

# De invloed van de anisotropie op de kritische kracht bij het dieptrekken van ronde produkten : vergelijking van twee modellen

**Citation for published version (APA):**

Winter, de, A. (1993). *De invloed van de anisotropie op de kritische kracht bij het dieptrekken van ronde produkten : vergelijking van twee modellen*. (TH Eindhoven. Afd. Werktuigbouwkunde, Vakgroep Produktietechnologie : WPB; Vol. WPA1468). Technische Universiteit Eindhoven.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/1993

**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](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

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

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

Technische Universiteit Eindhoven  
Faculteit Werktuigbouwkunde  
Vakgroep Produktietechnologie & Automatisering  
Laboratorium voor Omvormtechnologie

De invloed van de anisotropie op de kritische  
kracht bij het dieptrekken van ronde produk-  
ten.

Vergelijking van twee modellen.

A. de Winter  
TUE onderzoeksrapport

April 1993  
WPA 1468

Begeleider: dr. ir. J.A.H. Ramaekers

# Samenvatting

Het onderzoek waarvan in dit rapport verslag wordt gedaan is uitgevoerd op de TU Eindhoven in het kader van het IOPM-Dieptrekonderzoek. Het verslag gaat in op de invloed van de anisotropie op de kritische kracht bij het dieptrekken van ronde produkten.

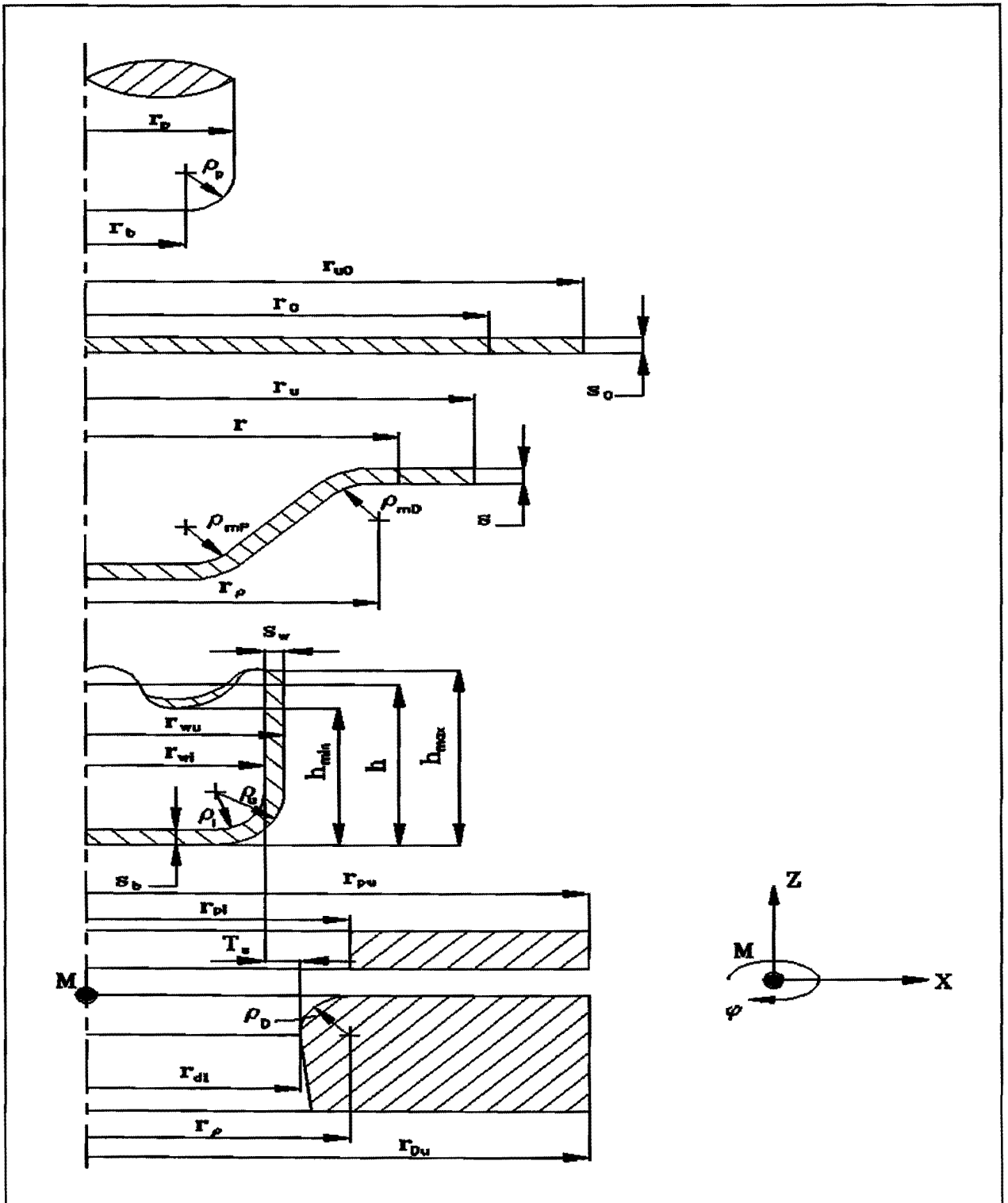
De kritische kracht is de door de pers geleverde kracht waarbij breuk optreedt tijdens het dieptrekken. Tot nu toe werd aangenomen dat de anisotropie hierop geen invloed heeft. Dit wordt echter door metingen tegengesproken. De bestaande isotrope modellen voldoen namelijk alleen voor staalsoorten ( $R > 1$ ), maar niet voor aluminiumsoorten ( $R < 1$ ).

