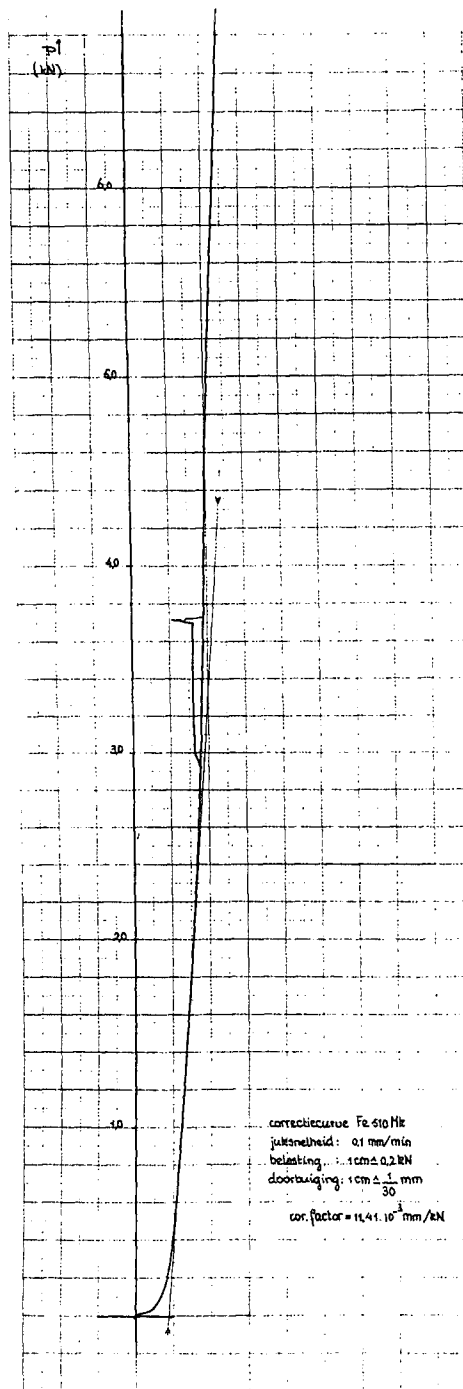
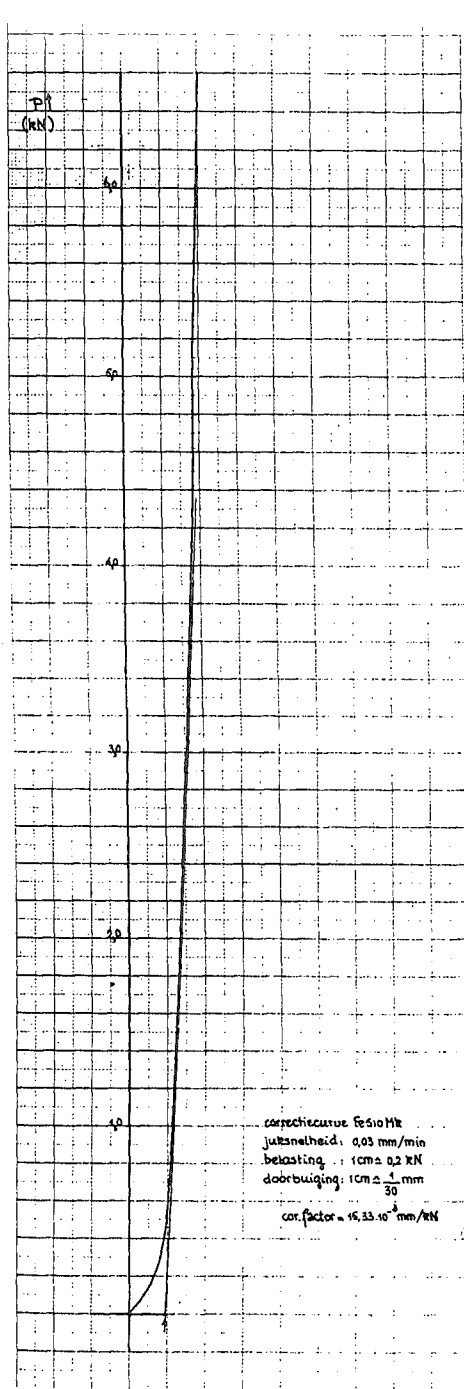
3.7

F e 5 1 0 ; d e c o r r e c t i e - c u r v e n

De proefstukken van Fe510 zijn bij verschillende snelheden beproefd. Om de correctie voor de rolindrukking van het materiaal uit te kunnen voeren is de correctie-factor bij verschillende snelheden bepaald. Op deze manier ontstond figuur 3.27; de hieraan ten grondslag liggende correctie-curven staan afgebeeld in figuur 3.28.



figuur 3.27; Het verband tussen correctie-factor en doorbuigingssnelheid van het proefstuk, zoals bepaald is voor Fe510.



figuur 3.28: De correctie-curven van Fe510 bij 0,03; 0,10; 0,20 en 0,30 mm/minuut.

3.8

d e J - w a a r d e n

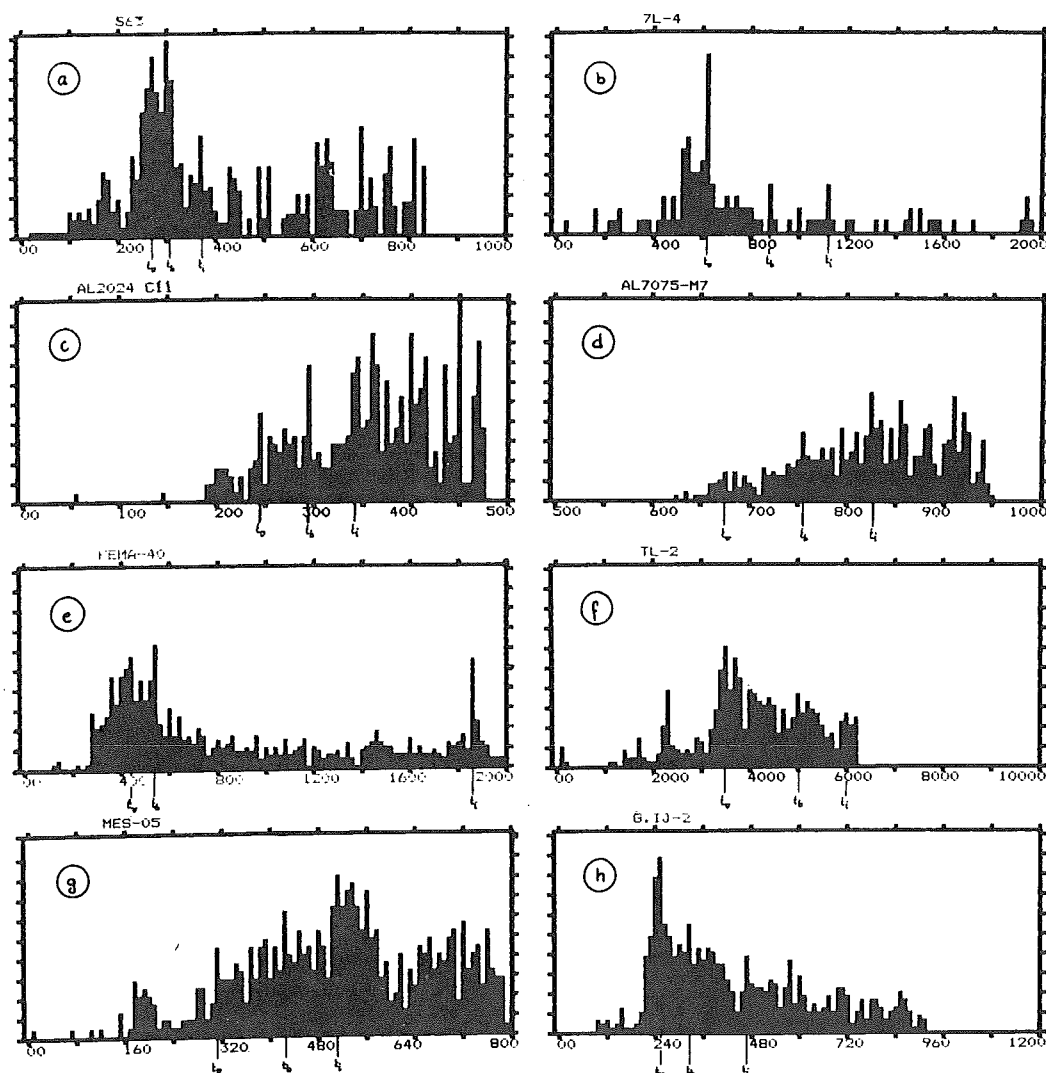
Tabel 3.26: De J-waarden die bepaald zijn volgens de ASTM-voorwaarden (J_Q), de AE-opnamen (J_{ae}), de M-lijn (J_{QM}) en de σ_t - Δa -relatie (J_z). Tevens worden vermeld de Δa en de M-waarde waarmee tot respectievelijk de J en de J_{QM} is gekomen. Het verschil in de nauwkeurigheid waarmee de tabelwaarden worden gegeven voor de verschillende materialen, is veroorzaakt door de as-verdeling van de grafiek waaruit de betreffende waarde is bepaald.

