

Thermische instabiliteit bij torsie

Citation for published version (APA):

Sillekens, W. H. (1986). *Thermische instabiliteit bij torsie*. (TH Eindhoven. Afd. Werktuigbouwkunde, Vakgroep Produktietechnologie : WPB; Vol. WPA0347). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1986

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

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

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Technische Universiteit Eindhoven

Functie van de Werktuigbouwcommissie

Vakgroep Productietechnologie en -Automatisering

Thermische Instabiliteit
 van ~~Werktuigen~~ Torsie ^{WE1}

door

W.H. Sillekens

okt. 1986

VF code: C₂

WPA 0347

Verslag van J₁-opdracht & vakcandidaatsstage

coach:

dr. ir. J.H. Dautzenberg

afstudeerhoofdocent: prof. ir. J.A.G. Kals

* Samenvatting

Dit verslag rapporteert over de opdracht waaraan ik in het kader van een T_1 -opdracht en tevens als nakandidaatsstage (projectstage) gewerkt heb. Het handelt over „Athermische instabiliteit bij plastische deformatie van metalen“.

Het begrip athermische instabiliteit wordt in het eerste hoofdstuk geïntroduceerd, waarna in het tweede hoofdstuk een wettelijke relatie wordt benadrukt die leidt tot een zogenaamd „criterium voor athermische instabiliteit“.

Mit dit criterium zijn een aantal materiaaleigenschappen af te leiden die een rol spelen bij het eventuele optreden van deze instabiliteit. Aan de hand hiervan zijn een drietal materialen uitgekozen waarvan verwacht werd dat ze instabiliteitsgevoelig zouden zijn. Deze materialen zijn met torsieproeven beproefd, zowel bij lage als bij hoge deformatiesnelheden. Hiervan wordt verslag gedaan in hoofdstuk 3.

Een belangrijke doel was het experimenteel proberen aan te tonen van athermisch instabiel materiaalgedrag aan de hand van opgenomen deformatiepatronen. Hiernaast werd er ook (in hoofdstuk 4) geprobeerd om met behulp van het criterium theoretisch voorspellingen te doen. Theorie en experiment worden vergeleken in hoofdstuk 5.

In hoofdstuk 6 worden de belangrijkste conclusies samengevat, waarna in hoofdstuk 7 nog enkele slotopmerkingen worden gemaakt, voornamelijk in verband met het criterium voor athermische instabiliteit.

* Symbolenlijst

σ	effectieve spanning	N/m^2
ϵ	effectieve rek	-
$\epsilon_{\dot{\epsilon}}$	effectieve rek bij een voorgaande deformatie	-
$\dot{\epsilon}$	effectieve reksnelheid	$1/sec$
$\sigma_{\dot{\epsilon}}$	referentiewaarde van de effectieve reksnelheidsinvloed	$1/sec$
σ_0	karakteristische deformatieweerstand	N/m^2
n	verstergings exponent	-
m	exponent voor de reksnelheidsinvloed	-
M	torsiemoment	Nm
φ	hoekverdraaiing torsiestaf	rad, -
W	deformatie-energie	Nm
γ	afschuifhoek	rad, -
$\dot{\gamma}$	afschuif hoeksnelheid	$1/sec$
ρ	soortelijke gewicht	Rg/m^3
σ_w	soortelijke warmte	J/RgK
λ	warmtegeleidingscoëfficiënt	W/mK
α	de fractie warmte die niet door geleiding "wegvoert", maar zich in temperatuurstijging uitstraal van de torsiestaf	-
R	straal van de torsiestaf	m
L	lengte van de torsiestaf	m
T	temperatuur	$^{\circ}C$
t	tijd	sec
A, B	constanten	
R_{reg}	korrelatiecoëfficiënt bij lineaire regressie	

r, φ, z	coördinatenstelsel (cilindricoördinaten)	$m, -, m$
u_r, u_φ, u_z	componenten van het snelheidsveld	m/sec
$\dot{\epsilon}_{rr}, \dot{\epsilon}_{\varphi\varphi}, \dot{\epsilon}_{zz}$	componenten van de reknelheidstensor	$1/sec$
$\dot{\epsilon}_{\varphi z}, \dot{\epsilon}_{zr}, \dot{\epsilon}_{r\varphi}$		
$\sigma_{rr}, \sigma_{\varphi\varphi}, \sigma_{zz}$	componenten van de spanningstensor	N/m^2
$\sigma_{r\varphi}, \sigma_{\varphi z}, \sigma_{zr}$		
x, y, z	coördinatenstelsel (cartesische coördinaten)	m
u_x, u_y, u_z	componenten van het snelheidsveld	m/sec
$\dot{\epsilon}_{xx}, \dot{\epsilon}_{yy}, \dot{\epsilon}_{zz}$	componenten van de reknelheidstensor	$1/sec$
$\dot{\epsilon}_{xy}, \dot{\epsilon}_{xz}, \dot{\epsilon}_{yz}$		

gebruikte indices:

k	" <u>kritiek</u> ": duidt het inzetten van thermische instabiliteit aan
h	<u>homogeen</u>
e	aan <u>einde</u> van deformatie
max	<u>maximaal</u>
z	ter plaatse z
L	ter plaatse $z = L$
r	ter plaatse r
R	ter plaatse $r = R$
o	<u>omgeving</u>
v	<u>verhoogd</u>

* Inhoudsopgave

- * Samenvatting pag. I
 - * Symbolenlijst pag. II
 - * Inhoudsopgave pag. IV
1. Inleiding. pag. 1
 2. Afleiding van een criterium dat thermisch instabiel gedrag voorspelt. pag. 3
 3. Experimenten.
 - 3.1. Opzet pag. 6
 - 3.2. Proefstukmaterialen pag. 7
 - 3.3. De „snelle“ torsieproeven pag. 8
 - 3.4. De „gewone“ torsieproeven pag. 11
 4. Bepaling van de verschillende termen in het instabiliteitscriterium en de hieruit volgende „voorspellingen“. pag. 13
 5. Vergelijking van theorie en experiment. pag. 16
 6. Conclusies. pag. 18
 7. Slotopmerkingen. pag. 19
 8. Literatuuropgave. pag. 21

Bijlagen

- Bijlage 1. Analyse van de torsie van een cilindrische staaf.
- Bijlage 2. Materiaalgegevens. Warmtebehandelingen.
- Bijlage 3. Snelle torsieproeven - rekverloop.
- Bijlage 4. Gewone torsieproeven - rekverloop.
- Bijlage 5. Het bepalen van de C en n waarden uit de (gewone) torsieproeven aan de hand van de opgenomen $M(\varphi_2)$ curves.
- Bijlage 6. De rekenresultaten van het computerprogramma.
- Bijlage 7. Voorspelling van de „instabiliteitsrekken“.
-

1. Inleiding.

Bij het plastisch deformeren van metalen kunnen er verschillende vormen van instabiliteit optreden.

Een bekend voorbeeld van een instabiliteit treedt op in de trekproef, waar bij een bepaalde rek de verzwakking van de proefstaaf door de doorsnede afname gelijk wordt aan de deformatieversterking van het materiaal. Dit leidt tot een concentratie van de rek in een klein gebied van de proefstaaf (insnoering).

Meer algemeen kan men stellen dat er een instabiliteit optreedt als de totale versterking gecompenseerd wordt door de totale ontsterking.

Als belangrijkste versterkingsfactor geldt de deformatieversterking, maar ook andere oorzaken kunnen een rol spelen (bijvoorbeeld geometrische versterking bij een streekproef).

Ook ontsterking kan verschillende oorzaken hebben, o.a. geometrische ontsterking in de (al bovengenoemde) trekproef, maar ook thermische ontsterking kan optreden. Thermische ontsterking bestaat hieruit, dat de vloeispanning van een materiaal afneemt bij toenemende temperatuur. Een temperatuurstoename kan bewerkstelligd worden door de als warmte in het materiaal vrijkomende deformatie-energie.

Een als gevolg van thermische ontsterking geïnduceerde instabiliteit noemt men een thermische instabiliteit.

Bij het optreden van dit verschijnsel spelen een groot aantal factoren een rol, waaronder:

- mechanische eigenschappen van het gebruikte materiaal, bijvoorbeeld uitgedrukt in een spanning-rekrelatie. Mede hierdoor wordt de hoeveelheid ontwikkelde deformatie-energie bepaald.
- thermofysische eigenschappen van het materiaal (warmtegeleiding, soortelijke warmte, temperatuur-gevoeligheid van de vreespanning ed.).
- het proces. Onder andere de rek- en rekvalheidsverdeling en de geometrie van het werkstuk beïnvloeden de thermische geleiding en de hieruit volgende temperatuurverdeling.

Het is belangrijk om een inzicht te krijgen in het effect van al deze factoren op het optreden van thermische instabiliteit. Het optreden ervan kan dan namelijk worden herkend en voorkomen, respectievelijk toegepast worden.

2. Afleiding van een criterium dat Athermisch instabiel gedrag voorspelt.

(zie ook lit. [1])

Voor het mechanisch gedrag van een materiaal wordt een toestandsvergelijking van de volgende soort aangenomen:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T) \quad (1)$$

Voor $\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}}$ kunnen we dan schrijven:

$$\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} = \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \bar{\epsilon}}\right)_{\dot{\bar{\epsilon}}, T} + \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \dot{\bar{\epsilon}}}\right)_{\bar{\epsilon}, T} \cdot \frac{d\dot{\bar{\epsilon}}}{d\bar{\epsilon}} + \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial T}\right)_{\dot{\bar{\epsilon}}, \bar{\epsilon}} \cdot \frac{dT}{d\bar{\epsilon}} \quad (2)$$

Op het punt van instabiel worden geldt:

$$\left[\frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}} = 0\right], \text{ en tevens } \left[\frac{d\dot{\bar{\epsilon}}}{d\bar{\epsilon}} \approx 0\right] \quad (3)$$

als geometrische effecten geen rol spelen

 dit wordt aangenomen

Invullen van deze beide voorwaarden in (2.) levert:

$$\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \bar{\epsilon}}\right)_{\dot{\bar{\epsilon}}, T} \approx -\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial T}\right)_{\dot{\bar{\epsilon}}, \bar{\epsilon}} \cdot \frac{dT}{d\bar{\epsilon}} \quad (4)$$

Nemen we nu een eenheids-volumedeel materiaal aan, waarin de temperatuur homogeen verdeeld is. Bij de incrementele rek $d\bar{\epsilon}$ wordt de arbeid $\bar{\sigma} d\bar{\epsilon}$ verricht. We nemen (benaderingswijze) aan dat al deze mechanische arbeid omgezet wordt in warmte. Een fractie α van deze warmte zal zich in temperatuurstijging uiten, de andere fractie zal door thermische geleiding naar de omgeving wegstromen.

Voor de temperatuurverhoging van het volumedeel geldt nu:

$$dT \approx \frac{\alpha \cdot d\bar{\epsilon}}{\rho \cdot s_w}, \quad \text{ofwel: } \frac{dT}{d\bar{\epsilon}} \approx \frac{\alpha \cdot \bar{\sigma}}{\rho \cdot s_w} \quad (5)$$

Deze laatste uitdrukking kunnen we substitueren in (4.), zodat we krijgen:

$$\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \bar{\epsilon}}\right)_{\bar{\epsilon}, T} \approx -\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial T}\right)_{\bar{\epsilon}, \bar{\epsilon}} \cdot \frac{\alpha \cdot \bar{\sigma}}{\rho \cdot s_w} \quad (6)$$

Om deze vergelijking meer expliciet te maken nemen we een concrete toestandsvergelijking aan, namelijk de uitgebreide Nadai-relatie:

$$\bar{\sigma} = C \cdot (\bar{\epsilon}_0 + \bar{\epsilon})^n \cdot \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\bar{\epsilon}_0}\right)^m \quad (7)$$

Invullen van (7) in (6.) levert:

(met $\bar{\epsilon} = \bar{\epsilon}_k$ op het punt van instabiel worden)

$$C \cdot n \cdot (\bar{\epsilon}_0 + \bar{\epsilon}_k)^{n-1} \cdot \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\bar{\epsilon}_0}\right)^m \approx -\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial T}\right)_{\bar{\epsilon}, \bar{\epsilon}} \cdot \frac{\alpha}{\rho \cdot s_w} \cdot C \cdot (\bar{\epsilon}_0 + \bar{\epsilon}_k)^n \cdot \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\bar{\epsilon}_0}\right)^m$$

$$n \approx -\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial T}\right)_{\bar{\epsilon}, \bar{\epsilon}} \cdot \frac{\alpha}{\rho \cdot s_w} \cdot (\bar{\epsilon}_0 + \bar{\epsilon}_k)$$

ofwel:

$$\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial T}\right)_{\bar{\epsilon}, \bar{\epsilon}} \approx -\frac{\rho \cdot s_w}{\alpha} \cdot \frac{n}{\bar{\epsilon}_0 + \bar{\epsilon}_k} \quad (8)$$

Als we uitgaan van een materiaal dat geen voorgaande deformaties heeft ondergaan, kunnen we schrijven:

$$\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial T}\right)_{\bar{\epsilon}, \bar{\epsilon}} \approx -\frac{\rho \cdot s_w}{\alpha} \cdot \frac{n}{\bar{\epsilon}_k} \quad (9)$$

Dit noemen we een criterium voor thermische instabiliteit. Als de materiaaleigenschappen ρ , σ_w , n en $\left(\frac{\partial \sigma}{\partial T}\right)_{\dot{\epsilon}, \bar{\epsilon}}$ bekend zijn, evenals de deformatieomstandigheden, uitgedrukt in een waarde voor α , dan is er uit het criterium een waarde voor de rek af te leiden waarbij de instabiliteit inzet. (we noemen deze waarde de kritieke waarde voor de rek: $\bar{\epsilon}_k$)

- Uit het criterium is af te leiden dat materialen met een kleine waarde van dichtheid en soortelijke warmte en een grote invloed van de temperatuur op de vloeispanning met daarbij een lage waarde van de verstergings-exponent gevoelig zijn voor thermische instabiliteit.
 - Het optreden van instabiliteit is sterk afhankelijk van de waarde van α .
 - Een hoge deformatsnelheid in een materiaal met een lage warmtegeleidingscoëfficiënt leidt tot weinig thermische geleiding en daarmee tot waarden van α van ongeveer 1. (theoretisch: $\dot{\epsilon} \rightarrow \infty$, dan $\alpha \rightarrow 1$; adiabatische deformatie). De waarde van $\bar{\epsilon}_k$ is dan voor dat materiaal minimaal.
 - Een lage deformatsnelheid in een materiaal met een grote warmtegeleidingscoëfficiënt levert waarden van α van ongeveer 0. (theoretisch: $\dot{\epsilon} \rightarrow 0$, dan $\alpha \rightarrow 0$; isotherme deformatie).
- Thermische instabiliteit wordt dan geheel onderdrukt
($\bar{\epsilon}_k \rightarrow \infty$).

3. Experimenten.

• 3.1. Opzet

Als men het verschijnsel „thermische instabiliteit“ wil onderzoeken moet er voor gezorgd worden dat mogelijke andere instabiliteitsvormen niet optreden. Als experimentele proef werd o.a. daarom de torsie van massieve cilindrische proefstukken gekozen, omdat hierbij een geometrische ver- of ontsterving niet optreedt (het „belastingdragende“ oppervlak blijft gelijk).

Er werden zowel proeven bij lage als bij hoge deformatiesnelheden uitgevoerd. De veronderstelling was dat er bij de hoge-snelheidsproeven dergelijke hoge temperaturen zouden optreden dat thermische instabiliteit zou inzetten (zich uitende in concentratie van de rek). Dit zou dan in contrast moeten staan met de lage-snelheidsproeven (waar een homogene deformatie verwacht werd).

Een mathematische analyse van de torsieproef wordt gegeven in bijlage 1, waarbij in het eerste gedeelte homogene deformatie aangenomen wordt en er in het tweede gedeelte ook concentratie van de rek wordt behandeld.

Mit deze analyse blijkt onder andere dat de buitenste proefstaafvezel in de torsieproef ($r=R$) bijzonder belangrijk is. Zowel de effectieve rek, de effectieve rekesnelheid en de effectieve spanning zijn hier het grootste (A.o.v. de rest van de doorsnede). Hieruit volgt dat, als er instabiliteit optreedt, deze wordt ingeleid op de buitenste proefstukestraal. Om geen verstoring te introduceren is het

dan ook belangrijk dat het proefstukoppervlak glad is en geen bewerkingsgroeven vertoont.

Zowel bij de snelle als bij de gewone torsieproeven is na beproeving het verloop van de effectieve rek op de buitenste straal ($\bar{\epsilon}_{R,e}$) bepaald als functie van de axiale coördinaat. Hiervoor was er, voordat er beproefd werd, op elk van de proefstukken in axiale richting een inketlijn op het oppervlak aangebracht. De hoek die deze lijn na het torderen met de as van het proefstuk vormt is gelijk aan de afschuifhoek $\psi_{R,e}$. Het verloop van $\psi_{R,e}$ langs de as werd opgemeten onder een meetmicroscop [Zeiss Universeel Meetmicroscop in de meetkamer]. Het rekverloop kan dan bepaald worden met behulp van formule 21 uit de analyse (bijlage 1):

$$\bar{\epsilon}_{R,e} = \frac{\tan \psi_{R,e}}{\sqrt{3}} \quad [-]$$

• 3.2. Proefstukmaterialen

Bij de proeven werd gebruik gemaakt van een drietal materialen waarvan verwacht werd dat ze gevoelig zouden zijn voor thermische instabiliteit.

Materialen:

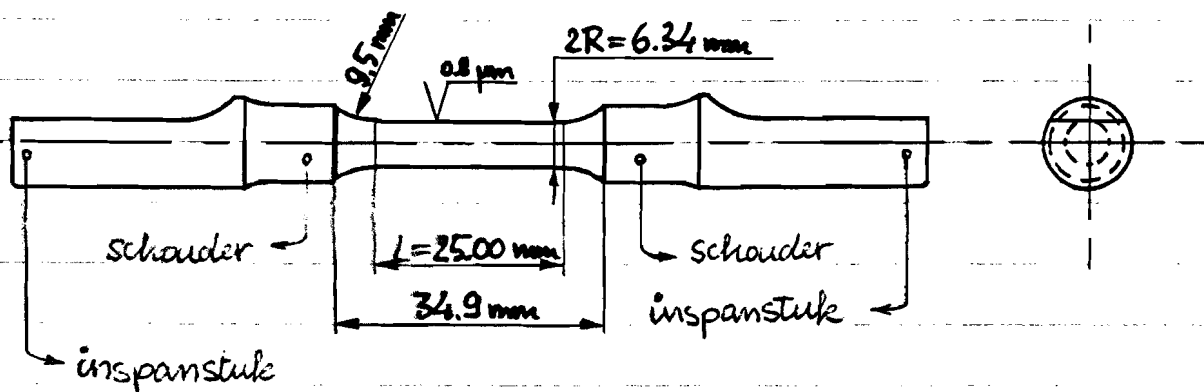
- titaan legering, Ti 6AL4V
- commercieel zuiver titaan, Ti-zuiver
- aluminium legering, AL 51 ST

Voor gegevens over belangrijke materiaaleigenschappen en eventuele warmtebehandelingen wordt verwezen naar bijlage 2.

• 3.3. De „snelle“ torsieproeven

Voor het uitvoeren van de torsieproeven bij hoge deformatiesnelheden werd gebruik gemaakt van de "Carpenter Torsion impact machine" (The A.H. Emery Co.). Het principe van dit apparaat is eenvoudig: één zijde van de proefstaaf is vast ingeklemd (kan niet roteren om zijn as), de andere zijde kan via een (slag) koppeling sterk gekoppeld worden met een snel roterend vliegwiel. De kinetische energie in dit vliegwiel wordt gebruikt om het proefstuk (snel) te torseren (tot breuk). Hierdoor neemt het toerental echter iets af (deformatiesnelheid slechts bij benadering constant). Uit het toerentalverschil kan eventueel de totale deformatiearbeid berekend worden.

* proefstukgeometrie:



In bijlage 3 zijn alle gegevens over de opgemeten rekverdelingen bij de snelle torsieproeven bijgebracht. Hieruit blijkt dat er bij alle drie de materialen en bij alle toegepaste deformatiesnelheden een concentratie van de rek heeft plaatsgevonden.

Een belangrijk gegeven dat uit de rek-grafieken af te lezen is is de mate van homogene deformatie ($\bar{\epsilon}_{R,h}$) die de staafjes hebben ondergaan voordat rekconcentratie inzet. Wordt namelijk de rekconcentratie veroorzaakt door thermische instabiliteit, dan zou deze waarde ($\bar{\epsilon}_{R,h}$) moeten overeenkomen met de door het criterium te voorspellen waarde ($\bar{\epsilon}_k$) !

Hiernaast volgt een overzicht van de verrichte instelproefproeven en de resultaten:

material: Ti 6AL4V Tabel 1.

proefstuknummer	$\dot{\epsilon}_R$ [$1/\text{sec}$]	$\bar{\epsilon}_{R,h}$ [-]	gemiddelde $\bar{\epsilon}_{R,h}$ [-]
I	17.7	0.17	0.19
II	17.7	0.21	
III	17.7	0.18	
IV	6.0	0.40	
V	6.0	0.15	→ 0.15

Proef IV is verstoord door een groef in het proefstukoppervlak. Dit heeft (blijkbaar) een grote invloed op het rekverloop (zie bijlage 3). Daarom is deze proef bij bepaling van een gemiddelde $\bar{\epsilon}_{R,h}$ niet meegeteld.

De overige proeven leiden tot een sterke concentratie van de rek bij een laag homogeen rekniveau. Een wezenlijk verschil tussen de rekverlopen bij proef I (bij $\dot{\epsilon}_R = 6.0$ [$1/\text{sec}$]) en de proeven bij $\dot{\epsilon}_R = 17.7$ [$1/\text{sec}$] bestaat er niet.

materiaal: Ti-zuiver

Tabel 2.

proef/stuknummer	$\dot{\bar{\epsilon}}_R$ [$1/sec$]	$\bar{\epsilon}_{R,h}$ [-]	gemiddelde $\bar{\epsilon}_{R,h}$ [-]
I	17.7	0.53	0.49
II	17.7	0.50	
III	17.7	0.45	
IV	9.0	0.47	0.49
V	9.0	0.51	

Bij een vergelijking van de rekverlopen van de proeven bij $\dot{\bar{\epsilon}}_R = 17.7 [1/sec]$ en $\dot{\bar{\epsilon}}_R = 9.0 [1/sec]$ valt op dat de rekconcentraties bij de proeven bij lagere reknelheid een minder steil verloop hebben. De mate van homogene deformatie ($\bar{\epsilon}_{R,h}$) echter is ongeveer gelijk.

materiaal: Al 51 ST

Tabel 3.

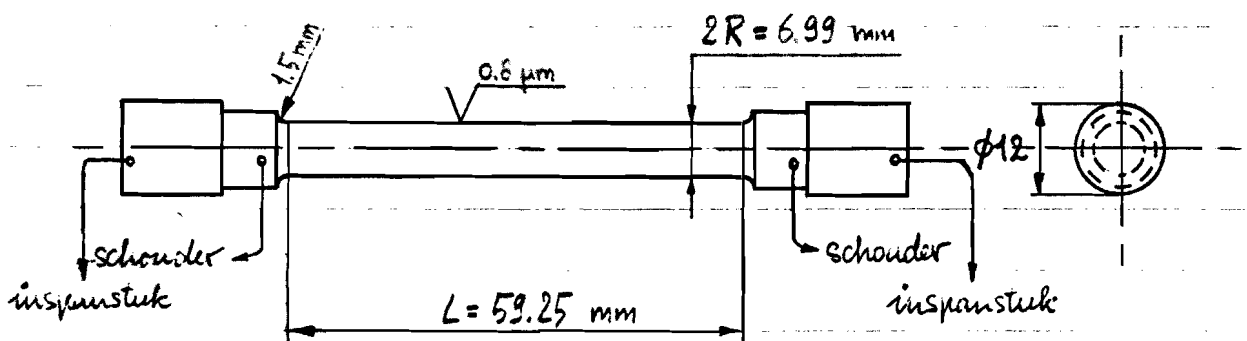
proef/stuknummer	$\dot{\bar{\epsilon}}_R$ [$1/sec$]	$\bar{\epsilon}_{R,h}$ [-]	gemiddelde $\bar{\epsilon}_{R,h}$ [-]
I	17.7	0.12	0.12
II	17.7	0.11	
III	17.7	0.12	
IV	9.0	0.14	~ 0.13
V	9.0	~ 0.12	
VI	9.0	~ 0.13	
VII	6.0	~ 0.13	~ 0.12
VIII	6.0	~ 0.12	
IX	6.0	~ 0.11	

Het verschil tussen de rekverlopen bij de verschillende reknelheden is klein. Wel bestaat er de tendens, dat er bij de proeven bij lagere reknelheid minder sprake is van een constant niveau van de rek langs de concentratie, maar meer van een geleidelijk toenemende waarde van $\bar{\epsilon}_{R,h}$ naar de rekconcentratie toe.

• 3.4. De „gewone“ Torsieproeven

Voor het uitvoeren van de torsieproeven bij lage deformatiesnelheid („gewone“ torsieproeven) werd gebruik gemaakt van de Pmsler-Torsiebank. Hierbij werd het verloop van het torsiemoment als functie van de torsiehoek in grafiekvorm opgenomen.

* proefstaafgeometrie:



Met elk van de drie materialen is een torsieproef gedaan bij kamertemperatuur en een proef bij verhoogde temperatuur. De proeven bij verhoogde temperatuur waren nodig om de temperatuurgevoeligheid van de vloeispanning te kunnen bepalen (zie hoofdstuk 4).

In bijlage 4 worden de bij de gewone torsieproeven opgemeten rekverdelingen gegeven. Uit de rekverlopen (met name die bij kamertemperatuur) blijkt o.a. :

- dat de deformatie bij Ti6Al4V niet geheel homogeen was, maar toch sterk verschil vertoont met de deformatie bij de hoge reksnelheden.
- dat de deformatie bij Ti-zuiver homogeen was totdat (vanaf een bepaalde rekwaarde) het materiaal ging scheuren. Ook

hier dus verschil met de snelle torsieproeven.

Dit optreden van scheuren bij de gewone torsieproeven werd bij de snelle torsieproeven niet waargenomen.

- dat bij AL51ST sterke concentratie van de reke plaatsvond! Het homogene rekenniveau ligt ongeveer bij een waarde van $\bar{\epsilon}_p = 0.15 [-]$, dus ongeveer gelijk aan dat van de snelle proeven. De rekverlopen bij snelle en langzame proeven vertonen weinig verschil. Waarschijnlijk wordt de concentratie van de rek bij de snelle proeven dus niet veroorzaakt door thermische instabiliteit!

Mit de bij de gewone torsieproeven opgenomen kurven die het verloop van het torsiemoment (M) als functie van de torsiehoek (φ_i) geven kunnen de C en n -waarden volgens de vergelijking van Nadai worden afgeleid. Dit is gedaan in bijlage 5. Resultaten:

Tabel 4.

materiaal	proefstuknummer	temperatuur	C [N/m^2]	n [-]
Ti6Al4V	A	20 [$^{\circ}C$]	$1225 \cdot 10^6$	0.067
	B	85 [$^{\circ}C$]	$C_1 = 1135 \cdot 10^6$	$n_1 = 0.115$
$C_2 = 1141 \cdot 10^6$			$n_2 = 0.067$	
Ti-zuiver	A	20 [$^{\circ}C$]	$1213 \cdot 10^6$	0.099
	B	175 [$^{\circ}C$]	$1140 \cdot 10^6$	0.120
AL51ST	A	20 [$^{\circ}C$]	$407 \cdot 10^6$	0.063
	B	80 [$^{\circ}C$]	$391 \cdot 10^6$	0.063

Bij Ti6Al4V, proefstuk B zijn voor zowel C als n twee waarden afgeleid. Verklaring: zie bijlage 5.

4. Bepaling van de verschillende termen in het instabiliteitscriterium en de hieruit volgende versterkingen

In hoofdstuk 2 is als criterium voor het optreden van thermisch instabiel gedrag afgeleid:

$$\left(\frac{\partial \sigma}{\partial T} \right)_{\bar{\epsilon}} \approx - \frac{\rho \cdot s_w}{\alpha} \cdot \frac{n}{\bar{\epsilon}_k} \quad (9)$$

Om hieruit de kritieke waarde voor de rek ($\bar{\epsilon}_k$) af te kunnen leiden moeten de andere termen bekend zijn.

- Het soortelijke gewicht ρ en de soortelijke warmte s_w volgen uit de materiaalgegevens in bijlage 2.
- De verstergings-exponent n volgt uit de gewone torsieproeven bij kamertemperatuur en is voor de drie materialen gegeven in tabel 4, pag. 12.
- De warmtecontractie α die niet door geleiding wegvloeit.

Als eerste benadering voor een waarde van $\bar{\epsilon}_k$ kunnen we gebruiken $\alpha = 1$ (aanname van adiabatische deformatie).

We kunnen echter ook gebruik maken van een (bestaand) computerprogramma. Dit programma berekent de temperatuurverdeling in een torsiestaf bij plastische deformatie en leidt daaruit ook de waarden van α af. De snelle torsieproeven zijn doorgekeurd met dit programma, de rekenresultaten zijn gegeven in bijlage 6. De voor de verschillende situaties berekende waarden voor α in de buitenste proefstaafvezel zijn

in de onderstaande tabel samengevat.

Tabel 5

$\alpha_R [-]$	$\dot{\bar{\epsilon}}_R = 17.7 [1/sec]$	$\dot{\bar{\epsilon}}_R = 9.0 [1/sec]$	$\dot{\bar{\epsilon}}_R = 6.0 [1/sec]$
Ti6Al4V	0.986	*	0.971
Ti-zuiver	0.937	0.900	*
Fil 51ST	0.894	0.839	0.813

* : niet berekend.

Mit deze tabel kunnen we o.a. afleiden dat in de snelle torsieproeven de deformatie in de buitenste proefstaafvezel bij Ti6Al4V bijna adiabatisch verloopt ($\alpha_R = 0.97-0.99$), terwijl dit bij Fil 51ST duidelijk niet het geval is ($\alpha_R = 0.81-0.89$).

Probleem: Als invoer van het programma dient o.a. de totale rek in de buitenste proefstaafvezel. Deze waarde willen we echter met het instabiliteitscriterium juist uitspellen!

In de berekeningen hebben we als invoer de uit de snelle torsie-experimenten verkregen waarden van $\bar{\epsilon}_{R,h}$ gebruikt om α_R te bepalen. (zie ook: slotopmerking $\bar{\epsilon}$, pag. 19)

- De temperatuurgevoeligheid van de vloeispanning $\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial T}\right)_{\dot{\bar{\epsilon}}, \bar{\epsilon}}$
 Van elk materiaal zijn er twee gewone torsieproeven gedaan; één bij omgevingstemperatuur T_0 en één bij verhoogde temperatuur T_v . Met behulp van de uit deze proeven volgende C en n -waarden (tabel 4, pag. 12) kan dan $\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial T}\right)_{\dot{\bar{\epsilon}}, \bar{\epsilon}}$ als functie van de effectieve rek benaderd worden volgens:

$$\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial T}\right)_{\dot{\bar{\epsilon}}, \bar{\epsilon}} \approx \left(\frac{\Delta \bar{\sigma}}{\Delta T}\right)_{\dot{\bar{\epsilon}}, \bar{\epsilon}} = \left(\frac{\bar{\sigma}_v - \bar{\sigma}_0}{T_v - T_0}\right)_{\dot{\bar{\epsilon}}, \bar{\epsilon}} = \frac{C_v \bar{\epsilon}^{n_v} - C_0 \bar{\epsilon}^{n_0}}{T_v - T_0}$$

Voor T_v werden temperaturen gekozen die ongeveer overeenkomen met de door de computersimulatie berekende temperaturen in de buitenste profielstroefvezel (zie bijlage 6). (Ti 6 FL 4V : $T_v = 85 \text{ }^\circ\text{C}$; Ti-zuiver : $T_v = 175 \text{ }^\circ\text{C}$) Bij FL 51 ST werd hiervan afgeweken omdat de berekende temperatuurverhoging erg klein was ($\Delta T \approx 15 \text{ }^\circ\text{C}$). Deze proef werd verricht bij $T_v = 85 \text{ }^\circ\text{C}$.

De waarden voor $\bar{\epsilon}_k$ kunnen nu aan de hand van de bovenstaande aanwijzingen berekend worden. Dit is in bijlage 7 gedaan. Resultaten :

<u>Ti 6 FL 4V:</u>	$\bar{\epsilon}_{k_1} = 0.065 \text{ [-]}$	} ($\alpha_R = 1$)
	$\bar{\epsilon}_{k_2} = 0.148 \text{ [-]}$	
<u>Ti-zuiver:</u>	$\bar{\epsilon}_k = 0.49 \text{ [-]}$	($\alpha_R = 1$)
	$\bar{\epsilon}_k = 0.53 \text{ [-]}$	($\alpha_R = 0.937$)
	$\bar{\epsilon}_k = 0.55 \text{ [-]}$	($\alpha_R = 0.900$)
<u>FL 51 ST:</u>	$\bar{\epsilon}_k = 0.63 \text{ [-]}$	($\alpha_R = 1$)

Opm. 1 Bij Ti 6 FL 4V zijn twee waarden voor $\bar{\epsilon}_k$ bij $\alpha_R = 1$ berekend omdat de problemen bij de gewone torsieproef (bij verhoogde temperatuur) leidden tot twee waarden voor C en n . Omdat de snelle torsieproeven bij Ti 6 FL 4V bijna adiabatisch verlopen is $\bar{\epsilon}_k$ hier alleen bij $\alpha_R = 1$ berekend.

Opm. 2 Omdat bij FL 51 ST bij $\alpha_R = 1$ een waarde voor $\bar{\epsilon}_k$ gevonden wordt die ver boven de experimentele waarden uitkomt is niet verder gerekend (voor $\alpha_R < 1$).

5. Vergelijking van theorie en experiment.

In de onderstaande tabel worden de experimenteel en theoretisch verkregen „instabiliteitsrekenen“ nog eens samengevat:

Tabel 6

		theorie $\bar{\epsilon}_k$ [-]	experiment $\bar{\epsilon}_{R,k}$ [-]
Ti 6Al 4V	$\dot{\bar{\epsilon}} \rightarrow \infty$ 1.	0.07	
	2.	0.15	
	$\dot{\bar{\epsilon}}_R = 17.7$ [1/sec]		0.19
	$\dot{\bar{\epsilon}}_R = 6.0$ [1/sec]		0.15 (1proef)
Ti-zuiver	$\dot{\bar{\epsilon}} \rightarrow \infty$	0.49	
	$\dot{\bar{\epsilon}}_R = 17.7$ [1/sec]	0.53	0.49
	$\dot{\bar{\epsilon}}_R = 9.0$ [1/sec]	0.55	0.49
Al 51ST	$\dot{\bar{\epsilon}} \rightarrow \infty$	0.63	
	$\dot{\bar{\epsilon}}_R = 17.7$ [1/sec]	**	0.12
	$\dot{\bar{\epsilon}}_R = 9.0$ [1/sec]	**	0.13
	$\dot{\bar{\epsilon}}_R = 6.0$ [1/sec]	**	0.12

* : zie opmerking 1, pag. 15

** : zie opmerking 2, pag. 15

- Ti 6Al 4V. De tweede voorspelde waarde van de kritieke rek ($\bar{\epsilon}_{k2}$) komt ongeveer overeen met de experimentele waarden. Dat de inhomogene deformatie bij de snelle torsieproeven veroorzaakt wordt door thermische instabiliteit is aannemelijk. Dit wordt ook ondersteund door de grote verschillen in deformatiepatroon tussen de snelle en de gewone proeven.

• Ti-zuiver. Theorie en experiment komen redelijke met elkaar overeen. Ook de verschillen in deformatiepatroon tussen snelle en gewone torsieproeven ondersteunen de conclusie dat er bij de snelle proeven thermisch instabiel gedrag optreedt.

• Pi 51 ST. Theorie en experiment verschillen sterk! Evenals bij de snelle als bij de gewone torsieproeven trad er een concentratie van de rek op, waaruit al verwacht werd dat er geen thermische instabiliteit optrad. Dit nu wordt ondersteund door de theorie; thermisch instabiel gedrag immers kan (volgens de theorie) pas bij een veel hoger rekniveau optreden dan blijkt uit de experimenten.

Welke (andere) instabiliteit er optreedt is onbekend, wel volgt uit de proeven dat deze instabiliteit niet, of zeer weinig, reknelheidsgevoelig is.

• De invloed van de reknelheid op de instabiliteitsrek komt bij de snelle torsieproeven niet goed tot uiting. Hiervoor moeten er ook experimenten bij lagere toerentallen worden gedaan, zodanig dat er in de buitenste vezel waarden van α van bijvoorbeeld $\frac{1}{2}$ optreden. Met dit proefapparaat voor de snelle torsieproeven (bij deze materialen) is dat echter niet mogelijk omdat het vliegwielt dan zeer sterk in toerental zal afnemen ($\bar{\epsilon}_R$ niet constant), eventueel zelfs tot stilstand komt.

6. Conclusies.

- * In Ti6Al4V en Ti-zuiver treedt er bij de snelle torsieproeven thermisch instabiel gedrag op.
 - * In Ti51ST treedt er bij de snelle torsieproeven geen thermische instabiliteit op. Een andere instabiliteit leidt, zowel bij de snelle als bij de gewone proeven, tot concentratie van de rek vanaf een vrij laag homogeen rek niveau.
 - * Het criterium voor thermische instabiliteit voorspelt goede waarden voor de kritieke rek bij Ti6Al4V en Ti-zuiver. De grote afwijking bij Ti51ST is verklaarbaar omdat in dit materiaal geen thermische instabiliteit optreedt.
 - * Het gebruik van het criterium voor thermische instabiliteit in de praktijk wordt belemmerd omdat het moeilijk is een goede waarde voor α af te leiden.
(zie ook: "slotopmerking 2", pag. 19)
-

7. Slotopmerkingen.

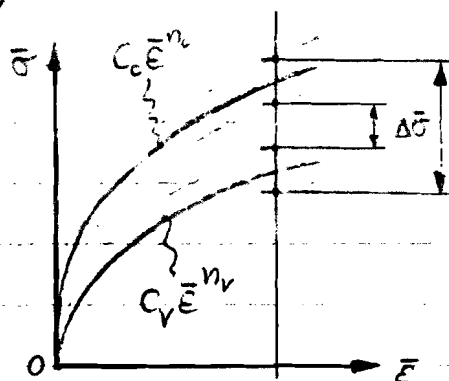
- 1./ Van de in hoofdstuk 4 experimenteel bepaalde termen uit het instabiliteitscriterium is de term $\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial T}\right)_{\bar{\epsilon}, \bar{\epsilon}} \approx \frac{C_v \bar{\epsilon}^{n_v} - C_c \bar{\epsilon}^{n_c}}{T_v - T_0}$ waarschijnlijk niet erg nauwkeurig.

Hiervoor zijn enkele oorzaken te noemen, onder andere:

- de term wordt bepaald als verschil van twee termen ($C_c \bar{\epsilon}^{n_c}$ en $C_v \bar{\epsilon}^{n_v}$) waardoor de relatieve fout in de uitkomst groot kan worden (zie figuur).

In de figuur zijn aangegeven:

- $C_c \bar{\epsilon}^{n_c}$ en $C_v \bar{\epsilon}^{n_v}$; de spreidingsgebieden in deze curves en de ten gevolge van deze spreiding mogelijke variatie in de term $\Delta \bar{\sigma}$ (bij een bepaalde rek).



- bij de proeven bij verhoogde temperatuur was de temperatuur in de proefstaaf waarschijnlijk niet overal gelijk. (zie bijlage 4)
- de temperatuurverhoging $T_v - T_0$ was niet nauwkeurig bekend.

- 2./ Het gebruik van het criterium voor thermische instabiliteit in de praktijk wordt belemmerd omdat het moeilijk is een goede waarde voor α af te leiden. Hiervoor namelijk is het nodig om een berekening te maken waarin de deformatie-energie een rol speelt. Deze deformatie-energie echter is rechtstreeks afhankelijk van het rekniveau, en het is nu net dit rekniveau waarvoor we middels het criterium een waarde proberen te vinden!

Dit probleem Areaedt ook op bij de computerberekeningen van de snelle torsieproeven. Hier kan het probleem mathematisch als volgt worden geformuleerd:

$$\text{Criterium: } \bar{\epsilon}_k = \bar{\epsilon}_k \left(\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial T} \right)_{\bar{\epsilon}, \bar{e}, sw, n, \underline{\alpha_R}} \right)$$

$$\text{Computerprogramma: } \alpha_R = \alpha_R \left(\bar{e}, sw, A, C, n, R, T_0, \bar{\epsilon}, \underline{\bar{\epsilon}_k} \right)$$

In hoofdstuk 4 is dit probleem omzette door in het computerprogramma de experimentele waarde van $\bar{\epsilon}_k$ te gebruiken ($= \bar{\epsilon}_{Rk}$) en met de aldus verkregen waarde van α_R het criterium toe te passen.