Om de invloed van de anisotropie op de kritische kracht te beschrijven zijn twee modellen afgeleid. Hiervoor is uitgegaan van de isotrope modellen van Kals lit. [1] en Ramaekers lit. [2] en het anisotropiemodel van Hosford-Backofen.

De verkregen anisotrope modellen blijken goed overeen te komen met de metingen en voldoen zowel voor staal- als aluminiumsoorten.

Met de modellen kan worden aangetoond dat als de anisotropiefactor toeneemt van  $R=0.5$  tot  $R=2.0$  de kritische kracht ongeveer 40% groter wordt.

# Symbolenlijst



C	karacteristieke deformatieweerstand	[N/mm <sup>2</sup> ]
E	Elasticiteitsmodulus	[N/mm <sup>2</sup> ]
F	kracht	[N, kN]
F <sub>kr</sub>	kritische dieptrekkkracht in de wand	[N, kN]
F <sub>max</sub>	maximaal benodigde dieptrekkkracht	[N, kN]
F <sub>tot</sub>	door de pers te leveren kracht	[N, kN]
F <sub>wr</sub>	wrijvingskracht	[N, kN]
n	verstevigingsexponent	[-]
P	vermogen	[Nm/s]
P <sub>pl</sub>	plooihouderdruk	[N, kN]/[mm <sup>2</sup> ]
r	momentane straal van een willekeurige plaats	[mm]
r <sub>d</sub>	matrijsstraal	[mm]
r <sub>i</sub>	gemiddelde gereedschapsstraal (r <sub>Di</sub> + r <sub>p</sub> )/2	[mm]
r <sub>p</sub>	stempelstraal	[mm]
r <sub>u</sub>	momentane straal buitenrand flens	[mm]
r <sub>uo</sub>	oorspronkelijke straal buitenrand blank	[mm]
R <sub>α</sub>	anisotropiefactor in α° met de wals-richting	[-]
R	anisotropiefactor	[-]
s	momentane blank- of plaatdikte	[mm]
s <sub>0</sub>	oorspronkelijke blank- of plaatdikte	[mm]
W	arbeid	[Nm]
α	hoek	[-]
β	momentane dieptrekverhouding [r <sub>u</sub> /r <sub>i</sub> ]	[-]
β <sub>0</sub>	oorspronkelijke dieptrekverhouding [r <sub>uo</sub> /r <sub>i</sub> ]	[-]
β <sub>0max</sub>	maximale dieptrekverhouding [r <sub>uo</sub> /r <sub>i</sub> ] <sub>max</sub>	[-]
γ	dimensieloze momentane dikte [s/s <sub>0</sub> ]	[-]
ε <sub>0</sub>	voordeformatie	[-]
ε	natuurlijke of logaritmische rek	[-]
μ <sub>1</sub>	wrijvingscoëfficiënt flens volgens Coulomb	[-]
μ <sub>2</sub>	wrijvingscoëfficiënt radius volgens Coulomb	[-]
ρ <sub>D</sub>	matrijsafronding	[mm]
ρ <sub>P</sub>	stempelafronding	[mm]
σ <sub>f</sub>	momentane vloeispanning	[N/mm <sup>2</sup> ]

Opmerking: In dit verslag worden grootheden dimensieloos gemaakt met behulp van r<sub>i</sub> in plaats van r<sub>p</sub>, zoals dat in de CIRP-normen staat.

## Dimensieloze grootheden

Bij IOP-M-DIEPTREKKEN-TUE worden de grootheden dimensieloos gemaakt met behulp van de grootheid  $r_i$ . Dit wordt aangegeven met een \*-teken.