materiaal	J_Q N/mm	J_{ae} N/mm	J_{QM} N/mm	J_z N/mm	Δa_z mm	M -
Fe510	92	85	85	86	0,07	1,50
Al2024	9,95	9,98	9,90	10,00	0,015	1,08
Al7075	10,40	9,61	10,38	10,40	0,010	1,50
Fe510Nb	280	217	220	→ 280	0,280	1,31
→ 22NiMOCr37	1260	669	650	450	0,15	1,49
T StE-355	1270	592	600	→ 760	0,72	1,59
Ms58	16,8	16,8	16,8	16,7	0,018	1,00
f.n.g	32	28	30	30	0,02	1,95

discussie

4.1 de AE - opnamen

De tijdens de beproeving opgenomen akoestische emissie vertoont een samenhangend patroon dat voor vrijwel alle beproefde materialen in meer- of mindere mate terugkeert.



figuur 4.1: Voorbeelden van het AE-patroon van gebeurtenissen in de tijd voor; Fe510 (a), Fe510Nb (b), Al2024 (c), Al7075 (d), 22NiMoCr37 (e), T StE-355 (f), Ms58 (g) en nodulair ferritisch gietijzer (h).

Een verduidelijking van het AE-patroon geeft figuur 4.1. Dit patroon van gebeurtenissen in de tijd vertoont drie maxima. Het eerste maximum zal worden aangeduid met de index v , het tweede met b en het derde met i . De indexkeuze wordt verklaard door het materiaalgedrag tijdens het maximum.

4.1.1 het eerste maximum

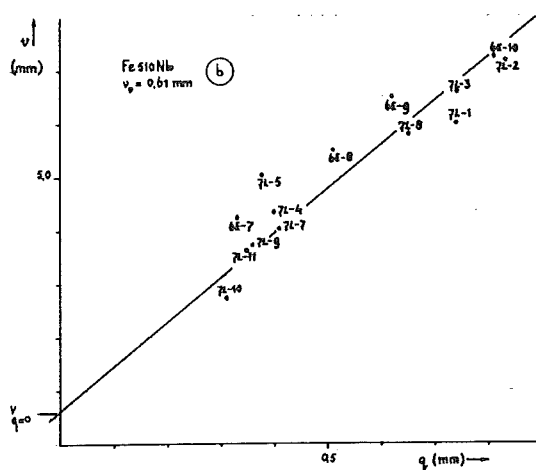
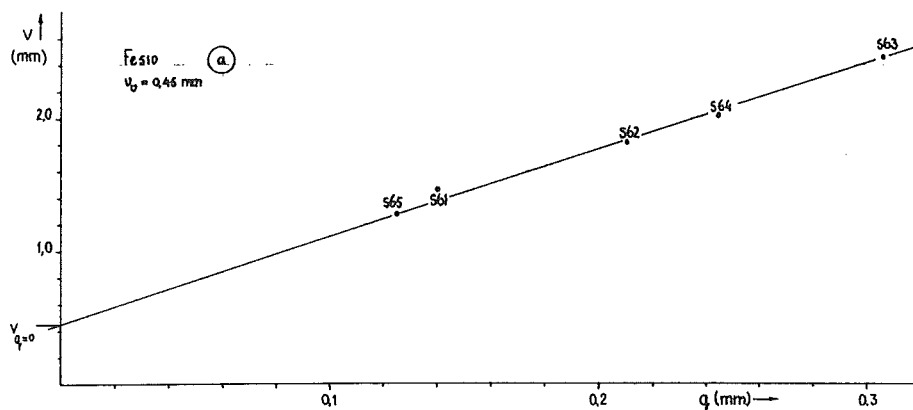
Het eerste maximum ontstaat tijdens het eerste begin van de plastische deformatie van het materiaal. Het wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het geheel of gedeeltelijk losscheuren of breken van insluitsels in het materiaal rond de scheurtip en vorming van voids; vooral dit laatste is een AE-bron die veel pulsen genereert (lit.7).

Ten tijde van het eerste maximum wordt van het lineaire gedeelte van de P, v -curve afgeweken. Dit begin van plastische deformatie is ook aan te tonen door de insnoering q uit te zetten tegen de doorbuiging. Hiertoe wordt voor meerdere proefstukken de insnoering, na beëindiging van de beproeving, opgemeten. Deze insnoeringen worden uitgezet tegen de maximale doorbuiging van de bijbehorende proefstukken. Extrapolatie naar insnoering nul ($q=0$) levert dan de doorbuiging ten tijde van het eerste maximum op (let wel; dit typeert het gedrag van het materiaal op dit eerste maximum, en niet de AE-bron die dit maximum veroorzaakt.)

Ter illustratie is op de volgende bladzijde voor twee materialen (Fe510 en Fe510Nb) de q, v -rechte gegeven (figuur 3.25); het snijpunt van de q, v -rechte met de as $q=0$ correspondeert met de via de AE bepaalde v_v .

De insnoering q is alleen te bepalen voor materialen die bros gebroken zijn; bij doorvermoeien van het proefstuk ontstaat ook weer insnoering, en het is niet mogelijk deze te onderscheiden van de insnoering, ontstaan tijdens de beproeving. Een tweede voorwaarde is dat het materiaal voldoende taai is. Met de gebruikte meetapparatuur kan tot op 0,005 mm nauwkeurig gemeten worden; insnoeringen kleiner dan deze waarde zijn niet te meten. De grootte van de insnoering hangt behalve van de doorbuiging ook af van de proefstukgrootte.

De index van het eerste maximum slaat op voidsvorming.



De doorbuiging van het proefstuk v uitgezet tegen de insnoering q voor Fe510 (a) en Fe510Nb (b).

4.1.2 het tweede maximum

Het tweede maximum treedt minder duidelijk op bij bijvoorbeeld de aluminium-legeringen, maar is uitgesproken bij Fe510 en Fe510Nb. Dit maximum ontstaat tijdens blunting van de scheurtip.

De tip van dit maximum treedt op als tijdens de beproeving de glijlijnen zichtbaar worden die in hoeken van 45° staan ten opzichte van de richting van de vermoeiingsscheur (zie par.2.2.1). Waarschijnlijk hangt de oorzaak van dit maximum samen met de vorming van het plastisch scharnier. Tabel 4.1 geeft voor enkele materialen de J-waarden ten tijde van dit tweede maximum (J_b). Deze tabel is samengesteld uit de AE-tabellen van par.3.2.

Tabel 4.1 : Het tijdstip van het tweede maximum en de bijhorende J-waarde voor proefstukken van de materialen Fe510, Fe510Nb, A12024, A17075, 22NiMoCr37 en Ms58.