Door de uitvoer van het programma te veranderen kan echter vrij eenvoudig een echte oplossing worden gevonden. Men rekent hiervoor met het programma de volgende gegevens door, bijv. $\bar{\epsilon}_R = 1$ (totale rek) in 1000 stappen (bij een materiaal en torsieproef waarvoor men $\bar{\epsilon}_k$ wil afleiden). Als uitvoer geeft men de resultaten van het buitenste segment bij aantal stappen $X = 10, 20, 30$ enz. $\frac{1}{1000}$. In feite is dan in een berekening $\alpha_R = \alpha_R(\bar{\epsilon}_R)$ vastgelegd waarbij $\bar{\epsilon}_R$ ophooft in stappen van 0.01. Het bepalen van $\bar{\epsilon}_k$ gaat dan als volgt: Neem aan $\alpha_R = 1$ en bepaal met het criterium een waarde voor de kritische rek. De volgens het programma bij deze rek behorende α_R kan uit de uitvoer worden afgelezen. Met deze α_R wordt opnieuw het criterium toegepast waaruit een nieuwe waarde voor $\bar{\epsilon}_k$ volgt, en waarmee weer een nieuwe α_R bepaald wordt. Zo kan men itereren totdat een voldoende nauwkeurige oplossing voor $\bar{\epsilon}_k$ gevonden is.

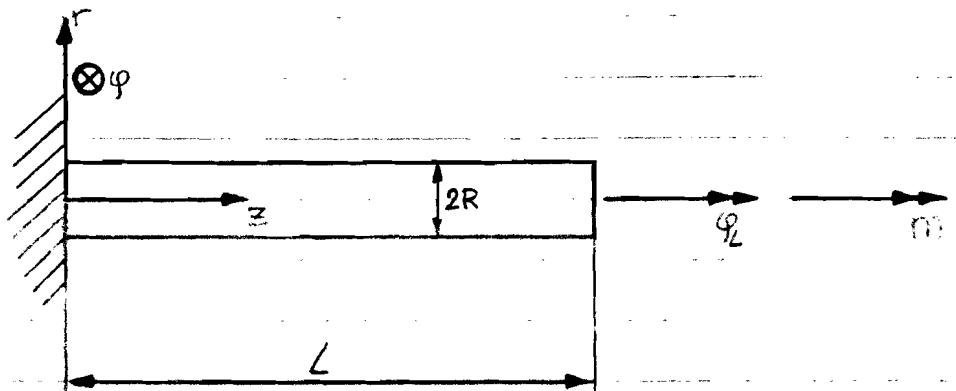
8. Literatuur-opgave

- [1.] J.H. Dautzenberg
 „Thermische instabiliteit.“
 T.H.E. diktaat „Omvormtechnologie - A“, nummer: 4.558
 tekst 12.
- [2.] P.C. Veunstra ; S. Hoogenboom
 T.H.E. diktaat „Technische plasticiteitsleer.“
 nummers: 4.406 en 4.482
- [3.] H. Wilhelm
 „Über das Umformverhalten von Blechen aus Titan
 und Titanlegierungen.“
 deel 34 van „Berichte aus dem Institut für
 Umformtechnik“
 bibliothekenummer: KFK 66 THS
- [4.] T.H.E. - intern normblad Nr. 12.1.1.
 [Aluminium 51 ST]
- [5.] M.P. Snijder van Wissenkerke
 „Numerieke methode voor de bepaling van de
 temperatuurverdeling in een torsie-staaf tijdens
 plastische deformatie.“
 W.P.B. rapport nr. 0091

Bijlage 1.

* Analyse van de torsie van een cilindrische staaf.

zie ook lit. [2]



I. "homogene deformatie"

- Aannamen :
1. vlakke doorsneden blijven vlak.
 2. geen verandering van staaflengte.
 3. materiële lijnen in radiale richting blijven recht.
 4. $\frac{d\varphi_z}{dz} = \text{constant}$.
(= aanname van homogene deformatie)

• Het snelheidsveld in de staaf

Wij nemen aan : $\dot{u}_z = 0$ en $\dot{u}_r = 0$

Verder : $\varphi_z = \frac{z}{L} \varphi_L$; differentiëren naar de tijd : $\dot{\varphi}_z = \frac{z}{L} \dot{\varphi}_L$

Ook geldt : $\dot{u}_\varphi = r \cdot \dot{\varphi}_z$, dus : $\dot{u}_\varphi = r \cdot z \frac{\dot{\varphi}_L}{L}$

- Als componenten van de rekspannings-tensor volgen hiermee :
(in cilindercoördinaten)

$$\dot{\epsilon}_{rr} = \frac{\partial \dot{u}_r}{\partial r} = 0$$

$$\dot{\epsilon}_{\varphi\varphi} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \dot{u}_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\dot{u}_r}{r} = 0$$

$$\dot{\epsilon}_{zz} = \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial z} = 0$$

$$\dot{\epsilon}_{\varphi z} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial \varphi} + \frac{\partial \dot{u}_\varphi}{\partial z} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \cdot 0 + r \frac{\dot{\varphi}}{L} \right) = \frac{1}{2} r \cdot \frac{\dot{\varphi}}{L}$$

$$\dot{\epsilon}_{zr} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{u}_r}{\partial z} + \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial r} \right) = 0$$

$$\dot{\epsilon}_{r\varphi} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \dot{u}_r}{\partial \varphi} + \frac{\partial \dot{u}_\varphi}{\partial r} - \frac{\dot{u}_\varphi}{r} \right) = \frac{1}{2} \left(z \cdot \frac{\dot{\varphi}}{L} - z \cdot \frac{\dot{\varphi}}{L} \right) = 0$$

Dit geeft voor de effectieve rekspanning:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\epsilon}} &= \sqrt{\left\{ \frac{2}{3} (\dot{\epsilon}_{rr}^2 + \dot{\epsilon}_{\varphi\varphi}^2 + \dot{\epsilon}_{zz}^2) + \frac{4}{3} (\dot{\epsilon}_{r\varphi}^2 + \dot{\epsilon}_{\varphi z}^2 + \dot{\epsilon}_{zr}^2) \right\}} \\ &= \sqrt{\frac{4}{3} \dot{\epsilon}_{\varphi z}^2} = \sqrt{\frac{4}{3} \left(\frac{1}{2} r \frac{\dot{\varphi}}{L} \right)^2} = \sqrt{\frac{1}{3} \left(r \frac{\dot{\varphi}}{L} \right)^2} \end{aligned}$$

dus :
$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot r \cdot \frac{\dot{\varphi}}{L} \quad [1/\text{sec}] \quad (10.)$$

- Integreer over de tijd levert voor de effectieve rek :

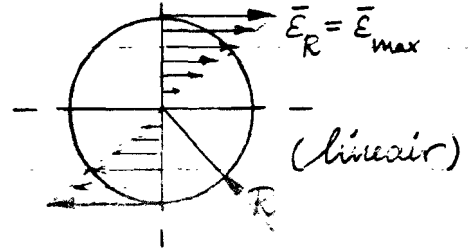
$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{r}{L} \cdot \varphi_L \quad [-] \quad (11.)$$

De maximale effectieve rek treedt bij de torsieproef op in de „buitenste vezel“ van het proefstuk. ($r=R$)

Deze is te berekenen met: $\bar{\epsilon}_R = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{L} \cdot \varphi_L$ [-] (12.)

(bij homogene deformatie)

Rekverloop over de doorsnede:



• De maximale reknelheid

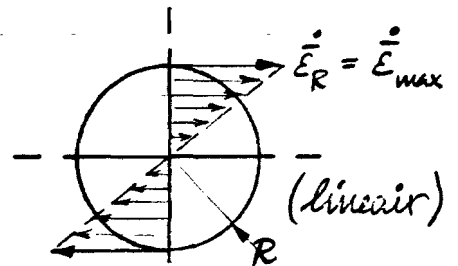
Als uitdrukking voor de effectieve reknelheid is

afgeleid: $\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot r \cdot \frac{\dot{\varphi}_L}{L}$ [1/sec] (10.)

Voor de maximale effectieve reknelheid geldt dan:

$$\dot{\bar{\epsilon}}_{max} = \dot{\bar{\epsilon}}_R = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{L} \cdot \dot{\varphi}_L \quad [1/sec] \quad (15.)$$

Reknelheidsverloop over de doorsnede:



Als n het toerental (in $\frac{omw}{min}$) voorstelt waarmee de torsieproef wordt uitgevoerd, dan geldt de relatie:

$$n = \frac{1}{2\pi} \cdot \dot{\varphi}_L \left[\frac{rad}{sec} \right] \cdot 60 = \frac{30}{\pi} \cdot \dot{\varphi}_L \quad ; \quad \text{dus:} \quad \dot{\varphi}_L = \frac{\pi}{30} \cdot n \quad (14.)$$

Samen met (13.) levert dit voor de maximale effectieve reknelheid:

$$\dot{\bar{\epsilon}}_R = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{L} \cdot \frac{\pi}{30} \cdot n$$

oftewel:

$$\dot{\bar{\epsilon}}_R = \frac{\pi}{30\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{L} \cdot n \quad [1/sec] \quad (15.)$$

(n in $\frac{omw}{min}$)

• Het verband tussen torsiemoment M en torsiehoek φ_z

de vergelijkingen van
Levy - von Mises :

de componenten van
de reknelheids-tensor:

$$\left. \begin{array}{l} \dot{\epsilon}_{rr} = \frac{\dot{\epsilon}_i}{\sigma} \left(\sigma_{rr} - \frac{\sigma_{\varphi\varphi} + \sigma_{zz}}{2} \right) \quad | \quad \dot{\epsilon}_{rr} = 0 \\ \dot{\epsilon}_{\varphi\varphi} = \frac{\dot{\epsilon}_i}{\sigma} \left(\sigma_{\varphi\varphi} - \frac{\sigma_{zz} + \sigma_{rr}}{2} \right) \quad | \quad \dot{\epsilon}_{\varphi\varphi} = 0 \\ \dot{\epsilon}_{zz} = \frac{\dot{\epsilon}_i}{\sigma} \left(\sigma_{zz} - \frac{\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi}}{2} \right) \quad | \quad \dot{\epsilon}_{zz} = 0 \end{array} \right\} \text{ geeft: } \sigma_{rr} = \sigma_{\varphi\varphi} = \sigma_{zz} = 0$$

$$\begin{array}{l} \dot{\epsilon}_{r\varphi} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\epsilon}_i}{\sigma} \cdot \sigma_{r\varphi} \quad | \quad \dot{\epsilon}_{r\varphi} = 0 \quad \longrightarrow \quad \sigma_{r\varphi} = 0 \\ \dot{\epsilon}_{\varphi z} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\epsilon}_i}{\sigma} \cdot \sigma_{\varphi z} \quad | \quad \dot{\epsilon}_{\varphi z} = \frac{1}{2} r \frac{\dot{\varphi}_z}{L} \quad \longrightarrow \quad \sigma_{\varphi z} \neq 0 \\ \dot{\epsilon}_{zr} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\epsilon}_i}{\sigma} \cdot \sigma_{zr} \quad | \quad \dot{\epsilon}_{zr} = 0 \quad \longrightarrow \quad \sigma_{zr} = 0 \end{array}$$

Er werkt slechts één spanningscomponent : $\sigma_{\varphi z}$

Voor de effectieve spanning geldt dan :

$$\begin{aligned} 2\bar{\sigma}^2 &= (\sigma_{rr}^2 - \sigma_{\varphi\varphi}^2) + (\sigma_{\varphi\varphi}^2 - \sigma_{zz}^2) + (\sigma_{zz}^2 - \sigma_{rr}^2) + 6(\sigma_{r\varphi}^2 + \sigma_{\varphi z}^2 + \sigma_{zr}^2) \\ \rightarrow 2\bar{\sigma}^2 &= 6\sigma_{\varphi z}^2 \\ \rightarrow \quad \boxed{\bar{\sigma} = \sqrt{3} \cdot \sigma_{\varphi z}} \quad \text{o} \quad \boxed{\sigma_{\varphi z} = \frac{1}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}} \end{aligned} \quad (16)$$

Het torsiemoment M volgt uit de integraal :

$$M = \int_{r=0}^R \sigma_{\varphi z} 2\pi r \cdot dr \cdot r = 2\pi \int_{r=0}^R \sigma_{\varphi z} r^2 dr$$

Tenzen met formule (16.) geeft dit :

$$M = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \cdot \int_{r=0}^R \bar{\sigma} \cdot r^2 dr \quad (17.)$$

Nu is afhankelijk van het materiaalmodel : $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon})$,
 waarbij in dit geval $\bar{\epsilon} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot r \cdot \frac{q_L}{L}$ (11.)

Als we uitgaan van de versterigingsfunctie van Rankin ($\bar{\sigma} = C \bar{\epsilon}^n$)
 wordt de uitdrukking :

$$\begin{aligned} M &= \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \cdot \int_{r=0}^R C \bar{\epsilon}^n \cdot r^2 dr = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \cdot \int_{r=0}^R C \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot r \cdot \frac{q_L}{L} \right)^n \cdot r^2 dr \\ &= \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \cdot C \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{q_L}{L} \right)^n \cdot \int_{r=0}^R r^{n+2} dr \end{aligned}$$

$$M = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \cdot C \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{q_L}{L} \right)^n \cdot \frac{R^{n+3}}{n+3} \quad [Nm] \quad (18.)$$

$n \neq -3$

• De totaal deformatie-energie W

Deze volgt uit : $W = \int_{q_L=0}^{q_{Le}} M dq_L = \frac{2\pi C}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)^n \cdot \frac{R^{n+3}}{n+3} \int_{q_L=0}^{q_{Le}} q_L^n dq_L$

$$= \frac{2\pi C}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)^n \cdot \frac{R^{n+3}}{n+3} \cdot \left(\frac{1}{n+1} q_L^{n+1} \right) \Big|_{q_L=0}^{q_{Le}}$$

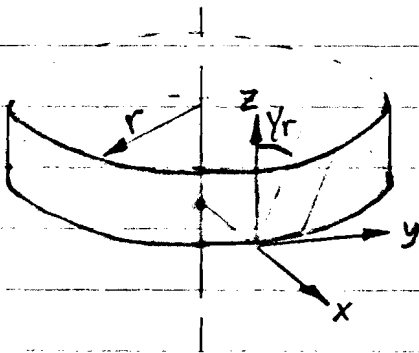
duis : $W = \frac{2\pi C}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)^n \cdot \frac{R^{n+3} \cdot q_{Le}^{n+1}}{(n+3)(n+1)} \quad [J] \quad (19.)$

$(\text{bij homogene deformatie})$ $n \neq -3; n \neq -1$

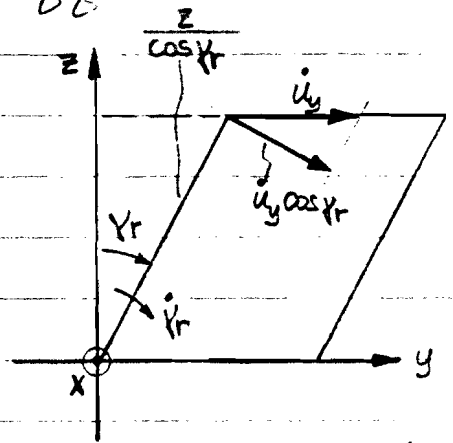
II. "Inhomogene deformatie"

Wij laten de 4^e aanname, namelijk dat $\frac{dy_z}{dz}$ constant moet zijn, vallen. Hiermee wordt dus de mogelijkheid geïntroduceerd dat de cilindrische staaf in axiale richting rekconcentraties vertoont. Een dergelijke deformatiepatroon ($\bar{\epsilon} = \bar{\epsilon}(z)$) definiëren we als "inhomogeen".

Voor de afleiding wordt uitgegaan van een lokaal cartesisch coördinatenstelsel:



x, y, z (lokale) coördinaten



enkelezijdige afschuiving

• Het snelheidsveld

$$u_x = 0$$

$$u_y \neq 0$$

$$u_z = 0$$

u_y volgt uit de relatie: $u_y \cos \gamma_r = \dot{\gamma}_r \frac{z}{\cos \gamma_r}$, oftewel: $u_y = \dot{\gamma}_r \frac{z}{\cos^2 \gamma_r}$
(zie figuur)

Deze relatie geldt ook bij inhomogene deformaties omdat de coördinaat z zo klein genomen kan worden dat het beschouwde "blokje" rechte begrenzinglijnen heeft.

• Componenten van de rekspannings-tensor :

$$\dot{\epsilon}_{xx} = \frac{\partial \dot{u}_x}{\partial x} = 0$$

$$\dot{\epsilon}_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{u}_x}{\partial y} + \frac{\partial \dot{u}_y}{\partial x} \right) = 0$$

$$\dot{\epsilon}_{yy} = \frac{\partial \dot{u}_y}{\partial y} = 0$$

$$\dot{\epsilon}_{xz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{u}_x}{\partial z} + \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial x} \right) = 0$$

$$\dot{\epsilon}_{zz} = \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial z} = 0$$

$$\dot{\epsilon}_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{u}_y}{\partial z} + \frac{\partial \dot{u}_z}{\partial y} \right) = \frac{1}{2} \frac{\dot{\gamma}_r}{\cos^2 \gamma_r}$$

Hiervan wordt de effectieve rekspanning :

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\epsilon}} &= \sqrt{\left\{ \frac{2}{3} (\dot{\epsilon}_{xx}^2 + \dot{\epsilon}_{yy}^2 + \dot{\epsilon}_{zz}^2) + \frac{4}{3} (\dot{\epsilon}_{xy}^2 + \dot{\epsilon}_{xz}^2 + \dot{\epsilon}_{yz}^2) \right\}} \\ &= \sqrt{\frac{4}{3} \dot{\epsilon}_{yz}^2} = \sqrt{\frac{4}{3} \left(\frac{1}{2} \frac{\dot{\gamma}_r}{\cos^2 \gamma_r} \right)^2} = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\frac{\dot{\gamma}_r}{\cos^2 \gamma_r} \right)^2} \end{aligned}$$

dus :
$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\dot{\gamma}_r}{\cos^2 \gamma_r}$$

Integreren over de tijd levert de effectieve rek :

$$\bar{\epsilon} = \int \dot{\bar{\epsilon}} \, dt = \int \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\dot{\gamma}_r}{\cos^2 \gamma_r} \, dt = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \int \frac{\delta \gamma_r}{\cos^2 \gamma_r}$$

$$\boxed{\bar{\epsilon} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \tan \gamma_r} \quad [-] \quad (20)$$

Voor de „buitenste vezel“ ($r=R$) geldt dan :

$$\boxed{\bar{\epsilon}_R = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \tan \gamma_R} \quad [-] \quad (21)$$

Bijlage 2.

* Materiaalgegevens. Warmtebehandelingen.

• materiaalgegevens

			Ti6Al4V	Ti-zuiver	Al51ST
specifieke gewicht	ρ	$\frac{kg}{m^3}$	4430	4510	2700
specifieke warmte	c_w	$\frac{J}{kg \cdot K}$	565	523	960
warmtegeleidingscoëfficiënt	λ	$\frac{W}{mK}$	7.1	16.0	~ 160

De gegevens van Ti6Al4V en Ti-zuiver zijn ontleend aan lit. [3], de gegevens van Al51ST aan lit. [4.]

• warmtebehandelingen

De staafjes van Ti6Al4V en Ti-zuiver waarover hier verslag is gedaan hebben geen warmtebehandeling ondergaan.

De staafjes van Al51ST hebben een veredelingsbehandeling ondergaan volgens :

- 1.) 1 uur (in vacuüm) oplossingsfloeiën bij 525 °C
- 2.) afschrikken in water
- 3.) veredelen : 8 uur bij 175 °C (in droogstoef)

zie ook lit. [4.]

Bijlage 3.

* Snelle torsieproeven - rekverloop.

Onderwerp van deze bijlage :

Het verloop van $\bar{\epsilon}_{Re}$ als functie van de axiale coördinaat, van de proefstukken die bij "hoge" deformatiesnelheid beproefd zijn.

Er werden snelle torsieproeven uitgevoerd bij drie verschillende toerentallen : 2315, 1175 en 784 [$\frac{\text{omw}}{\text{min}}$].

Mit vergelijking 15 van de analyse (bijlage 1) volgen de hierbij behorende effectieve ratesnelheden in de buitenste proefstaafvezel:

$$1.) \quad \dot{\bar{\epsilon}}_R = \frac{\pi}{30\sqrt{3}} \cdot \frac{3.17}{25.00} \cdot 2315 = 17.7 \text{ [1/sec]}$$

$$2.) \quad \dot{\bar{\epsilon}}_R = \frac{\pi}{30\sqrt{3}} \cdot \frac{3.17}{25.00} \cdot 1175 = 9.0 \text{ [1/sec]}$$

$$3.) \quad \dot{\bar{\epsilon}}_R = \frac{\pi}{30\sqrt{3}} \cdot \frac{3.17}{25.00} \cdot 784 = 6.0 \text{ [1/sec]}$$

} zolang de deformatie homogeen is.

Alle snelle torsieproeven werden bij kamertemperatuur uitgevoerd.

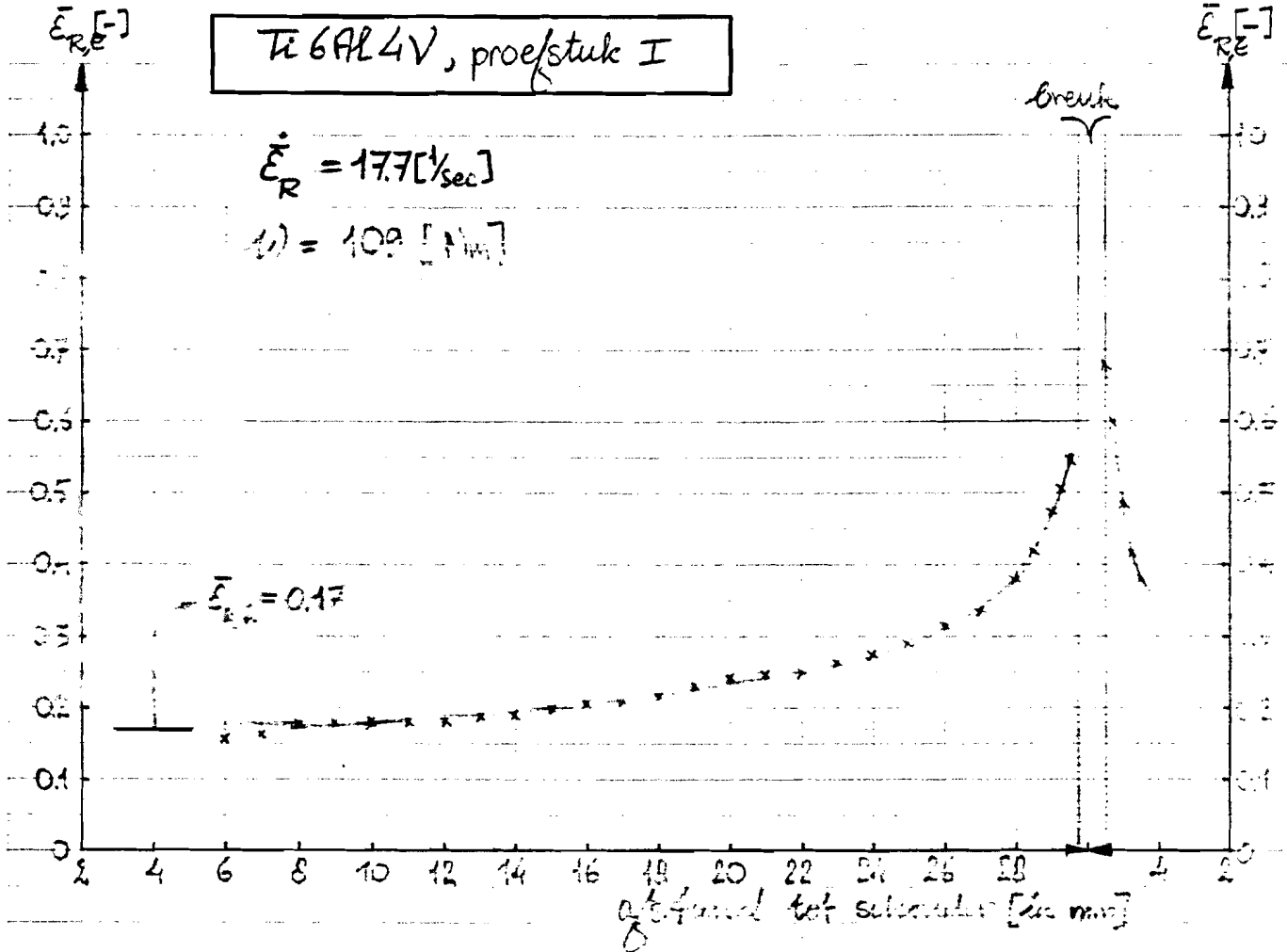
Op de volgende bladzijden worden de opgemeten rekverlopen in grafieken weergegeven. In deze grafieken zijn ook de experimenteel bepaalde waarden van de totale deformatie-energie (W) vermeld.

Tc 6Al4V, proefstuk I

$\dot{\epsilon}_R = 17.7 [1/sec]$

$\sigma = 109 [N/mm^2]$

$\bar{\epsilon}_{Rk} = 0.17$

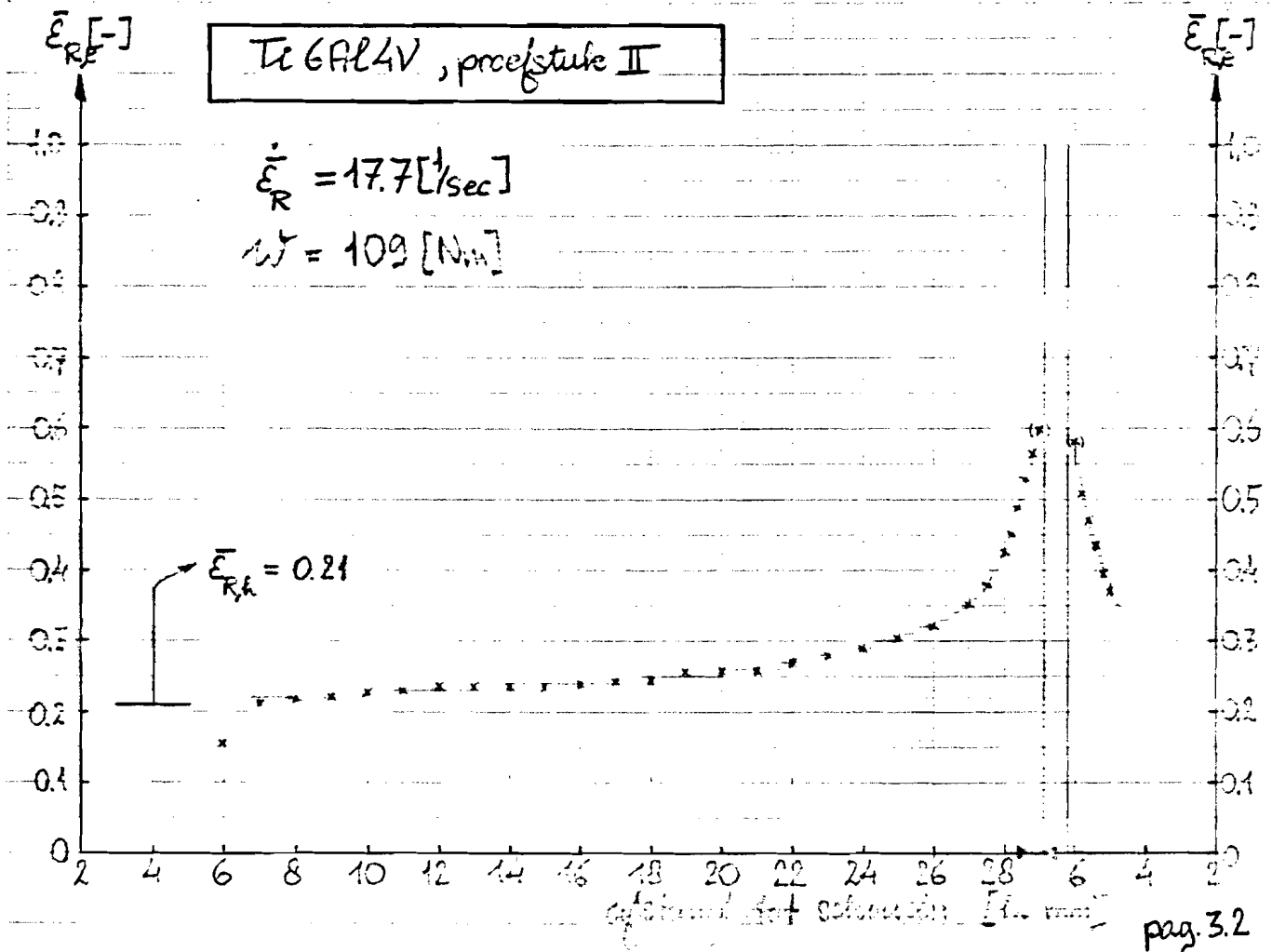


Tc 6Al4V, proefstuk II

$\dot{\epsilon}_R = 17.7 [1/sec]$

$\sigma = 109 [N/mm^2]$

$\bar{\epsilon}_{Rk} = 0.21$

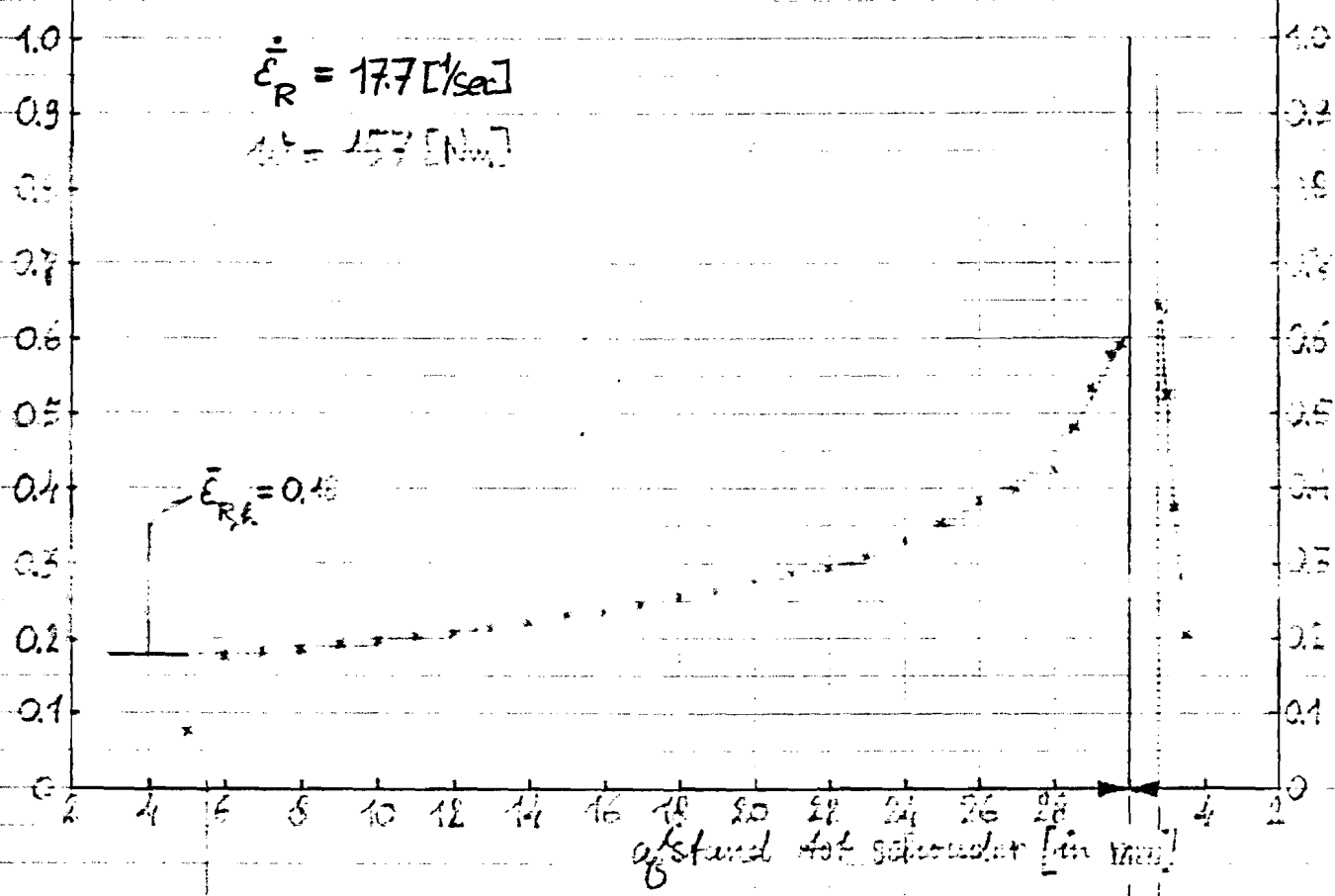


$\bar{\epsilon}_{R\epsilon} [-]$

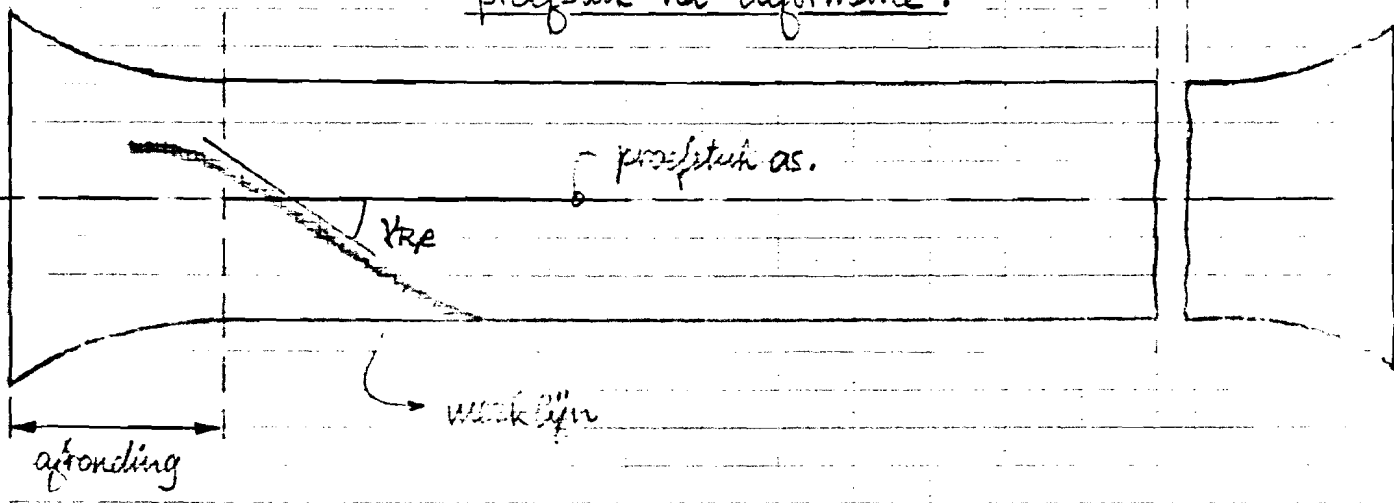
Ti 6Al4V, proefstuk III

$$\dot{\bar{\epsilon}}_R = 17.7 [1/sec]$$

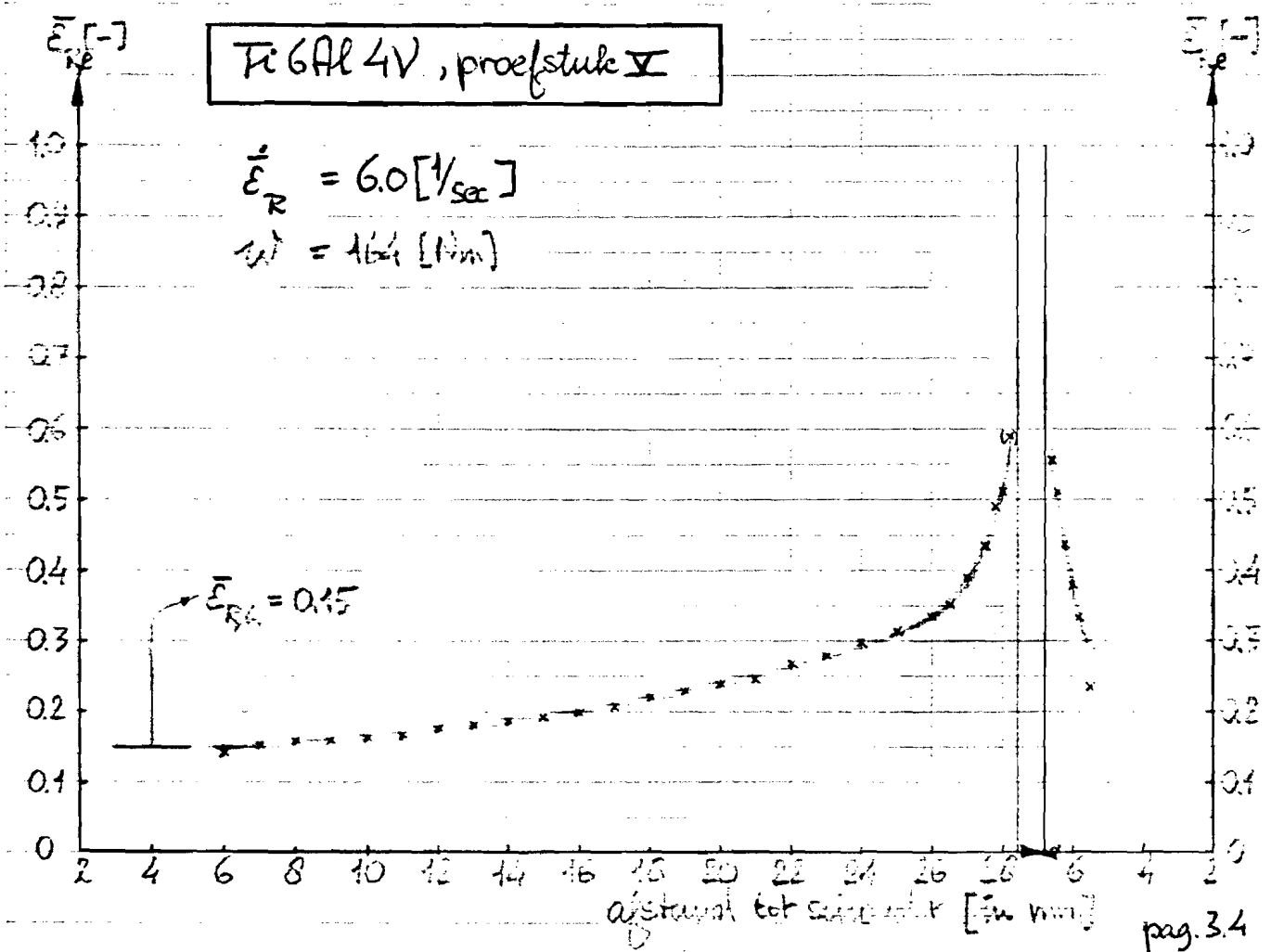
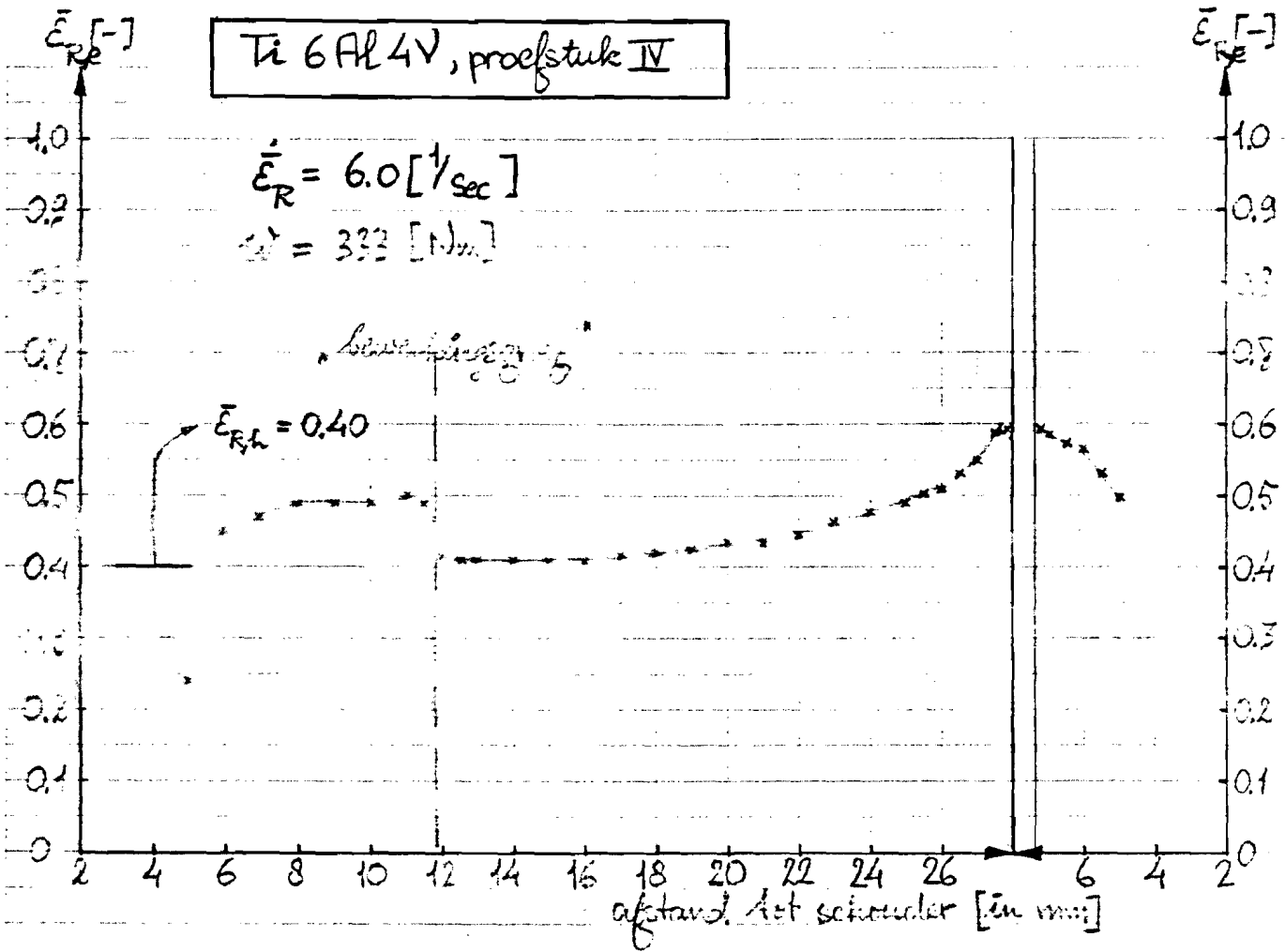
$$F = 157 [N/mm]$$