$F^*$	dimensieloze kracht $F/2\pi r_i s_0 C$	[-]
$P^*$	dimensieloos vermogen $P/2\pi r_i s_0 C u$	[-]

## Indices IOPM-Dieptrekken-TUE

0	begin, initiëel, oorspronkelijk
buigen	ten gevolge van buiging
f	vloei
kr	kritisch
max	maximaal
tot	totaal
strekken	ten gevolge van strekken
stuiken	ten gevolge van stuiken
wr	wrijving
wr afronding	wrijving op de afronding
wr flens	wrijving langs de flens
$\alpha$	hoek in graden met de walsrichting

# Inhoudsopgave

Samenvatting . . . . .	2
Symbolenlijst . . . . .	3
Inhoudsopgave . . . . .	6
1. Inleiding . . . . .	7
2. Afleiding van de theoretische modellen . . . . .	8
2.1 De kritische kracht, MODEL A. . . . .	10
2.2 De kritische kracht, MODEL B . . . . .	14
3. Toetsing aan experimenten . . . . .	17
3.1 De metingen . . . . .	17
3.2 Confrontatie . . . . .	19
4. Vergelijking van de modellen met elkaar . . . . .	24
5. Conclusies . . . . .	25
6. Literatuur . . . . .	26
Bijlage 1 . . . . .	27

# 1. Inleiding

Dit onderzoek maakt deel uit van het dieptrekonderzoek dat op de TU in Eindhoven wordt gedaan in het kader van het IOPM-D projekt. Het verslag gaat in op de invloed van de anisotropie op de kritische kracht.

De kritische kracht is de door de pers geleverde kracht waarbij breuk optreedt in de wand van het te maken produkt. Bij het dieptrekken moet de kracht die nodig is voor het vormen van het produkt onder deze kritische kracht blijven.

In het verleden zijn meerdere modellen ontwikkeld die het proces beschrijven dat zich in de wand afspeelt, om daarmee een voorspelling te doen over de maakbaarheid van een produkt. Deze modellen gaan uit van isotroop materiaal en voldoen alleen voor staalsoorten. Breuk bij het dieptrekken van aluminium kan hiermee niet voorspeld worden.

Een mogelijke oorzaak van het niet voldoen van de isotrope modellen voor de kritische kracht is het ontbreken van de anisotropiefactor. Staal en aluminium verschillen wat deze parameter betreft sterk van elkaar. Voor aluminiumsoorten geldt over het algemeen  $R < 1$ , terwijl voor staalsoorten over het algemeen geldt  $R > 1$ .

Om te toetsen of de anisotropiefactor de kritische kracht beïnvloedt zijn twee modellen, een model ontwikkeld door Kals lit. [1] en een model ontwikkeld door Ramaekers lit. [2], opnieuw afgeleid met behulp van het Hosford-Backofen-model, dat de invloed van de anisotropie beschrijft.



## 2. Afleiding van de theoretische modellen

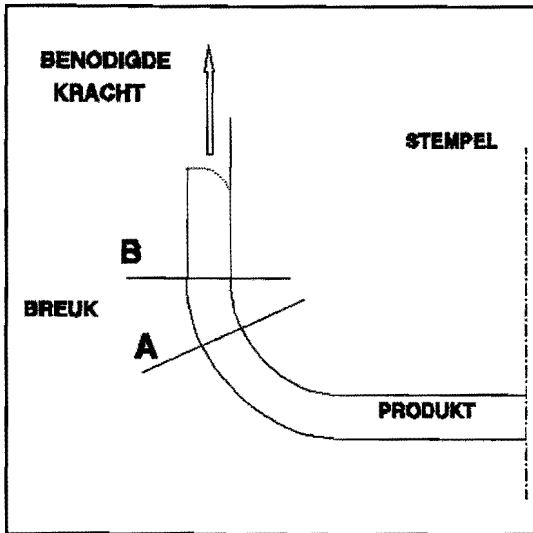
De modellen die in dit hoofdstuk worden afgeleid beschrijven de kritische kracht voor anisotroop materiaal. Hierbij is voor de beschrijving van de anisotropie gebruik gemaakt van de algemene basisvergelijkingen voor rotatiesymmetrische plaatanisotropie met behulp van het Hosford-Backofen-model voor vlakspanning. In dit model volstaat het om de anisotropie te beschrijven met één constante namelijk de normaalanisotropie  $R$ .

In het model wordt geen rekening gehouden met de invloed van wrijving tussen het produkt en de wand van het stempel. Hiervoor wordt verwezen naar lit. [3].