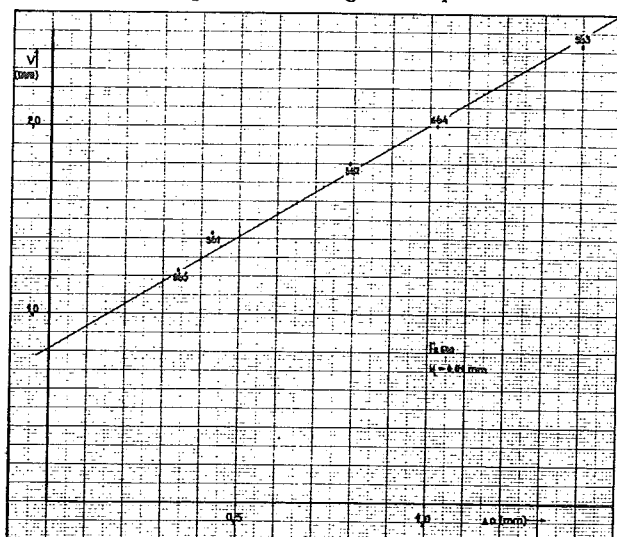
materiaal	nr	t	v	P	v _c	J _b
-	-	sec	mm	kN	mm	N/mm
Fe510	S62	1330,0	0,783	6,49	0,695	71,4
	S63	306,5	0,616	7,85	0,576	61,4
	S64	192,0	0,670	7,35	0,655	67,4
	S65	2496,0	0,725	6,90	0,612	61,7
Fe510Nb	7L-1	863,0	1,250	56,4	1,029	120,3
	7L-3	894,5	1,400	45,6	1,221	127,6
	7L-4	878,7	1,363	48,8	1,171	129,4
A12024	C 9	300,0	0,297	3,53	0,250	6,86
	C11	294,0	0,295	3,13	0,254	6,81
	C12	300,0	0,255	2,98	0,216	6,44
A17075	M3	741,0	0,362	4,43	0,315	7,44
	M5	745,0	0,320	4,60	0,271	6,89
	M6	732,9	0,312	4,13	0,268	7,09
	M7	755,1	0,300	4,34	0,254	7,39
22NiMoCr37	01	384	0,57	26,0	0,403	35,6
	02	379	0,540	26,0	0,373	31,8
	03	347	0,481	24,3	0,324	26,7
	04	519	0,682	28,9	0,494	64,4
	05	390	0,610	26,0	0,443	39,8
	37	435	0,552	29,0	0,364	30,0
	38	330	0,429	23,3	0,280	20,2
	40	542	0,401	26,3	0,231	18,7
Ms58	MS-1	471	0,345	5,60	0,334	11,80
	MS-2	414	0,323	4,86	0,313	10,00
	MS-3	396	0,315	4,83	0,305	8,55
	MS-4	381	0,306	4,60	0,297	8,41
	MS-5	420	0,340	5,15	0,330	10,68

De AE-bron van dit tweede maximum wordt vermoedelijk veroorzaakt door de beweging van het materiaal langs de glijlijnen tijdens het blunting-proces. Het is mogelijk dat door de combinatie van beweging en toenemende belasting, harde deeltjes in het materiaal breken. Dit zou dan de pulsen leveren die het tweede maximum vormen.

4.1.3 het derde maximum

Het derde maximum wordt beschouwd als indicatie van scheurinitiatie.

Dit vermoeden wordt onder meer bevestigd door de $v, \Delta a$ -rechte. Als wordt geëxtrapoleerd naar een scheuruitbreiding nul ($\Delta a=0$), dan wordt een doorbuiging gevonden die overeenkomt met de gemiddelde doorbuiging van de proefstukken op het tijdstip van het derde maximum. Ter illus-



De $v, \Delta a$ -rechte van Fe510.

tratie is hier de $v, \Delta a$ -rechte van Fe510 afgebeeld; deze $v, \Delta a$ -rechte en die van Fe510Nb, Ms58, Al2024 en Al7075 staan in fig.3.26, par.3.6.

De voorgaande twee maxima worden veroorzaakt door voids-vorming en beweging van het materiaal langs de glijlijnen tijdens het blunting-proces; het ligament tussen gebroken insluitfels en voids enerzijds en de afgebotte scheurtip anderzijds zal, na een mogelijke insnoering, tenslotte breken. Hierna zal scheuruitbreiding optreden. De tijdsduur tussen eerste en

derde maximum zal bepaald worden door doorbuigingssnelheid en taaiheid van het materiaal.

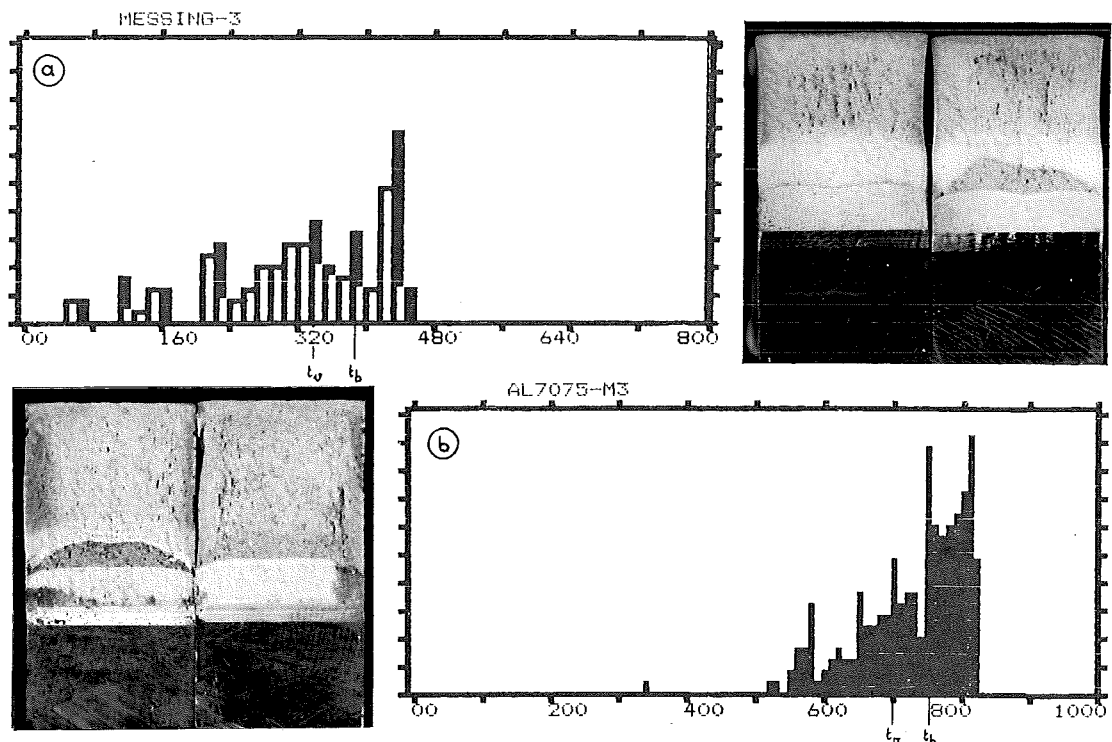
De J_{ae} wordt aan de hand van dit derde maximum bepaald.

Het blijkt dat de proefstukken die géén derde maximum vertonen in hun AE-opnamen, inderdaad géén stabiele scheuruitbreiding vertonen op het breukvlak.

In figuur 4.2 staan AE-opnamen van M3 (Al7075) en MS-3 (Ms58) en foto's van de breukvlakken (volgende bladzijde). Er is een duidelijk onderscheid tussen voor-vermoeingszône en het doorvermoeide gedeelte van het breukvlak. Hier is een zône zichtbaar die duidelijk verkleurd is ten opzichte van de twee andere scheurvlakken; het licht wordt anders gereflecteerd en afhankelijk van de lichtval lijkt deze zône lichter of donkerder.