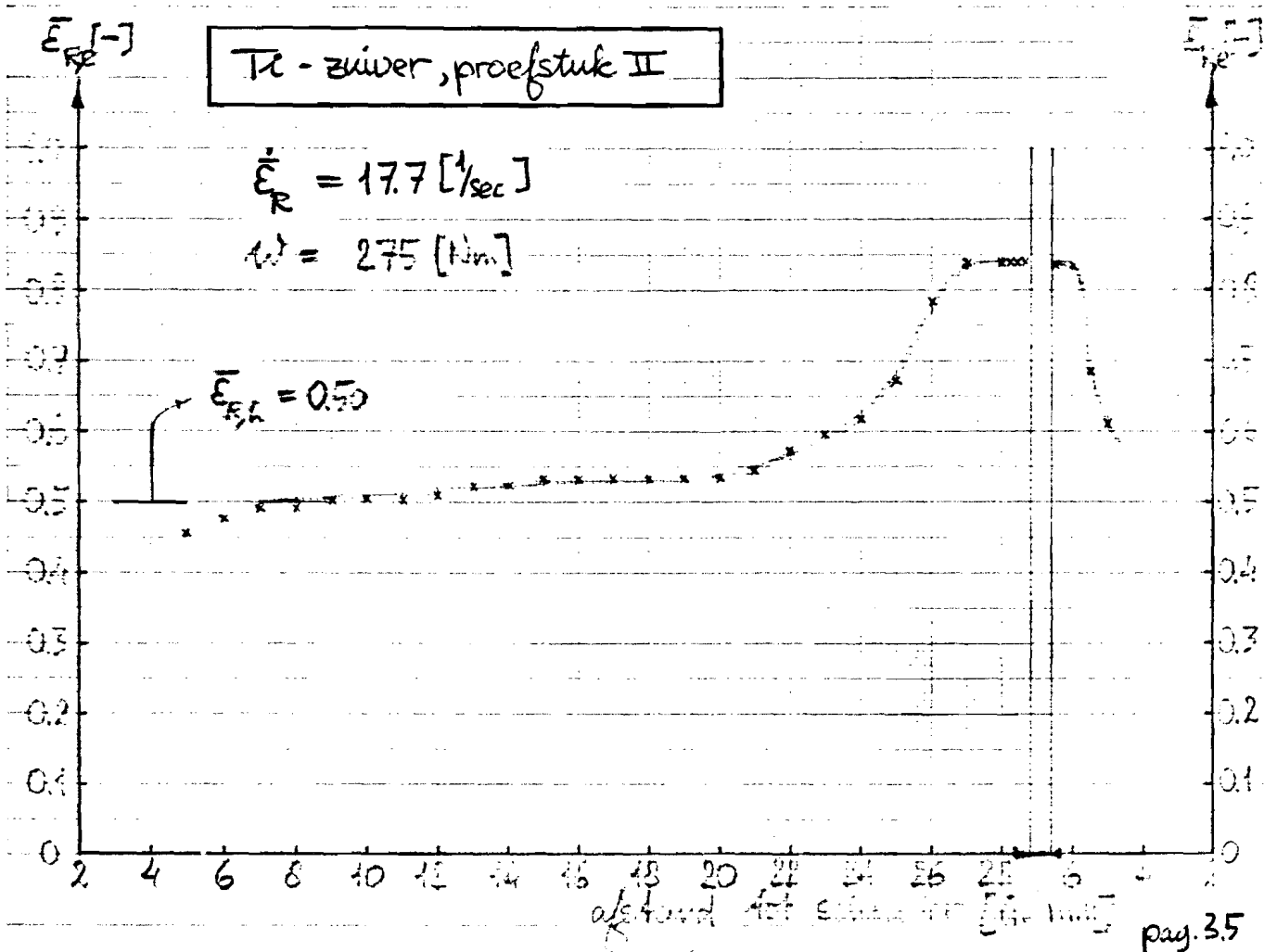
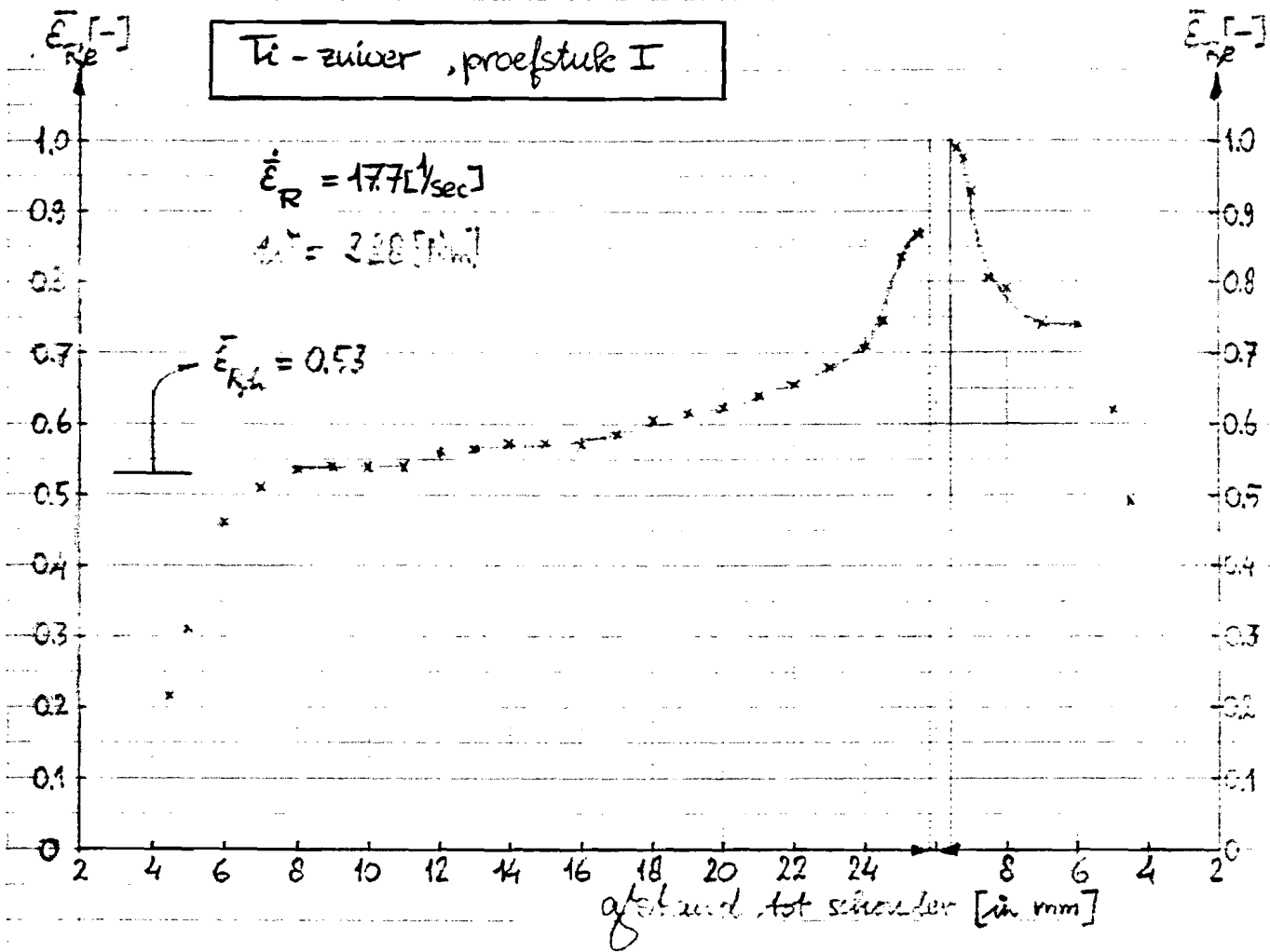


proefstuk na deformatie:



Voor afstand tot schouder $< 6 \text{ à } 7$ [mm] wordt de deformatie beïnvloed door de afrondingen aan het proefstuk.

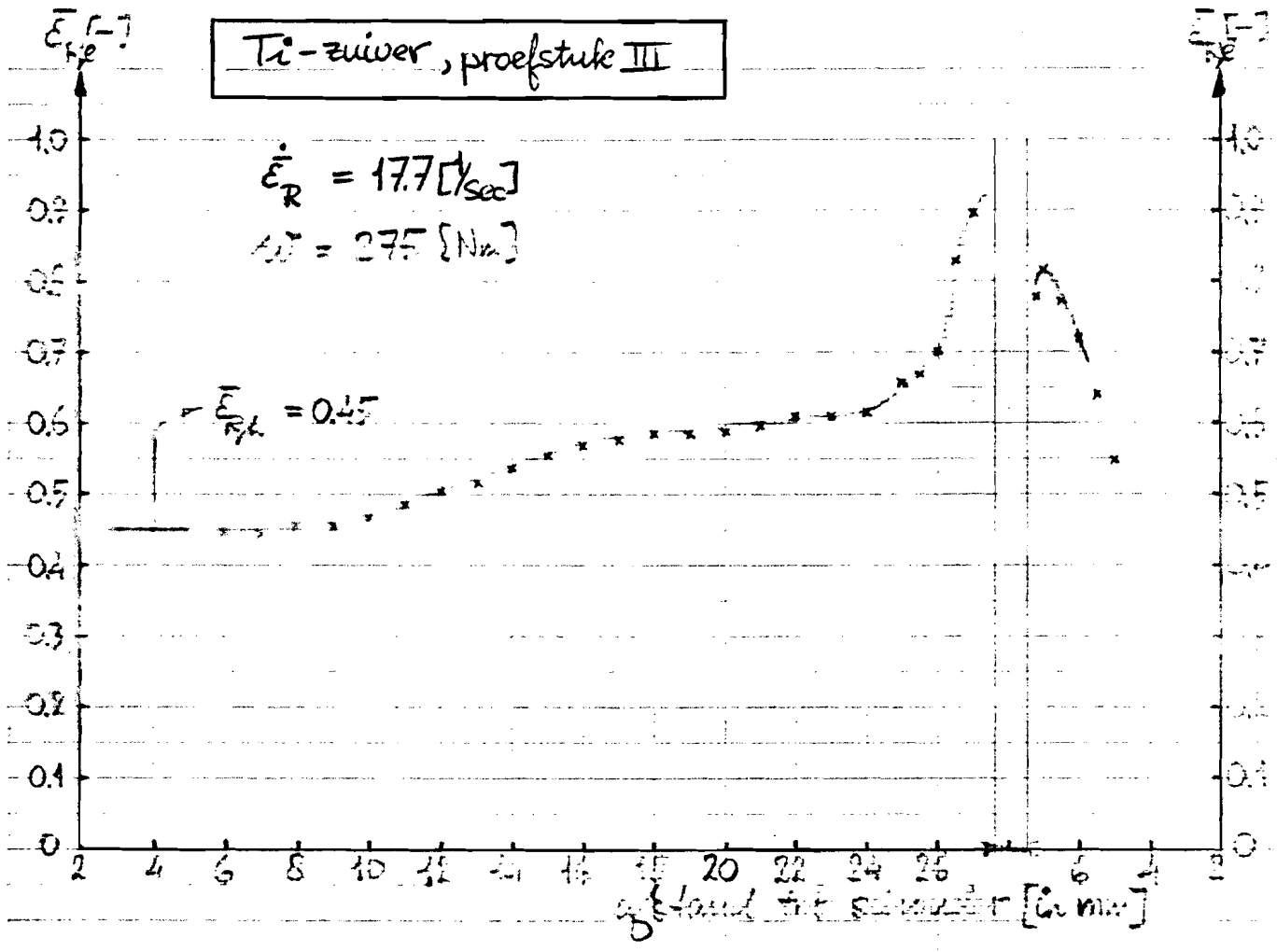




Ti-zuiver, proefstuk III

$\dot{\epsilon}_R = 17.7 [\%/sec]$
 $\dot{W} = 275 [Nm]$

$\bar{\epsilon}_{Rk} = 0.45$

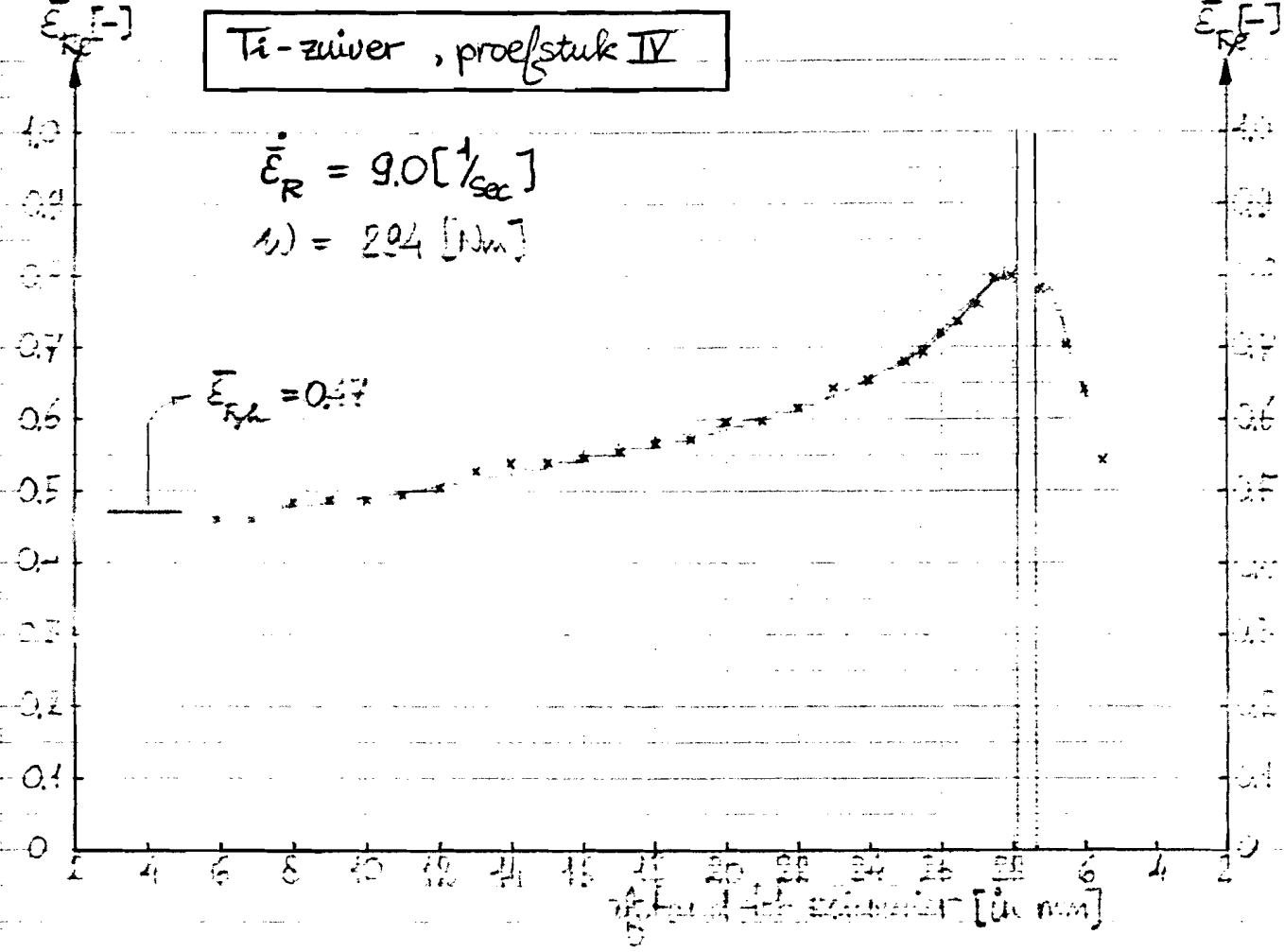


Ti-zuiver, proefstuk IV

$\dot{\epsilon}_R = 9.0 [1/sec]$

$w) = 204 [Nm]$

$\bar{\epsilon}_{R,h} = 0.47$

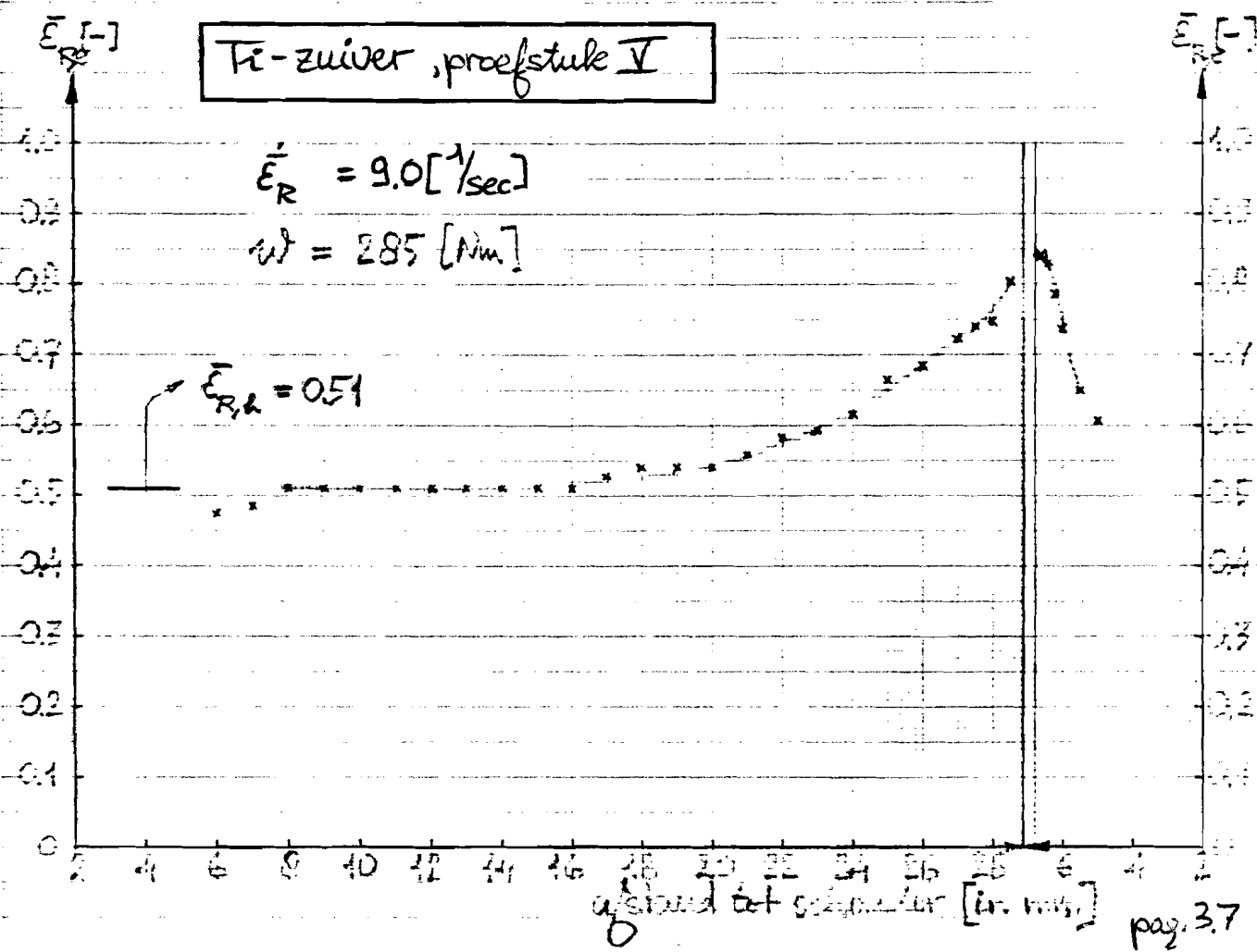


Ti-zuiver, proefstuk V

$\dot{\epsilon}_R = 9.0 [1/sec]$

$w) = 285 [Nm]$

$\bar{\epsilon}_{R,h} = 0.51$

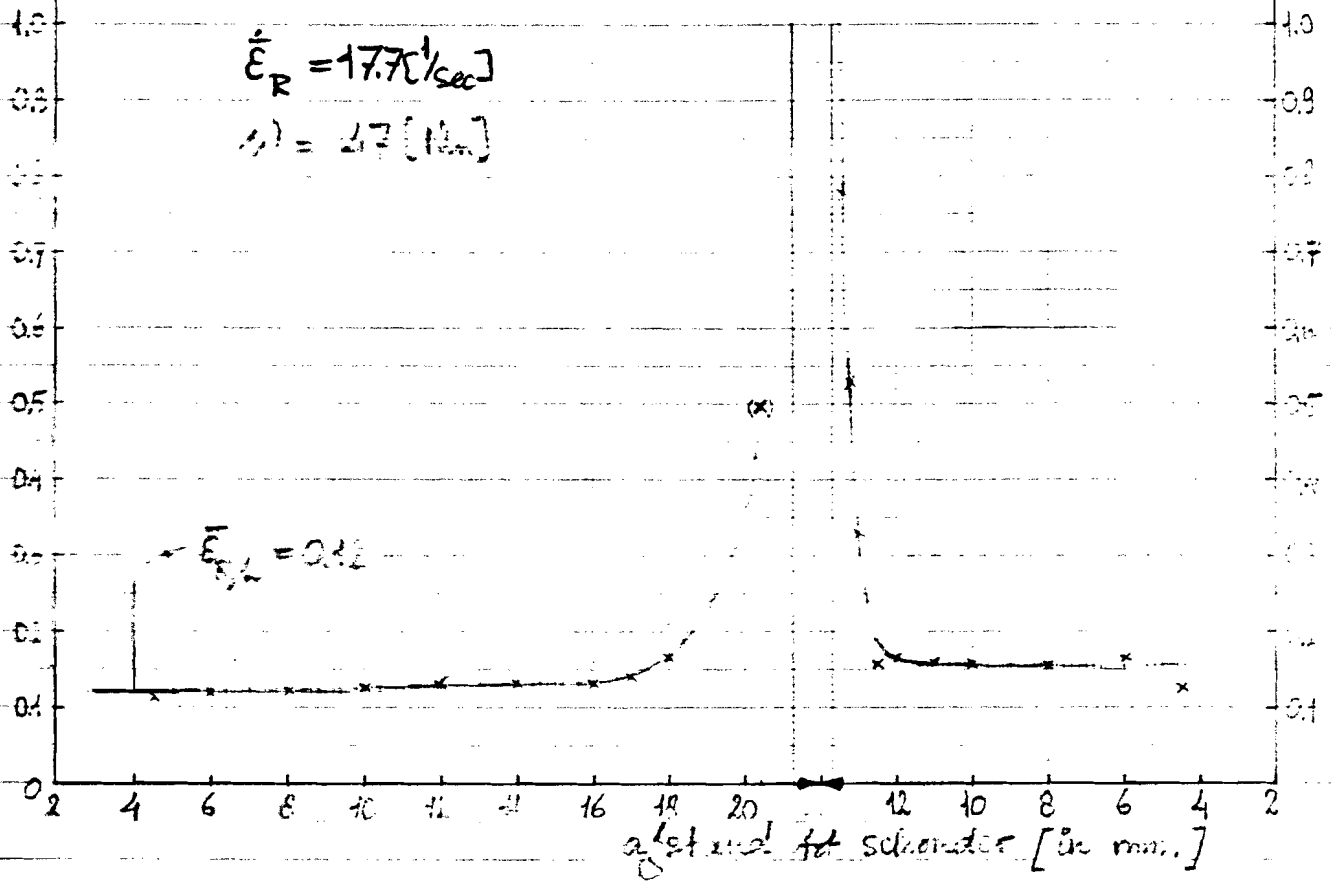


AL51 ST , proefstuk I

$$\dot{\epsilon}_R = 17.7 [\text{1/sec}]$$

$$F = 47 [\text{N}]$$

$$\bar{\epsilon}_{R,h} = 0.12$$

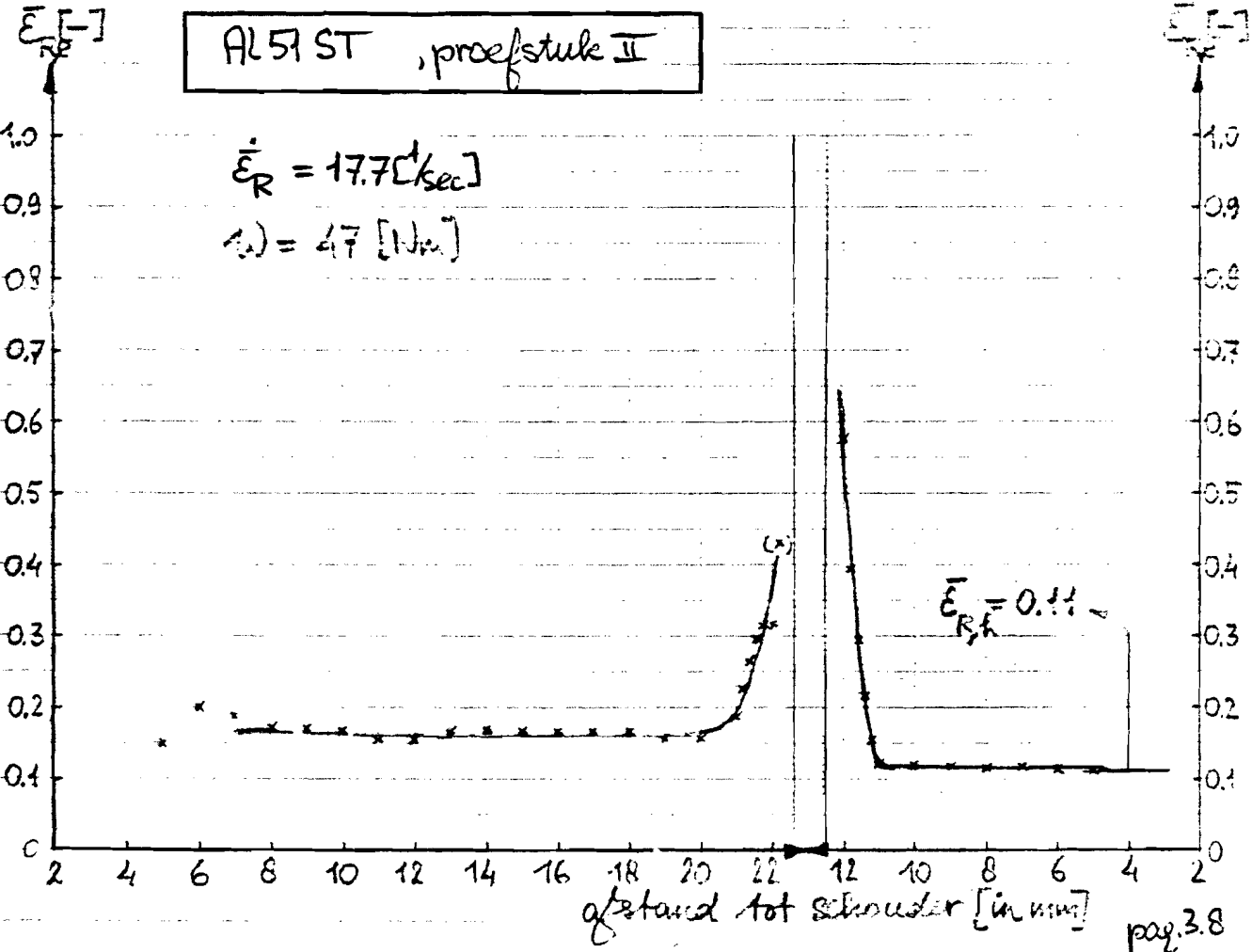


AL51 ST , proefstuk II

$$\dot{\epsilon}_R = 17.7 [\text{1/sec}]$$

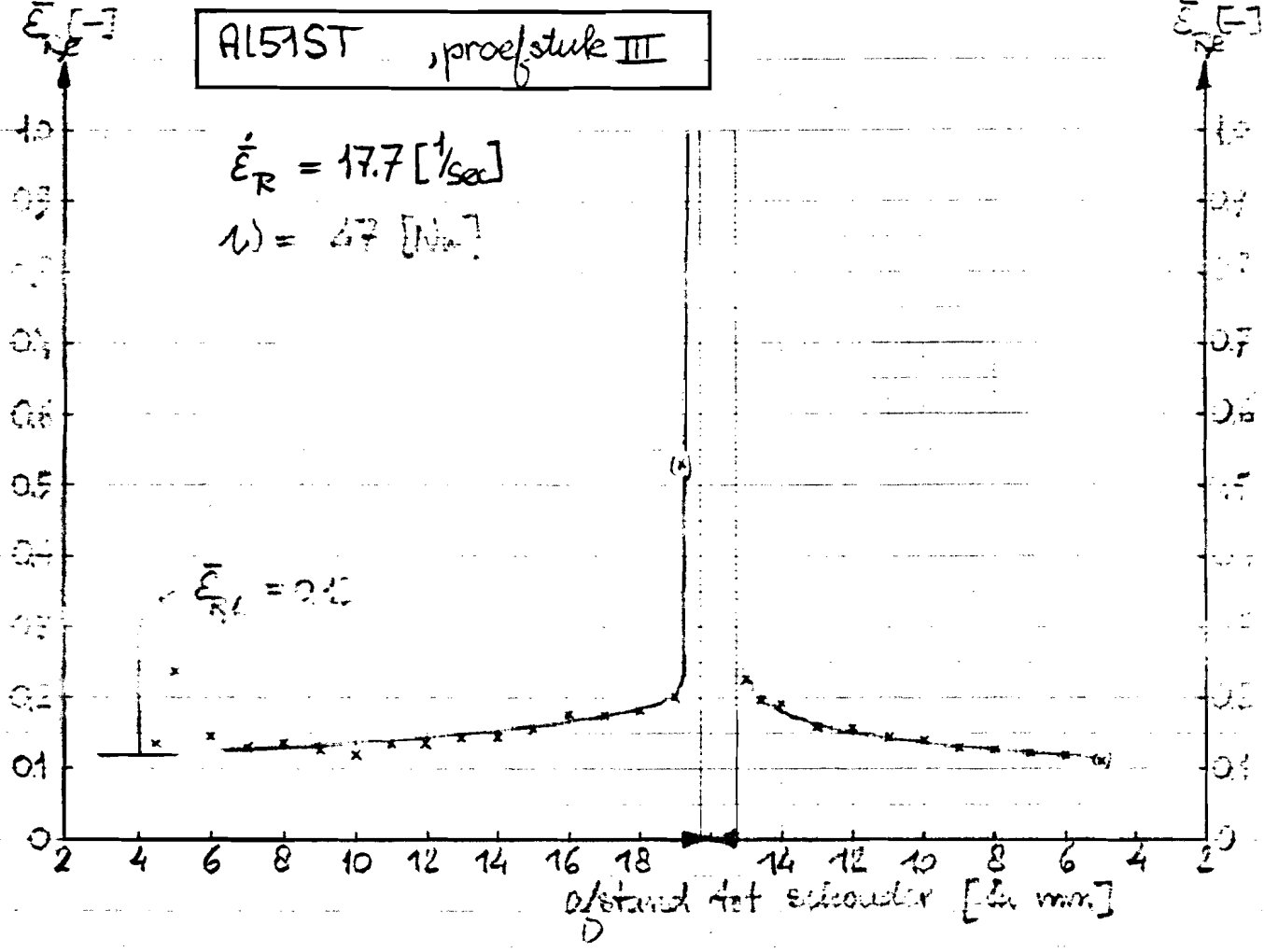
$$F = 47 [\text{N}]$$

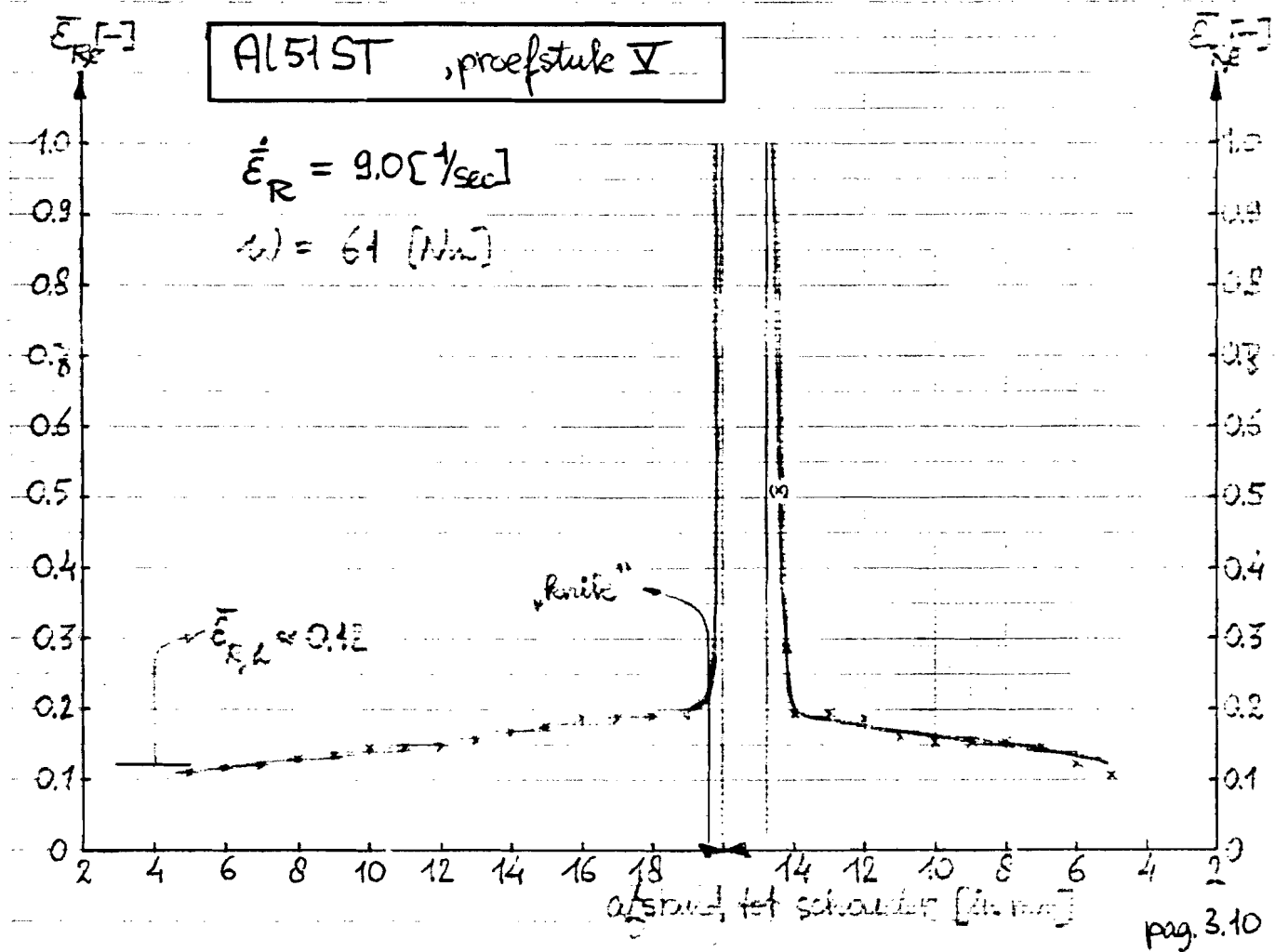
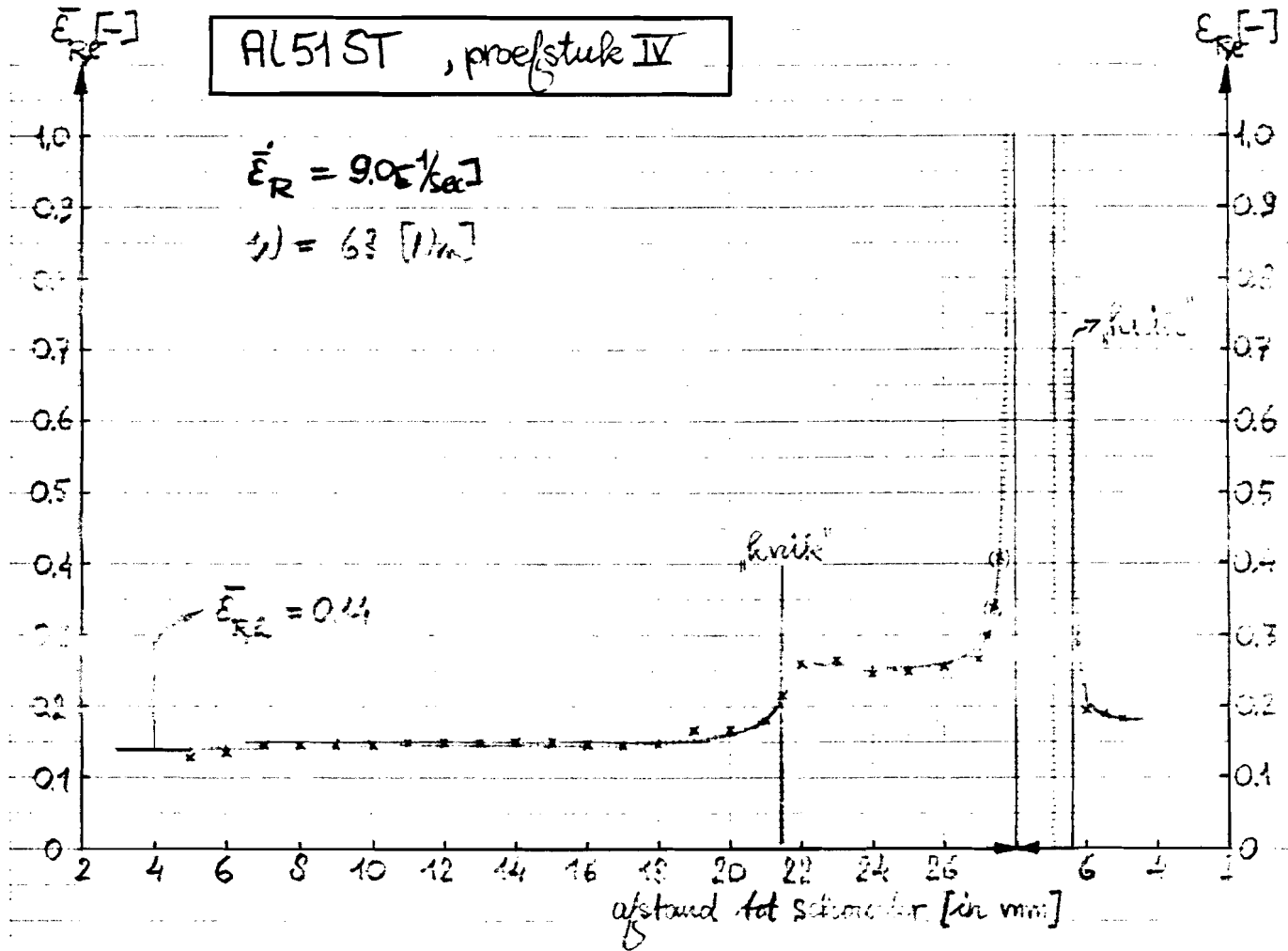
$$\bar{\epsilon}_{R,h} = 0.11$$