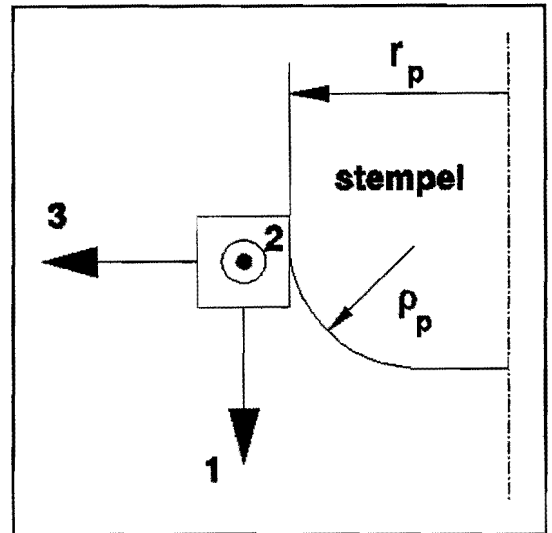
De kritische kracht is het criterium dat het scheuren van het materiaal vastlegt. Breuk treedt op op de overgang van de wand naar de afronding. De exacte plaats van de breuk is echter niet voor iedere situatie gelijk.

Als er wordt diepgetrokken met zeer grote stempelafronding kan het gebeuren dat er breuk optreedt op de overgang stempelafronding-bodem. Dit soort breuk treedt op doordat het krachtdoorleidend oppervlak hier klein is door de grote afronding. Voor de hier afgeleide criteria is deze breuk niet van belang, omdat deze niet valt onder het dieptrekken. De bodemzone wordt namelijk door de grote afronding gestrekt. Dit valt buiten het kader van het dieptrekken.

Naast deze breukvorm zijn er nog twee andere vormen te onderscheiden die wel vallen onder de noemer dieptrekken. Dit is breuk op de stempelafronding net onder de wand en breuk op de overgang van stempelafronding-produktwand. Voor beide breuktypen wordt een model afgeleid.



Figuur 1. Schematische weergave van de plaats waar breuk optreedt zoals dat is gemodelleerd in model A en B.



Figuur 2. De richtingindices en de geometrische grootheden.

Model A, zie *figuur 1*, beschrijft de breuk op de afronding net onder de wand. In dit criterium wordt dan ook rekening gehouden met de geometrie van deze afronding, zoals de afrondingsstraal en de stempelradius. Model B, zie *figuur 1*, daarentegen gaat er van uit dat er breuk optreedt net boven de stempelafronding in de wand. In dit model kan gebruik worden gemaakt van een veel eenvoudiger geometrie.

In *figuur 2* staan de gebruikte geometrische maten  $r_p$  en  $\rho_p$  die de stempelafronding beschrijven. In de figuur is ook de oriëntatie van het gebruikte assenstelsel in de wand van het produkt weergegeven zoals dat in model A en B is gebruikt.

De krachten zijn dimensieloos gemaakt met:

$$F^*_{kritisch} = \frac{F_{kritisch}}{2 \cdot \pi \cdot s_0 \cdot r_i \cdot C}$$

## 2.1 De kritische kracht, MODEL A.

Afleiding van de kritische kracht met daarin opgenomen de invloed van geometrie van de stempelafronding en anisotropie. De afleiding is gemaakt analoog aan Kals, lit. [1]

Bij benadering wordt aangenomen dat vlak onder de wand op de afronding geldt  $\epsilon_2=0$  , zodat met behulp van Levy-Von Mises geschreven kan worden

$$\sigma_3 = 2\sigma_2 - \sigma_1 \quad (1)$$

Uit het krachtsevenwicht in het produkt ter plaatse van de afronding is in lit. [5] afgeleid

$$\sigma_2 = j\sigma_1 \quad (2)$$

De hierin gebruikte  $j$  staat voor

$$j = \frac{r_p \cdot \rho_p - is}{\rho_p \cdot 2r_p + is} \quad (3)$$

waarin  $i$  staat voor de afhankelijkheid van de normaalspanning van de wanddruk  $p$  ( $0 < i < 1$ ).

$$\sigma_3 = -i \cdot p \quad (4)$$

Voor  $i$  wordt later 1 gekozen.

Formule (1) en (2) kunnen nu gecombineerd worden tot

$$\sigma_3 = (2j-1) \sigma_1 \quad (5)$$

Hiermee kan de effectieve spanning worden berekend met behulp van

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{1}{R+1} (R(\sigma_2 - \sigma_1)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2) \quad (6)$$

zodat we kunnen schrijven

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{R+5}{R+1}} (1-j) \sigma_1 \quad (0 < j < 1) \quad (7)$$

Voor het model wordt uitgegaan van exponentieel verstevigend materiaal, waarvoor geldt

$$\bar{\sigma} = C(\bar{\varepsilon} + \bar{\varepsilon}_0)^n \quad (8)$$

Hiervoor moet de effectieve rek worden berekend. Er van uitgaande dat er geen rek optreedt in omtrekriching en gebruik makend van volumeïnvariatie kan geschreven worden