Omdat in beide gevallen het materiaal bros is, is het niet

figuur 4.2.a: Op het breukvlak van Ms-3 (links) ontbreekt stabiele scheuruitbreiding; ter vergelijking is naast Ms-3 proefstuk Ms-1 (rechts) geplaatst. Het AE-patroon vertoont de eerste twee maxima en is onderbroken tijdens de aanloop tot het derde maximum. Beide proefstukken zijn van Ms58.
 figuur 4.2.b: Eenzelfde verschijnsel als bij Ms-3 treedt op bij M3 (rechts). Ter vergelijking is naast het breukvlak van M3 dat van M2 (links) geplaatst. Beide proefstukken zijn van Al7075.



mogelijk om een opstaande bluntingrand te zien; uit de in par.3.1 gegeven $J, \Delta a$ -grafieken van de materialen blijkt dat de maximaal opgetreden blunting, bepaald aan de hand van de ASTM-bluntingline, voor Ms58 0,020 mm en voor Al7075 0,010 mm zou moeten bedragen. Voor beide materialen is de M-waarde groter dan 1, dus de werkelijk opgetreden blunting zal nog minder zijn. Dit is niet meer te meten.

Op deze wijze kan de hoeveelheid blunting niet bepaald worden. Wel tonen deze proefstukken aan dat, als geen derde maximum optreedt, stabiele scheuruitbreiding op het breukvlak ontbreekt.

4.2

à f w i j k e n d e b e p r o e v i n g e n

Beproevingen van verscheidene proefstukken voldoen niet aan de voorwaarden van de ASTM. Hierdoor is het niet mogelijk de resultaten van deze beproevingen te gebruiken voor de standaard J_{1C} -bepaling.

Wél is uit de akoestische emissie-opnamen de J_{ae} bepaald. Deze zal met de gemiddelde J_{ae} , bepaald uit opnamen van beproevingen die wél aan deze voorwaarden voldoen, worden vergeleken.

4.2.1

afwijking van doorbuigingssnelheid

Het materiaal Fe510 is bij verschillende snelheden beproefd, waarvan het merendeel hoger is dan wordt voorgeschreven door de ASTM-norm.

De reden waarom de doorbuigingssnelheid wordt beperkt is dat men voor de J_{1C} -bepaling zeker moet zijn van een volledig gevormd plastisch scharnier. Tevens wordt een stabiele scheuruitbreiding verlangd; bij een voor het materiaal te hoge snelheid kan een ander breukmechanisme optreden zoals splijting ("cleavage").

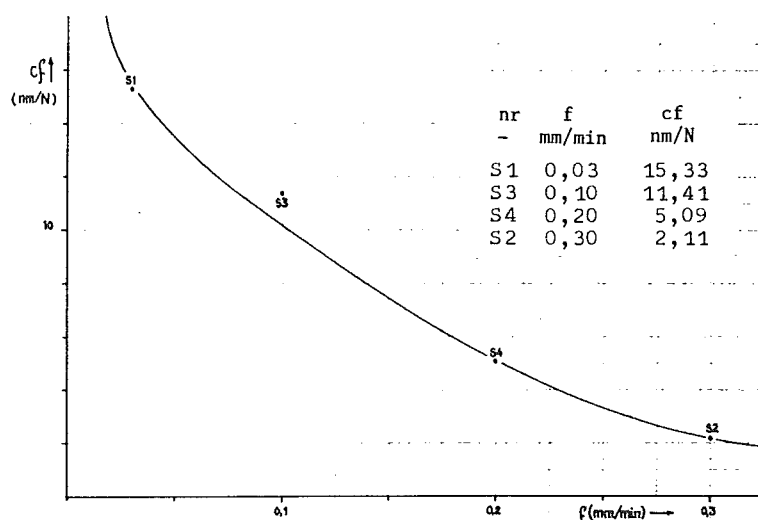
Voor zeer kleine proefstukken kan de snelheid, als de ASTM-norm gehanteerd wordt, zeer laag worden, hetgeen de volledige J_{1C} -bepaling tijdrovend maakt.

Als een hogere snelheid gehanteerd wordt, is een grafische bepaling van de J_{1C} niet meer mogelijk. Er wordt nu onderzocht of de J_{ae} , die bepaald wordt bij hoge snelheid, overeenkomt met de J_{ae} die wordt bepaald bij de door de norm voorgeschreven snelheid.

de correctie-factor

Voor enkele snelheden werd een correctie-curve opgenomen en daaruit werd de correctie-factor bepaald (deze curven zijn opgenomen in par.3.7). Op de volgende bladzijde is het verband tussen doorbuigingssnelheid en correctie-factor afgebeeld: hieruit blijkt dat de correctie-factor afneemt, naarmate de snelheid toeneemt.

De correctie-factor corrigeert voor de indrukking van het materiaal door de rol van de trekbank. Bij hoge snelheid neemt de belasting, en derhalve de spanning in het mate-



figuur 3.27: Het verband tussen correctie-factor en doorbuigingssnelheid van het proefstuk, zoals bepaald is voor Fe510.

riaal, snel toe. Het materiaal heeft minder tijd om plastisch te deformeren, zodat minder plastische deformatie van het materiaal onder de rol van de trekbank optreedt. Tevens heeft het proefstuk, door de snelle belasting, minder kans om over de onderliggende roloplegging weg te glijden. Beide verschijnselen dragen ertoe bij dat de helling van het P,v-diagram steiler is bij hoge snelheid dan bij lage snelheid het geval zou zijn. Dit resulteert in een lagere correctie-factor bij hogere snelheid. Bij een hoge snelheid zal de correctie-factor zó laag zijn dat de fout, die ontstaat bij het niet gebruiken van de correctie-factor, verwaarloosbaar klein is. Helaas is het dan ook denkbaar dat bij deze snelheid het breukmechanisme niet meer voldoet, zodat geen J_{1C} bepaald kan worden.

de J_{ae} -bepaling

De beproevingen zijn uitgevoerd bij snelheden van 0,02; 0,05; 0,10; 0,20 en 0,30 mm doorbuiging van het proefstuk per minuut.

Bij contrôle van de helling van het P,v-diagram bleek de snelheid van 0,02 mm/minuut te voldoen aan de ASTM-voorwaarden. De helling van het P,v-diagram wordt uitgedrukt in de genormaliseerde compliance k:

$$k = E \cdot B \cdot v_i / P_i \quad (13)$$

waarin (v_i, P_i) het voor de rol-indrukking gecorrigeerde

punt op de P,v-curve is, waar wordt afgeweken van de lineair elastische helling. Deze helling is, naast de doorbuigingssnelheid, afhankelijk van de verhouding a_0/W en mag niet meer dan 7% afwijken van de theoretische, in de ASTM-norm getabelleerde, compliance k_t . De beproeving met de snelheid van 0,02 mm/minuut duurde een uur en twintig minuten en hierbij trad een scheurbreiding op van 0,343 mm (S65). De resultaten van de AE-opnamen als gebruikt bij de J_{ae} -bepaling staan vermeld in tabel 4.2.

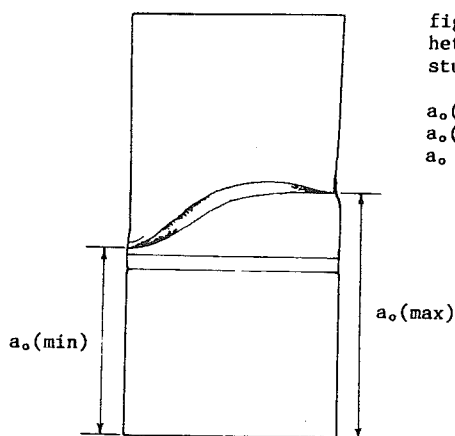
Tabel 4.2: De resultaten van de AE-opnamen die gebruikt zijn voor de J_{ae} -berekening. Deze tabel is een gedeelte van tabel 3.3. Hieruit volgt: $J_{ae} = 85$ N/mm. Gegeven is dat $J_{QM} = 85$ N/mm.

nr	f	t	v	P	v_c	J_{ae}
-	mm/min	sec	mm	kN	mm	N/mm
S61	0,10	642	0,763	7,04	0,740	76,94
S62	0,05	1400	0,838	6,54	0,810	85,63
S63	0,20	368	0,813	8,07	0,767	87,15
S64	0,30	226	0,825	7,55	0,809	88,29
S65	0,02	2848	0,837	7,08	0,801	87,43

De met behulp van AE-opnamen bepaalde kritische J-waarden komen ook voor de meest uiteenlopende snelheden vrijwel overeen (vergelijk bijvoorbeeld S64 en S65). Het is mogelijk scheurgroei te versnellen met een factor 15 en toch nog een goede indicatie te verkrijgen voor de J_{QM} met behulp van AE-opnamen, waarbij wordt uitgegaan van de door de ASTM voorgeschreven snelheid. Benadrukt moet worden dat dit resultaat voor dit staal geldt; voor andere materialen zal dit nog onderzocht moeten worden. Het is niet onmogelijk dat bij aluminium, bij een snelheid die 15 maal hoger ligt dan is voorgeschreven, het breukmechanisme verandert zodat splijting optreedt.