AL51ST , proefstuk III

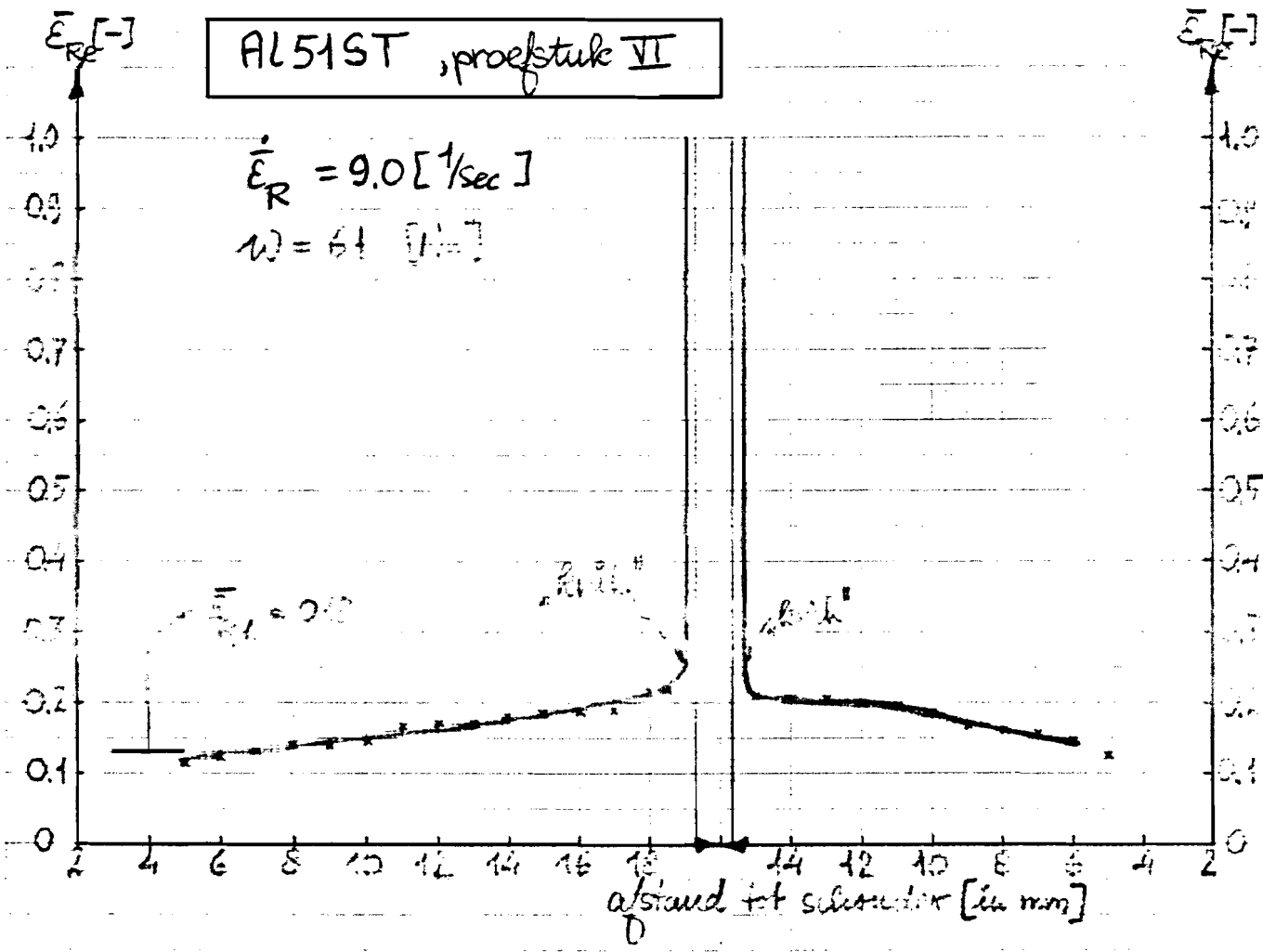
$\dot{\epsilon}_R = 17.7 [1/sec]$
 $\omega = 47 [N/mm^2]$



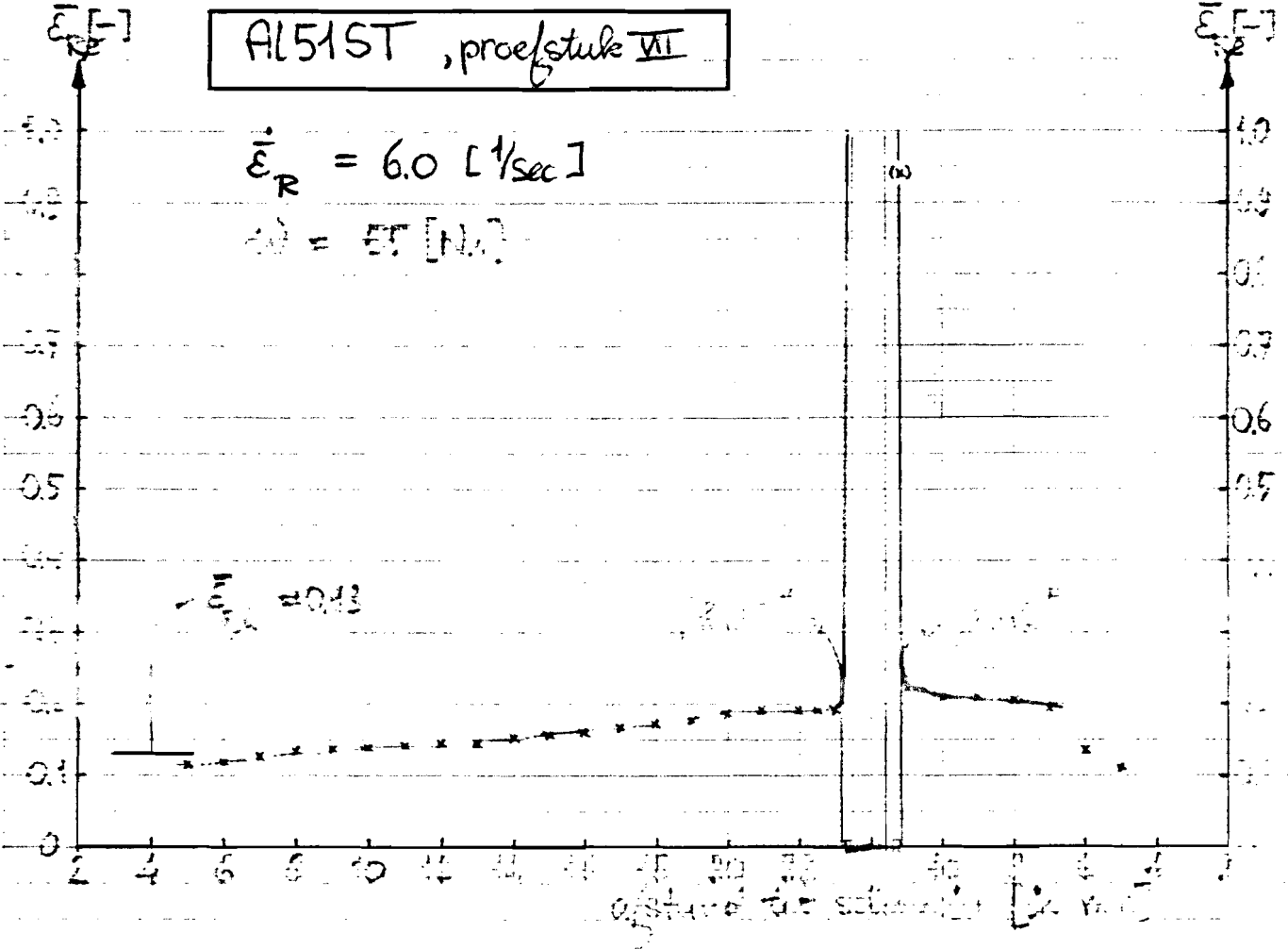


AL51ST , proefstuk VI

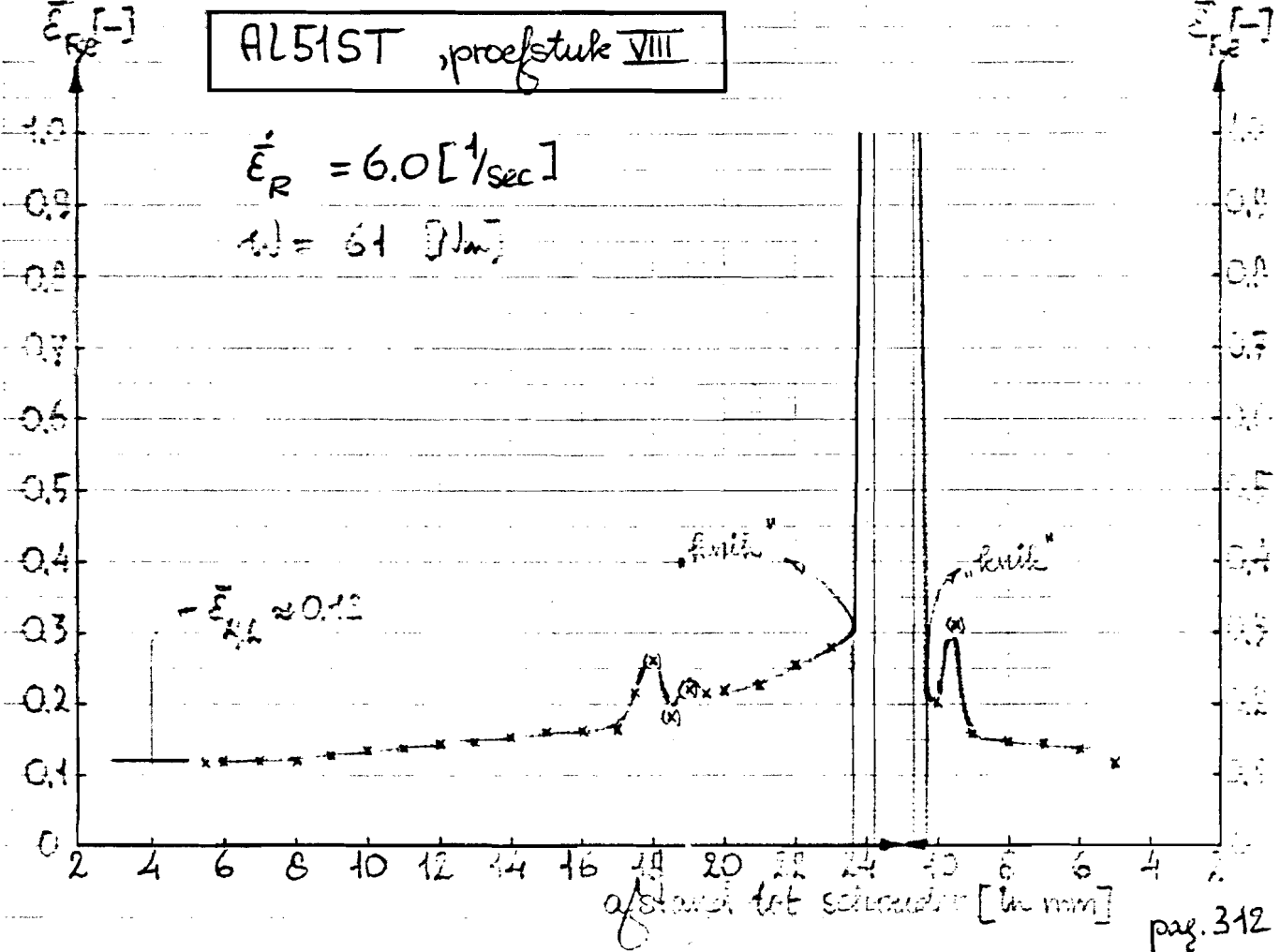
$\dot{\epsilon}_R = 9.0 [1/sec]$
 $\omega = 64 [1/min]$



AL51ST , proefstuk VII

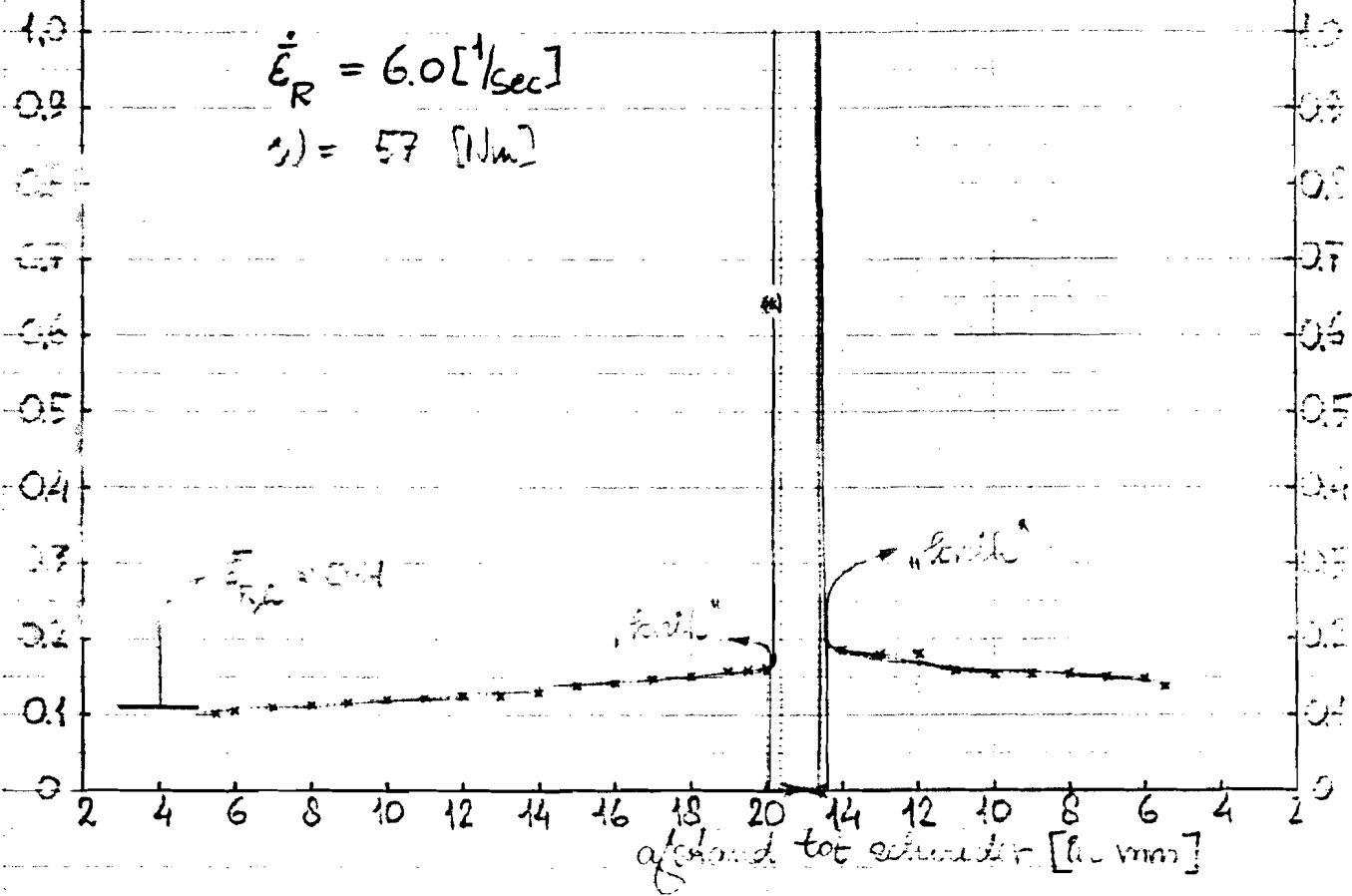


AL51ST , proefstuk VIII



AL51 ST , proefstuk IX

$\dot{\epsilon}_R = 6.0 [1/sec]$
 $\sigma = 57 [Nm]$



Snelle torsieproeven - rekeverloop

a.s. = afstand tot schouder

$$\dot{\epsilon}_R = 13.7 \text{ [1/sec]}$$

proefstuk I

proefstuk II

proefstuk III

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
6.00	15.12	0.156
7.00	15.73	0.163
8.00	17.03	0.179
9.00	17.03	0.179
10.00	17.35	0.180
11.00	17.35	0.180
12.00	17.35	0.180
13.00	17.67	0.180
14.00	17.83	0.190
15.00	19.05	0.199
16.00	19.63	0.206
17.00	19.88	0.209
18.00	20.60	0.215
19.00	21.70	0.230
20.00	22.63	0.241
21.00	23.15	0.247
22.00	23.42	0.250
23.00	24.45	0.263
24.00	25.37	0.274
25.00	26.68	0.290
26.00	28.68	0.316
27.00	30.23	0.336
28.00	33.42	0.381
28.50	36.05	0.420
29.00	39.27	0.472
29.25	41.28	0.507
29.50	43.45	0.547
29.65	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
6.00	15.22	0.157
7.00	20.07	0.211
8.00	20.68	0.218
9.00	20.92	0.221
10.00	21.58	0.228
11.00	21.73	0.230
12.00	22.03	0.234
13.00	22.03	0.234
14.00	22.03	0.234
15.00	22.03	0.234
16.00	22.48	0.239
17.00	22.82	0.243
18.00	22.92	0.244
19.00	24.05	0.258
20.00	24.05	0.258
21.00	24.05	0.258
22.00	25.03	0.270
23.00	25.80	0.279
24.00	26.63	0.289
25.00	27.72	0.303
26.00	29.05	0.321
27.00	31.27	0.351
27.50	33.30	0.379
28.00	36.32	0.424
28.20	38.08	0.452
28.40	40.25	0.489
28.60	42.50	0.529
28.80	44.27	0.563
29.00	=46.00	=0.60
29.10	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.00	7.40	0.075
6.00	17.08	0.177
7.00	17.55	0.183
8.00	17.78	0.185
9.00	18.38	0.192
10.00	18.95	0.198
11.00	19.40	0.203
12.00	19.73	0.207
13.00	20.32	0.214
14.00	20.95	0.221
15.00	21.68	0.230
16.00	22.20	0.236
17.00	23.08	0.246
18.00	24.02	0.257
19.00	24.62	0.265
20.00	25.38	0.274
21.00	26.28	0.285
22.00	27.10	0.295
23.00	28.12	0.309
24.00	29.83	0.331
25.00	31.40	0.352
26.00	33.60	0.384
27.00	33.98	0.389
28.00	36.50	0.427
28.50	39.82	0.481
29.00	43.73	0.533
29.50	45.08	0.579
29.80	45.73	0.592
30.00	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
4.50	33.35	0.380
4.75	35.75	0.416
5.00	39.97	0.484
5.25	46.03	0.598
5.45	49.62	0.679
breuk		

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.00	32.70	0.371
5.20	34.47	0.396
5.40	36.87	0.433
5.60	39.13	0.470
5.80	41.37	0.508
6.00	=45.25	=0.58
6.20	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
4.50	19.65	0.206
4.80	32.97	0.375
5.00	=42.23	=0.52
5.20	=48.13	=0.64
5.25	breuk	

Snelle torsieproeven - rekverloop

$$\dot{\epsilon}_T = 6.0 \left[\frac{1}{\text{sec}} \right]$$

a.s. = afstand tot schouder

proefstuk I			proefstuk II		
a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]	a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.00	22.87	0.24	6.00	13.93	0.143
6.00	37.92	0.450	7.00	14.88	0.153
7.00	39.13	0.470	8.00	15.37	0.159
8.00	40.22	0.488	9.00	15.37	0.159
9.00	40.22	0.488	10.00	15.70	0.162
10.00	40.30	0.490	11.00	16.03	0.166
11.00	40.80	0.500	12.00	17.07	0.177
11.50	42.87	0.488	13.00	17.37	0.181
11.80	breekingsproef		14.00	17.85	0.186
12.00	35.68	0.415	15.00	18.40	0.192
12.50	35.28	0.408	16.00	19.02	0.199
13.00	35.28	0.408	17.00	19.85	0.208
14.00	35.28	0.408	18.00	20.98	0.221
15.00	35.28	0.408	19.00	21.67	0.229
16.00	35.28	0.408	20.00	22.43	0.238
17.00	35.75	0.416	21.00	23.12	0.246
18.00	36.08	0.421	22.00	24.82	0.267
19.00	36.32	0.424	23.00	25.90	0.280
20.00	36.95	0.434	24.00	27.35	0.299
21.00	36.95	0.434	25.00	28.43	0.313
22.00	37.55	0.444	26.00	30.08	0.334
23.00	38.67	0.462	26.50	31.27	0.351
24.00	39.43	0.475	27.00	34.12	0.391
25.00	40.35	0.490	27.50	37.05	0.436
25.50	41.02	0.502	27.80	40.35	0.490
26.00	41.42	0.509	28.00	41.52	0.511
26.50	42.55	0.530	28.20	45.77	0.59
27.00	43.52	0.548	28.40	breuk	
27.50	45.52	0.588			
27.80	45.52	0.59			
28.00	breuk				

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]	a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.00	40.80	0.498	5.35	bewerkingsproef	
5.50	42.63	0.531	5.50	22.02	0.233
6.00	44.42	0.566	5.80	29.87	0.332
6.50	44.73	0.572	6.00	33.32	0.380
7.00	45.47	0.587	6.20	37.17	0.438
7.20	45.78	0.593	6.40	41.52	0.511
7.40	breuk		6.60	43.83	0.554
			6.80	breuk	

Snelle torsieproeven - rekverloop

a.s. = afstand tot schouder

$$\dot{\bar{\epsilon}}_R = 17.7 [1/\text{sec}]$$

proefstuk I

proefstuk II

proefstuk III

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
4.50	20.35	0.214
5.00	28.20	0.310
6.00	38.53	0.460
7.00	41.53	0.511
8.00	42.85	0.537
9.00	42.98	0.538
10.00	42.88	0.538
11.00	43.12	0.541
12.00	44.25	0.562
13.00	44.50	0.567
14.00	44.78	0.573
15.00	44.78	0.573
16.00	44.67	0.571
17.00	45.45	0.586
18.00	46.35	0.605
19.00	46.80	0.615
20.00	47.17	0.623
21.00	47.90	0.639
22.00	48.62	0.655
23.00	49.58	0.678
24.00	50.75	0.707
24.50	52.28	0.746
25.00	55.30	0.834
25.50	56.37	0.868
25.80	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.00	38.32	0.456
6.00	39.60	0.478
7.00	40.38	0.491
8.00	40.38	0.491
9.00	40.98	0.502
10.00	41.07	0.503
11.00	41.07	0.503
12.00	41.40	0.509
13.00	42.12	0.522
14.00	42.18	0.523
15.00	42.70	0.533
16.00	42.70	0.533
17.00	42.70	0.533
18.00	42.70	0.533
19.00	42.70	0.533
20.00	42.70	0.533
21.00	43.35	0.545
22.00	44.70	0.573
23.00	45.93	0.596
24.00	46.95	0.618
25.00	49.32	0.672
26.00	53.67	0.785
27.00	55.47	0.839
28.00	55.47	0.839
28.20	55.47	0.839
28.40	55.47	0.839
28.60	55.47	0.839
28.80	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
6.00	37.55	0.444
7.00	37.55	0.444
8.00	38.22	0.455
9.00	38.22	0.455
10.00	38.93	0.466
11.00	40.02	0.485
12.00	41.05	0.503
13.00	41.74	0.515
14.00	42.87	0.536
15.00	43.75	0.553
16.00	44.47	0.567
17.00	44.93	0.576
18.00	45.33	0.584
19.00	45.33	0.584
20.00	45.52	0.588
21.00	46.02	0.598
22.00	46.53	0.609
23.00	46.53	0.609
24.00	46.72	0.613
25.00	48.68	0.657
25.50	49.18	0.668
26.00	52.40	0.750
26.50	55.15	0.829
27.00	57.15	0.894
27.60	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
4.50	40.35	0.490
5.00	47.00	0.619
6.00	52.02	0.740
7.00	52.02	0.740
8.00	53.88	0.791
8.50	54.33	0.804
9.00	56.12	0.928
9.20	59.35	0.974
9.40	59.77	0.991
9.55	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.00	46.62	0.611
5.50	49.82	0.684
6.00	55.32	0.834
6.50	55.32	0.834
6.60	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.00	43.57	0.549
5.50	47.98	0.641
6.00	51.23	0.719
6.50	53.22	0.772
7.00	54.65	0.814
7.20	53.47	0.779
7.50	breuk	

Ti-zuiver

Snelle torsieproeven - rekverloop

$$\dot{\epsilon}_K = 9.0 [1/sec]$$

a.s. = afstand tot schouder

proefstuk IV			proefstuk V		
a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]	a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
6.00	38.52	0.460	6.00	39.28	0.472
7.00	38.52	0.460	7.00	40.05	0.485
8.00	39.98	0.484	8.00	41.43	0.510
9.00	40.15	0.487	9.00	41.43	0.510
10.00	40.15	0.487	10.00	41.43	0.510
11.00	40.53	0.494	11.00	41.43	0.510
12.00	41.07	0.502	12.00	41.43	0.510
13.00	42.07	0.522	13.00	41.43	0.510
14.00	42.07	0.522	14.00	41.43	0.510
15.00	43.03	0.539	15.00	41.43	0.510
16.00	43.37	0.545	16.00	41.43	0.510
17.00	43.87	0.555	17.00	42.37	0.527
18.00	44.43	0.566	18.00	43.10	0.540
19.00	44.73	0.572	19.00	43.10	0.540
20.00	45.98	0.597	20.00	43.10	0.540
21.00	45.98	0.597	21.00	44.02	0.558
22.00	46.83	0.615	22.00	45.22	0.582
23.00	48.10	0.643	23.00	45.78	0.593
24.00	48.50	0.653	24.00	46.82	0.615
25.00	49.65	0.680	25.00	48.98	0.664
25.50	50.12	0.691	26.00	49.80	0.683
26.00	51.25	0.719	27.00	51.40	0.723
26.50	51.72	0.732	27.50	52.03	0.740
27.00	52.72	0.758	28.00	52.35	0.748
27.50	54.00	0.795	28.50	54.32	0.804
28.00	≈ 54.00	≈ 0.80	28.85	breuk	
28.10	breuk				

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]	a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.00	46.40	0.606	5.00	46.40	0.606
5.50	43.18	0.542	5.50	48.33	0.649
6.00	47.93	0.640	6.00	51.90	0.736
6.50	50.57	0.702	6.20	53.70	0.786
7.00	53.57	0.782	6.40	55.17	0.830
7.20	53.57	0.782	6.60	≈ 55.60	≈ 0.84
7.35	breuk		6.80	breuk	

Snelle torsieproeven - nekoverloop

a.s. = afstand tot schouder

$$\dot{\epsilon}_R = 17.7 [1/s_{acc}]$$

proefstuk I

proefstuk II

proefstuk III

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
4.50	11.03	0.113
6.00	11.67	0.119
8.00	11.80	0.121
10.00	12.35	0.126
12.00	12.88	0.132
14.00	12.85	0.132
16.00	12.83	0.131
17.00	13.07	0.140
18.00	14.10	0.167
///	onduidelijk	
20.35	≈ 40.65	≈ 0.50
21.25	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.00	14.38	0.148
6.00	19.03	0.199
7.00	18.00	0.188
8.00	16.53	0.171
9.00	16.35	0.169
10.00	16.10	0.167
11.00	15.05	0.155
12.00	15.05	0.155
13.00	16.15	0.167
14.00	16.15	0.167
15.00	16.15	0.167
16.00	15.92	0.165
17.00	15.92	0.165
18.00	15.88	0.164
19.00	14.98	0.155
20.00	15.10	0.156
21.00	17.88	0.186
21.20	21.42	0.226
21.40	24.90	0.268
21.60	27.28	0.298
21.80	28.60	0.315
22.00	28.60	0.315
22.20	≈ 36.47	≈ 0.43
22.60	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
4.50	13.10	0.134
5.00	22.22	0.236
6.00	14.32	0.147
7.00	12.73	0.130
8.00	13.23	0.136
9.00	12.38	0.127
10.00	11.78	0.120
11.00	12.90	0.133
12.00	13.18	0.135
13.00	13.92	0.143
14.00	14.12	0.145
15.00	15.20	0.157
16.00	17.07	0.177
17.00	16.92	0.176
18.00	17.47	0.182
19.00	19.27	0.202
19.20	≈ 42.7	≈ 0.53
19.40	≈ 64.3	≈ 1.20
19.60	≈ 71.4	≈ 1.71
19.70	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
4.50	12.27	0.126
6.00	16.05	0.166
8.00	14.98	0.154
10.00	15.35	0.158
11.00	15.45	0.160
12.00	16.15	0.167
12.50	15.17	0.157
13.00	29.80	0.331
13.20	42.57	0.530
13.40	53.47	0.779
13.60	≈ 66.70	≈ 1.34
13.70	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.00	10.75	0.110
6.00	11.08	0.113
7.00	11.33	0.116
8.00	11.33	0.116
9.00	11.55	0.118
10.00	11.80	0.121
11.00	11.93	0.122
11.20	14.82	0.153
11.40	20.63	0.217
11.60	26.93	0.293
11.80	34.45	0.396
12.00	44.90	0.575
12.50	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.00	≈ 10.9	≈ 0.11
6.00	11.70	0.120
7.00	11.97	0.122
8.00	12.50	0.128
9.00	12.70	0.130
10.00	13.77	0.141
11.00	13.98	0.144
12.00	15.43	0.159
13.00	15.53	0.160
14.00	18.50	0.193
14.50	18.82	0.197
15.00	21.48	0.227
15.30	breuk	

Snelle torsieproeven - rekeverloop

a.s. = afstand tot schouder

$$\dot{\epsilon}_R = 2.0 [1/sec]$$

proefstuk IV

proefstuk V

proefstuk VI

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.00	12.63	0.129
6.00	13.08	0.134
7.00	14.17	0.146
8.00	14.17	0.146
9.00	14.17	0.146
10.00	14.17	0.146
11.00	14.47	0.149
12.00	14.47	0.149
13.00	14.47	0.149
14.00	14.55	0.150
15.00	14.55	0.150
16.00	14.08	0.145
17.00	14.08	0.145
18.00	14.33	0.147
19.00	16.03	0.166
20.00	16.00	0.166
21.00	16.50	0.171
21.50	knik	
21.50	20.33	0.214
22.00	24.25	0.260
23.00	24.67	0.265
24.00	23.17	0.247
25.00	23.42	0.250
26.00	23.85	0.255
27.00	24.83	0.267
27.20	27.37	0.299
27.40	≈ 30.22	≈ 0.34
27.60	≈ 35.47	≈ 0.41
27.80	≈ 61.83	≈ 1.08
28.00	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.00	10.67	0.109
6.00	11.35	0.116
7.00	11.67	0.119
8.00	12.57	0.129
9.00	13.28	0.136
10.00	13.88	0.143
11.00	14.22	0.146
12.00	14.37	0.148
13.00	15.17	0.157
14.00	16.32	0.169
15.00	17.05	0.177
16.00	18.13	0.189
17.00	18.13	0.189
18.00	18.13	0.189
19.00	18.13	0.189
19.40	19.75	0.207
19.60	knik	
19.80	≈ 70.77	≈ 1.66
20.00	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.00	11.13	0.114
6.00	12.00	0.123
7.00	12.87	0.132
8.00	13.77	0.141
9.00	13.77	0.141
10.00	14.33	0.147
11.00	16.22	0.168
12.00	16.52	0.171
13.00	16.52	0.171
14.00	17.42	0.181
15.00	17.92	0.187
16.00	18.05	0.188
17.00	18.18	0.190
18.00	20.50	0.216
18.50	20.88	0.220
18.95	knik	
19.00	≈ 64.33	≈ 1.20
19.20	≈ 65.82	≈ 1.29
19.30	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.00	10.27	0.105
6.00	11.97	0.122
7.00	14.15	0.146
8.00	14.82	0.153
9.00	14.82	0.153
10.00	14.82	0.153
11.00	15.62	0.161
12.00	18.05	0.188
13.00	18.68	0.195
14.00	18.68	0.195
14.20	26.42	0.287
14.40	≈ 41.70	≈ 0.51
14.60	≈ 71.63	≈ 1.74
14.75	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.00	12.45	0.127
6.00	14.20	0.146
7.00	15.10	0.156
8.00	15.68	0.162
9.00	16.23	0.168
10.00	17.88	0.186
11.00	18.88	0.197
12.00	19.08	0.200
13.00	19.57	0.205
14.00	19.57	0.205
15.00	20.02	0.210
15.30	knik	
15.40	≈ 65.37	≈ 1.26
15.50	≈ 74.63	≈ 2.10
15.70	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.00	17.60	0.183
5.50	18.32	0.191
6.00	18.63	0.195
6.20	26.75	0.291
6.40	knik	
6.50	≈ 69.35	≈ 1.53
6.60	≈ 70.15	≈ 1.60
6.80	≈ 71.33	≈ 1.71
6.90	breuk	

Snelle torsieproeven - rekeverloop

a.s. = afstand tot schouder

$$\dot{\bar{\epsilon}}_R = 6.0 [1/sec]$$

proefstuk VI

a.s. [mm]	χ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.00	11.28	0.115
6.00	11.67	0.119
7.00	12.48	0.128
8.00	12.95	0.133
9.00	13.32	0.137
10.00	13.52	0.139
11.00	13.62	0.141
12.00	13.90	0.144
13.00	13.95	0.144
14.00	14.88	0.153
15.00	15.43	0.159
16.00	15.53	0.160
17.00	16.02	0.166
18.00	16.62	0.172
19.00	17.13	0.178
20.00	17.72	0.184
21.00	18.42	0.192
22.00	18.42	0.192
22.50	18.42	0.192
23.00	18.42	0.192
23.20	breuk	
23.40	≈ 70.32	≈ 1.61
23.50	breuk	

proefstuk VII

a.s. [mm]	χ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.50	11.42	0.117
6.00	11.60	0.119
7.00	11.75	0.120
8.00	11.75	0.120
9.00	12.45	0.127
10.00	12.98	0.133
11.00	13.40	0.138
12.00	13.90	0.143
13.00	14.22	0.146
14.00	14.77	0.152
15.00	15.45	0.160
16.00	15.57	0.161
17.00	15.77	0.163
17.50	20.38	0.214
18.00	≈ 24.02	≈ 0.26
18.50	≈ 17.18	≈ 0.18
19.00	≈ 20.80	≈ 0.22
19.50	20.37	0.214
20.00	20.72	0.218
21.00	21.08	0.223
22.00	23.65	0.253
23.00	25.77	0.279
23.60	breuk	
23.80	≈ 62.23	≈ 1.10
24.00	≈ 65.68	≈ 1.28
24.20	breuk	

proefstuk IX

a.s. [mm]	χ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.50	10.03	0.102
6.00	10.28	0.105
7.00	10.72	0.109
8.00	10.97	0.112
9.00	11.22	0.115
10.00	11.60	0.119
11.00	11.83	0.121
12.00	12.12	0.124
13.00	12.12	0.124
14.00	12.70	0.130
15.00	13.42	0.138
16.00	13.72	0.141
17.00	14.17	0.146
18.00	14.57	0.150
19.00	15.10	0.156
19.50	15.23	0.157
20.00	15.23	0.157
20.05	breuk	
20.10	≈ 48.08	≈ 0.64
20.20	≈ 48.08	≈ 0.64
20.35	breuk	

a.s. [mm]	χ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.00	10.93	0.111
6.00	13.17	0.135
7.00	12.57	0.134
8.00	19.55	0.205
9.00	20.03	0.210
10.00	20.03	0.210
10.50	20.97	0.221
11.00	20.97	0.221
11.15	breuk	
11.20	≈ 58.38	≈ 0.94
11.40	≈ 69.42	≈ 1.54
11.60	breuk	

a.s. [mm]	χ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.00	11.30	0.115
6.00	13.00	0.133
7.00	13.90	0.143
8.00	14.25	0.147
9.00	15.33	0.158
9.50	≈ 28.38	≈ 0.31
10.00	19.22	0.201
10.30	breuk	
10.40	≈ 65.20	≈ 1.25
10.60	≈ 70.53	≈ 1.63
10.70	breuk	

a.s. [mm]	χ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
5.50	13.47	0.138
6.00	14.43	0.149
7.00	14.60	0.150
8.00	14.87	0.153
9.00	14.87	0.153
10.00	14.87	0.153
11.00	15.30	0.158
12.00	17.35	0.180
13.00	17.35	0.180
14.00	17.88	0.186
14.40	breuk	
14.50	≈ 65.37	≈ 1.26
14.65	breuk	

Bijlage 4.

* Gewone torsieproeven - rekverloop.

Onderwerp van deze bijlage:

Het verloop van $\bar{\epsilon}_R$ als functie van de axiale coördinaat, van de proefstukken die bij "lage" deformatiesnelheid beproefd zijn.

De proeven werden uitgevoerd bij een hoersnelheid van $0.48 \text{ [} \frac{\text{cm}}{\text{min}} \text{]}$. Uit vergelijking 15 van de analyse (bijlage 1) volgt de hierbij behorende effectieve reksnelheid in de buigste proefstaafvezel:

$$\dot{\bar{\epsilon}}_R = \frac{\pi}{30\sqrt{3}} \cdot \frac{6.99}{2 \cdot 59.25} \cdot 0.48 \approx 0.002 \text{ [} \frac{1}{\text{sec}} \text{]}$$

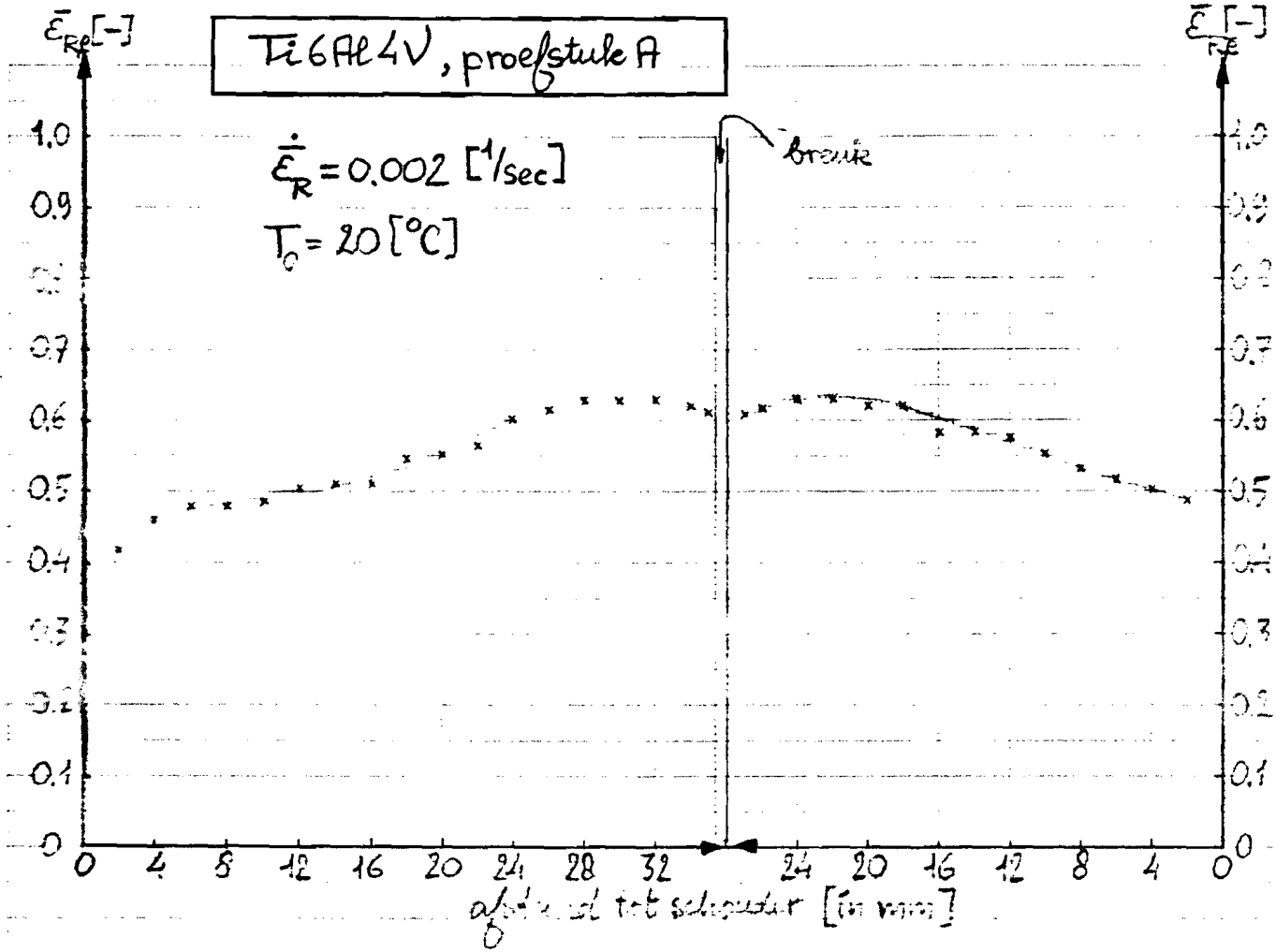
(bij homogeen deformatie)

Op de volgende bladzijden worden de opgemeten rekverlopen in grafieken weergegeven.