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_3 \quad (9)$$

en dus

$$\bar{\varepsilon} = \frac{R+1}{\sqrt{2R+1}} \cdot |\varepsilon_1| \quad (10)$$

De optredende kracht kan worden bepaald uit

$$F = 2\pi s r_i \sigma_1 \quad (11)$$

De hiervoor benodigde spanning kan met (8), (9) en (11) worden geschreven als

$$\sigma_1 = \frac{C}{(1-j)\sqrt{\frac{R+5}{R+1}}} \left( \frac{R+1}{\sqrt{2R+1}} \varepsilon_1 + \bar{\varepsilon}_0 \right)^n \quad (12)$$

Formule (11) en (12) samen met

$$s = s_0 \cdot \exp(\varepsilon_3) \quad (13)$$

en dus

$$s = s_0 \cdot \exp(-\varepsilon_1) \quad (14)$$

geeft

$$F = \frac{2\pi r_i s_0 C}{(1-j)\sqrt{\frac{R+5}{R+1}}} \exp(-\varepsilon_1) \cdot \left( \frac{R+1}{\sqrt{2R+1}} \varepsilon_1 + \bar{\varepsilon}_0 \right)^n \quad (15)$$

De kritische kracht kan hieruit bepaald worden met

$$\frac{dF}{d\varepsilon_1} = 0 \quad (16)$$

en

$$\varepsilon_{1k} = n - \frac{\sqrt{2R+1}}{R+1} \bar{\varepsilon}_0 \quad (17)$$

Met formule (15), (16) en (17) kan voor de kritische kracht geschreven worden

$$F_{kr} = 4 \cdot \pi \cdot C \cdot r_j \cdot s_0 \cdot \left(\frac{(R+1)n}{\sqrt{2R+1}}\right)^n \cdot \sqrt{\frac{R+1}{R+5} \cdot \left(\left(\frac{s_0}{\rho_p}\right) + \left(\frac{s_0}{r_p}\right) + \exp\left(n - \frac{\sqrt{2R+1}}{R+1} \varepsilon_0\right)\right)^{-1}} \quad (18)$$

en dimensieloos gemaakt:

$$F_{kr}^* = 2 \cdot \left(\frac{(R+1)n}{\sqrt{2R+1}}\right)^n \cdot \sqrt{\frac{R+1}{R+5} \cdot \left(\left(\frac{s_0}{\rho_p}\right) + \left(\frac{s_0}{r_p}\right) + \exp\left(n - \frac{\sqrt{2R+1}}{R+1} \varepsilon_0\right)\right)^{-1}} \quad (19)$$

Voor het bijzondere geval van isotroop materiaal kan analoog aan lit.[1] worden geschreven

$$F_{kr}^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{2n}{\sqrt{3}}\right)^n \cdot \left(\left(\frac{s_0}{\rho_p}\right) + \left(\frac{s_0}{r_p}\right) + \exp\left(n - \frac{\sqrt{3}}{2} \varepsilon_0\right)\right)^{-1} \quad (20)$$

## 2.2 De kritische kracht, MODEL B

Afleiding van de kritische kracht met anisotropie zonder de invloed van de geometrie, analoog aan de afleiding van Ramaekers lit. [2].

De effectieve rek kan voor een rechte rekweg worden geschreven als

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{R+1}{2R+1} \cdot (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + R \varepsilon_3^2)} \quad (21)$$

Door volumeïnvariantie geldt voor de rechte rekweg

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (22)$$

Omdat de rek in omtrekriching kan worden verwaarloosd, wordt gesteld dat

$$\varepsilon_2 = 0 \quad (23)$$

Met (22) en (23) volgt

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_3 \quad (24)$$

zodat met (21) en (24) kan worden geschreven

$$\bar{\varepsilon} = \frac{R+1}{\sqrt{2R+1}} \cdot |\varepsilon_1| \quad (25)$$

Voor de spanning-rekrelatie geldt voor het anisotrope geval

$$\varepsilon_2 = \frac{\bar{\varepsilon}}{\sigma} \cdot \frac{(\sigma_2 - \sigma_3) + R(\sigma_2 - \sigma_1)}{R+1} \quad (26)$$

Voor  $s \ll r_p$  kan de rek in omtrekriching worden verwaarloosd. Er geldt

$$\varepsilon_2 = 0 \quad (27)$$

en omdat er geen spanning loodrecht op de wand net boven de afronding wordt ingeleid

$$\sigma_3 = 0 \quad (28)$$

volgt met (26) t/m (28)

$$\sigma_2 + R(\sigma_2 - \sigma_1) = 0 \quad (29)$$

en dus

$$\sigma_2 = \frac{R}{1+R} \cdot \sigma_1 \quad (30)$$

Met de vloeivoorwaarde volgens Von Mises formule (31)

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{1}{R+1} \cdot (R(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2) \quad (31)$$

volgt voor de effectieve spanning

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{2R+1}}{1+R} \cdot \sigma_1 \quad (32)$$