4.2.2 afwijking van vermoeiingsscheur

Proefstuk 6E-10 (Fe510Nb) heeft een afwijkend gevormde vermoeiingsscheur (zie figuur 4.3). De scheur verloopt asymmetrisch; de maximaal en minimaal gemeten vermoei-



figuur 4.3 : Schets van het breukvlak van proefstuk 6E-10.

$$\begin{aligned} a_o(\min) &= 19,325 \text{ mm} \\ a_o(\max) &= 31,781 \text{ mm} \\ a_o &= 29,673 \text{ mm} \end{aligned}$$

ingsscheurlengten verschillen meer dan de maximaal toegelaten 7% met het gemiddelde van de vermoeiingsscheurlengten over de breedte van het proefstuk. Deze beperkingen aan de geometrie van de vermoeiingsscheur zijn opgelegd omdat de verdere scheurgroei hierdoor beïnvloed wordt. De verdere scheuruitbreiding Δa is voor de grafische J_{1C} -

bepalingsmethoden van belang omdat de J_{1C} bepaald wordt door middel van extrapolatie in het $J, \Delta a$ -diagram. De resultaten van de beproeving van 6E-10 zijn niet gebruikt voor de standaard J_{1C} -bepaling, maar staan wel aangegeven in het $J, \Delta a$ -diagram.

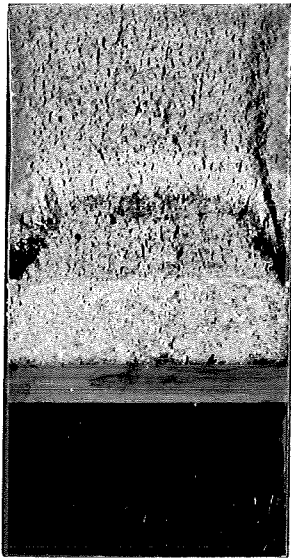
Met behulp van de AE-opname is bij het derde maximum van gebeurtenissen in de tijd een kritische J-waarde bepaald. Deze bedraagt 225,39 N/mm en wijkt 3,5% af van de gemiddelde J_{ae} en slechts 2,0% van de J_{OM} . Een grote afwijking van de vermoeiingsscheur veroorzaakt geen drastische afwijking in de akoestische emissie van het materiaal. Het is mogelijk met AE eenzelfde kritische J-waarde te bereiken met een proefstuk met een rechte vermoeiingsscheur, voldoende aan ASTM-voorwaarden, als met een vermoeiingsscheur die sterk afwijkt; voor de AE-opname bij de bepaling van de kritische J-waarde is verdere scheurgroei niet van invloed.

Wel van belang voor zowel de AE-methode als de standaard J_{1C} -bepaling is de vermoeiingsbelasting waaronder de vermoeiingsscheur ontstaat; deze moet dusdanig gekozen worden dat zowel plastic collapse als beïnvloeding van verdere scheurgroei door de tijdens vermoeiing veroorzaakte plastische zone vermeden wordt. Het laatste kan tot gevolg hebben dat een hogere kritische J-waarde gevonden wordt dan voor het oorspronkelijke materiaal redelijk is. De begrenzing van de vermoeiingsbelasting wordt in de ASTM-norm vermeld en bedraagt voor de laatste helft van de scheurlengte:

$$P_{f, \max} = 0,4 \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{B \cdot b^2 \cdot \sigma_y}{S} \quad (14)$$

4.2.3 afwijking van stabiele scheuruitbreiding

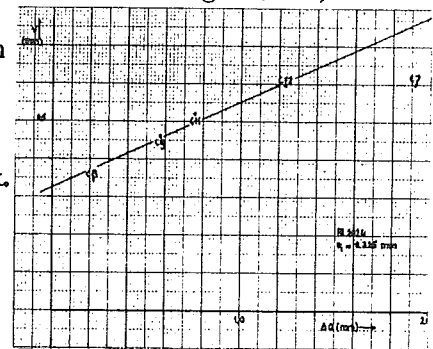
Er zijn proefstukken die tijdens de beproeving een afwijkend scheur-gedrag vertonen, waardoor de resultaten niet gebruikt kunnen worden voor de grafische J-bepalingsmethoden.



figuur 4.4 : Het breukvlak van C7 (Al2024); dit proefstuk vertoont een afwijkend scheur-gedrag.

Een voorbeeld hiervan is proefstuk C7 (Al2024) als afgebeeld in figuur 4.4. Hierbij is een zeer grote scheuruitbreiding opgetreden, waarbij een onregelmatig scheurfront is gevormd. De scheurgroei is beperkt gebleven tot het binnenste gedeelte van het proefstuk, en de scheuruitbreiding is ook groter dan verwacht werd met het oog op de $v, \Delta a$ -rechte (zie fig. 3.26).

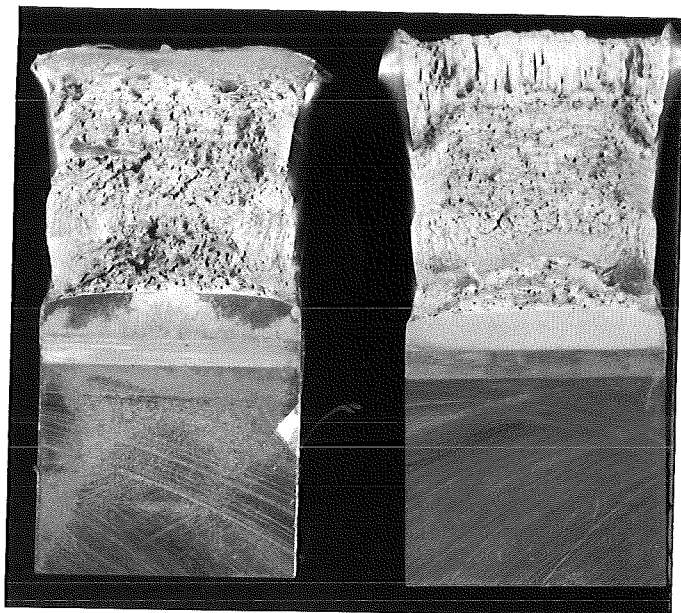
Aan de rand van het scheurfront is plastische deformatie herkenbaar aan de verkleuring van het materiaal; deze is veroorzaakt door de na de beproeving aangebrachte middellast ter doorvermoeiing van het proefstuk. De met behulp van AE-opnamen voor- spelde kritische J-waarde is een goede benadering van de J_{1C} , omdat het verdere scheurverloop op de J_{ae} niet van invloed is.



figuur 3.26: De $v, \Delta a$ -rechte van Al2024.

Proefstuk 37 (22NiMoCr37) vertoont eveneens een afwijkend breukvlak in het gebied van stabiele scheuruitbreiding (zie fig. 4.5). Ter vergelijking is het breukvlak van proefstuk 37 (rechts) geplaatst naast dat van proefstuk 38 (links); het breukvlak van proefstuk 38 is kenmerkend voor de overige beproefde proefstukken.