De proefstaven A zijn beproefd bij kamertemperatuur, ($20 \text{ [}^\circ\text{C} \text{]}$), de proefstaven B bij verhoogde temperatuur. Deze proefstaven B werden verwarmd in een cilindervormig ovenje dat tussen de twee inspanklemmen van de torsiebank geplaatst was. Het was echter niet mogelijk om de proefstaven (in axiale richting gezien) precies in het midden van de oven te plaatsen waardoor de proefstaaftemperatuur waarschijnlijk niet overal gelijk was. De mogelijke "koelere" zijde is in de grafieken met een haak (┌) aangegeven. Hiermee worden de lagere rekwaarden aan deze zijden bij Ti 6Al 4V en Ti-zuiver verklaarbaar.

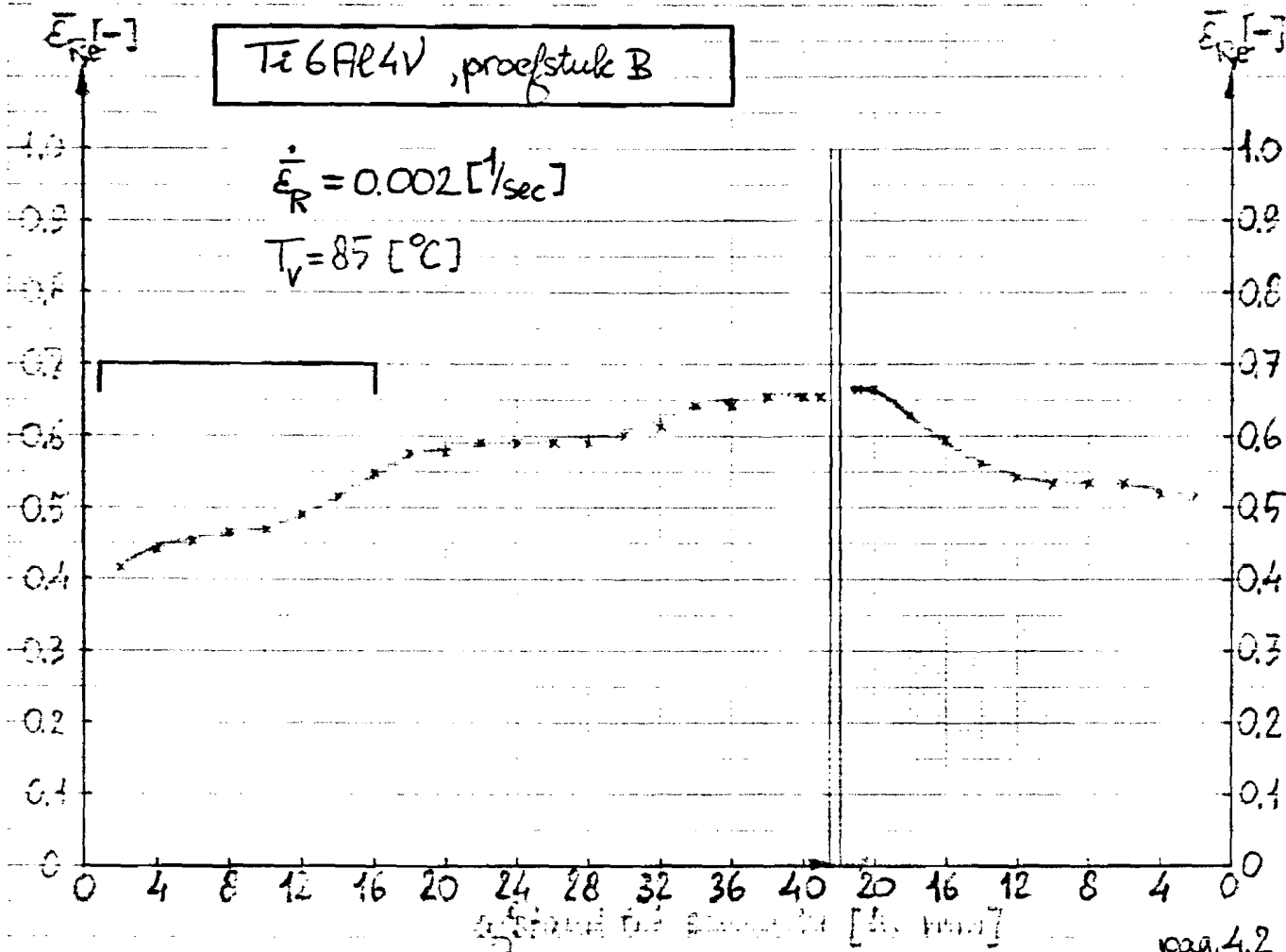
Ti 6Al4V, proefstuk A

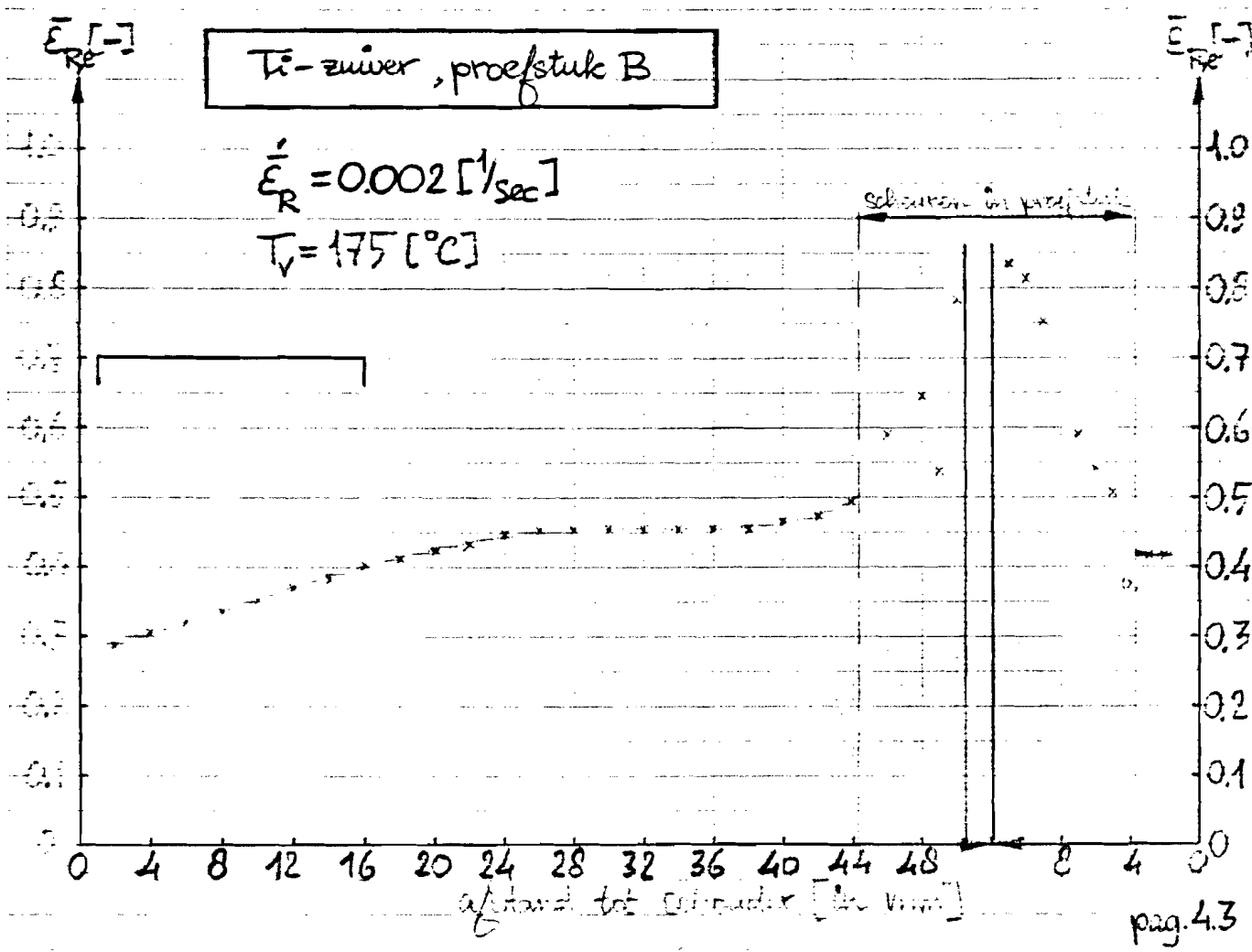
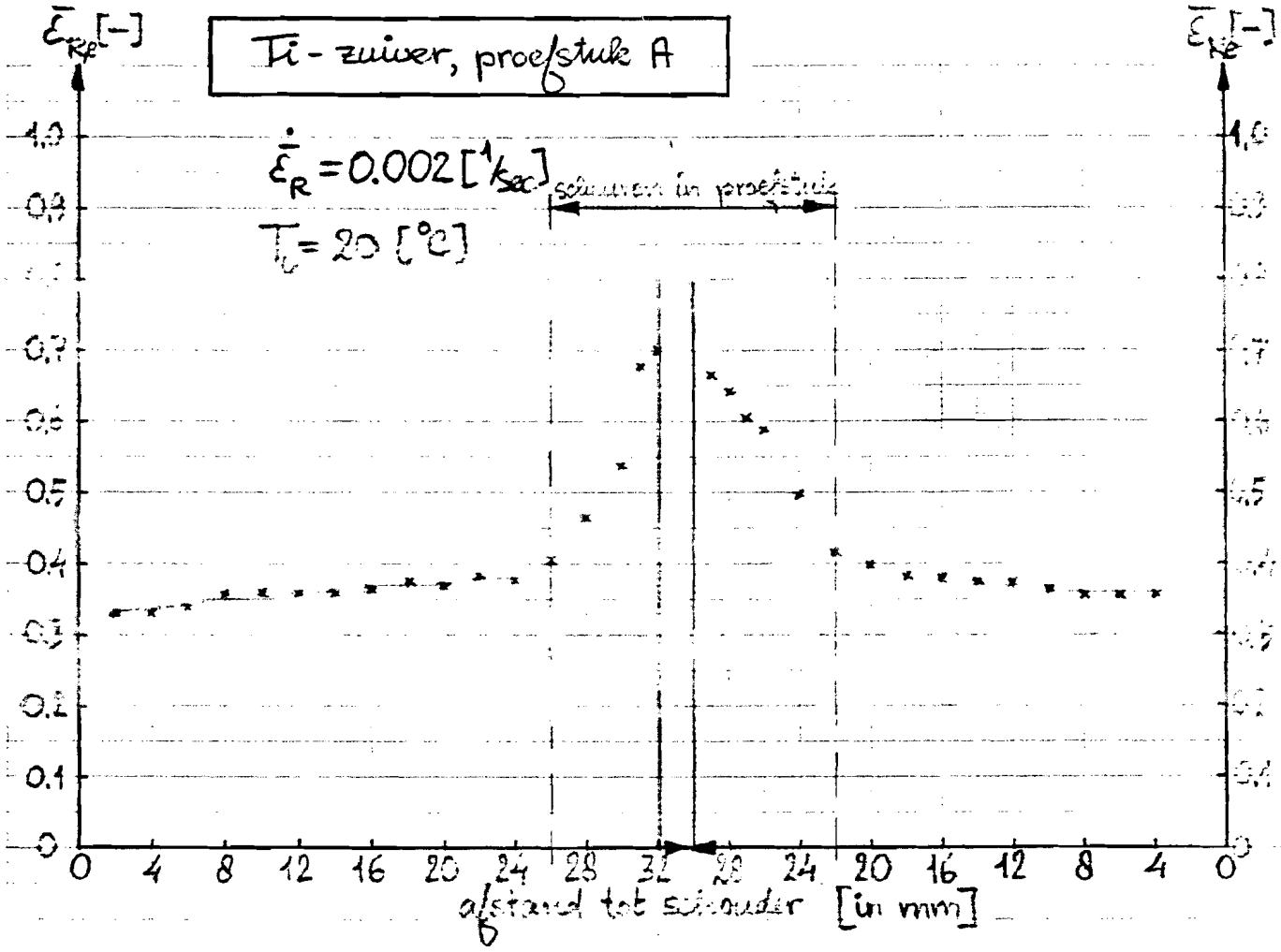
$\dot{\epsilon}_R = 0.002 \text{ [1/sec]}$
 $T_0 = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$

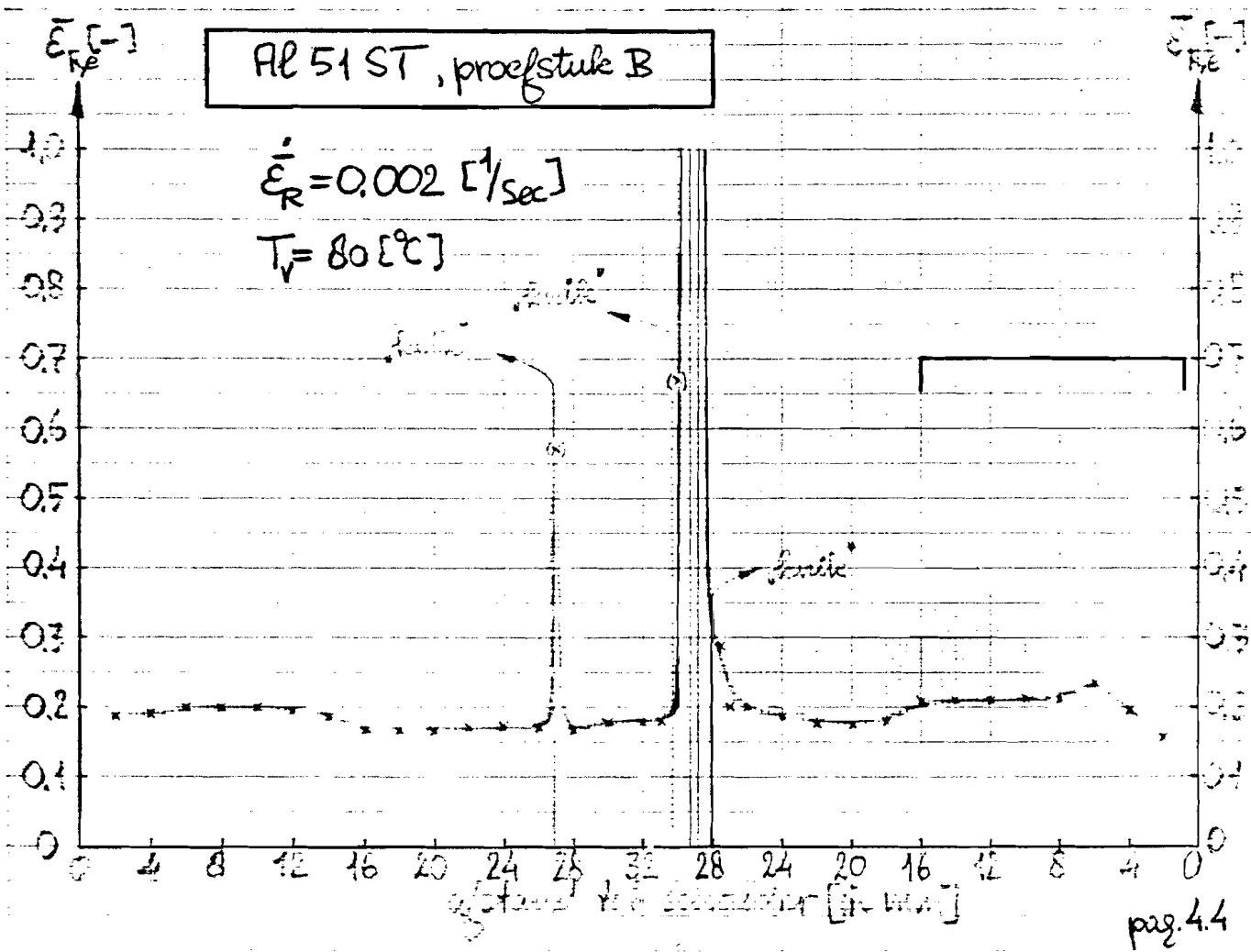
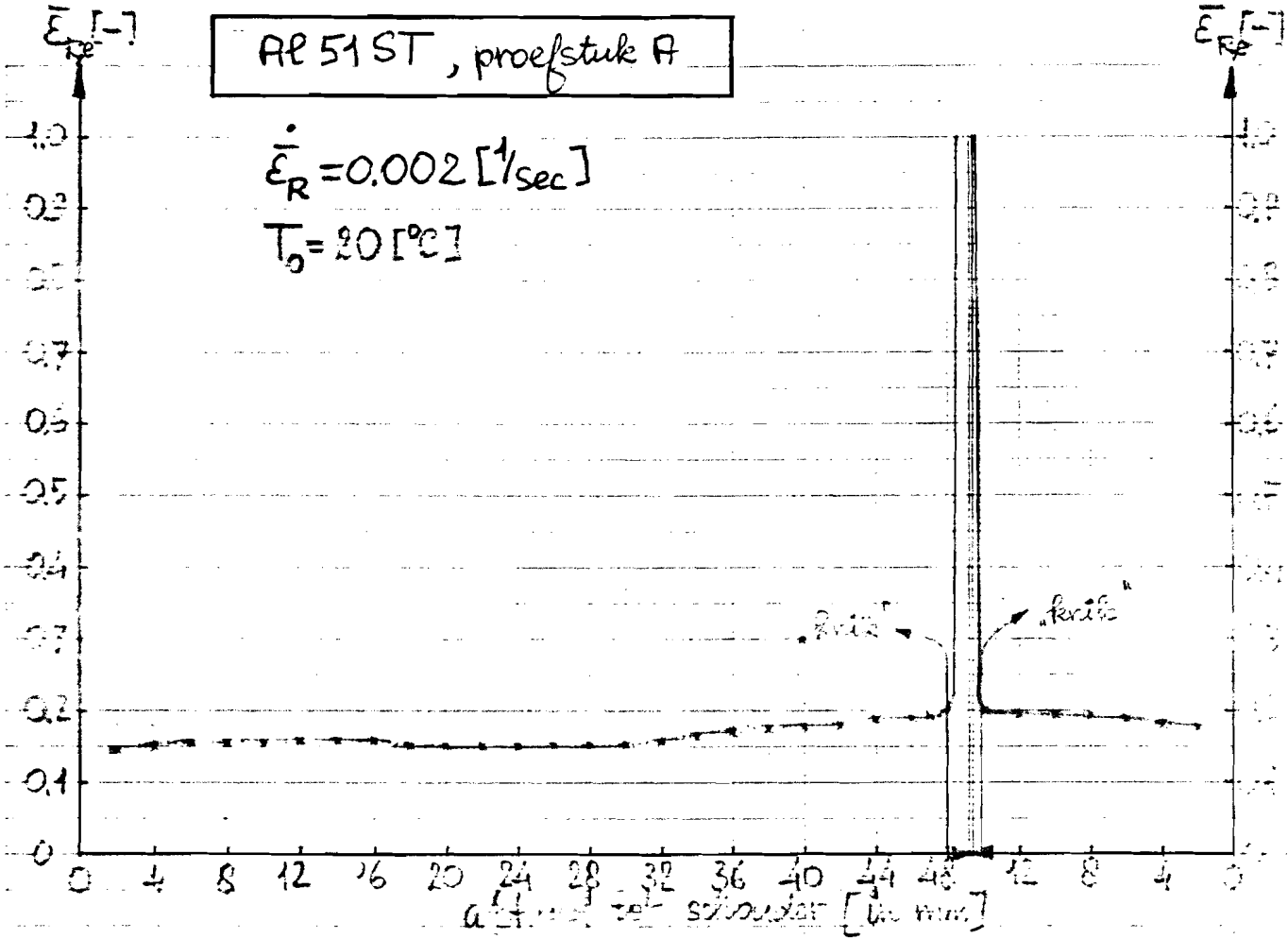


Ti 6Al4V, proefstuk B

$\dot{\epsilon}_R = 0.002 \text{ [1/sec]}$
 $T_V = 85 \text{ [}^\circ\text{C]}$







Gewone torsieproeven - rekverloop

a.s. = afstand tot schouder

$$\dot{\epsilon}_k = 0.002 \text{ [1/sec]}$$

proefstuk A ($T = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$)proefstuk B ($T = 35 \text{ [}^\circ\text{C]}$)

a.s. [mm]	γ_{Re} [$^\circ$]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
2.00	35.85	0.417
4.00	38.57	0.460
6.00	39.68	0.479
8.00	39.68	0.479
10.00	40.15	0.487
12.00	41.08	0.503
14.00	41.47	0.510
16.00	41.47	0.510
18.00	42.37	0.545
20.00	43.70	0.572
22.00	44.42	0.566
24.00	46.18	0.602
26.00	46.77	0.614
28.00	47.47	0.629
30.00	47.47	0.629
32.00	47.45	0.629
34.00	47.07	0.621
35.00	46.63	0.611
35.40	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [$^\circ$]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
2.00	35.72	0.415
4.00	37.28	0.440
6.00	38.05	0.452
8.00	38.95	0.467
10.00	39.07	0.469
12.00	40.37	0.491
14.00	41.70	0.514
16.00	42.50	0.548
18.00	44.93	0.576
20.00	44.93	0.576
22.00	45.63	0.590
24.00	45.63	0.590
26.00	45.63	0.590
28.00	45.63	0.590
30.00	46.10	0.600
32.00	46.70	0.613
34.00	48.00	0.641
36.00	48.00	0.641
38.00	48.53	0.653
40.00	48.53	0.653
41.00	48.53	0.653
41.50	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [$^\circ$]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
2.00	40.22	0.488
4.00	41.08	0.503
6.00	41.78	0.516
8.00	42.63	0.531
10.00	43.72	0.552
12.00	44.90	0.575
14.00	45.25	0.582
16.00	45.25	0.582
18.00	47.10	0.621
20.00	47.10	0.621
22.00	47.55	0.631
24.00	47.55	0.631
26.00	46.90	0.617
27.00	46.52	0.609
27.90	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [$^\circ$]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
2.00	41.88	0.518
4.00	41.88	0.518
6.00	42.67	0.532
8.00	42.67	0.532
10.00	42.67	0.532
12.00	43.13	0.541
14.00	44.17	0.561
16.00	45.82	0.594
18.00	47.43	0.629
20.00	48.98	0.664
21.00	48.98	0.664
21.90	breuk	

$$\varphi_{Le} = 674^\circ + 356^\circ = 1030^\circ$$

Gewone torsieproeven - rekverloop

a.s. = afstand tot schouder

$$\dot{\epsilon}_R = 0.002 [1/sec]$$

proefstuk A ($T_0 = 175 [^\circ]$)

proefstuk B ($T_0 = 175 [^\circ]$)

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
2.00	29.73	0.330
4.00	29.73	0.330
6.00	30.30	0.337
8.00	31.80	0.358
10.00	31.80	0.358
12.00	31.80	0.358
14.00	31.80	0.358
16.00	32.02	0.364
18.00	33.07	0.376
20.00	32.65	0.370
22.00	33.57	0.383
24.00	33.12	0.377
26.00	34.98	0.404
28.00	38.75	0.463
30.00	42.95	0.537
31.00	49.53	0.677
32.00	50.65	0.704
32.40	breuk	

scheuren in proefstuk voor a.s. > 26.0 [mm]

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
4.00	31.73	0.357
6.00	31.73	0.357
8.00	31.73	0.357
10.00	32.20	0.364
12.00	32.87	0.373
14.00	32.87	0.373
16.00	33.40	0.381
18.00	33.55	0.383
20.00	34.60	0.398
22.00	35.88	0.418
24.00	40.68	0.496
26.00	45.55	0.589
27.00	46.28	0.604
28.00	48.05	0.642
29.00	49.08	0.666
30.00	breuk	

scheuren in proefstuk voor a.s. > 22.0 [mm]

$$\varphi_{le} = 354^\circ + 346^\circ = 700^\circ$$

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
2.00	26.43	0.287
4.00	27.98	0.307
6.00	29.10	0.321
8.00	30.17	0.336
10.00	31.38	0.352
12.00	32.70	0.371
14.00	33.52	0.382
16.00	34.80	0.401
18.00	35.47	0.411
20.00	36.25	0.423
22.00	36.83	0.432
24.00	37.80	0.448
26.00	38.17	0.454
28.00	38.17	0.454
30.00	38.17	0.454
32.00	38.17	0.454
34.00	38.17	0.454
36.00	38.17	0.454
38.00	38.17	0.454
40.00	38.92	0.466
42.00	39.30	0.473
44.00	40.53	0.494
46.00	45.60	0.590
48.00	48.13	0.644
49.00	42.85	0.536
50.00	53.55	0.782
50.50	breuk	

scheuren in proefstuk voor a.s. > 44.3 [mm]

scheuren in proefstuk voor a.s. > 3.9 [mm]

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
2.00	35.80	0.416
3.00	35.80	0.416
4.00	33.03	0.38
5.00	41.25	0.506
6.00	43.12	0.541
7.00	45.68	0.591
9.00	52.50	0.752
10.00	54.58	0.842
11.00	55.32	0.834
11.90	breuk	

$$\varphi_{le} = 626^\circ + 179^\circ = 805^\circ$$

Gewone torsieproeven - rekverloop

a.s. = afstand tot schouder

$$\dot{\epsilon}_s = 0.002 [\%/s]$$

proefstuk A ($\alpha = 10^\circ$)

proefstuk B ($\alpha = 2.5^\circ$)

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
2.00	14.02	0.144
4.00	14.35	0.148
6.00	14.85	0.153
8.00	15.00	0.155
10.00	15.00	0.155
12.00	15.27	0.158
14.00	15.27	0.158
16.00	15.27	0.158
18.00	14.51	0.151
20.00	14.62	0.151
22.00	14.62	0.151
24.00	14.62	0.151
26.00	14.62	0.151
28.00	14.62	0.151
30.00	14.62	0.151
32.00	15.25	0.157
34.00	15.72	0.163
36.00	16.47	0.171
38.00	16.90	0.175
40.00	17.23	0.179
42.00	17.23	0.179
44.00	18.23	0.190
46.00	18.23	0.190
47.00	18.47	0.193
48.00	kenik	
48.50	≈ 67.63	≈ 1.40
49.00	≈ 67.63	≈ 1.40
49.20	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
2.00	17.87	0.186
4.00	18.27	0.191
6.00	19.08	0.200
8.00	19.08	0.200
10.00	19.08	0.200
12.00	18.63	0.195
14.00	17.80	0.185
16.00	16.05	0.166
18.00	16.05	0.166
20.00	16.05	0.166
22.00	16.43	0.170
24.00	16.43	0.170
26.00	16.43	0.170
26.90	kenik	
27.00	≈ 44.82	≈ 0.57
28.00	16.23	0.168
30.00	17.12	0.178
32.00	17.12	0.178
33.00	17.12	0.178
33.80	kenik	
34.00	≈ 49.18	≈ 0.67
34.75	≈ 68.15	≈ 1.44
	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
2.00	16.93	0.176
4.00	17.38	0.181
6.00	18.10	0.189
8.00	18.57	0.194
10.00	18.57	0.194
12.00	18.57	0.194
14.00	19.10	0.200
14.20	kenik	
14.50	≈ 69.83	≈ 1.57
14.75	breuk	

a.s. [mm]	γ_{Re} [°]	$\bar{\epsilon}_{Re}$ [-]
2.00	14.97	0.154
4.00	18.63	0.195
6.00	21.88	0.232
8.00	20.05	0.211
10.00	20.05	0.211
12.00	19.78	0.208
14.00	19.78	0.208
16.00	19.78	0.208
18.00	17.05	0.177
20.00	16.80	0.174
22.00	16.90	0.175
24.00	17.83	0.186
26.00	19.08	0.200
27.00	19.08	0.200
27.50	26.33	0.286
28.10	kenik	
28.25	≈ 65.40	≈ 1.26
28.50	≈ 67.30	≈ 1.38
28.80	breuk	

$$\varphi_{le} \approx 255^\circ + 95^\circ = 350^\circ$$

$$\varphi_{le} \approx 205^\circ + 175^\circ = 380^\circ$$

Bijlage 5.

* Het bepalen van de C en n waarden uit de (gewone) torsieproeven aan de hand van de opgenomen $M(\varphi_L)$ kurven.

Onder (oa.) de aanname van de spanning-rekver relatie $\bar{\sigma} = C \cdot \bar{\epsilon}^n$ is in bijlage 1 („Analyse van de torsie van een cilindrische staaf“) voor het torsiemoment de volgende relatie afgeleid:

$$M = \left[\frac{2\pi C}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R^{n+3}}{n+3} \cdot \frac{1}{(L\sqrt{3})^n} \right] \varphi_L^n \quad [\text{Nm}] \quad (18)$$

(φ_L in radialen)

Nemen we links en rechts van het gelijkteken de natuurlijke logaritme, dan staat er:

$$\ln M = \ln \left[\frac{2\pi C}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R^{n+3}}{n+3} \cdot \frac{1}{(L\sqrt{3})^n} \right] \varphi_L^n$$

oftewel:

$$\ln M = \ln \left[\frac{2\pi C}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R^{n+3}}{n+3} \cdot \frac{1}{(L\sqrt{3})^n} \right] + n \ln \varphi_L \quad (22)$$

De meetwaarden uit de torsieproef worden uitgezet in een $(\ln M, \ln \varphi_L)$ -grafiek en met behulp van een rekenmachine wordt dan de regressierechte bepaald met de vorm:

$$\ln M = A + B \cdot \ln \varphi_L \quad (23)$$

Vergelijking 23 is de experimentele versie van vergelijking 22.

De waarden van C en n kunnen nu worden bepaald volgens:

• $n = B$ [-] (24)

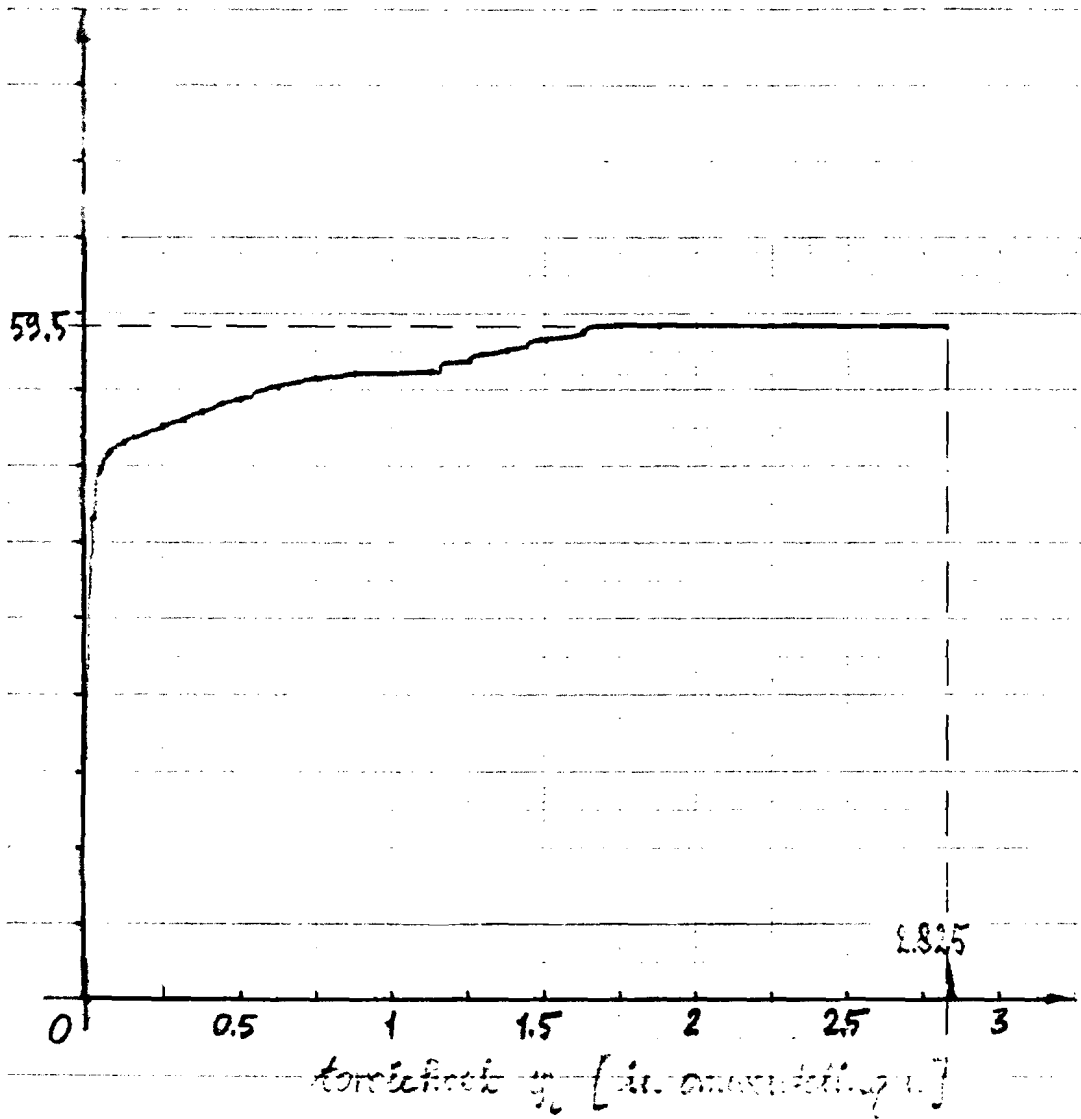
• $\ln \left[\frac{2\pi C}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R^{n+3}}{n+3} \cdot \frac{1}{(L\sqrt{3})^n} \right] = A$; $\frac{2\pi C}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R^{n+3}}{n+3} \cdot \frac{1}{(L\sqrt{3})^n} = e^A$

dus: $C = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \cdot \frac{n+3}{R^{n+3}} \cdot (L\sqrt{3})^n \cdot e^A$ (25)
[N/m²]

• Opgenomen $M(\varphi_2)$ - kromme

Ti 6Al4V, proefstuk A

Torsiemoment M
[in Nm]



$$T_0 = 20 [^{\circ}\text{C}]$$

$$\dot{\epsilon}_R \approx 0.002 [1/\text{sec}]$$

$$\text{maximale Torsiemoment } M_{\text{max}} = 59.5 [\text{Nm}]$$

* Meetwaarden, behorende bij de ingetekende punten.

	φ_2 [rad]	$\ln \varphi_2$	M [Nm]	$\ln M$		φ_2 [rad]	$\ln \varphi_2$	M [Nm]	$\ln M$
1	0.157	-1.851	42.4	3.746	14	6.283	1.838	55.3	4.013
2	0.314	-1.158	46.7	3.844	15	7.069	1.956	55.4	4.014
3	0.471	-0.752	48.1	3.873	16	7.854	2.061	56.3	4.030
4	0.755	-0.242	49.1	3.893	17	8.639	2.156	57.3	4.049
5	1.181	0.167	49.8	3.907	18	9.425	2.243	58.3	4.065
6	1.571	0.452	50.6	3.924	19	10.210	2.323	58.8	4.075
7	1.967	0.676	51.1	3.934	20	10.996	2.397	59.5	4.086
8	2.356	0.857	51.9	3.950	21	11.781	2.466	59.5	4.086
9	2.752	1.012	52.6	3.963	22	12.566	2.531	59.5	4.086
10	3.142	1.145	52.9	3.968	23	14.137	2.649	59.5	4.086
11	3.927	1.368	54.0	3.989	24	15.708	2.754	59.5	4.086
12	4.712	1.550	54.7	4.001	25	17.279	2.849	59.5	4.086
13	5.498	1.704	55.1	4.010	26	17.750	2.876	59.5	4.086

Regressierechte door de punten 2 t/m 25 :

$$\ln M_i = 3.90 + 0.0665 \cdot \ln \varphi_{2i}$$

korrelatiecoëfficiënt : $R_{reg} = 0.985$

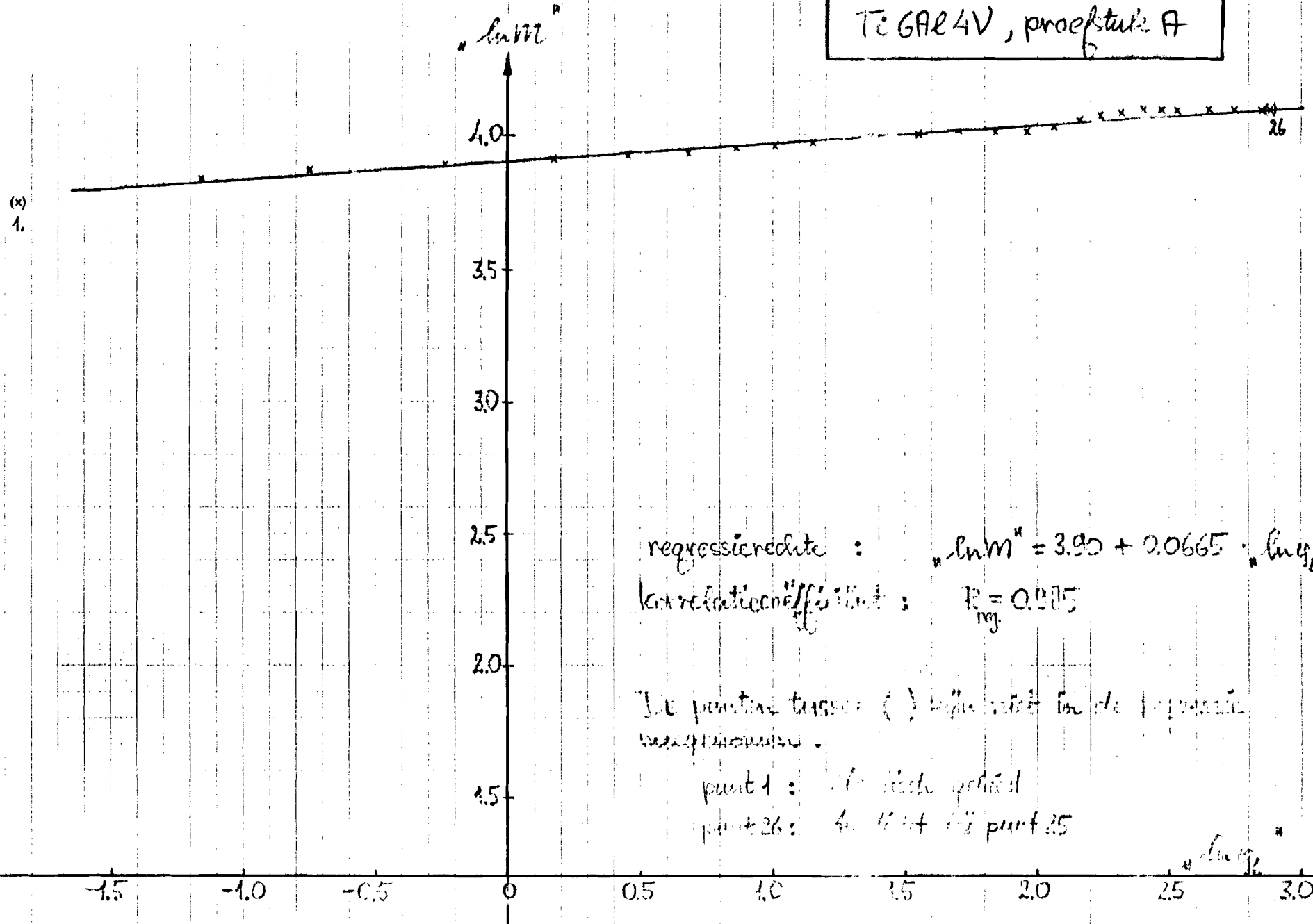
- versterkingsexponent : $n = 0.0665$ [-]
- karakteristieke deformatieweerstand :

$$C = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \frac{3.0665}{(3.495 \cdot 10^{-3})^{3.0665}} \cdot (59.25 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{3})^{0.0665} \cdot e^{3.90} = 1225 \cdot 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$$

dus :

$$C = 1225 \cdot 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]} \quad \text{en} \quad n = 0.067 \text{ [-]}$$

Ti 6A24V, proefstuk A



regressiecurve : $\ln M = 3.95 + 0.0665 \cdot \ln I_2$
 correlatiecoëfficiënt : $R_{reg} = 0.975$

De punten tussen () zijn niet in de regressie meegenomen.

punt 1 : als zich gelijkt
 punt 26 : 4.144 bij punt 25

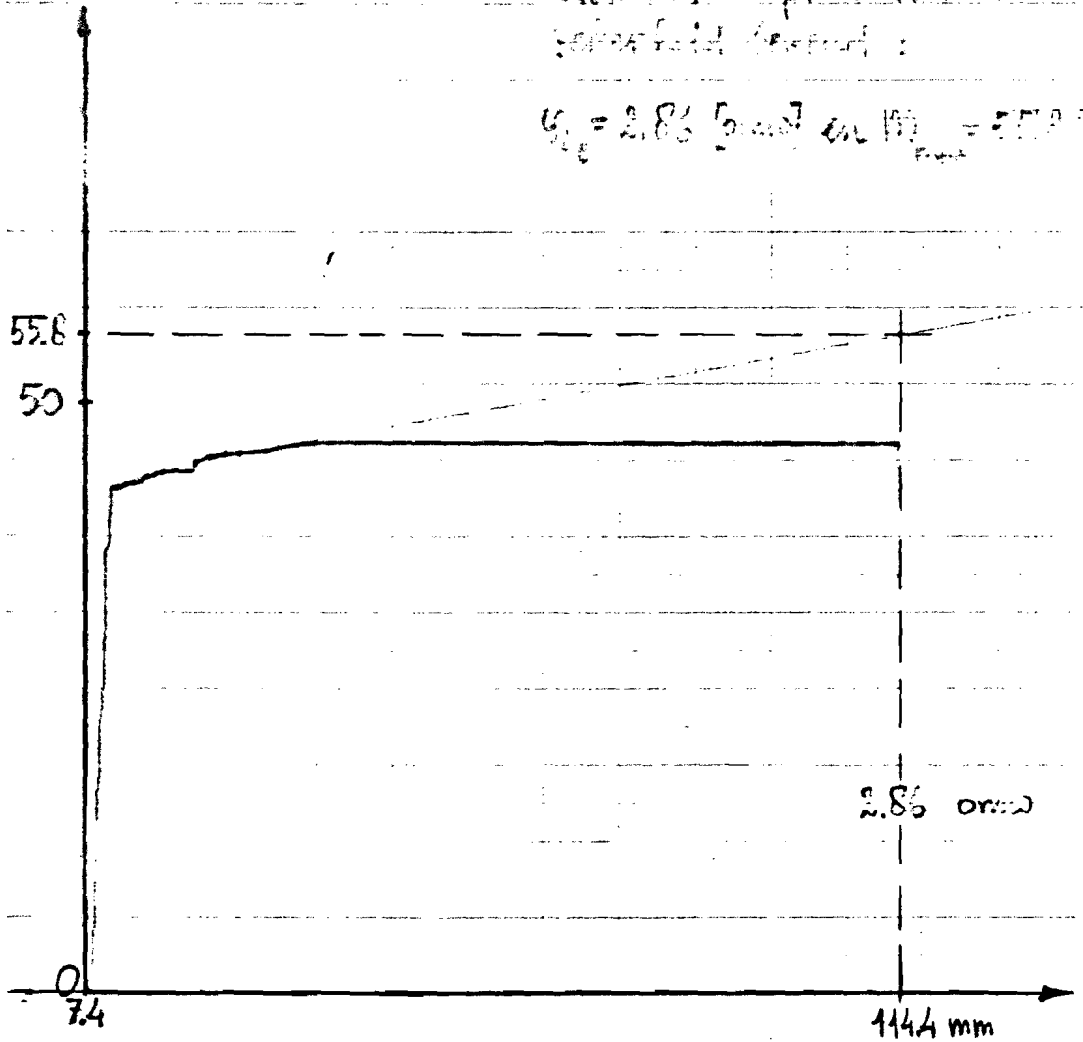
• Opgevoeren $M(\epsilon_2)$ keramiek

Ti6Al4V, proefstuk B

Verplaatsing in
[mm]

Schroef weigerde!
 etalite van punt is niet
 bereikt (overstap):

$\epsilon_2 = 2.86$ [mm] en $M_{punt} = 558$ [N]



$\epsilon_2 = 2.86$

$T_v = 85 [^{\circ}C]$
 $\dot{\epsilon}_R = 0.002 [1/sec]$

De schrijver die de $M(\varphi_z)$ kromme zou moeten ontwerpen werkt niet goed!

hierdoor is er maar één meetpunt met zekerheid bekend, namelijk het punt (φ_{ze}, M_{\max}) . Achteraf werd namelijk de totale torsiehoek (φ_{ze}) opgemeten:

$\varphi_{ze} = 1030^\circ \hat{=} \frac{1030}{360} [\text{omw}] = 2,86 [\text{omw}] \hat{=} \frac{1030}{360} \cdot 2\pi [\text{rad}] = 17,98 [\text{rad}]$
 Het hierbij behorende torsiemoment M_{\max} was bekend van de uitlezing van de millimeter: $M_{\max} = 55,8 [\text{Nm}]$.