Voor de kracht kan eenvoudig worden gesteld

$$F = A \cdot \sigma_1 \quad (33)$$

Dit geeft met formule (32)

$$\sigma_1 = \frac{R+1}{\sqrt{2R+1}} \cdot \bar{\sigma} \quad (34)$$



Voor exponentieel verstevigend materiaal geldt

$$\bar{\sigma} = C \cdot (\bar{\varepsilon} + \bar{\varepsilon}_0)^n \quad (35)$$

De effectieve rek (25) kan met (26), (34), (35) en met

$$\varepsilon_3 = -\varepsilon_1 = \ln \frac{s}{s_0} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_1 = \ln \frac{s_0}{s} \quad (36)$$

ingevuld worden in formule (33). Dit geeft dan

$$F = 2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot C \cdot s \cdot \frac{R+1}{\sqrt{2R+1}} \cdot \left( \frac{R+1}{\sqrt{2R+1}} \cdot \ln \frac{s_0}{s} + \bar{\varepsilon}_0 \right)^n \quad (37)$$

De kritische kracht kan hieruit worden afgeleid met (38) en (39)

$$\frac{dF_{kritisch}}{ds} = 0 \quad (38)$$

$$\ln \frac{s}{s_0} = - \left( n - \frac{\sqrt{2R+1}}{R+1} \bar{\varepsilon}_0 \right) \quad (39)$$

zodat kan worden geschreven

$$F_{kritisch} = 2 \left( \frac{R+1}{\sqrt{2R+1}} \right)^{n+1} \cdot s_0 \cdot \pi \cdot r_i \cdot C \cdot n^n \cdot \exp - \left( n - \frac{\sqrt{2R+1}}{R+1} \bar{\varepsilon}_0 \right) \quad (40)$$

$$F^*_{kritisch} = \left( \frac{R+1}{\sqrt{2R+1}} \right)^{n+1} \cdot n^n \cdot \exp - \left( n - \frac{\sqrt{2R+1}}{R+1} \bar{\varepsilon}_0 \right) \quad (41)$$

In het bijzondere geval dat  $R=1$  geldt analoog aan lit. [2]:

$$F_{kritisch} = \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \pi \cdot r_p \cdot s_0 \cdot C \cdot \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot n \right)^n \cdot \exp - \left( n - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \bar{\varepsilon}_0 \right) \quad (42)$$

## 3. Toetsing aan experimenten

### 3.1 De metingen

De modellen A ( $\rho_p, R$ ) en B (R) worden in dit hoofdstuk geconfronteerd met de metingen zoals die zijn gedaan door De Groot en Van der Net [4]. Hier volgt een korte samenvatting.

De proeven zijn gedaan op een Erichsen testbank. Op deze bank wordt tijdens het dieptrekken de maximale kracht bepaald. Als het krachtmaximum is bereikt wordt de plooihouderkracht opgevoerd en wordt er verder diepgetrokken tot er insnoering of scheurvorming optreedt. Op dat punt wordt de kritische kracht gemeten.

Bovenstaande proef is gedaan voor elf materialen, te weten:

- materiaal 1, Cockerill, St bekleed;
- materiaal 2, Sidmar-Ocas, St bekleed;
- materiaal 3, Cockerill, Novozink;
- materiaal 4, Volvo, St bekleed;
- materiaal 5, Fokker, Aluminium Alclad 2024-O TH5.322/1;
- materiaal 6, Fokker, Aluminium Pechiney/Rhenalu/Issoire 6061-O;
- materiaal 10, Hoogovens, St tweezijdig bekleed, dompel verzinkt, laagdikte 10  $\mu\text{m}$ , (Hoogovens code 8803);
- materiaal 11, Hoogovens, St onbekleed (Hoogovens code 8921);
- materiaal 12, Hoogovens, St bekleed, Thermische zinklaag 10  $\mu\text{m}$  (hotdip), (Hoogovens code 9121);
- materiaal 13, Hoogovens, St 15 bekleed, Elektrolitische zinklaag 10  $\mu\text{m}$ , (Hoogovens code 9122);
- materiaal 14, Hoogovens, St 15 bekleed, Duplexsysteem: Elektrolitische zinklaag 10  $\mu\text{m}$ , primer 5  $\mu\text{m}$ , Topcoat polyurethaan, (hoogovens code 9120).

Er is getest onder een tweetal smeringscondities, te weten met talk en met finarol.

De materiaalparameters staan in tabel 1 [zie bijlage 1]. De belangrijkste geometrische grootheden staan hieronder vermeld.

$r_{u0} = 32.5$ mm	initiële straal blenk;
$r_d = 17.1$ mm	binnenstraal matrijs;
$\rho_d = 4.0$ mm	af rondingsstraal matrijs;
$r_p = 15.0$ mm	stempelstraal;
$\rho_d = 4.0$ mm	af rondingsstraal stempel.