Proefstuk 37 onderscheidt zich door een gladder breukoppervlak en een dermate hoge akoestische activiteit van het materiaal bij scheurinitiatie, dat de instelling van de AE-apparatuur moet worden verlaagd (zie AE-opname par. 3.2.2). De resultaten van de beproeving leveren een van de regressie-curve afwijkend punt. De J_{ae} van dit proefstuk vertoont



figuur 4.5: De breukvlakken van proefstuk 38 (links) en proefstuk 37 (rechts) van het materiaal 22NiMoCr37.

echter geen grotere afwijking van de gemiddelde J_{ae} dan de kritische J_{ae} -waarden van de andere proefstukken.

Het scheurgedrag na initiatie is niet van invloed op de AE-methode, zodat de J_{ae} ook door middel van deze afwijkende proefstukken kan worden bepaald.

4.3

a f l e z i n g v a n A E - o p n a m e n

4.3.1

de nauwkeurigheid

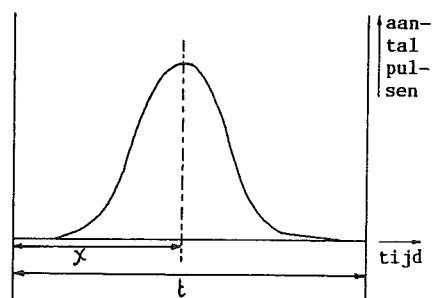
Voor de bepaling van de J_{ae} van een proefstuk wordt gebruik gemaakt van een grafiek waarin het aantal gebeurtenissen in de tijd uitgezet staat.

De tijd wordt afgelezen van deze grafiek met een vaste as-lengte (5 inch) en variabel instelbaar tijdsgebied.

Metten van de tijdschaal gebeurt met een lineaal, waarvan de afleesbaarheid tot 0,5 mm (half schaaldeel) nauwkeurig is. De fout in de aflezing van de tijdschaal, Δt , is:

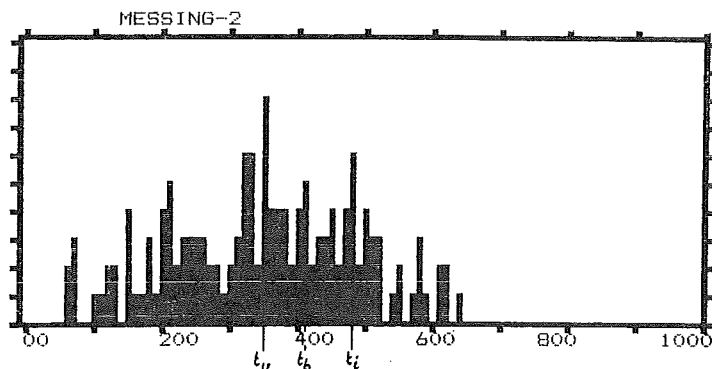
$$(15) \quad \Delta t = \frac{\Delta x \cdot t}{l} = 3,9 \cdot 10^{-3} \cdot t$$

waarin Δx = afleesfout = 0,5 mm
 l = aslengte = 127 mm
 t = instelling tijdsas



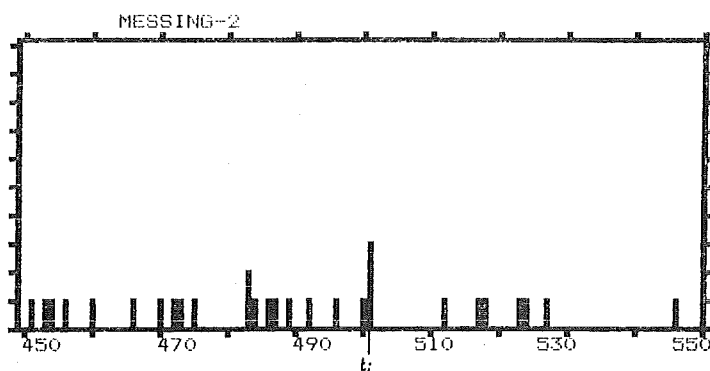
figuur 4.6 : Symboolgebruik bij aflezing van de tijdschaal van een AE-opname.

Om het maximum te localiseren wordt het algehele patroon bekeken. Hiertoe wordt t zo groot mogelijk gekozen (zie



figuur 4.7 : Om het hele AE-patroon te kunnen bekijken wordt een zeer ruime tijdschaal gekozen.

figuur 4.7). Als het betreffende maximum gesignaleerd is, wordt het tijdsgebied waarin het ligt vastgesteld. Afhankelijk daarvan wordt een nieuwe t ingesteld (zowel maximum als minimum zijn hierbij instelbaar). Bij de nieuwe t is meestal geen 'piek' meer te onderscheiden, maar wordt gewerkt met een strepen-verdeling (zie figuur 4.8).



figuur 4.8 : Het tijdstip wordt bepaald bij een kleinere t .

Deze nieuwe tijdschaal wordt nu gebruikt om het tijdstip te bepalen (te beschouwen als het 'inzoomen' van een camera voor een close-up). Omdat zo'n strepen-verdeling, hoewel nodig voor het aflezen van het juiste tijdstip, geen begrijpelijk beeld geeft voor de keuze van het maximum (er is eigenlijk geen patroon op te onderscheiden) is ter illustratie van de keuze tot dusver altijd een AE-opname getoont met een grotere as-instelling, waarop het patroon wel duidelijk zichtbaar is.

Middels het v, t -diagram wordt de doorbuiging op dat tijdstip vastgesteld. Er wordt gewerkt met een constante doorbuiging in de tijd; er mag verondersteld worden dat het verband tussen doorbuiging en tijd rechtlijnig is;

$$\Delta v = f' \cdot \Delta t \quad (16)$$

waarin f' de doorbuigingssnelheid in mm per seconde is. De J-integraal wordt rechtstreeks bepaald uit het oppervlak onder de P, v -curve. De J-integraal is afhankelijk van de fout ΔA in het aflezen van het oppervlak A ;

$$A = \int_0^v P \cdot dv; \Delta A = P_t \cdot \Delta v \quad (17)$$

Hierin is P_t de belasting van het proefstuk ten tijde van het maximum. Door combinatie van bovenstaande formules wordt ΔJ gevonden (de fout die gemaakt wordt in het bepalen van een bij een bepaald tijdstip horende J-waarde);

$$\Delta J = \frac{2}{Bb} \cdot P_t \cdot f' \cdot 3,9 \cdot 10^{-3} \cdot t \quad (18)$$

Voor enkele metalen is de mogelijke fout, veroorzaakt door bovenstaande factoren, ten opzichte van de berekende J^{ae} bepaald. De resultaten staan in tabel 4.3. Hierbij is een

tijdschaalinstelling verondersteld van 100 seconden ($t=100$).

tabel 4.3: De mogelijke fout ten opzichte van de berekende J_{ae} , ΔJ , en de voor de berekening benodigde gegevens.

materiaal	f	f'	B	b	P	ΔJ	$\Delta J/J_{ae}$
-	mm/min	mm/sec	mm	mm	kN ^t	N/mm	% ae
Fe510Nb	0,20	3,33	28,0	25,0	40,00	0,148	0,068
Al2024	0,10	1,67	10,5	10,0	4,25	0,052	0,525
Al7075	0,05	8,33	12,9	12,0	5,00	0,020	0,208

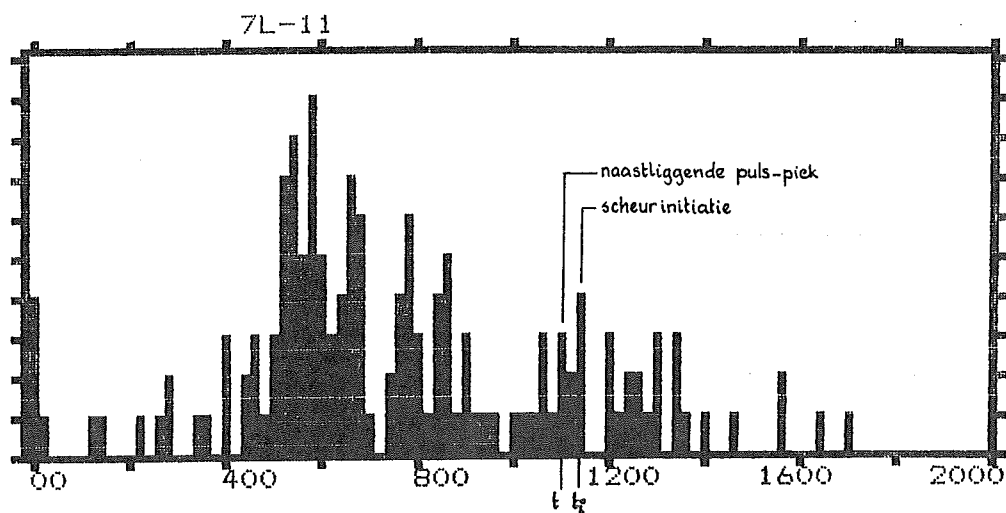
Bovenstaande tabel toont dat deze fout kleiner is dan 1%.