Afzgaande van dit punt zijn nog een tiental andere punten gereconstrueerd, die in de grafiek zijn ingetekend. De torsiehoek werd hierbij bepaald terugtellende van φ_{ze} met 40 mm schaal per omwenteling, en het torsiemoment uit het aantal mm schaal waarbij $155 \text{ mm} \hat{=} 100 \text{ Nm}$.

Andere manieren om punten te reconstrueren (bijv. φ_z vanuit de oorsprong van het assenkruis van de grafiek bepalen) zijn ook geprobeerd maar gaven een slechtere correlatiecoëfficiënt in de regressierechte.

De C en de n-waarde zijn bepaald aan de hand van de 11 meetpunten.

Er is echter nog een tweede manier toegepast om een C en een n-waarde af te leiden, namelijk door te stellen dat alleen de C-waarde temperatuurafhankelijk is. Dan is slechts één meetpunt (bijv.: φ_{ze}, M_{\max}) voldoende omdat de n-waarde uit de proef bij kamertemperatuur bekend is.

* Meetwaarden, behorende bij de ingetekende punten.

	torsiehoek			torsiemoment		
	mm grafiek	φ_2 [rad]	$\ln \varphi_2$	mm grafiek	M [Nm]	$\ln M$
1	11.4	1.791	0.583	66 $\frac{1}{3}$	42.8	3.755
2	12.4	1.949	0.667	66 $\frac{2}{3}$	43.0	3.760
3	13.4	2.106	0.745	67	43.2	3.765
4	15.4	2.420	0.884	67 $\frac{2}{3}$	43.6	3.775
5	16.4	2.577	0.947	68	43.8	3.780
6	17.4	2.734	1.006	68 $\frac{1}{3}$	44.0	3.785
7	21.4	3.363	1.213	69 $\frac{1}{2}$	44.8	3.802
8	23.4	3.677	1.302	70 $\frac{1}{3}$	45.3	3.814
9	25.4	3.991	1.384	70 $\frac{2}{3}$	45.6	3.819
10	27.4	4.306	1.460	71	45.8	3.823
11	114.4	17.977	2.889	86 $\frac{1}{2}$	55.8	4.021

↳ enige punt dat zeker goed is.

§ methode 1:

Regressierechte door de punten 1 t/m 11:

$$\ln M = 3.67 + 0.115 \ln \varphi_2$$

korrelatiecoëfficiënt: $R_{\text{reg}} = 0.988$

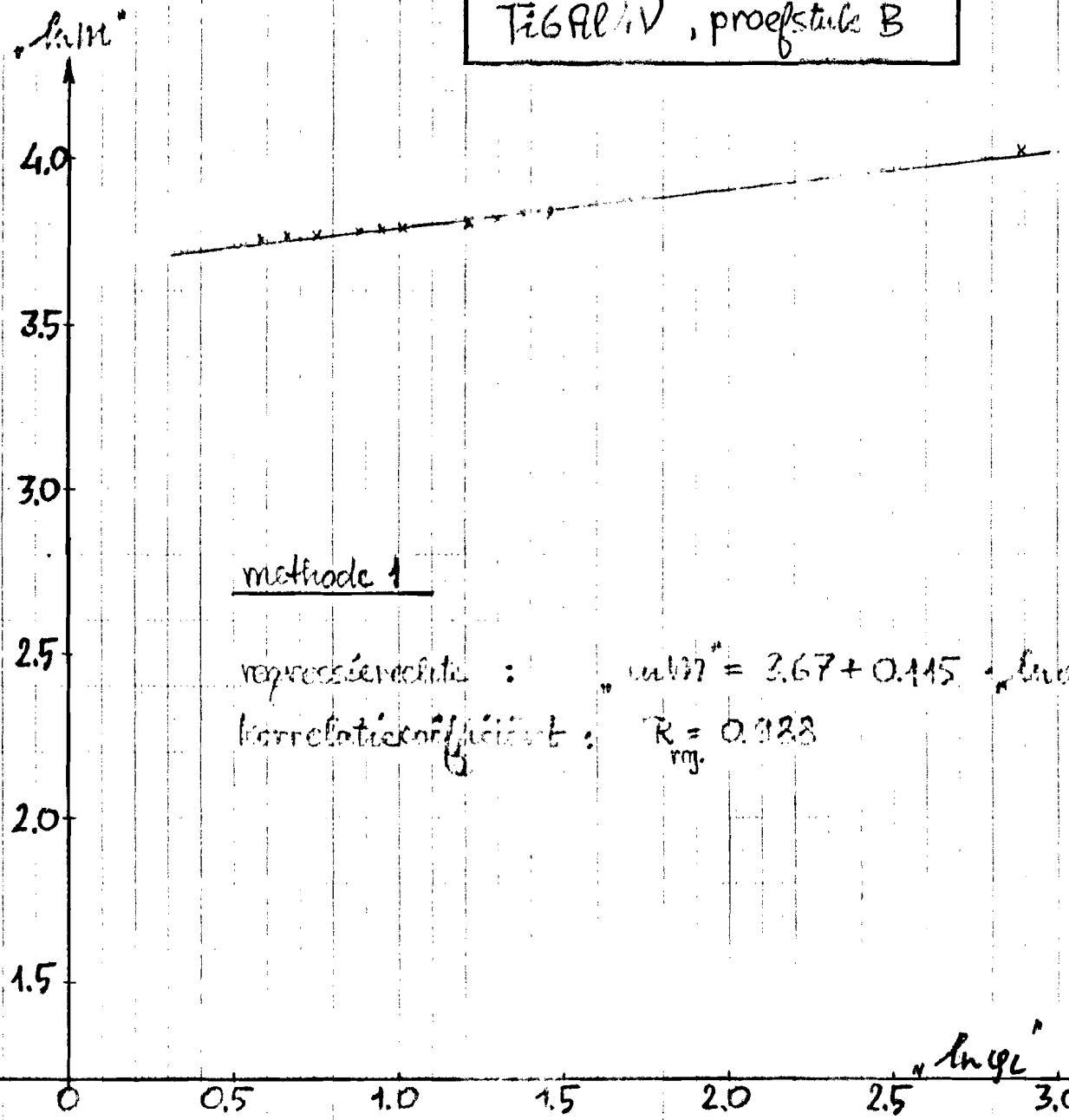
- versterkingsexponent: $n_1 = 0.115$ [-]
- karakteristieke deformatieweerstand:

$$C_1 = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \frac{3.115}{(3.495 \cdot 10^{-3})^{0.115}} \cdot (59.25 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{3})^{0.115} \cdot e^{3.67} = 1165 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$$

dus:

$$C_1 = 1165 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] \text{ en } n_1 = 0.115 \text{ [-]}$$

Ti6Al4V, proefstuk B



methode 1

regressievergelting : $\ln M'' = 3.67 + 0.115 \ln qL''$
korrrelatiecoëfficiënt : $R = 0.988$

§ methode 2:

De span uit van het punt dat zeker goed is:

$$\varphi_{Le} = \frac{130^\circ}{360^\circ} \cdot 2\pi = 17.977 \text{ [rad.]}$$

en

$$M_{\max} = (22.3 \times 2.5) = 55.75 \text{ [Nm]}$$

uitbreiding mv-vector

→ schaalfactor

Veronderstelling: de versterkingsexponent blijft in het beperkte temperatuurinterval van 20°C tot 25°C constant:

$$n_2 = n_{20^\circ\text{C}} = 0.067 \text{ [-]}$$

(zie bladzijde 5.3 van deze bijlage)

voor het torsiemoment is afgeleid:

$$M = \left[\frac{2\pi C}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R^{n+3}}{n+3} \cdot \frac{1}{(L\sqrt{3})^n} \right] \cdot \varphi_2^n \quad \text{[Nm]} \quad (18.)$$

of omgeschreven: $C = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \cdot \frac{n+3}{R^{n+3}} \cdot (L\sqrt{3})^n \cdot \left(\frac{M}{\varphi_2^n} \right)$

Als we hierin het punt (φ_{Le}, M_{\max}) substitueren, evenals de veronderstelde n_2 , dan is C_2 bekend:

$$C_2 = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \cdot \frac{3.067}{(3.495 \cdot 10^{-3})^{3.067}} \cdot (59.25 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{3})^{0.067} \cdot \frac{55.75}{(17.977)^{0.067}}$$

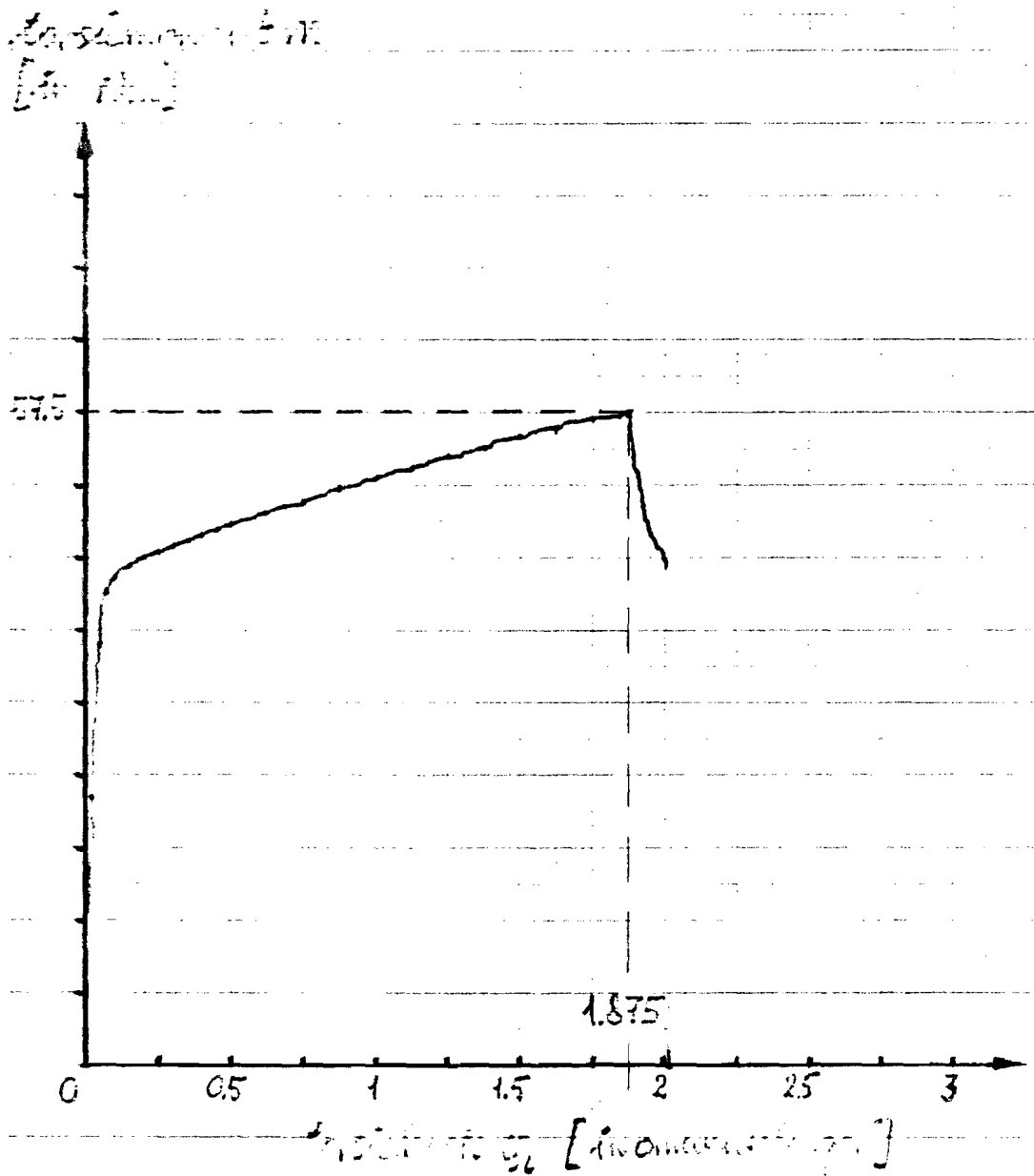
$$C_2 = 1141 \cdot 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$$

dus:

$$C_2 = 1141 \cdot 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]} \text{ en } n_2 = 0.067 \text{ [-]}$$

- Opgegenomen $M(\varphi)$ kromme

Ti-zuiver, proefstuk A



$$T_0 = 20^\circ\text{C}$$

$$\dot{\epsilon}_R \approx 0.002 \text{ [1/sec]}$$

$$\text{maximale Torsiemoment } M_{\text{max}} = 57.5 \text{ [Nm]}$$

* Waarkwaarden, behorende bij de ingetekende punten.

	φ_L [rad]	$\ln \varphi_L$	M [N.m]	$\ln M$		φ_L [rad]	$\ln \varphi_L$	M [N.m]	$\ln M$
1	0.157	-1.851	23.6	3.163	13	3.927	1.368	48.6	3.883
2	0.314	-1.158	37.1	3.612	14	4.712	1.550	49.5	3.902
3	0.471	-0.752	41.7	3.730	15	5.498	1.704	50.8	3.928
4	0.628	-0.465	43.0	3.760	16	6.283	1.838	51.8	3.946
5	0.942	-0.059	44.1	3.786	17	7.069	1.956	52.5	3.962
6	1.257	0.228	44.7	3.800	18	7.854	2.061	53.5	3.980
7	1.571	0.452	45.2	3.811	19	8.639	2.156	54.5	3.938
8	1.885	0.634	45.7	3.822	20	9.425	2.243	55.3	4.012
9	2.199	0.788	46.2	3.832	21	10.210	2.323	56.2	4.029
10	2.513	0.922	46.6	3.842	22	10.936	2.397	56.9	4.041
11	2.827	1.039	47.1	3.853	23	11.781	2.466	57.5	4.052
12	3.142	1.145	47.6	3.863					

Regressie rechte door de punten 3 t/m 23 :

$$\ln M = 3.77 + 0.0989 \cdot \ln \varphi_L$$

korrelatiecoëfficiënt : $R_{reg} = 0.975$

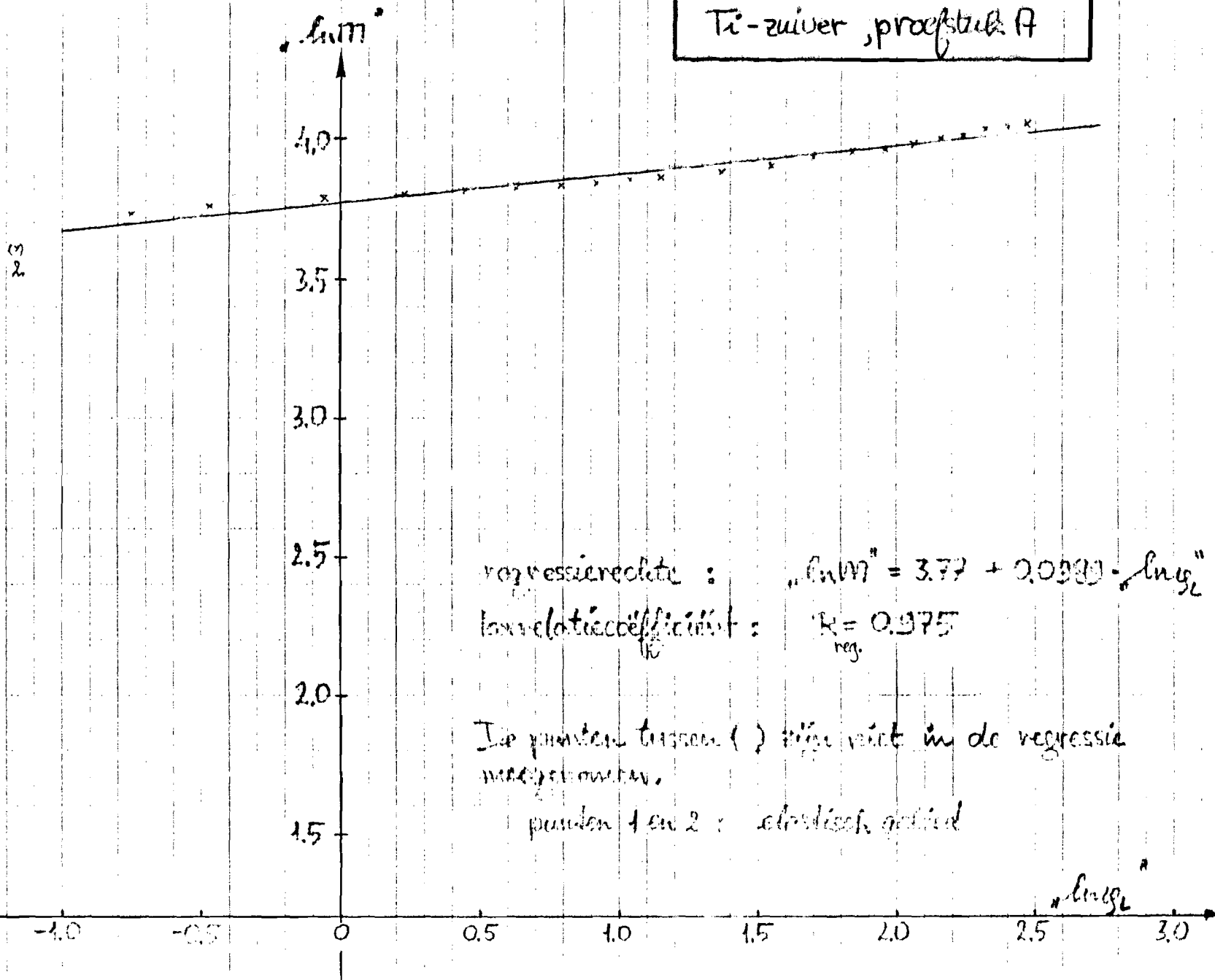
- versterigingsexponent : $n = 0.0989$
- karakteristieke deformatieweerstand :

$$C = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \cdot \frac{3.0989}{(3.495 \cdot 10^{-3})^{0.0989}} \cdot (59.25 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{3})^{0.0989} \cdot e^{3.77} = 1213 \cdot 10^6 \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

dus :

$C = 1213 \cdot 10^6 \left[\frac{N}{m^2} \right] \text{ en } n = 0.099 [-]$

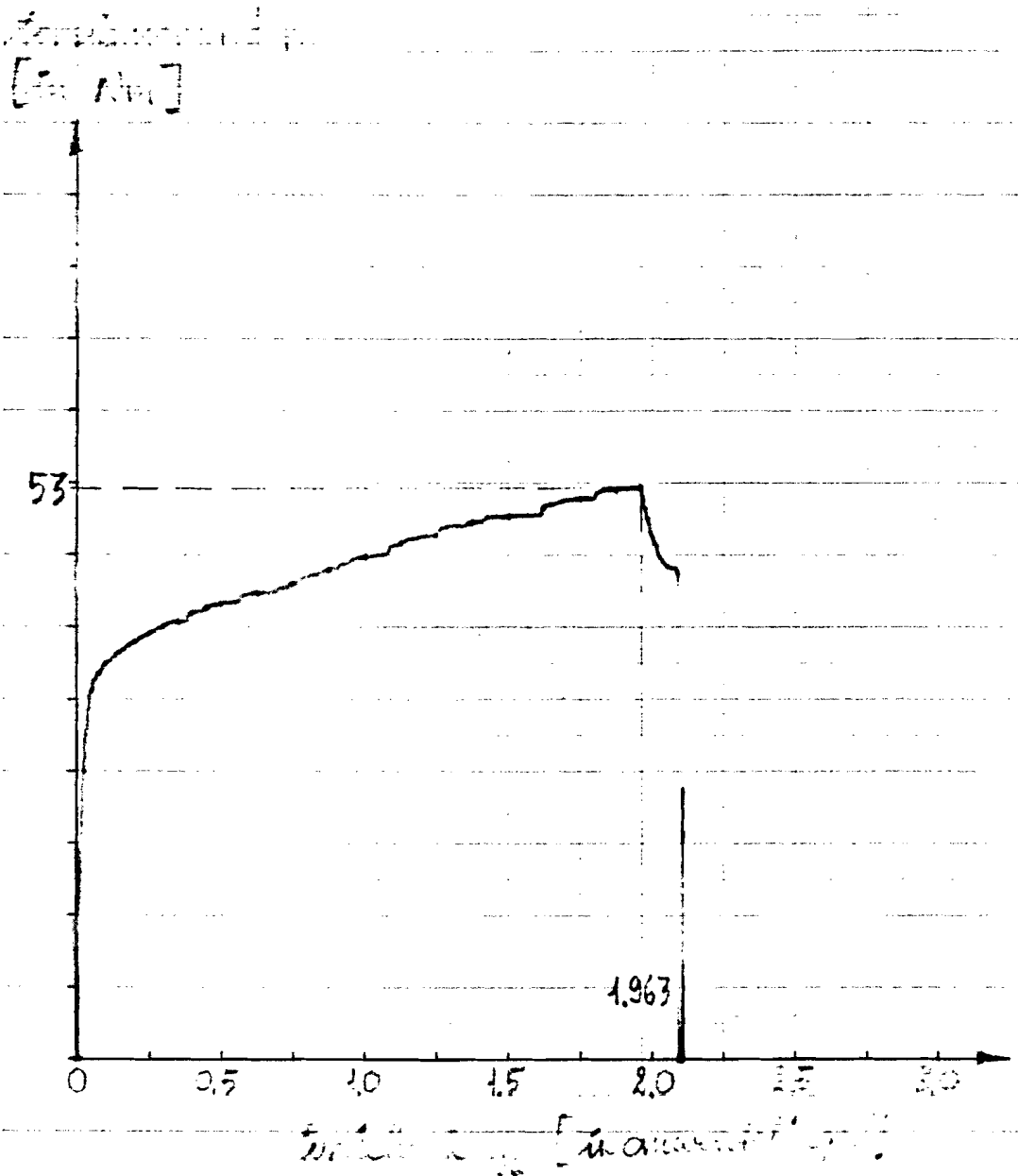
Ti-zuiver, proefstuk A



3
4

- Opgezomen $M(\varphi)$ kerfcurve

Ti-zuiver, proefstuk B



$T_y = 175 \text{ [}^\circ\text{C]}$
 $\dot{\epsilon}_R \approx 0.002 \text{ [1/sec]}$
 maximale Torsiemoment $M_{\max} = 53.0 \text{ [Nm]}$

* Meetwaarden, behorende bij de ingetekende punten.

	φ_z [rad]	$\ln \varphi_z^*$	M [Nm]	$\ln M$		φ_z [rad]	$\ln \varphi_z^*$	M [Nm]	$\ln M$
1	0.157	-1.851	26.7	3.286	13	3.927	1.368	43.2	3.766
2	0.314	-1.158	34.1	3.529	14	4.712	1.550	44.1	3.786
3	0.471	-0.752	35.7	3.576	15	5.498	1.704	45.4	3.816
4	0.628	-0.465	36.7	3.604	16	6.283	1.838	46.5	3.840
5	0.942	-0.059	37.7	3.631	17	7.069	1.956	47.8	3.866
6	1.257	0.228	38.7	3.657	18	7.854	2.061	48.6	3.883
7	1.571	0.452	39.4	3.674	19	8.639	2.156	49.8	3.907
8	1.885	0.634	40.1	3.691	20	9.425	2.243	50.4	3.921
9	2.199	0.788	40.5	3.702	21	10.210	2.323	51.2	3.936
10	2.513	0.922	41.4	3.724	22	10.996	2.397	51.9	3.950
11	2.827	1.030	41.8	3.732	23	11.781	2.466	52.8	3.966
12	3.142	1.145	42.1	3.740	24	12.331	2.512	53.0	3.970

Regressierechte door de punten 2 t/m 24 :

$$\ln M = 3.63 + 0.120 \ln \varphi_z$$

$$\text{Korrelatiecoëfficiënt : } R_{\text{reg.}} = 0.982$$

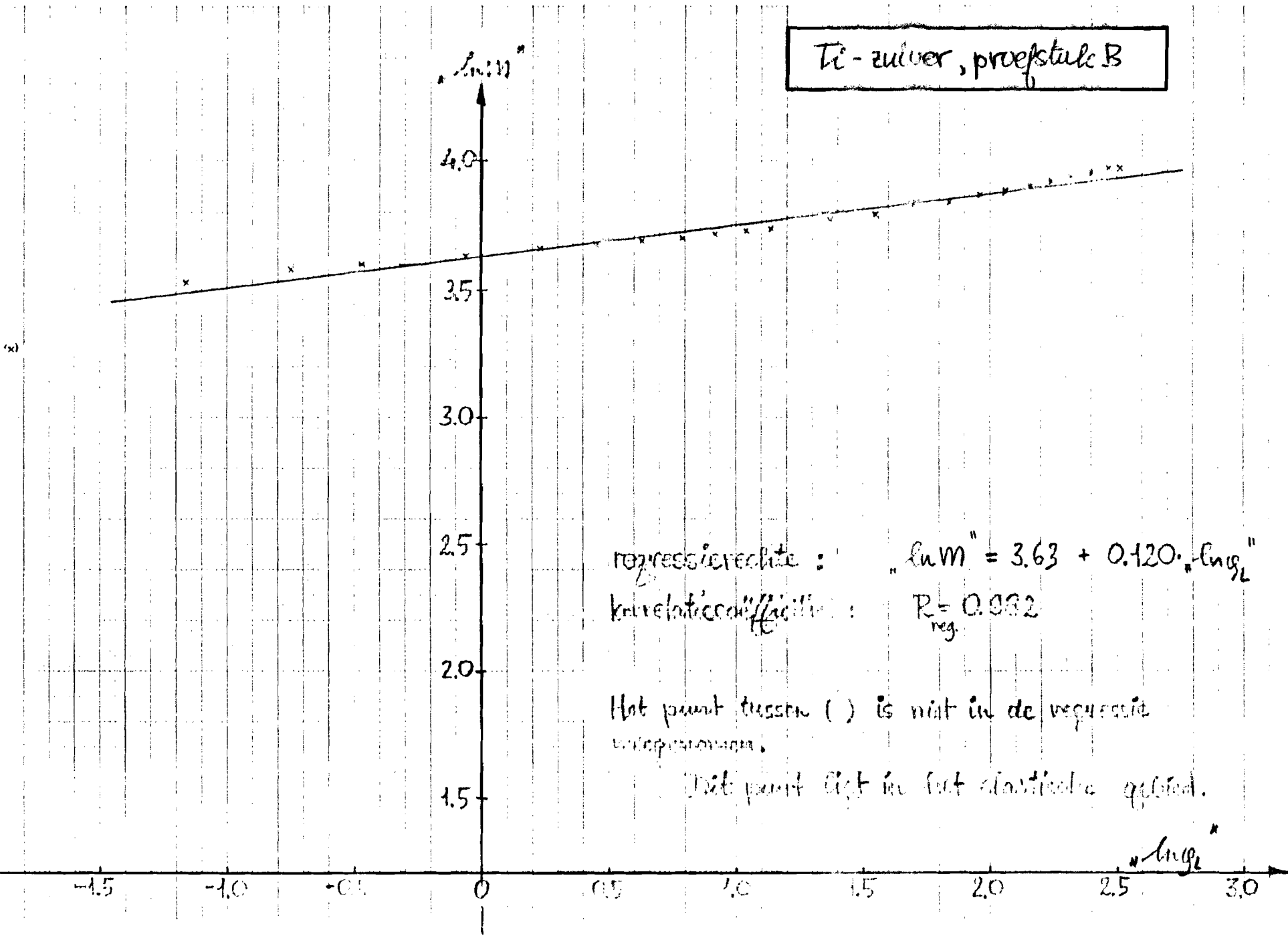
- verstergingsexponent : $n = 0.120$
- karakteristieke deformatieweerstand :

$$C = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \cdot \frac{3.120}{(3.495 \cdot 10^{-3})^{3.120}} \cdot (59.25 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{3})^{0.120} \cdot e^{3.63} = 1140 \cdot 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$$

dus :

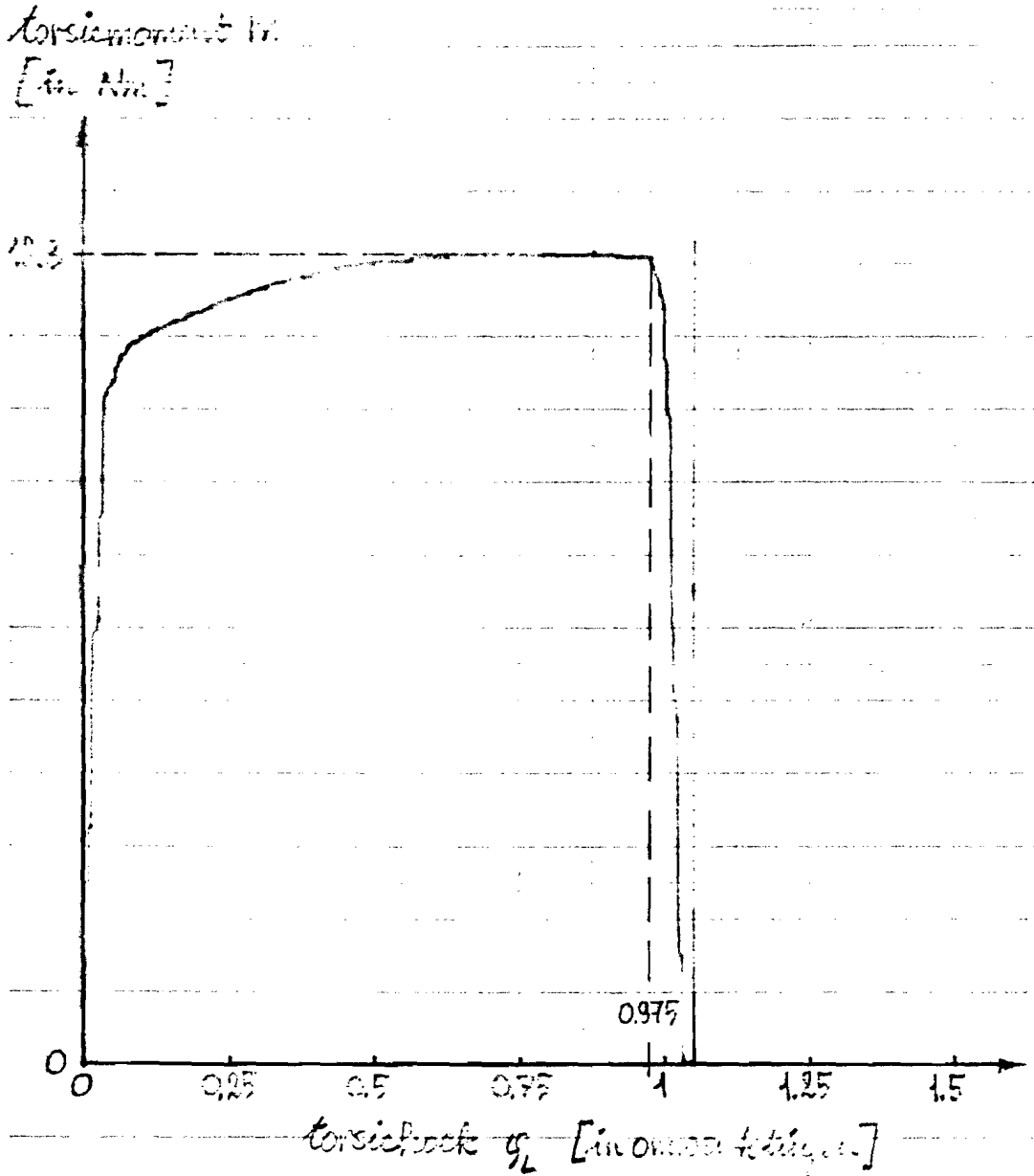
$$C = 1140 \cdot 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]} \text{ en } n = 0.120 \text{ [-]}$$

Ti-zilver, proefstuk B



- Opgenomen $M(\varphi_L)$ kromme

AL 51 ST, proefstuk A



$$T_0 = 20^\circ\text{C}$$

$$\dot{\epsilon}_R \approx 0.002 \text{ [1/sec]}$$

$$\text{maximale Torsiemoment } M_{\max} = 18.3 \text{ [Nm]}$$

* Meetwaarden, behorende bij de ingetekende punten.

	φ_2 [rad]	$\ln \varphi_2$	M [Nm]	$\ln M$		φ_2 [rad]	$\ln \varphi_2$	M [Nm]	$\ln M$
1	0.079	-2.544	5.3	1.674	14	1.571	0.452	17.2	2.846
2	0.157	-1.851	10.3	2.303	15	1.767	0.569	17.3	2.853
3	0.236	-1.446	15.1	2.714	16	1.963	0.675	17.5	2.862
4	0.314	-1.158	15.4	2.733	17	2.160	0.770	17.6	2.868
5	0.393	-0.935	15.9	2.762	18	2.356	0.857	17.7	2.875
6	0.471	-0.752	16.2	2.784	19	2.749	1.011	17.9	2.887
7	0.550	-0.598	16.3	2.790	20	3.142	1.145	18.1	2.895
8	0.628	-0.465	16.4	2.795	21	3.534	1.263	18.1	2.897
9	0.707	-0.347	16.5	2.801	22	3.927	1.368	18.2	2.902
10	0.785	-0.242	16.5	2.804	23	4.320	1.463	18.25	2.904
11	0.862	-0.148	16.7	2.817	24	4.712	1.550	18.25	2.904
12	1.178	0.164	16.9	2.830	25	5.498	1.704	18.25	2.904
13	1.374	0.318	17.1	2.837	26	6.126	1.813	18.2	2.902

Regressierechte door de punten 3 t/m 23 :

$$\ln M = 2.81 + 0.0631 \ln \varphi_2$$

korrelatiecoëfficiënt : $R_{reg} = 0.993$

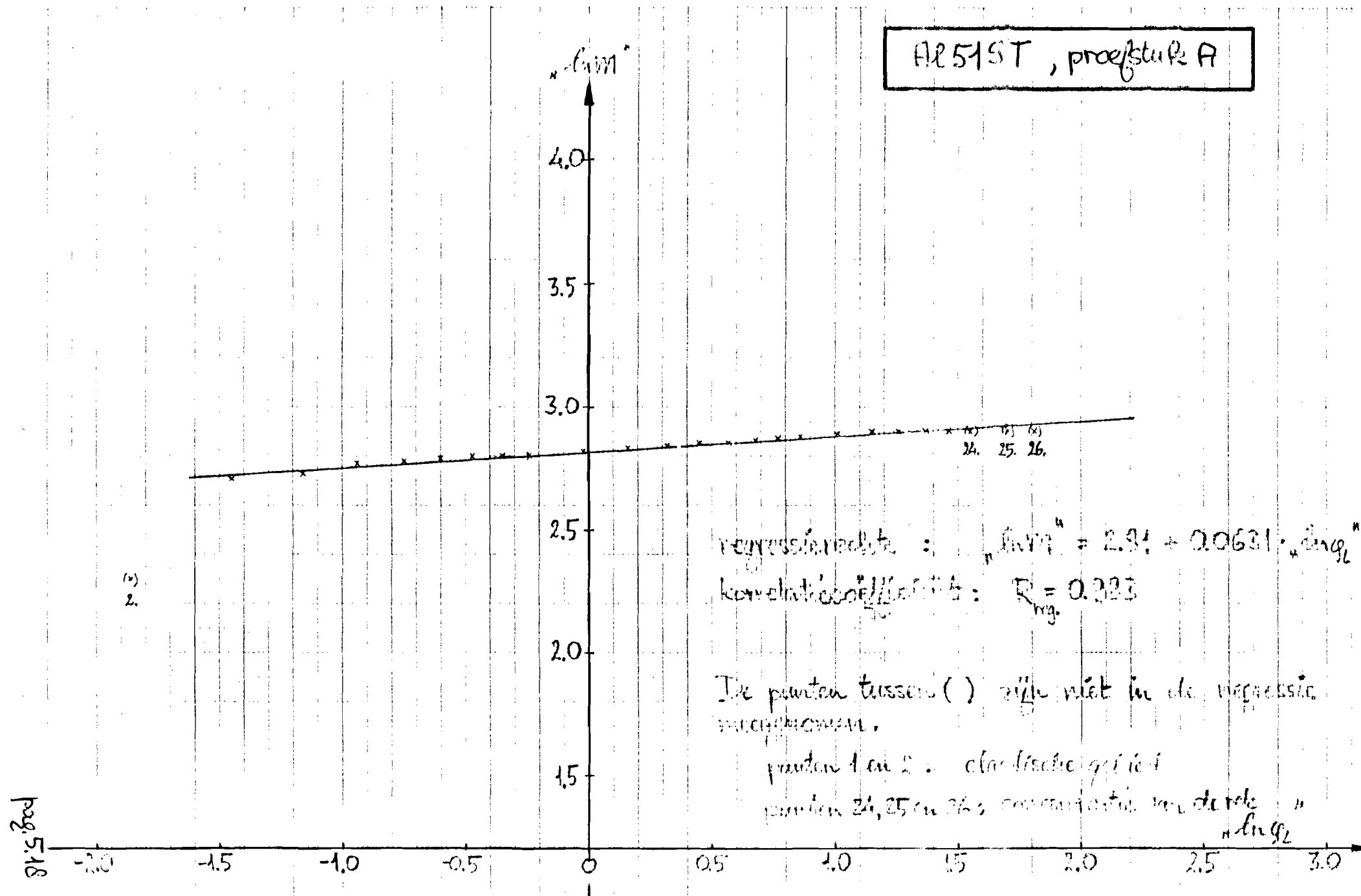
- versterkingsexponent : $n = 0.0631$
- karakteristieke deformatieweerstand :

$$C = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \cdot \frac{3.0631}{(3.495 \cdot 10^{-3})^{3.0631}} \cdot (59.25 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{3})^{0.0631} \cdot e^{2.81} = 407 \cdot 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$$

dus :

$$C = 407 \cdot 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]} \text{ en } n = 0.063 \text{ [-]}$$

AL51ST, proefstuf A



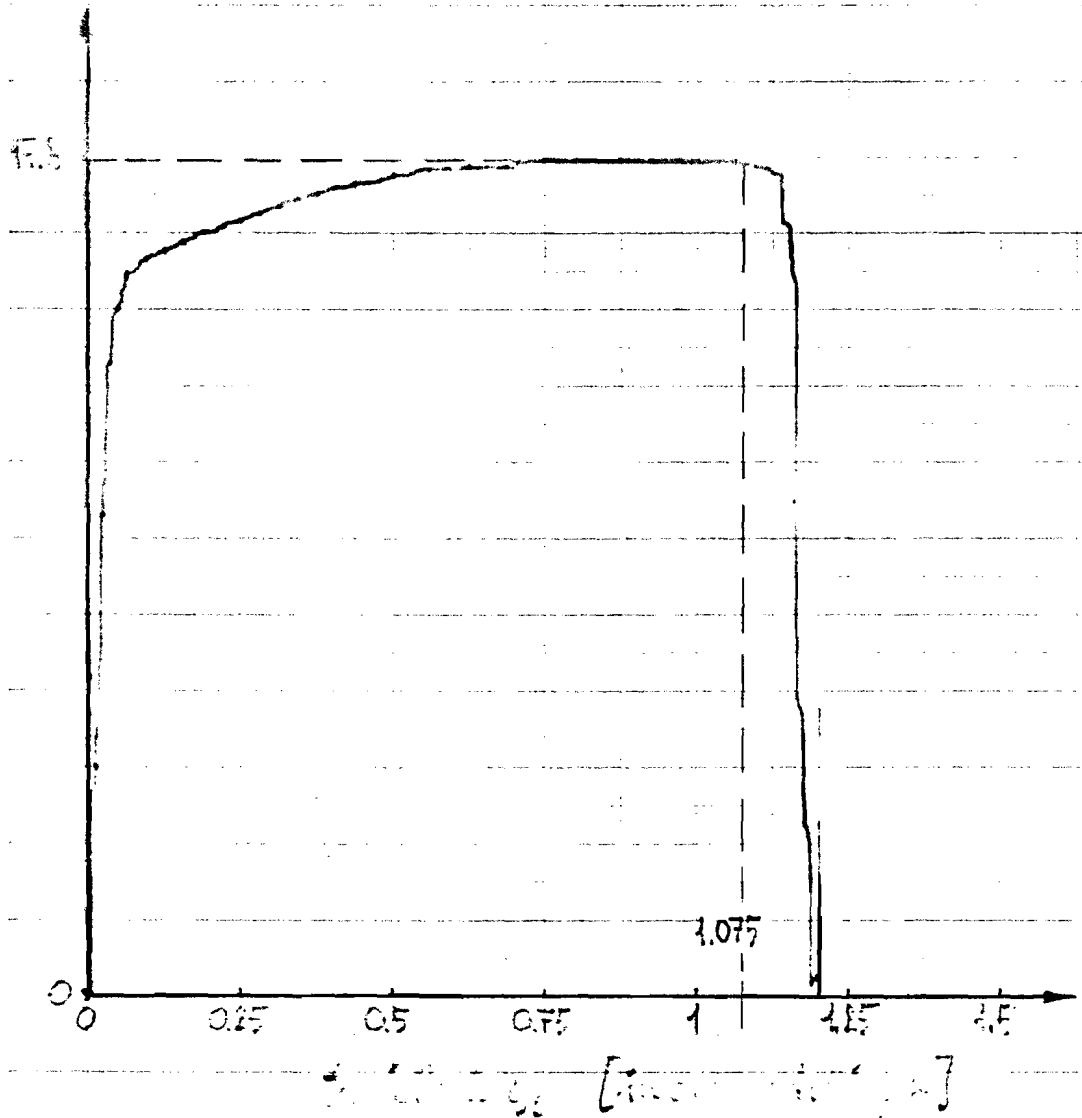
(3)
2.