De straal van de blenk was niet altijd gelijk, omdat in sommige gevallen de overgebleven flens na het krachtmaximum niet voldoende was om de flens te fixeren.

Bij smering met talk is voor de straal (materiaal 10) van de blenk 59 mm gekozen. Bij smering met finarol is voor de aluminiumsoorten (materiaal 5 en 6) de straal van de blenk 47 mm gekozen.

Dit is mogelijk, omdat de berekende kritische kracht onafhankelijk is van de dieptrekverhouding.

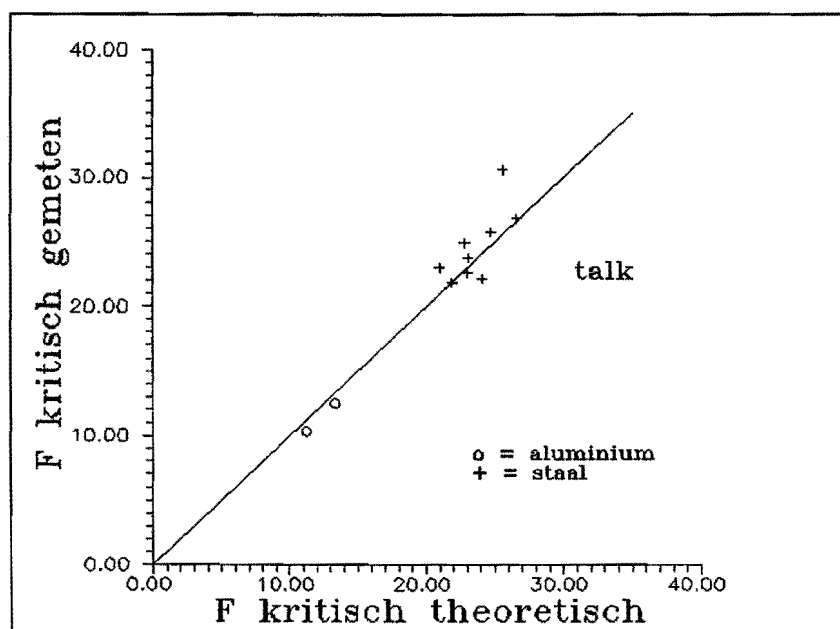
## 3.2 Confrontatie

In deze paragraaf worden de theoretische waarden volgens model A( $\rho_p, R$ ) en B(R) vergeleken met de gemeten waarden. Dit is gedaan door de gemeten waarden uit te zetten tegen de berekende waarden. De theoretische ligging van de punten is dan de lijn die door de oorsprong gaat en ligt onder een hoek van  $45^\circ$  met de assen. Deze lijn is ononderbroken aangegeven. De meetwaarden zijn punten in de grafiek. Hoe beter het model de metingen beschrijft hoe dichter de meetpunten bij de theoretische lijn liggen.

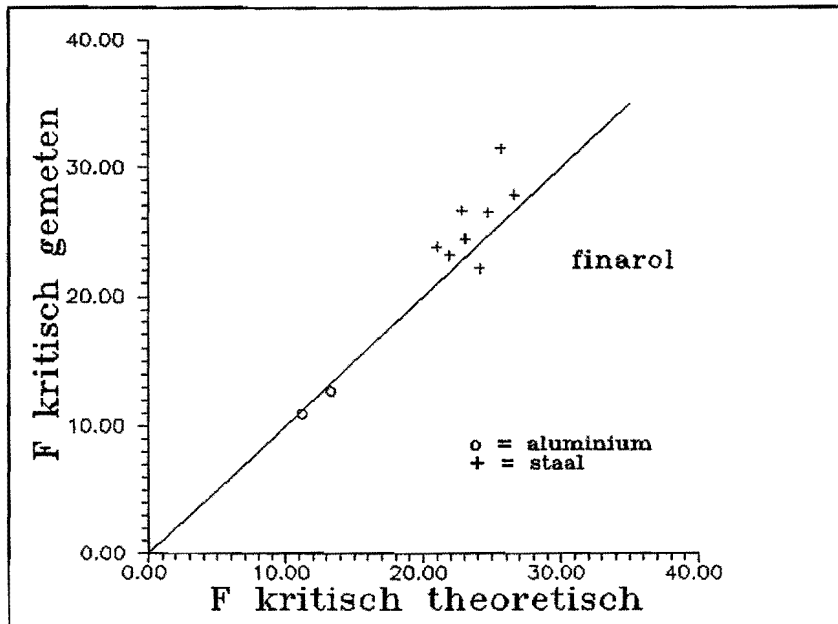
Er is geen gebruik gemaakt van dimensieloze grootheden om het verschil tussen de aluminium- en de staalsoorten duidelijk in de grafiek naar voren te laten komen.

- Model A ( $\rho_p, R$ ).