4.3.2 keuze van het maximum

Het is mogelijk dat twijfel ontstaat bij de keuze van een maximum uit de AE-opname.

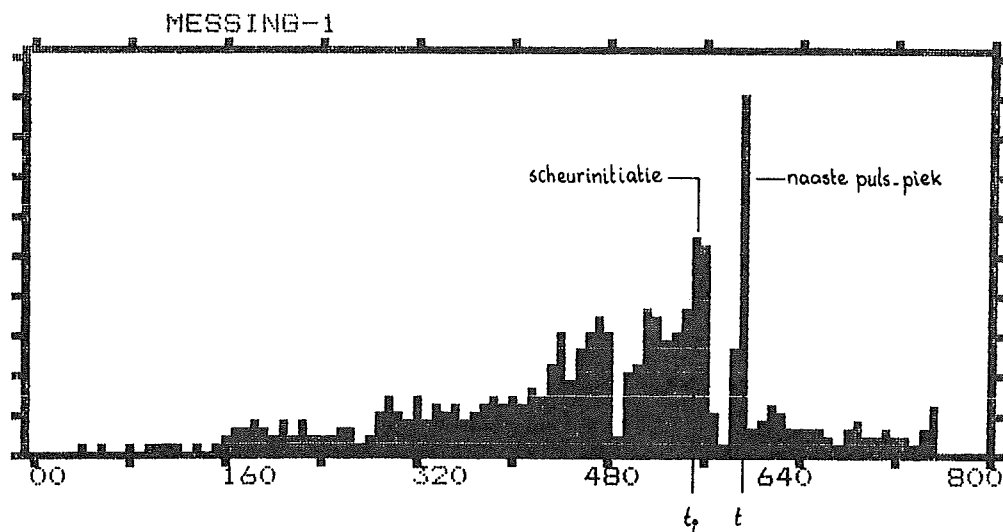
De afwijking in de J-waarde die door een verkeerde keuze ontstaat, wordt geïllustreerd door de volgende voorbeelden.

Omdat, in geval van de J_{IC} -bepaling, alleen het derde maximum van belang is, is voor 7L-11 (Fe510Nb) de J-waarde behorend bij de naastliggende puls-piek berekend (zie onderstaande figuur).



Een tweestrijd in de keuze van het derde maximum levert dan een J -waarde op van 205,6 N/mm, hetgeen 5,3% afwijkt van de gemiddelde J_{ae} van dit materiaal (217,0 N/mm) en 6,5% afwijkt van de oorspronkelijke J_{ae} van dit proefstuk (219,9 N/mm).

Eenzelfde beschouwing leidt bij Ms-1 (Ms58) tot een J -waarde van 21,8 N/mm, terwijl de J_{ae} van dit proefstuk 17,1 N/mm bedraagt. Hierbij moet in aanmerking worden genomen dat de instelling van de AE-apparatuur zeer hoog was; bij circa 590 seconden is deze verlaagd waardoor het lijkt alsof rond deze tijd een maximum is ontstaan (zie onderstaande figuur).



De keuze van het maximum is afhankelijk van het verkregen patroon en derhalve van de kwaliteit van de AE-opname. Bij opname van zowel teveel als te weinig pulsen ontbreekt het overzicht, zodat de maxima niet onderscheiden kunnen worden.

Als de AE-instelling buiten beschouwing wordt gelaten kan het patroon verstoord worden door pulsen die niet veroorzaakt worden door emissie van het materiaal. Voorbeelden van gebeurtenissen die deze pulsen veroorzaken kunnen zijn het raken van de tasters aan de rol van de trekbank, het loslaten van de taster van het proefstuk door het los-schieten van het plakband of verschuiving van het kogeltje dat dient als lager tussen de rol van de trekbank en de bladveer.

Het laatste voorbeeld veroorzaakt over het algemeen pulsen in het lineaire gebied van de P, v -curve, evenals het neerkomen van de rol op het proefstuk; dit wordt gerekend tot het schikken van de meetopstelling.

Het loslaten van de taster, evenals het raken van de tasters aan de rol van de trekbank, moet zoveel mogelijk worden voorkomen; soms is dit erg moeilijk. Bij kleine proefstukken komt het raken van de tasters aan de rol ten gevolge van de afmetingen van de tasters veel voor, vooral bij grote doorbuiging.

Om een verkeerde interpretatie van de AE-opnamen, beïnvloed door externe gebeurtenissen, te voorkomen is het nodig elke onregelmatigheid, die optreedt tijdens de opname, te vermelden. Dit is in par.3.2, waar nodig, dan ook gebeurd.

4.4

de grafische J_{1C} - bepaling

Voor alle materialen is het verband tussen J-integraal en δ_t , uitgedrukt in de M-waarde, bepaald zoals beschreven in par.2.2.2. De hiertoe benodigde meetpunten en de nummers van de voor de bepaling gebruikte proefstukken staan per materiaal vermeld in par.3.3, tabel 3.17. De uit deze tabel samengestelde grafieken, die gebruikt zijn voor de grafische bepaling van de M-waarde, volgen op de tabel. Met deze M-waarden is voor elk materiaal de M-lijn uitgezet in het $J, \Delta a$ -diagram en het snijpunt van de regressiecurve met de M-lijn levert de J_{QM} .

De voor de bepaling van de Δa_z benodigde grafieken staan in par.3.4. Voor de uiteindelijke J_z -bepaling zijn weer de $J, \Delta a$ -grafieken gebruikt die in par.3.2 per materiaal gegeven zijn.

Tabel 3.26 vermeldt de J-waarden, als zijn bepaald met de standaard- J_{1C} bepaling (J_Q), de AE-opnamen (J_{ae}), de M-lijn (J_{QM}) en de $\delta_t, \Delta a$ -relatie (J_z).

Tabel 3.26: De J-waarden volgens ASTM-methode (J_Q), AE-methode (J_{ae}), de M-lijn (J_{QM}) en de $\delta_t, \Delta a$ -relatie (J_z). Het verschil in de nauwkeurigheid waarmee de tabelwaarden worden gegeven voor de verschillende materialen, is veroorzaakt door de as-verdeling van de grafiek waaruit de betreffende waarde is bepaald. De as-verdeling is afhankelijk van de bereikte resultaten en derhalve van de mechanische eigenschappen.

materiaal	J_Q N/mm	J_{ae} N/mm	J_{QM} N/mm	J_z N/mm	Δa_z mm
Fe510	92	85	85	86	0,07
Al2024	9,95	9,98	9,90	10,00	0,015
Al7075	10,40	9,61	10,38	10,40	0,010
Fe510Nb	280	217	220	280	0,280
22NiMoCr37	1260	669	650	450	0,15
T StE-355	1270	592	600	760	0,72
Ms58	16,8	16,8	16,8	16,7	0,018
f.n.g	32	28	30	30	0,02

De brosse materialen (Al2024, Al7075 en Ms58) hebben een dusdanig geringe blunting, voorafgaand aan scheurinitiatie, dat het blunting-gebied in het $J, \Delta a$ -diagram zeer

klein is in vergelijking met de bereikte stabiele scheuruitbreiding. Het snijpunt van bluntingline en regressiecurve verschuift door M-lijn, dan wel Δa_z -keuze, nauwelijks.