815 bod

• Opzomenen $M(\varphi)$ kromme

Al 51ST, proefstuk B

Torsiemoment M
[in Nm]



$$T_V = 80 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\dot{\epsilon}_R \approx 0.002 \text{ [1/sec]}$$

$$\text{maximale Torsiemoment } M_{\max} = 17.8 \text{ [Nm]}$$

* Meetwaarden, behorende bij de ingetekende punten.

	φ_z [rad]	l_{ing} [mm]	M [Nm]	$\ln M$		φ_z [rad]	l_{ing} [mm]	M [Nm]	$\ln M$
1	0.073	-2.544	4.9	1.582	13	1.963	0.675	16.8	2.820
2	0.157	-1.851	10.2	2.324	14	2.160	0.770	16.9	2.828
3	0.236	-1.446	13.5	2.599	15	2.356	0.857	17.1	2.833
4	0.314	-1.158	14.6	2.680	16	2.749	1.011	17.3	2.849
5	0.393	-0.935	15.3	2.729	17	3.142	1.145	17.5	2.860
6	0.589	-0.523	15.6	2.750	18	3.534	1.263	17.6	2.867
7	0.785	-0.242	15.8	2.762	19	3.927	1.368	17.6	2.869
8	0.982	-0.018	16.0	2.776	20	4.320	1.463	17.6	2.869
9	1.178	0.164	16.2	2.786	21	4.712	1.550	17.75	2.876
10	1.374	0.318	16.3	2.793	22	5.498	1.704	17.75	2.876
11	1.571	0.452	16.5	2.802	23	6.283	1.838	17.75	2.876
12	1.767	0.569	16.6	2.812	24	6.676	1.899	17.75	2.876

Regressierechte door de punten 5 t/m 21 :

$$\ln M = 2.77 + 0.0633 \ln \varphi_z$$

$$\text{korrelatiecoëfficiënt} : R_{reg} = 0.994$$

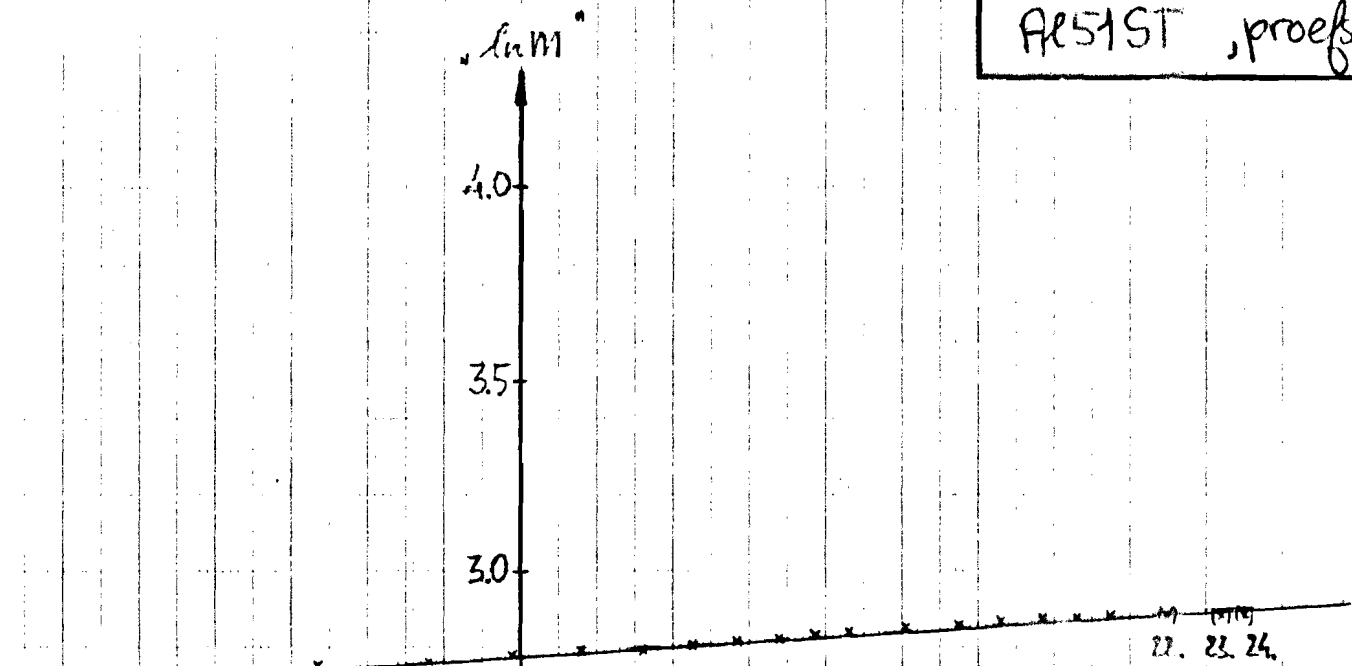
- verstergings-exponent : $n = 0.0633$
- karakteristieke deformatieweerstand :

$$C = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \cdot \frac{3.0633}{(3.495 \cdot 10^{-3})^{3.0633}} \cdot (59.25 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{3})^{0.0633} \cdot e^{2.77} = 391 \cdot 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$$

dus :

$$C = 391 \cdot 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]} \text{ en } n = 0.063 \text{ [-]}$$

AL51ST , proefstuk B



(*)
2.

regressierechte : $\ln M'' = 2.77 + 0.0633 \cdot \ln c_2$
 correlatiecoëfficiënt : $R = 0.934$
reg.

De punten tussen () zijn niet in de regressie
 inclusie.

punten 1, 2, 3 en 4 : elastische gebied
 punten 22, 23 en 24 : concentratie van de velle
 " $\ln c_2$

Bijlage 6.

* De rekenresultaten van het computerprogramma.

Onderwerp van deze bijlage:

Computerberekeningen aan de snelle torsieproeven.

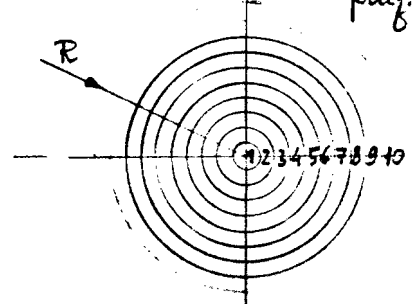
Met het programma, dat uitvoerig beschreven is in lit. [E], wordt de temperatuurverdeling in de torsiestaf tijdens plastische deformatie berekend [$T=T(r,t)$], evenals waarden voor α [$\alpha=\alpha(r,t)$].

De resultaten van de berekeningen zijn op de volgende bladzijden (in tabelvorm) weergegeven. De tabelkolommen geven respectievelijk:

N	: segmentnummer.
E_0	: effectieve vwr-rek ($\bar{\epsilon}$); hier steeds 0.
Rek	: effectieve rek.
E_{tot}	: totale effectieve rek ($\bar{\epsilon}$)
Spanning	: effectieve spanning ($\bar{\sigma}$)
Temp.	: temperatuur, geleiding in aanmerking genomen.
Temp.g.geel	: temperatuur, <u>geen</u> geleiding in aanmerking genomen.
$\frac{T_j - T_{j-1}}{t_j - t_{j-1}}$: α tussen (tijd) stap $j-1$ en j . ($\alpha_{momentaan}$)
$\frac{T_j - 20}{t_j - 20}$: de tot stap j gemiddelde α ($\bar{\alpha}$)

Van bijzonder belang is steeds de laatste tabel op de bladzijde ($x=200$), want deze geeft de berekende waarden nadat de deformatie voltooid is. In deze tabel is de laatste regel ($N=10$) het belangrijkste, deze geeft de berekende waarden in de laatste proefstaafvezel.

Het materiaal is TI6AL4V
 Rho = 4430.0 kg/m**3
 S.W. = 565.0 J/kg*K
 C = 1225.0 N/mm**2
 n = 0.0700
 Lam = 7.10 w/m*K
 De straal van de torsiestaaft, R = 0.3170E 01 mm
 Totale tijd, Ttot = 0.011 s
 Aantal segmenten = 10
 Aantal stappen = 200
 Begin temperatuur, Tc = 25 C
 Totale rek = 0.1900E 00
 Snelheid = 0.1770E 02 s-1



*verdeling van de proefstaaf-
doorsnede in segmenten.*

Aantal stappen, X = 40

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.002	0.002	790.04	0.2063E 02	0.2056E 02	0.1240E 01	0.1125E 01
2	0.000	0.004	0.004	852.19	0.2185E 02	0.2182E 02	0.1029E 01	0.1015E 01
3	0.000	0.007	0.007	935.25	0.2317E 02	0.2315E 02	0.1010E 01	0.1005E 01
4	0.000	0.013	0.013	905.33	0.2453E 02	0.2452E 02	0.1005E 01	0.1003E 01
5	0.000	0.017	0.017	921.39	0.2592E 02	0.2591E 02	0.1003E 01	0.1002E 01
6	0.000	0.021	0.021	934.43	0.2733E 02	0.2732E 02	0.1002E 01	0.1001E 01
7	0.000	0.025	0.025	945.42	0.2876E 02	0.2876E 02	0.1002E 01	0.1001E 01
8	0.000	0.028	0.028	954.94	0.3021E 02	0.3021E 02	0.1001E 01	0.1001E 01
9	0.000	0.032	0.032	963.34	0.3167E 02	0.3167E 02	0.1001E 01	0.1000E 01
10	0.000	0.036	0.036	970.87	0.3310E 02	0.3314E 02	0.9943E 00	0.9970E 00

Aantal stappen, X = 80

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.004	0.004	829.32	0.2147E 02	0.2118E 02	0.1469E 01	0.1248E 01
2	0.000	0.011	0.011	895.61	0.2394E 02	0.2382E 02	0.1059E 01	0.1030E 01
3	0.000	0.019	0.019	928.22	0.2667E 02	0.2660E 02	0.1021E 01	0.1011E 01
4	0.000	0.027	0.027	950.34	0.2951E 02	0.2946E 02	0.1011E 01	0.1005E 01
5	0.000	0.034	0.034	967.20	0.3242E 02	0.3238E 02	0.1006E 01	0.1003E 01
6	0.000	0.042	0.042	980.89	0.3538E 02	0.3535E 02	0.1004E 01	0.1002E 01
7	0.000	0.049	0.049	992.42	0.3838E 02	0.3835E 02	0.1003E 01	0.1002E 01
8	0.000	0.057	0.057	1002.41	0.4141E 02	0.4138E 02	0.1002E 01	0.1001E 01
9	0.000	0.065	0.065	1011.24	0.4446E 02	0.4445E 02	0.1001E 01	0.1001E 01
10	0.000	0.072	0.072	1019.14	0.4738E 02	0.4754E 02	0.9888E 00	0.9941E 00

Aantal stappen, X = 120

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.006	0.006	853.19	0.2248E 02	0.2182E 02	0.1683E 01	0.1364E 01
2	0.000	0.017	0.017	921.39	0.2616E 02	0.2589E 02	0.1089E 01	0.1046E 01
3	0.000	0.028	0.028	954.94	0.3034E 02	0.3018E 02	0.1031E 01	0.1016E 01
4	0.000	0.040	0.040	977.70	0.3471E 02	0.3459E 02	0.1016E 01	0.1008E 01
5	0.000	0.051	0.051	995.05	0.3919E 02	0.3909E 02	0.1010E 01	0.1005E 01
6	0.000	0.063	0.063	1009.12	0.4374E 02	0.4366E 02	0.1006E 01	0.1003E 01
7	0.000	0.074	0.074	1020.99	0.4836E 02	0.4830E 02	0.1005E 01	0.1002E 01
8	0.000	0.085	0.085	1031.27	0.5304E 02	0.5298E 02	0.1003E 01	0.1002E 01
9	0.000	0.097	0.097	1040.35	0.5773E 02	0.5770E 02	0.1001E 01	0.1001E 01
10	0.000	0.108	0.108	1048.48	0.6210E 02	0.6247E 02	0.9836E 00	0.9913E 00

Aantal stappen, X = 160

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.008	0.008	870.55	0.2365E 02	0.2247E 02	0.1885E 01	0.1477E 01
2	0.000	0.023	0.023	940.14	0.2851E 02	0.2801E 02	0.1120E 01	0.1061E 01
3	0.000	0.038	0.038	974.36	0.3414E 02	0.3384E 02	0.1042E 01	0.1022E 01
4	0.000	0.053	0.053	997.59	0.4006E 02	0.3934E 02	0.1021E 01	0.1011E 01
5	0.000	0.068	0.068	1015.29	0.4614E 02	0.4596E 02	0.1013E 01	0.1007E 01
6	0.000	0.084	0.084	1029.65	0.5232E 02	0.5218E 02	0.1009E 01	0.1004E 01
7	0.000	0.099	0.099	1041.76	0.5860E 02	0.5848E 02	0.1006E 01	0.1003E 01
8	0.000	0.114	0.114	1052.25	0.6495E 02	0.6485E 02	0.1004E 01	0.1002E 01
9	0.000	0.129	0.129	1061.51	0.7131E 02	0.7128E 02	0.1001E 01	0.1001E 01
10	0.000	0.144	0.144	1069.81	0.7709E 02	0.7776E 02	0.9786E 00	0.9885E 00

Aantal stappen, X = 200

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.009	0.009	884.25	0.2497E 02	0.2314E 02	0.2076E 01	0.1584E 01
2	0.000	0.028	0.028	954.94	0.3097E 02	0.3017E 02	0.1151E 01	0.1077E 01
3	0.000	0.047	0.047	989.70	0.3805E 02	0.3757E 02	0.1053E 01	0.1027E 01
4	0.000	0.066	0.066	1013.29	0.4553E 02	0.4519E 02	0.1027E 01	0.1014E 01
5	0.000	0.085	0.085	1031.27	0.5323E 02	0.5296E 02	0.1016E 01	0.1008E 01
6	0.000	0.104	0.104	1045.85	0.6108E 02	0.6085E 02	0.1011E 01	0.1006E 01
7	0.000	0.123	0.123	1058.16	0.6904E 02	0.6885E 02	0.1008E 01	0.1004E 01
8	0.000	0.142	0.142	1068.82	0.7709E 02	0.7693E 02	0.1005E 01	0.1003E 01
9	0.000	0.161	0.161	1078.22	0.8513E 02	0.8509E 02	0.1000E 01	0.1001E 01
10	0.000	0.180	0.180	1086.65	0.9226E 02	0.9331E 02	0.9739E 00	0.9859E 00

Het materiaal is Ti6Al4V

Rho = 4430.0 kg/m**3

S.W. = 565.0 J/kg*K

C = 1225.0 N/mm**2

n = 0.0700

Lam = 7.10 w/m*K

De straal van de torsiestaafl. R = 0.3170E 01 mm

Totale tijd, Ttot = 0.025 s

Aantal segmenten = 10

Aantal stappen = 200

Begin temperatuur, T0 = 20 C

Totale rest = 0.1500E 00

Reïstelheid = 0.5000E 01 s-1

Aantal stappen, X = 40

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.001	0.001	777.07	0.2056E 02	0.2044E 02	0.1535E 01	0.1283E 01
2	0.000	0.004	0.004	839.19	0.2147E 02	0.2142E 02	0.1068E 01	0.1035E 01
3	0.000	0.007	0.007	869.74	0.2243E 02	0.2245E 02	0.1024E 01	0.1012E 01
4	0.000	0.010	0.010	890.47	0.2353E 02	0.2351E 02	0.1012E 01	0.1006E 01
5	0.000	0.013	0.013	906.27	0.2461E 02	0.2459E 02	0.1007E 01	0.1004E 01
6	0.000	0.016	0.016	919.09	0.2570E 02	0.2569E 02	0.1005E 01	0.1003E 01
7	0.000	0.019	0.019	929.90	0.2681E 02	0.2680E 02	0.1003E 01	0.1002E 01
8	0.000	0.022	0.022	939.27	0.2794E 02	0.2792E 02	0.1002E 01	0.1001E 01
9	0.000	0.025	0.025	947.53	0.2907E 02	0.2906E 02	0.1001E 01	0.1001E 01
10	0.000	0.028	0.028	954.94	0.3014E 02	0.3021E 02	0.9872E 00	0.9932E 00

Aantal stappen, X = 80

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.003	0.003	815.71	0.2141E 02	0.2092E 02	0.2007E 01	0.1545E 01
2	0.000	0.009	0.009	880.91	0.2316E 02	0.2297E 02	0.1140E 01	0.1071E 01
3	0.000	0.015	0.015	912.98	0.2525E 02	0.2513E 02	0.1049E 01	0.1025E 01
4	0.000	0.021	0.021	934.74	0.2744E 02	0.2735E 02	0.1025E 01	0.1013E 01
5	0.000	0.027	0.027	951.33	0.2969E 02	0.2961E 02	0.1015E 01	0.1008E 01
6	0.000	0.033	0.033	964.79	0.3198E 02	0.3192E 02	0.1010E 01	0.1005E 01
7	0.000	0.039	0.039	976.14	0.3430E 02	0.3425E 02	0.1007E 01	0.1004E 01
8	0.000	0.045	0.045	985.96	0.3665E 02	0.3661E 02	0.1005E 01	0.1003E 01
9	0.000	0.051	0.051	994.64	0.3900E 02	0.3899E 02	0.1000E 01	0.1001E 01
10	0.000	0.057	0.057	1002.41	0.4110E 02	0.4138E 02	0.9756E 00	0.9869E 00

Aantal stappen, X = 120

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.004	0.004	839.19	0.2252E 02	0.2141E 02	0.2422E 01	0.1784E 01
2	0.000	0.013	0.013	906.27	0.2507E 02	0.2458E 02	0.1212E 01	0.1109E 01
3	0.000	0.022	0.022	939.27	0.2821E 02	0.2790E 02	0.1075E 01	0.1038E 01
4	0.000	0.031	0.031	961.65	0.3155E 02	0.3133E 02	0.1037E 01	0.1019E 01
5	0.000	0.040	0.040	978.72	0.3500E 02	0.3482E 02	0.1022E 01	0.1012E 01
6	0.000	0.049	0.049	992.56	0.3852E 02	0.3838E 02	0.1015E 01	0.1008E 01
7	0.000	0.058	0.058	1004.24	0.4209E 02	0.4197E 02	0.1011E 01	0.1005E 01
8	0.000	0.067	0.067	1014.35	0.4571E 02	0.4561E 02	0.1007E 01	0.1004E 01
9	0.000	0.076	0.076	1023.27	0.4928E 02	0.4928E 02	0.9984E 00	0.1000E 01
10	0.000	0.085	0.085	1031.27	0.5235E 02	0.5298E 02	0.9653E 00	0.9810E 00

Aantal stappen, X = 160

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.006	0.006	856.26	0.2385E 02	0.2192E 02	0.2795E 01	0.2004E 01
2	0.000	0.018	0.018	924.71	0.2713E 02	0.2622E 02	0.1284E 01	0.1146E 01
3	0.000	0.030	0.030	958.37	0.3130E 02	0.3075E 02	0.1101E 01	0.1051E 01
4	0.000	0.042	0.042	981.21	0.3580E 02	0.3541E 02	0.1050E 01	0.1026E 01
5	0.000	0.054	0.054	998.63	0.4047E 02	0.4016E 02	0.1030E 01	0.1015E 01
6	0.000	0.066	0.066	1012.75	0.4525E 02	0.4499E 02	0.1020E 01	0.1010E 01
7	0.000	0.078	0.078	1024.67	0.5010E 02	0.4988E 02	0.1014E 01	0.1007E 01
8	0.000	0.090	0.090	1034.98	0.5499E 02	0.5483E 02	0.1008E 01	0.1005E 01
9	0.000	0.102	0.102	1044.09	0.5979E 02	0.5982E 02	0.9958E 00	0.9994E 00
10	0.000	0.114	0.114	1052.25	0.6375E 02	0.6485E 02	0.9560E 00	0.9756E 00

Aantal stappen, X = 200

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.007	0.007	869.74	0.2539E 02	0.2244E 02	0.3134E 01	0.2210E 01
2	0.000	0.022	0.022	939.27	0.2935E 02	0.2790E 02	0.1355E 01	0.1183E 01
3	0.000	0.037	0.037	973.46	0.3453E 02	0.3364E 02	0.1127E 01	0.1065E 01
4	0.000	0.052	0.052	996.66	0.4019E 02	0.3956E 02	0.1063E 01	0.1032E 01
5	0.000	0.067	0.067	1014.35	0.4609E 02	0.4559E 02	0.1038E 01	0.1019E 01
6	0.000	0.082	0.082	1028.70	0.5213E 02	0.5172E 02	0.1025E 01	0.1013E 01
7	0.000	0.097	0.097	1040.80	0.5827E 02	0.5793E 02	0.1017E 01	0.1009E 01
8	0.000	0.112	0.112	1051.28	0.6446E 02	0.6421E 02	0.1009E 01	0.1006E 01
9	0.000	0.127	0.127	1060.53	0.7046E 02	0.7054E 02	0.9926E 00	0.9983E 00
10	0.000	0.142	0.142	1068.82	0.7525E 02	0.7693E 02	0.9476E 00	0.9705E 00

Het materiaal is TI-ZUIVER

Rho = 4510.0 kg/m**3
 S.W. = 523.0 J/kg*K
 C = 1215.0 N/mm**2
 n = 0.1000
 Lam = 16.00 w/m*K
 De straal van de torsiestaaft, R = 0.3170E 01 mm
 Totale tijd, Ttot = 0.028 s
 Aantal segmenten = 10
 Aantal stappen = 200
 Begin temperatuur, Tc = 20 C
 Totale rek = 0.4900E 00
 Reksnelheid = 0.1770E 02 s-1

Aantal stappen, X = 40

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.005	0.005	713.83	0.2233E 02	0.2136E 02	0.2304E 01	0.1721E 01
2	0.000	0.015	0.015	796.72	0.2498E 02	0.2454E 02	0.1188E 01	0.1098E 01
3	0.000	0.024	0.024	838.48	0.2824E 02	0.2796E 02	0.1066E 01	0.1034E 01
4	0.000	0.034	0.034	867.17	0.3173E 02	0.3153E 02	0.1033E 01	0.1017E 01
5	0.000	0.044	0.044	889.24	0.3536E 02	0.3520E 02	0.1020E 01	0.1010E 01
6	0.000	0.054	0.054	907.27	0.3907E 02	0.3896E 02	0.1013E 01	0.1007E 01
7	0.000	0.064	0.064	922.55	0.4284E 02	0.4278E 02	0.1009E 01	0.1005E 01
8	0.000	0.073	0.073	935.85	0.4674E 02	0.4667E 02	0.1006E 01	0.1004E 01
9	0.000	0.083	0.083	947.63	0.5062E 02	0.5060E 02	0.9995E 00	0.1001E 01
10	0.000	0.093	0.093	956.23	0.5400E 02	0.5458E 02	0.9691E 00	0.9830E 00

Aantal stappen, X = 80

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.010	0.010	765.07	0.2671E 02	0.2290E 02	0.3294E 01	0.2315E 01
2	0.000	0.029	0.029	853.91	0.3164E 02	0.2971E 02	0.1381E 01	0.1199E 01
3	0.000	0.049	0.049	898.66	0.3823E 02	0.3703E 02	0.1137E 01	0.1071E 01
4	0.000	0.069	0.069	929.41	0.4553E 02	0.4465E 02	0.1068E 01	0.1035E 01
5	0.000	0.088	0.088	953.07	0.5319E 02	0.5250E 02	0.1041E 01	0.1021E 01
6	0.000	0.108	0.108	972.33	0.6110E 02	0.6053E 02	0.1027E 01	0.1014E 01
7	0.000	0.127	0.127	988.77	0.6919E 02	0.6870E 02	0.1019E 01	0.1010E 01
8	0.000	0.147	0.147	1003.02	0.7736E 02	0.7701E 02	0.1010E 01	0.1006E 01
9	0.000	0.167	0.167	1015.45	0.8530E 02	0.8542E 02	0.9922E 00	0.9982E 00
10	0.000	0.186	0.186	1027.01	0.9163E 02	0.9394E 02	0.9453E 00	0.9688E 00

Aantal stappen, X = 120

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.015	0.015	796.72	0.3276E 02	0.2452E 02	0.4101E 01	0.2820E 01
2	0.000	0.044	0.044	889.24	0.3967E 02	0.3515E 02	0.1563E 01	0.1299E 01
3	0.000	0.073	0.073	935.85	0.4944E 02	0.4657E 02	0.1210E 01	0.1108E 01
4	0.000	0.103	0.103	967.87	0.6055E 02	0.5847E 02	0.1105E 01	0.1054E 01
5	0.000	0.132	0.132	992.50	0.7235E 02	0.7072E 02	0.1062E 01	0.1032E 01
6	0.000	0.162	0.162	1012.62	0.8459E 02	0.8325E 02	0.1040E 01	0.1021E 01
7	0.000	0.191	0.191	1029.68	0.9711E 02	0.9601E 02	0.1026E 01	0.1014E 01
8	0.000	0.220	0.220	1044.52	0.1097E 03	0.1090E 03	0.1011E 01	0.1008E 01
9	0.000	0.250	0.250	1057.68	0.1215E 03	0.1221E 03	0.9826E 00	0.9943E 00
10	0.000	0.279	0.279	1069.51	0.1304E 03	0.1354E 03	0.9261E 00	0.9567E 00

Aantal stappen, X = 160

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.020	0.020	819.98	0.4027E 02	0.2620E 02	0.4798E 01	0.3266E 01
2	0.000	0.059	0.059	915.20	0.4897E 02	0.4078E 02	0.1733E 01	0.1394E 01
3	0.000	0.098	0.098	963.16	0.6175E 02	0.5644E 02	0.1282E 01	0.1146E 01
4	0.000	0.137	0.137	996.12	0.7651E 02	0.7276E 02	0.1141E 01	0.1073E 01
5	0.000	0.176	0.176	1021.47	0.9257E 02	0.8957E 02	0.1083E 01	0.1043E 01
6	0.000	0.216	0.216	1042.18	0.1092E 03	0.1067E 03	0.1053E 01	0.1028E 01
7	0.000	0.255	0.255	1059.73	0.1262E 03	0.1242E 03	0.1032E 01	0.1019E 01
8	0.000	0.294	0.294	1075.01	0.1430E 03	0.1420E 03	0.1009E 01	0.1008E 01
9	0.000	0.333	0.333	1088.55	0.1536E 03	0.1600E 03	0.9726E 00	0.9897E 00
10	0.000	0.372	0.372	1100.72	0.1697E 03	0.1783E 03	0.9097E 00	0.9461E 00

Aantal stappen, X = 200

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.024	0.024	838.48	0.4910E 02	0.2793E 02	0.5421E 01	0.3670E 01
2	0.000	0.073	0.073	935.85	0.5944E 02	0.4655E 02	0.1891E 01	0.1486E 01
3	0.000	0.122	0.122	984.89	0.7510E 02	0.6657E 02	0.1352E 01	0.1183E 01
4	0.000	0.171	0.171	1018.60	0.9361E 02	0.8742E 02	0.1178E 01	0.1092E 01
5	0.000	0.220	0.220	1044.52	0.1137E 03	0.1089E 03	0.1104E 01	0.1054E 01
6	0.000	0.269	0.269	1065.69	0.1347E 03	0.1308E 03	0.1065E 01	0.1035E 01
7	0.000	0.318	0.318	1083.65	0.1562E 03	0.1532E 03	0.1037E 01	0.1022E 01
8	0.000	0.367	0.367	1099.26	0.1772E 03	0.1759E 03	0.1007E 01	0.1008E 01
9	0.000	0.416	0.416	1113.11	0.1962E 03	0.1989E 03	0.9627E 00	0.9849E 00
10	0.000	0.465	0.465	1125.56	0.2094E 03	0.2222E 03	0.8955E 00	0.9365E 00

Het materiaal is TI-ZUIVER

Rho = 4510.0 kg/m**3
 S.W. = 523.0 J/kg*K
 C = 1215.0 N/mm**2
 n = 0.1000
 Lam = 16.00 w/m*K
 De straal van de torsiestaaft, R = 0.3170E 01 mm
 Totale tijd, Ttot = 0.054 s
 Aantal segmenten = 10
 Aantal stappen = 200
 Begin temperatuur, To = 20 C
 Totale $\dot{\epsilon}$ = 0.4900E 00
 Reksnelheid = 0.9000E 01 s-1

Aantal stappen, X = 40

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Tj-20 Taj-20
1	0.000	0.005	0.005	713.83	0.2310E 02	0.2136E 02	0.3250E 01	0.2287E 01
2	0.000	0.015	0.015	796.72	0.2542E 02	0.2454E 02	0.1371E 01	0.1194E 01
3	0.000	0.024	0.024	835.48	0.2851E 02	0.2796E 02	0.1133E 01	0.1067E 01
4	0.000	0.034	0.034	867.17	0.3193E 02	0.3153E 02	0.1066E 01	0.1034E 01
5	0.000	0.044	0.044	889.24	0.3552E 02	0.3520E 02	0.1040E 01	0.1021E 01
6	0.000	0.054	0.054	907.27	0.3922E 02	0.3896E 02	0.1026E 01	0.1014E 01
7	0.000	0.064	0.064	922.50	0.4300E 02	0.4278E 02	0.1018E 01	0.1010E 01
8	0.000	0.073	0.073	935.85	0.4683E 02	0.4667E 02	0.1010E 01	0.1006E 01
9	0.000	0.083	0.083	947.63	0.5065E 02	0.5060E 02	0.9927E 00	0.9984E 00
10	0.000	0.093	0.093	958.23	0.5353E 02	0.5458E 02	0.9464E 00	0.9695E 00

Aantal stappen, X = 80

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Tj-20 Taj-20
1	0.000	0.010	0.010	765.07	0.2937E 02	0.2290E 02	0.4744E 01	0.3231E 01
2	0.000	0.029	0.029	853.91	0.3345E 02	0.2971E 02	0.1719E 01	0.1386E 01
3	0.000	0.049	0.049	898.66	0.3945E 02	0.3703E 02	0.1276E 01	0.1142E 01
4	0.000	0.069	0.069	929.41	0.4640E 02	0.4465E 02	0.1138E 01	0.1071E 01
5	0.000	0.088	0.088	953.07	0.5387E 02	0.5250E 02	0.1081E 01	0.1042E 01
6	0.000	0.108	0.108	972.38	0.6165E 02	0.6053E 02	0.1052E 01	0.1028E 01
7	0.000	0.127	0.127	988.77	0.6959E 02	0.6870E 02	0.1032E 01	0.1018E 01
8	0.000	0.147	0.147	1003.02	0.7749E 02	0.7701E 02	0.1010E 01	0.1008E 01
9	0.000	0.167	0.167	1015.65	0.8478E 02	0.8542E 02	0.9739E 00	0.9902E 00
10	0.000	0.186	0.186	1027.01	0.9001E 02	0.9374E 02	0.9110E 00	0.9469E 00

Aantal stappen, X = 120

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Tj-20 Taj-20
1	0.000	0.015	0.015	796.72	0.3810E 02	0.2452E 02	0.5928E 01	0.4000E 01
2	0.000	0.044	0.044	889.24	0.4368E 02	0.3515E 02	0.2024E 01	0.1563E 01
3	0.000	0.073	0.073	935.85	0.5231E 02	0.4657E 02	0.1413E 01	0.1216E 01
4	0.000	0.103	0.103	967.87	0.6265E 02	0.5847E 02	0.1210E 01	0.1109E 01
5	0.000	0.132	0.132	992.50	0.7396E 02	0.7072E 02	0.1123E 01	0.1064E 01
6	0.000	0.162	0.162	1012.62	0.8583E 02	0.8325E 02	0.1075E 01	0.1041E 01
7	0.000	0.191	0.191	1029.68	0.9790E 02	0.9601E 02	0.1040E 01	0.1025E 01
8	0.000	0.220	0.220	1044.52	0.1097E 03	0.1090E 03	0.1004E 01	0.1008E 01
9	0.000	0.250	0.250	1057.69	0.1201E 03	0.1221E 03	0.9542E 00	0.9806E 00
10	0.000	0.279	0.279	1069.51	0.1272E 03	0.1354E 03	0.8842E 00	0.9288E 00

Aantal stappen, X = 160

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Tj-20 Taj-20
1	0.000	0.020	0.020	819.98	0.4896E 02	0.2620E 02	0.6942E 01	0.4667E 01
2	0.000	0.059	0.059	915.20	0.5587E 02	0.4078E 02	0.2296E 01	0.1727E 01
3	0.000	0.098	0.098	963.16	0.6692E 02	0.5644E 02	0.1542E 01	0.1288E 01
4	0.000	0.137	0.137	996.12	0.8047E 02	0.7276E 02	0.1281E 01	0.1146E 01
5	0.000	0.176	0.176	1021.47	0.9550E 02	0.8957E 02	0.1162E 01	0.1085E 01
6	0.000	0.216	0.216	1042.18	0.1113E 03	0.1067E 03	0.1095E 01	0.1053E 01
7	0.000	0.255	0.255	1059.73	0.1274E 03	0.1242E 03	0.1045E 01	0.1030E 01
8	0.000	0.294	0.294	1075.01	0.1427E 03	0.1420E 03	0.9957E 00	0.1006E 01
9	0.000	0.333	0.333	1088.55	0.1560E 03	0.1600E 03	0.9367E 00	0.9709E 00
10	0.000	0.372	0.372	1100.72	0.1646E 03	0.1783E 03	0.8623E 00	0.9136E 00

Aantal stappen, X = 200

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Tj-20 Taj-20
1	0.000	0.024	0.024	838.48	0.6174E 02	0.2793E 02	0.7842E 01	0.5264E 01
2	0.000	0.073	0.073	935.85	0.6987E 02	0.4655E 02	0.2543E 01	0.1879E 01
3	0.000	0.122	0.122	984.89	0.8316E 02	0.6657E 02	0.1662E 01	0.1356E 01
4	0.000	0.171	0.171	1018.60	0.9744E 02	0.8742E 02	0.1346E 01	0.1183E 01
5	0.000	0.220	0.220	1044.52	0.1183E 03	0.1089E 03	0.1198E 01	0.1106E 01
6	0.000	0.269	0.269	1065.69	0.1379E 03	0.1308E 03	0.1111E 01	0.1064E 01
7	0.000	0.318	0.318	1083.65	0.1577E 03	0.1532E 03	0.1047E 01	0.1033E 01
8	0.000	0.367	0.367	1099.26	0.1763E 03	0.1759E 03	0.9872E 00	0.1003E 01
9	0.000	0.416	0.416	1113.11	0.1921E 03	0.1989E 03	0.9209E 00	0.9617E 00
10	0.000	0.465	0.465	1125.56	0.2021E 03	0.2222E 03	0.8439E 00	0.9003E 00

Het materiaal is AL51GT

Rho = 2700.0 kg/m**3

S.W. = 960.0 J/kg*K

C = 430.0 N/mm**2

n = 0.0700

Lam = 160.00 w/m*K

De straal van de torsiestaaft, R = 0.3170E 01 mm

Totale tijd, Ttot = 0.007 s

Aantal segmenten = 10

Aantal stappen = 200

Begin temperatuur, T0 = 20 C

Totale rek = 0.1200E 00

Reksnelheid = 0.1770E 02 s-1

Aantal stappen, X = 40

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.001	0.001	268.54	0.2026E 02	0.2012E 02	0.3392E 01	0.2366E 01
2	0.000	0.004	0.004	290.01	0.2046E 02	0.2038E 02	0.1411E 01	0.1212E 01
3	0.000	0.006	0.006	300.57	0.2070E 02	0.2065E 02	0.1149E 01	0.1075E 01
4	0.000	0.008	0.008	307.73	0.2097E 02	0.2094E 02	0.1074E 01	0.1038E 01
5	0.000	0.011	0.011	313.19	0.2125E 02	0.2122E 02	0.1044E 01	0.1023E 01
6	0.000	0.013	0.013	317.62	0.2154E 02	0.2152E 02	0.1029E 01	0.1015E 01
7	0.000	0.016	0.016	321.54	0.2183E 02	0.2182E 02	0.1020E 01	0.1010E 01
8	0.000	0.018	0.018	324.59	0.2213E 02	0.2212E 02	0.1010E 01	0.1006E 01
9	0.000	0.020	0.020	327.45	0.2241E 02	0.2242E 02	0.9900E 00	0.9974E 00
10	0.000	0.022	0.022	330.01	0.2263E 02	0.2272E 02	0.9411E 00	0.9666E 00