Bij de taaiere materialen zoals Fe510, Fe510Nb en 22NiMOCr37 komt het verschil in de J-waarde, bepaald door middel van bluntingline, M-lijn of Δa_z -keuze, meer tot uiting.

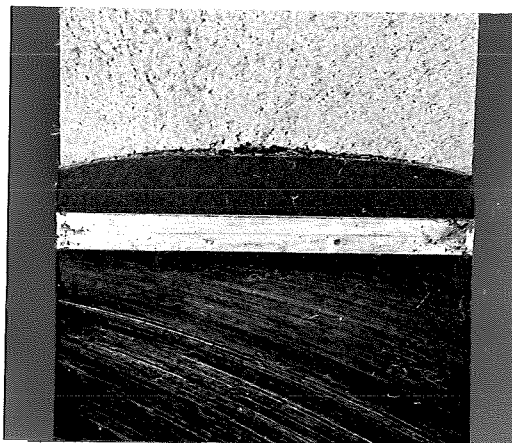
De hypothetische aard van de ASTM-bluntingline wordt geïllustreerd met behulp van proefstuk 7L-10 (Fe510Nb). Het breukvlak vertoont stabiele scheuruitbreiding (zie figuur 4.9), terwijl volgens zijn positie in het J, Δa -diagram alleen blunting verwacht mag worden.

De M-lijn daarentegen toont wel de mogelijkheid van stabiele scheuruitbreiding aan.

De M-lijnmethode is te prefereren boven de twee andere grafische methoden omdat er direct gebruik wordt gemaakt van de gegevens, kenmerkend voor het materiaalgedrag tijdens blunting. Hierdoor wordt het gebruik van aannamen, waardoor plastisch materiaalgedrag wordt benaderd (bijvoorbeeld als bij het Dugdale-strip yield model), vermeden.

Bovendien bestaat bij deze methode de mogelijkheid tot een controle, die bij de andere twee ontbreekt. De M-waarde is uit de resultaten van één proefstuk te bepalen; voor de bepaling van de regressie-curve zijn meerdere proefstukken nodig, zodat deze M-waarde voor meerdere proefstukken kan worden bepaald. Omdat de M-waarde kenmerkend is voor het materiaalgedrag, moeten de M-waarden van proefstukken van hetzelfde materiaal gelijk zijn.

In tabel 4.4 wordt per materiaal de standaardafwijking s van de met de AE-opnamen bepaalde J-waarde, J , gegeven. Voor alle materialen, behalve Al7075, valt de J_{QM}^{ag} binnen deze grenzen.



figuur 4.9 : Het breukvlak van 7L-10, Fe510Nb.

Tabel 4.4: Voor de onderstaande materialen wordt de gemiddelde J-waarde, bepaald uit de opnamen van n proefstukken, gegeven, en tevens de standaardafwijking s, zowel absoluut als percentueel.

materiaal	J ^{ae} N/mm	n	s N/mm	s %
Fe510	85,1	5	4,65	5,5
Al2024	9,98	5	0,45	4,5
Al7075	9,61	6	0,44	4,6
Fe510Nb	216,8	11	7,44	3,4
22NiMOCr37	668,5	8	47,45	7,0
T StE-355	592	1	-	-
Ms58	16,9	4	0,48	2,8
f.n.g	28,2	6	2,96	10,5

conclusie

Voor acht, in chemische samenstelling zowel als mechanische eigenschappen verschillende, materialen wordt een zelfde patroon gevonden in de akoestische aktiviteit die door een toenemende deformatie veroorzaakt wordt in het materiaal.

Dit patroon van pulsen in de tijd vertoont drie maxima, mogelijk veroorzaakt door, respectievelijk, voidsvorming in combinatie met breuk en losscheuren van insluitels bij het eerste maximum, breuk van hardere deeltjes door de combinatie van de beweging van het materiaal langs glijlijnen en belastingstoename tijdens blunting bij het tweede maximum, en scheurinitiatie door het breken van het ligament tussen afgebottte scheurtip enerzijds en voids anderzijds bij het derde maximum.

De J-waarde, berekend ten tijde van het derde maximum, wordt de J_{ae} genoemd.

Er worden drie grafische J-bepalingsmethoden besproken.

- De standaard J_{1C} -bepaling (ASTM) met de bluntingline. De bluntingline is gebaseerd op de lineaire relatie tussen de J en δ_t in het geval van elastische deformatie van het materiaal, $J = \sigma_y \cdot \delta_t$. De J-waarde, bepaald met behulp van de bluntingline, wordt de J_0 genoemd. Omdat bij scheurinitiatie plastische deformatie van het materiaal zal optreden, worden twee andere methoden voorgesteld.
- De $\delta_t, \Delta a$ -relatie bepaalt met extrapolatie in de $\delta_t, \Delta a$ -grafiek het punt van maximale blunting, $\Delta a = 0,5 \cdot \delta_t$. Hierbij wordt gebruik gemaakt van resultaten van meerdere proefstukken die plastisch gedeformeerd zijn.
- Voor de M-lijn wordt rechtstreeks de J, δ_t -relatie gedurende blunting bepaald, $J = M \cdot \sigma_y \cdot \delta_t$, uit de resultaten van de beproeving van één proefstuk.

De kritische J-waarde bepaald met behulp van AE-opnamen, J_{ae} , en de J_{QM} komen vrijwel overeen.

Door middel van akoestische emissie-opnamen kan het materiaalgedrag bij toenemende deformatie van een proefstuk gevolgd worden, zodat de methode van AE-opnamen gebruikt kan worden voor de bepaling van de J-waarde op het moment

van scheurinitiatie, J_{1C} .

Dit geldt zowel voor bros materiaal zoals A12024, A17075 en Ms58, als voor taai materiaal zoals 22NiMOCr37 en Fe510Nb.

l i t e r a t u u r

- 1 J.R.Rice, Journal of Applied Mechanics,35 (1968) p.379-386.
- 2 ASTM E-813-81, Standard Test Method for J_{1C} , a measure of fracture toughness (1981).
- 3 C.Laird en G.C.Smith, Philosophical Magazine,7 (1962) p.847.
- 4 P.Neumann, Acta Metallurgica,22 (1974) p.1155.
- 5 K.F.Amouzouvi en M.N.Bassim, Materials Science and Engineering,62 (1984) p.137-146.
- 6 J.R.Rice en R.Thomson, Philosophical Magazine,29 (1974) p.73.
- 7 N.Aravas en R.M.McMeeking, International Journal of Fracture,29 (1985) p.21-38.
- 8 D.S.Dugdale, Journal of Mechanics and Physics of Solids,8 (1960) p.100-108.
- 9 H.F.Schindler, Engineering Fracture Mechanics,20 (1984) p.281-287.
- 10 Wu Shang-Xian, International Journal of Fracture,17 (1981) p.R63-R65.
- 11 You-Gu Xiao en Guo-Hao Huang, Engineering Fracture Mechanics,16 nr.1 (1982) p.83-94.
- 12 C.Q.Zhen en J.C.Radon, International Journal of Fatigue,6 nr.3 (1984) p.184-188.
- 13 J.W.Hutchinson, Journal of Mechanics and Physics of Solids,16 (1968) p.13-31.
- 14 C.F.Shih, Journal of Mechanics and Physics of Solids, 29 nr.4 (1981) p.305-326.
- 15 British Standard BS 5762:1979, British Standard Methods for Crack Opening Displacement (COD) Testing, (1979).
- 16 J.Zuidema en T.M. van Soest, Experimental Determination of Fatigue Crack Propagation Data and J_{1C} of Steel T StE-355, januari 1986.