Aantal stappen, X = 80

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.002	0.002	281.89	0.2082E 02	0.2024E 02	0.4915E 01	0.3334E 01
2	0.000	0.007	0.007	304.43	0.2112E 02	0.2079E 02	0.1786E 01	0.1420E 01
3	0.000	0.012	0.012	315.51	0.2156E 02	0.2137E 02	0.1306E 01	0.1156E 01
4	0.000	0.017	0.017	323.03	0.2211E 02	0.2196E 02	0.1154E 01	0.1078E 01
5	0.000	0.022	0.022	328.76	0.2268E 02	0.2257E 02	0.1090E 01	0.1046E 01
6	0.000	0.026	0.026	333.41	0.2328E 02	0.2318E 02	0.1057E 01	0.1030E 01
7	0.000	0.031	0.031	337.33	0.2388E 02	0.2380E 02	0.1033E 01	0.1019E 01
8	0.000	0.036	0.036	340.73	0.2447E 02	0.2443E 02	0.1007E 01	0.1008E 01
9	0.000	0.041	0.041	343.73	0.2501E 02	0.2507E 02	0.9676E 00	0.9875E 00
10	0.000	0.046	0.046	346.41	0.2538E 02	0.2571E 02	0.9035E 00	0.9426E 00

Aantal stappen, X = 120

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.004	0.004	290.01	0.2155E 02	0.2038E 02	0.6108E 01	0.4112E 01
2	0.000	0.011	0.011	313.19	0.2196E 02	0.2122E 02	0.2109E 01	0.1608E 01
3	0.000	0.018	0.018	324.59	0.2261E 02	0.2211E 02	0.1456E 01	0.1237E 01
4	0.000	0.025	0.025	332.33	0.2339E 02	0.2302E 02	0.1234E 01	0.1119E 01
5	0.000	0.032	0.032	338.23	0.2423E 02	0.2396E 02	0.1135E 01	0.1070E 01
6	0.000	0.040	0.040	343.01	0.2512E 02	0.2491E 02	0.1081E 01	0.1044E 01
7	0.000	0.047	0.047	347.04	0.2602E 02	0.2587E 02	0.1041E 01	0.1026E 01
8	0.000	0.054	0.054	350.54	0.2688E 02	0.2684E 02	0.9994E 00	0.1006E 01
9	0.000	0.061	0.061	353.62	0.2763E 02	0.2782E 02	0.9462E 00	0.9766E 00
10	0.000	0.068	0.068	356.39	0.2813E 02	0.2880E 02	0.8754E 00	0.9235E 00

Aantal stappen, X = 160

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.005	0.005	295.91	0.2245E 02	0.2051E 02	0.7123E 01	0.4782E 01
2	0.000	0.014	0.014	319.56	0.2296E 02	0.2166E 02	0.2394E 01	0.1780E 01
3	0.000	0.024	0.024	331.19	0.2377E 02	0.2287E 02	0.1595E 01	0.1314E 01
4	0.000	0.034	0.034	339.09	0.2477E 02	0.2411E 02	0.1310E 01	0.1160E 01
5	0.000	0.043	0.043	345.11	0.2588E 02	0.2538E 02	0.1177E 01	0.1093E 01
6	0.000	0.053	0.053	349.99	0.2705E 02	0.2667E 02	0.1101E 01	0.1056E 01
7	0.000	0.062	0.062	354.10	0.2822E 02	0.2798E 02	0.1044E 01	0.1030E 01
8	0.000	0.072	0.072	357.67	0.2933E 02	0.2930E 02	0.9896E 00	0.1003E 01
9	0.000	0.082	0.082	360.82	0.3027E 02	0.3063E 02	0.9272E 00	0.9659E 00
10	0.000	0.091	0.091	363.64	0.3087E 02	0.3197E 02	0.8526E 00	0.9076E 00

Aantal stappen, X = 200

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.006	0.006	300.57	0.2350E 02	0.2065E 02	0.8017E 01	0.5378E 01
2	0.000	0.018	0.018	324.59	0.2409E 02	0.2211E 02	0.2649E 01	0.1939E 01
3	0.000	0.030	0.030	336.41	0.2505E 02	0.2364E 02	0.1722E 01	0.1388E 01
4	0.000	0.042	0.042	344.43	0.2626E 02	0.2522E 02	0.1380E 01	0.1200E 01
5	0.000	0.054	0.054	350.54	0.2762E 02	0.2683E 02	0.1215E 01	0.1115E 01
6	0.000	0.066	0.066	355.50	0.2904E 02	0.2847E 02	0.1117E 01	0.1068E 01
7	0.000	0.078	0.078	359.68	0.3046E 02	0.3013E 02	0.1045E 01	0.1033E 01
8	0.000	0.090	0.090	363.30	0.3179E 02	0.3180E 02	0.9798E 00	0.9992E 00
9	0.000	0.102	0.102	366.50	0.3290E 02	0.3349E 02	0.9105E 00	0.9558E 00
10	0.000	0.114	0.114	369.36	0.3358E 02	0.3520E 02	0.8336E 00	0.8938E 00

Het materiaal is AL51ST

Rho = 2700.0 kg/m**3

S.W. = 960.0 J/kg*K

C = 430.0 N/mm**2

n = 0.0700

Lam = 160.00 w/m*K

De straal van de torsiestaafl. R = 0.3170E 01 mm

Totale tijd, Ttot = 0.014 s

Aantal segmenten = 10

Aantal stappen = 200

Begin temperatuur, To = 20 C

Totale rek = 0.1320E 00

Reksnelheid = 0.9000E 01 s-1

Aantal stappen, X = 40

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.001	0.001	270.05	0.2044E 02	0.2013E 02	0.5060E 01	0.3427E 01
2	0.000	0.004	0.004	291.64	0.2059E 02	0.2041E 02	0.1823E 01	0.1441E 01
3	0.000	0.006	0.006	302.25	0.2083E 02	0.2071E 02	0.1323E 01	0.1165E 01
4	0.000	0.009	0.009	309.46	0.2110E 02	0.2102E 02	0.1162E 01	0.1082E 01
5	0.000	0.012	0.012	314.95	0.2140E 02	0.2133E 02	0.1095E 01	0.1049E 01
6	0.000	0.014	0.014	319.41	0.2171E 02	0.2165E 02	0.1060E 01	0.1032E 01
7	0.000	0.017	0.017	323.16	0.2202E 02	0.2198E 02	0.1035E 01	0.1020E 01
8	0.000	0.019	0.019	326.42	0.2232E 02	0.2230E 02	0.1007E 01	0.1008E 01
9	0.000	0.022	0.022	329.29	0.2260E 02	0.2264E 02	0.9652E 00	0.9864E 00
10	0.000	0.025	0.025	331.86	0.2279E 02	0.2297E 02	0.9000E 00	0.9403E 00

Aantal stappen, X = 80

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.003	0.003	283.49	0.2131E 02	0.2027E 02	0.7350E 01	0.4932E 01
2	0.000	0.008	0.008	306.14	0.2157E 02	0.2036E 02	0.2458E 01	0.1820E 01
3	0.000	0.013	0.013	317.28	0.2199E 02	0.2149E 02	0.1627E 01	0.1332E 01
4	0.000	0.018	0.018	324.84	0.2250E 02	0.2214E 02	0.1327E 01	0.1170E 01
5	0.000	0.023	0.023	330.61	0.2307E 02	0.2280E 02	0.1187E 01	0.1098E 01
6	0.000	0.029	0.029	335.28	0.2367E 02	0.2347E 02	0.1105E 01	0.1059E 01
7	0.000	0.034	0.034	339.23	0.2427E 02	0.2414E 02	0.1045E 01	0.1031E 01
8	0.000	0.039	0.039	342.64	0.2484E 02	0.2483E 02	0.9872E 00	0.1002E 01
9	0.000	0.044	0.044	345.66	0.2532E 02	0.2552E 02	0.9229E 00	0.9634E 00
10	0.000	0.049	0.049	348.36	0.2562E 02	0.2622E 02	0.8477E 00	0.9041E 00

Aantal stappen, X = 120

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.004	0.004	291.64	0.2251E 02	0.2041E 02	0.9096E 01	0.6110E 01
2	0.000	0.012	0.012	314.95	0.2285E 02	0.2133E 02	0.2959E 01	0.2138E 01
3	0.000	0.019	0.019	326.42	0.2341E 02	0.2230E 02	0.1877E 01	0.1482E 01
4	0.000	0.027	0.027	334.19	0.2412E 02	0.2330E 02	0.1466E 01	0.1251E 01
5	0.000	0.035	0.035	340.13	0.2493E 02	0.2431E 02	0.1260E 01	0.1143E 01
6	0.000	0.043	0.043	344.94	0.2578E 02	0.2534E 02	0.1136E 01	0.1081E 01
7	0.000	0.051	0.051	348.99	0.2662E 02	0.2639E 02	0.1045E 01	0.1036E 01
8	0.000	0.058	0.058	352.51	0.2740E 02	0.2745E 02	0.9671E 00	0.9933E 00
9	0.000	0.066	0.066	355.61	0.2803E 02	0.2852E 02	0.8907E 00	0.9431E 00
10	0.000	0.074	0.074	358.39	0.2842E 02	0.2959E 02	0.8116E 00	0.8774E 00

Aantal stappen, X = 160

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.005	0.005	297.57	0.2396E 02	0.2056E 02	0.1049E 02	0.7097E 01
2	0.000	0.016	0.016	321.36	0.2436E 02	0.2181E 02	0.3360E 01	0.2412E 01
3	0.000	0.026	0.026	333.06	0.2505E 02	0.2313E 02	0.2078E 01	0.1615E 01
4	0.000	0.036	0.036	340.99	0.2593E 02	0.2448E 02	0.1576E 01	0.1323E 01
5	0.000	0.047	0.047	347.04	0.2693E 02	0.2586E 02	0.1317E 01	0.1182E 01
6	0.000	0.057	0.057	351.95	0.2799E 02	0.2727E 02	0.1158E 01	0.1099E 01
7	0.000	0.068	0.068	356.09	0.2902E 02	0.2869E 02	0.1044E 01	0.1038E 01
8	0.000	0.078	0.078	359.68	0.2997E 02	0.3013E 02	0.9503E 00	0.9840E 00
9	0.000	0.088	0.088	362.84	0.3072E 02	0.3158E 02	0.8659E 00	0.9257E 00
10	0.000	0.099	0.099	365.68	0.3117E 02	0.3304E 02	0.7848E 00	0.8562E 00

Aantal stappen, X = 200

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.006	0.006	302.25	0.2363E 02	0.2071E 02	0.1160E 02	0.7942E 01
2	0.000	0.019	0.019	326.42	0.2609E 02	0.2230E 02	0.3679E 01	0.2649E 01
3	0.000	0.032	0.032	338.30	0.2687E 02	0.2397E 02	0.2237E 01	0.1731E 01
4	0.000	0.045	0.045	346.36	0.2789E 02	0.2569E 02	0.1662E 01	0.1387E 01
5	0.000	0.058	0.058	352.51	0.2905E 02	0.2744E 02	0.1361E 01	0.1216E 01
6	0.000	0.071	0.071	357.49	0.3027E 02	0.2923E 02	0.1174E 01	0.1113E 01
7	0.000	0.084	0.084	361.70	0.3147E 02	0.3103E 02	0.1041E 01	0.1039E 01
8	0.000	0.097	0.097	365.34	0.3254E 02	0.3286E 02	0.9369E 00	0.9754E 00
9	0.000	0.110	0.110	368.56	0.3339E 02	0.3470E 02	0.8468E 00	0.9108E 00
10	0.000	0.123	0.123	371.44	0.3389E 02	0.3656E 02	0.7643E 00	0.8387E 00

Het materiaal is AL51GT

Rho = 2700.0 kg/m**3
 S.W. = 960.0 J/kg*K
 C = 430.0 N/mm**2
 n = 0.0700
 Lam = 160.00 w/m*K
 De straal van de torsiestaaf, R = 0.3170E 01 mm
 Totale tijd, Ttot = 0.020 s
 Aantal segmenten = 10
 Aantal stappen = 200
 Begin temperatuur, Ta = 20 C
 Totale rek = 0.1200E 00
 Reksnelheid = 0.6000E 01 s-1

Aantal stappen, X = 40

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.001	0.001	268.54	0.2047E 02	0.2012E 02	0.6017E 01	0.4051E 01
2	0.000	0.004	0.004	290.01	0.2050E 02	0.2038E 02	0.2083E 01	0.1592E 01
3	0.000	0.006	0.006	300.57	0.2080E 02	0.2065E 02	0.1444E 01	0.1229E 01
4	0.000	0.008	0.008	307.73	0.2104E 02	0.2094E 02	0.1227E 01	0.1115E 01
5	0.000	0.011	0.011	313.19	0.2131E 02	0.2122E 02	0.1131E 01	0.1068E 01
6	0.000	0.013	0.013	317.62	0.2158E 02	0.2152E 02	0.1079E 01	0.1043E 01
7	0.000	0.015	0.015	321.36	0.2166E 02	0.2182E 02	0.1041E 01	0.1025E 01
8	0.000	0.018	0.018	324.59	0.2213E 02	0.2212E 02	0.1000E 01	0.1007E 01
9	0.000	0.020	0.020	327.45	0.2236E 02	0.2242E 02	0.9480E 00	0.9776E 00
10	0.000	0.023	0.023	330.01	0.2252E 02	0.2272E 02	0.8774E 00	0.9250E 00

Aantal stappen, X = 80

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.002	0.002	281.89	0.2143E 02	0.2024E 02	0.8719E 01	0.5850E 01
2	0.000	0.007	0.007	304.43	0.2164E 02	0.2079E 02	0.2850E 01	0.2067E 01
3	0.000	0.012	0.012	315.51	0.2198E 02	0.2137E 02	0.1823E 01	0.1448E 01
4	0.000	0.017	0.017	323.03	0.2242E 02	0.2196E 02	0.1436E 01	0.1232E 01
5	0.000	0.022	0.022	328.76	0.2291E 02	0.2257E 02	0.1245E 01	0.1133E 01
6	0.000	0.026	0.026	333.41	0.2342E 02	0.2318E 02	0.1130E 01	0.1077E 01
7	0.000	0.031	0.031	337.33	0.2394E 02	0.2380E 02	0.1046E 01	0.1035E 01
8	0.000	0.036	0.036	340.73	0.2441E 02	0.2443E 02	0.9716E 00	0.9956E 00
9	0.000	0.041	0.041	343.73	0.2480E 02	0.2507E 02	0.8975E 00	0.9477E 00
10	0.000	0.046	0.046	346.41	0.2504E 02	0.2571E 02	0.8191E 00	0.8831E 00

Aantal stappen, X = 120

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.004	0.004	290.01	0.2273E 02	0.2038E 02	0.1067E 02	0.7230E 01
2	0.000	0.011	0.011	313.19	0.2299E 02	0.2122E 02	0.3412E 01	0.2449E 01
3	0.000	0.018	0.018	324.59	0.2345E 02	0.2211E 02	0.2104E 01	0.1633E 01
4	0.000	0.025	0.025	332.33	0.2403E 02	0.2302E 02	0.1590E 01	0.1333E 01
5	0.000	0.032	0.032	338.23	0.2470E 02	0.2396E 02	0.1324E 01	0.1188E 01
6	0.000	0.040	0.040	343.01	0.2540E 02	0.2491E 02	0.1160E 01	0.1101E 01
7	0.000	0.047	0.047	347.04	0.2609E 02	0.2587E 02	0.1043E 01	0.1039E 01
8	0.000	0.054	0.054	350.54	0.2672E 02	0.2684E 02	0.9481E 00	0.9827E 00
9	0.000	0.061	0.061	353.62	0.2722E 02	0.2782E 02	0.8627E 00	0.9234E 00
10	0.000	0.068	0.068	356.39	0.2751E 02	0.2880E 02	0.7813E 00	0.8533E 00

Aantal stappen, X = 160

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.005	0.005	295.91	0.2422E 02	0.2051E 02	0.1210E 02	0.8345E 01
2	0.000	0.014	0.014	319.56	0.2459E 02	0.2166E 02	0.3822E 01	0.2763E 01
3	0.000	0.024	0.024	331.19	0.2513E 02	0.2287E 02	0.2308E 01	0.1787E 01
4	0.000	0.034	0.034	339.09	0.2583E 02	0.2411E 02	0.1700E 01	0.1417E 01
5	0.000	0.043	0.043	345.11	0.2653E 02	0.2538E 02	0.1380E 01	0.1232E 01
6	0.000	0.053	0.053	349.99	0.2747E 02	0.2667E 02	0.1180E 01	0.1120E 01
7	0.000	0.062	0.062	354.10	0.2829E 02	0.2798E 02	0.1040E 01	0.1039E 01
8	0.000	0.072	0.072	357.67	0.2903E 02	0.2930E 02	0.9309E 00	0.9711E 00
9	0.000	0.082	0.082	360.82	0.2961E 02	0.3063E 02	0.8383E 00	0.9038E 00
10	0.000	0.091	0.091	363.64	0.2994E 02	0.3197E 02	0.7553E 00	0.8305E 00

Aantal stappen, X = 200

N	Eo	Rek	Etot	Spanning	Temp.	Temp. g. gel	Tj-Tj-1	
							Taj-Taj-1	Taj-20
1	0.000	0.006	0.006	300.57	0.2603E 02	0.2065E 02	0.1313E 02	0.9260E 01
2	0.000	0.018	0.018	324.59	0.2637E 02	0.2211E 02	0.4118E 01	0.3021E 01
3	0.000	0.030	0.030	336.41	0.2697E 02	0.2364E 02	0.2455E 01	0.1914E 01
4	0.000	0.042	0.042	344.43	0.2776E 02	0.2522E 02	0.1779E 01	0.1486E 01
5	0.000	0.054	0.054	350.54	0.2856E 02	0.2693E 02	0.1419E 01	0.1268E 01
6	0.000	0.066	0.066	355.50	0.2961E 02	0.2847E 02	0.1194E 01	0.1134E 01
7	0.000	0.078	0.078	359.68	0.3052E 02	0.3013E 02	0.1038E 01	0.1039E 01
8	0.000	0.090	0.090	363.30	0.3134E 02	0.3180E 02	0.9185E 00	0.9611E 00
9	0.000	0.102	0.102	366.50	0.3198E 02	0.3349E 02	0.8210E 00	0.8879E 00
10	0.000	0.114	0.114	369.36	0.3235E 02	0.3520E 02	0.7370E 00	0.8125E 00

Bijlage 7.

* Voorspelling van de "instabiliteitsrekken"

* Voorspelling van de "instabiliteitsrek" bij Ti 6 Al 4V

§ Manier 1 (met C_1 en n_1)

$$\text{Criterium: } \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial T} \right)_{\bar{\epsilon}, \bar{E}} \approx - \frac{\rho \cdot s.w.}{\alpha} \cdot \frac{n}{\bar{E}_k} \quad (9.)$$

• linksterm

$$\text{bij } 20^\circ\text{C: } C = 1225 \cdot 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]} \quad \text{en } n = 0.067 \text{ [-]}$$

$$\text{bij } 85^\circ\text{C: } C_1 = 1165 \cdot 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]} \quad \text{en } n_1 = 0.115 \text{ [-]}$$

De benadering van de differentiaalterm wordt hiermee:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial T} \right)_{\bar{\epsilon}, \bar{E}} &= \frac{1165 \cdot 10^6 \cdot \bar{E}^{0.115} - 1225 \cdot 10^6 \cdot \bar{E}^{0.067}}{85 - 20} \\ &= 17.9231 \cdot 10^6 \cdot \bar{E}^{0.115} - 18.8462 \cdot 10^6 \cdot \bar{E}^{0.067} \quad \text{[N/m}^2\text{K]} \end{aligned}$$

• rechterterm

$$\rho = 4430 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$s.w. = 565 \text{ [J/kgK]}$$

$$n = 0.067 \text{ [-]}$$

$$\alpha_R = 1$$

$$\begin{aligned} - \frac{\rho \cdot s.w.}{\alpha_R} \cdot \frac{n}{\bar{E}} &= - \frac{4430 \cdot 565}{1} \cdot \frac{0.067}{\bar{E}} \\ &= - \frac{0.1677 \cdot 10^6}{\bar{E}} \quad \text{[N/m}^2\text{K]} \end{aligned}$$

Zetten we de beide termen in één grafiek uit, (grafiek op pag. 7.3)
dan vinden we voor het snijpunt:

$$\bar{E}_{k,1} = 0.065 \quad \text{[-]}$$

* Voorspelling van de "instabiliteitsvekt" bij Ti 6Al4V

§ Manier 2 (met C_2 en n_2)

$$\text{Criterium: } \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial T} \right)_{\bar{\epsilon}, \bar{E}} \approx - \frac{\rho \cdot s.w.}{\alpha} \cdot \frac{n}{\bar{E}_k} \quad (9.)$$

• Lineairterm

bij 20°C : $C = 1225 \cdot 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]} \text{ en } n = 0.067 \text{ [-]}$

bij 85°C : $C_2 = 1141 \cdot 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]} \text{ en } n_2 = 0.067 \text{ [-]}$

De benadering van de differentiaalterm wordt hiermee:

$$\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial T} \right)_{\bar{\epsilon}, \bar{E}} \approx \frac{1141 \cdot 10^6 \bar{E}^{0.067} - 1225 \cdot 10^6 \bar{E}^{0.067}}{85 - 20}$$

$$= - \frac{84}{65} \cdot 10^6 \cdot \bar{E}^{0.067} = - 1.2923 \cdot 10^6 \cdot \bar{E}^{0.067} \text{ [N/m}^2\text{K]}$$

• rechterm

$$\rho = 4430 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$s.w. = 565 \text{ [J/kgK]}$$

$$n = 0.067 \text{ [-]}$$

$$\alpha_r = 1$$

$$- \frac{\rho \cdot s.w.}{\alpha_r} \cdot \frac{n}{\bar{E}} = - \frac{4430 \cdot 565}{1} \cdot \frac{0.067}{\bar{E}}$$

$$= - \frac{0.1677 \cdot 10^6}{\bar{E}} \text{ [N/m}^2\text{K]}$$

In dit geval is een analytische oplossing mogelijk:

$$- 1.2923 \cdot 10^6 \cdot \bar{E}_{k2}^{0.067} = - \frac{0.1677 \cdot 10^6}{\bar{E}_{k2}}$$

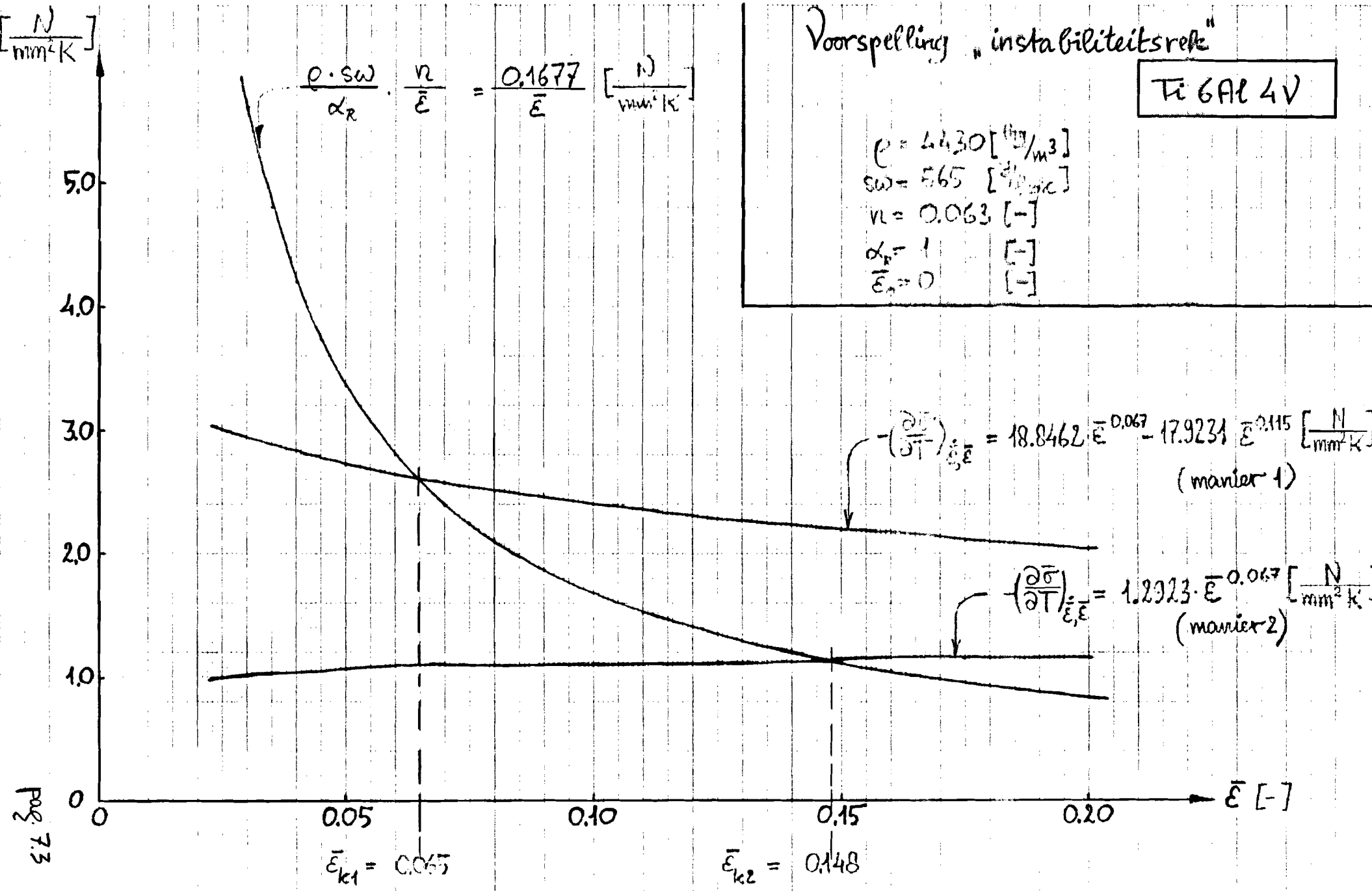
$$\text{oplossing: } \bar{E}_{k2}^{1.067} = \frac{0.1677}{1.2923} \quad ; \quad \bar{E}_{k2} = \left(\frac{0.1677}{1.2923} \right)^{\frac{1}{1.067}}$$

$$\boxed{\bar{E}_{k2} = 0.148} \text{ [-]} \text{ (zie ook grafiek op pag. 7.)}$$

Voorspelling "instabiliteitsreik"

Ti 6Al 4V

- $\rho = 4430 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
- $sw = 565 \text{ [}^\circ\text{C}^2\text{]}$
- $\nu = 0.063 \text{ [-]}$
- $\alpha_R = 1 \text{ [-]}$
- $\bar{\epsilon}_0 = 0 \text{ [-]}$



* Voorspelling van de instabiliteitsrek bij Ti-zuiver

$$\text{Criterium: } \left(\frac{\partial \bar{S}}{\partial T} \right)_{\bar{E}, \bar{E}} = - \frac{\rho \cdot s.w.}{\alpha} \cdot \frac{n}{\bar{E}_k} \quad (9)$$

• linkerterm

bij 20 °C: $C = 1213 \cdot 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]} \text{ en } n = 0.099 \text{ [-]}$

bij 175 °C: $C = 1140 \cdot 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]} \text{ en } n = 0.120 \text{ [-]}$

De benadering van de differentiaalterm wordt hiermee:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \bar{S}}{\partial T} \right)_{\bar{E}, \bar{E}} &\approx \frac{1140 \cdot 10^6 \bar{E}^{0.120} - 1213 \cdot 10^6 \bar{E}^{0.099}}{175 - 20} \\ &= 6.5143 \cdot 10^6 \bar{E}^{0.120} - 6.9314 \cdot 10^6 \bar{E}^{0.099} \quad \text{[N/m}^2\text{K]} \end{aligned}$$

• rechterterm, voor drie waarden van α_R

$\rho = 4510 \text{ [kg/m}^3\text{]} ; s.w. = 523 \text{ [J/kgK]} ; n = 0.099 \text{ [-]}$

$$\alpha_R = 1 \quad : - \frac{\rho \cdot s.w. \cdot n}{\alpha_R \cdot \bar{E}} = - \frac{4510 \cdot 523 \cdot 0.099}{1 \cdot \bar{E}} = - \frac{0.2335 \cdot 10^6}{\bar{E}} \quad \text{[N/m}^2\text{K]}$$

$$\alpha_R = 0.937 \quad : - \frac{\rho \cdot s.w. \cdot n}{\alpha_R \cdot \bar{E}} = - \frac{4510 \cdot 523 \cdot 0.099}{0.937 \cdot \bar{E}} = - \frac{0.2492 \cdot 10^6}{\bar{E}} \quad \text{[N/m}^2\text{K]}$$

$$\alpha_R = 0.900 \quad : - \frac{\rho \cdot s.w. \cdot n}{\alpha_R \cdot \bar{E}} = - \frac{4510 \cdot 523 \cdot 0.099}{0.900 \cdot \bar{E}} = - \frac{0.2594 \cdot 10^6}{\bar{E}} \quad \text{[N/m}^2\text{K]}$$

Zetten we de linkerterm en het drietal rechtertermen in één grafiek uit (grafiek op pag. 7.5), dan vinden we als snijpunten respectievelijk:

$\bar{E}_k = 0.49$	[-]	($\alpha_R = 1$)
$\bar{E}_k = 0.53$	[-]	($\alpha_R = 0.937$)
$\bar{E}_k = 0.55$	[-]	($\alpha_R = 0.900$)

$\left[\frac{N}{\text{mm}^2 \text{K}} \right]$

Voorspelling "instabiliteitsrel."

Ti-zuiver

$\rho = 4510 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$
 $S_{01} = 5115 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$
 $n = 2092 \left[\text{mm} \right]$
 $\bar{\epsilon}_0 = 0 \quad [-]$

$\frac{\rho \cdot S_{01}}{\alpha_R} \cdot \frac{n}{\bar{\epsilon}} = \frac{0.2335}{\bar{\epsilon}} \left[\frac{N}{\text{mm}^2 \text{K}} \right]$
 $(\alpha_R = 1)$

$\frac{0.2492}{\bar{\epsilon}} \left[\frac{N}{\text{mm}^2 \text{K}} \right] (\alpha_R = 0.937)$

$\frac{0.2594}{\bar{\epsilon}} \left[\frac{N}{\text{mm}^2 \text{K}} \right] (\alpha_R = 0.900)$

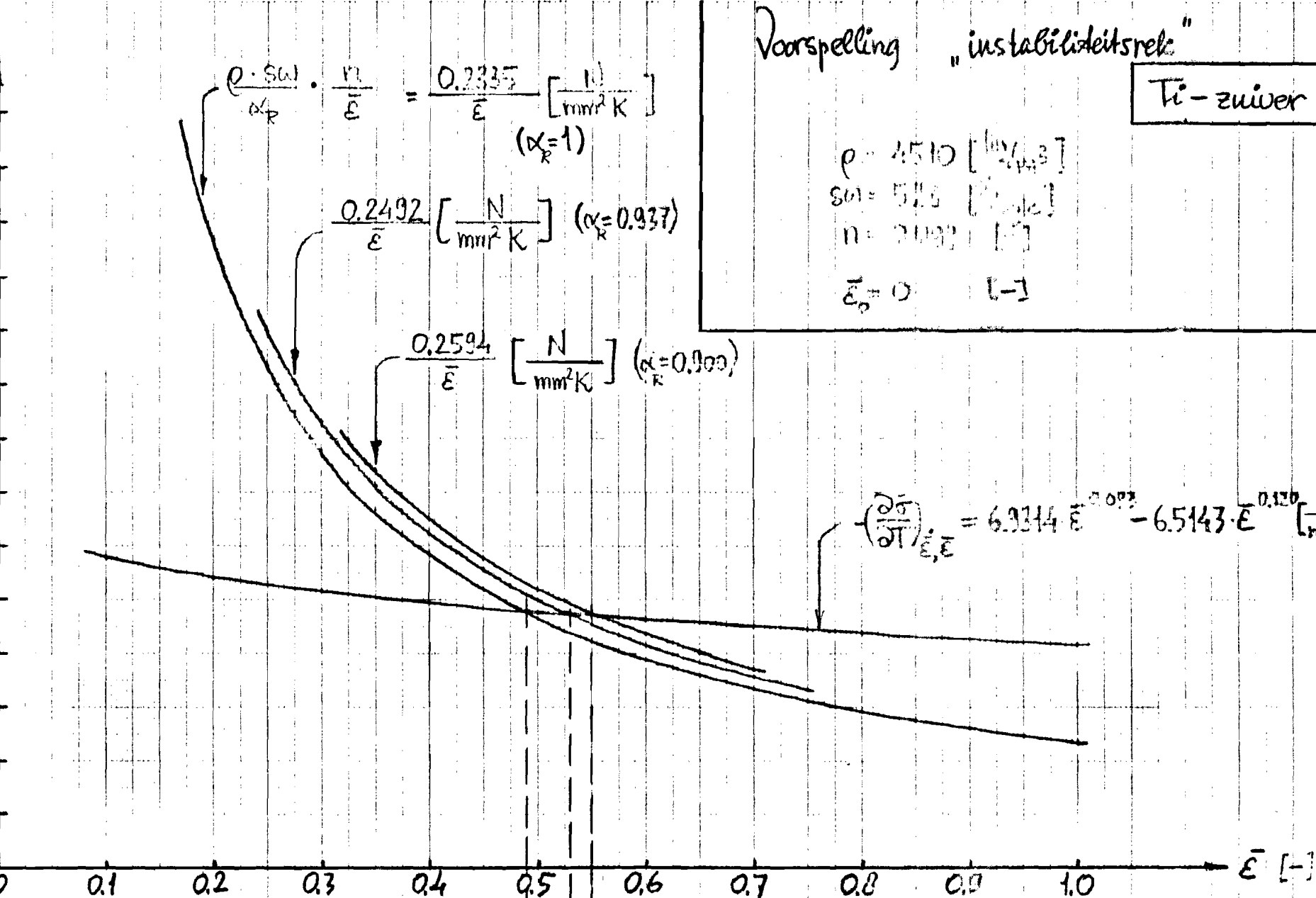
$\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial T} \right)_{\bar{\epsilon}, \bar{\epsilon}} = 6.9314 \bar{\epsilon}^{-0.097} - 6.5143 \bar{\epsilon}^{-0.120} \left[\frac{N}{\text{mm}^2 \text{K}} \right]$

pag. 75

1.3
1.2
1.1
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0

0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 $\bar{\epsilon} [-]$

$\bar{\epsilon}_K = \begin{cases} 0.49 & 0.55 \\ 0.53 \end{cases}$



* Voorspelling van de instabiliteitsrek bij RE 51 ST

$$\text{Criterium: } \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial T} \right)_{\bar{\epsilon}, \bar{E}} \approx - \frac{\rho \cdot s.w.}{\alpha} \cdot \frac{n}{\bar{E}_k} \quad (9)$$

• linkerterm

bij 20 °C : $C = 407 \cdot 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$ en $n = 0.063 \text{ [-]}$

bij 80 °C : $C = 391 \cdot 10^6 \text{ [N/m}^2\text{]}$ en $n = 0.063 \text{ [-]}$

De benadering van de differentiaalterm wordt hiermee:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial T} \right)_{\bar{\epsilon}, \bar{E}} &\approx \frac{391 \cdot 10^6 \cdot \bar{E}^{0.063} - 407 \cdot 10^6 \cdot \bar{E}^{0.063}}{80 - 20} \\ &= - \frac{16}{60} \cdot 10^6 \cdot \bar{E}^{0.063} = - 0.2667 \cdot 10^6 \cdot \bar{E}^{0.063} \text{ [N/m}^2\text{K]} \end{aligned}$$

• rechterterm

$$\left. \begin{array}{l} \rho = 2700 \text{ [kg/m}^3\text{]} \\ s.w. = 960 \text{ [J/kgK]} \\ n = 0.063 \text{ [-]} \\ \alpha_R = 1 \end{array} \right\} - \frac{\rho \cdot s.w.}{\alpha_R} \cdot \frac{n}{\bar{E}} = - \frac{2700 \cdot 960}{1} \cdot \frac{0.063}{\bar{E}} = - \frac{0.1633 \cdot 10^6}{\bar{E}} \text{ [N/m}^2\text{K]}$$

In dit geval is een analytische oplossing mogelijk:

$$- 0.2667 \cdot 10^6 \cdot \bar{E}_k^{0.063} = - \frac{0.1633 \cdot 10^6}{\bar{E}_k}$$

ofwel: $\bar{E}_k^{1.063} = \frac{0.1633}{0.2667}$; $\bar{E}_k = \left(\frac{0.1633}{0.2667} \right)^{\frac{1}{1.063}}$

$$\boxed{\bar{E}_k = 0.63} \text{ [-]} \text{ (zie ook grafiek op pag. 7.7)}$$

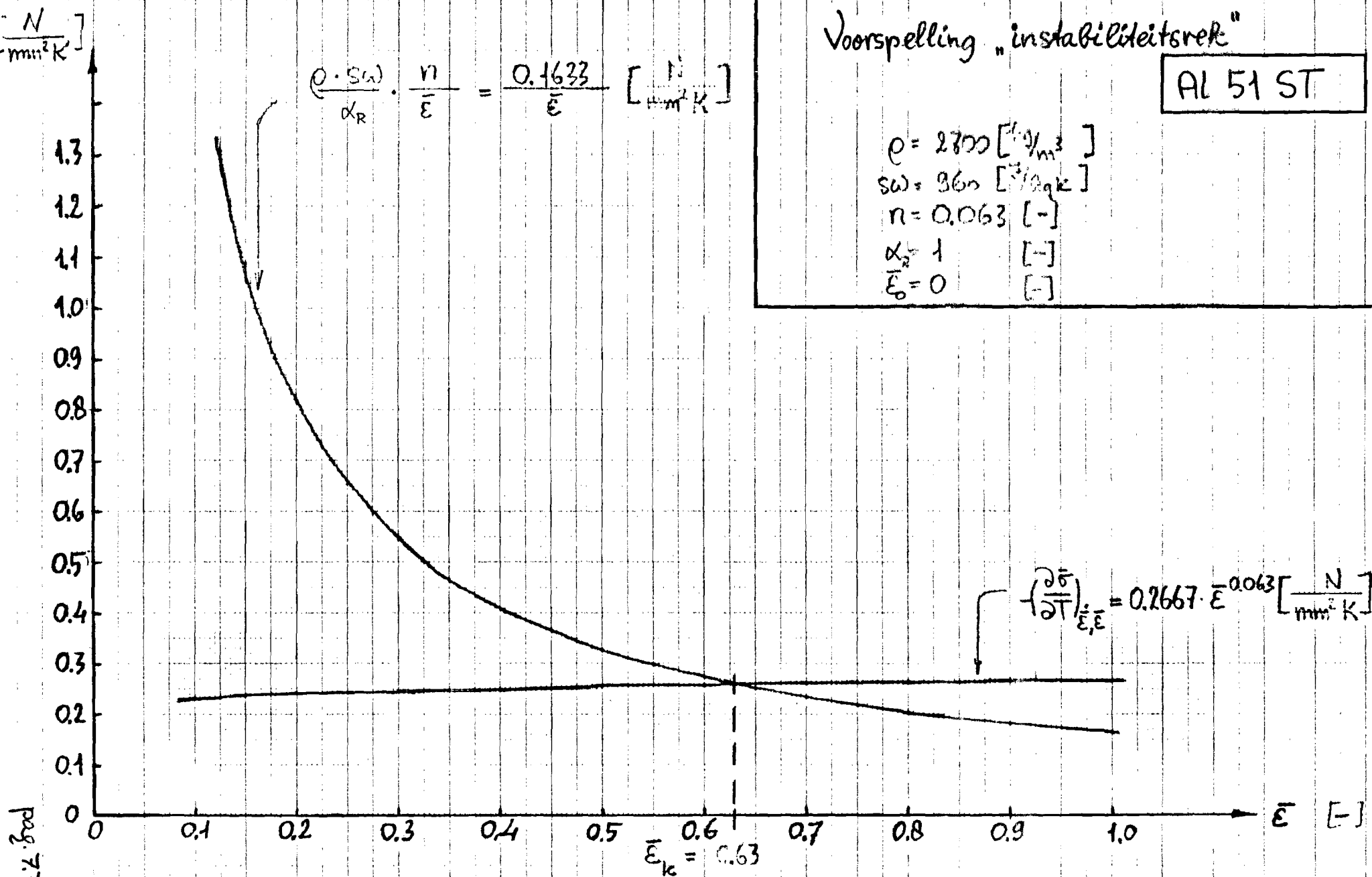
Voorspelling "instabiliteitsreik"

AL 51 ST

$$\begin{aligned} \rho &= 2700 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \\ s\omega &= 360 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{K}} \right] \\ \eta &= 0.063 \text{ [-]} \\ \alpha_2 &= 1 \text{ [-]} \\ \bar{\epsilon}_0 &= 0 \text{ [-]} \end{aligned}$$

$$\frac{\rho \cdot s\omega}{\alpha_R} \cdot \frac{\eta}{\bar{\epsilon}} = \frac{0.1633}{\bar{\epsilon}} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2 \text{K}} \right]$$

$$\left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \bar{\epsilon}} \right)_{\bar{\epsilon}, \bar{\epsilon}} = 0.2667 \cdot \bar{\epsilon}^{-0.063} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2 \text{K}} \right]$$



$\bar{\epsilon}_K = 0.63$