In *figuur 3* en *4* zijn de resultaten weergegeven voor model A, respectievelijk voor smering met talk en finarol.



*Figuur 3. Vergelijking van de metingen met model A ( $\rho_p, R$ ) voor smering met talk.*



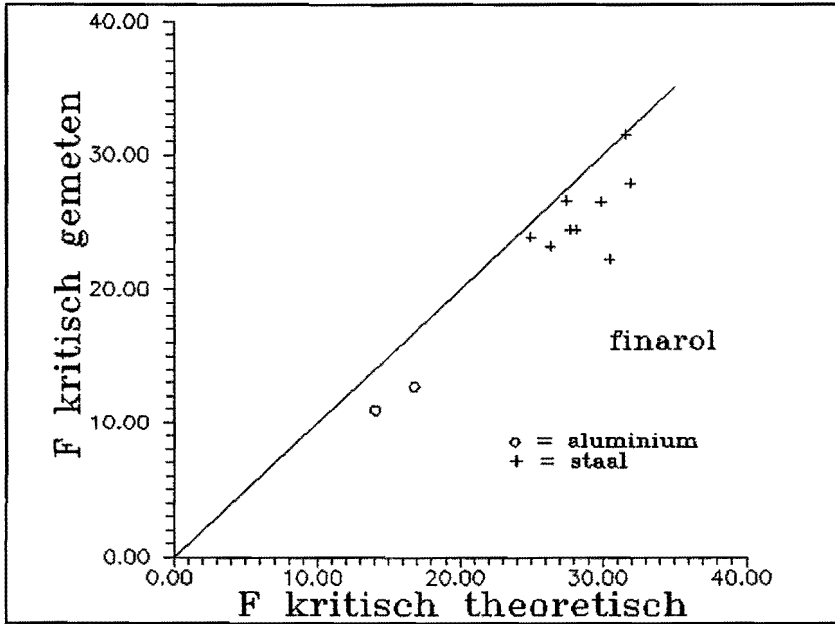
Figuur 4. Vergelijking van de metingen met model A ( $\rho_p, R$ ) voor smering met finarol.

Uit de figuren 3 en 4 blijkt een grote overeenkomst tussen theorie en praktijk, dit in tegenstelling tot eerdere metingen, lit. [3]. Deze metingen waren vergeleken met de isotrope modellen (model A en B,  $R=1$ ). Hierbij vielen de metingen voor aluminium zeer ver buiten de theoretisch verwachte lijn, terwijl de staalsoorten redelijk aan het criterium voldeden.

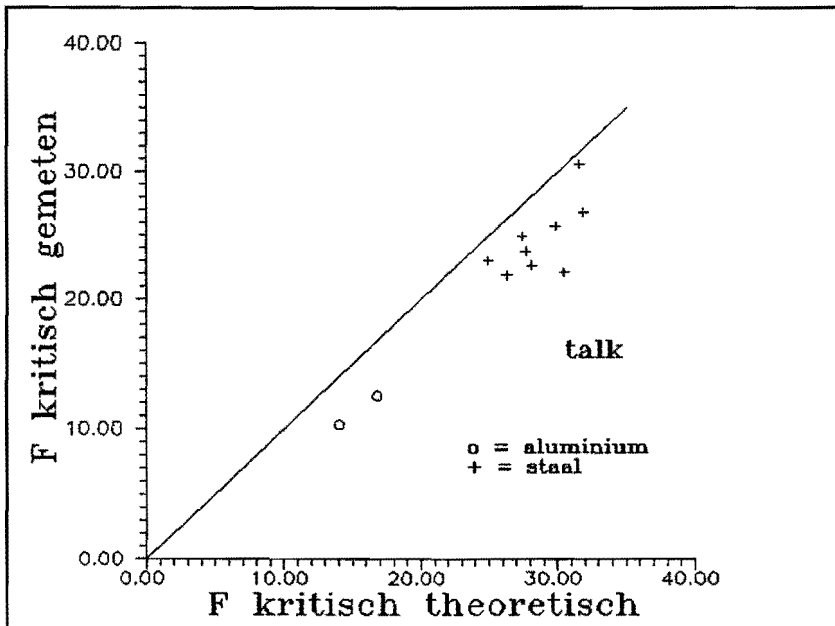
De grafieken laten zien dat het criterium model A ( $\rho_p, R$ ) kritisch of net te kritisch is, de meetpunten vallen namelijk, op een enkele uitzondering na, op de lijn of net er boven. Voor de meetpunten die boven de lijn vallen geldt dat de berekende waarde voor de kritische kracht kleiner is dan de werkelijke waarde.

Uit de grafieken blijkt dat de smering weinig invloed heeft op de ligging van de meetpunten. Voor de smering met talk geldt dat de gemeten kritische kracht over het geheel genomen iets lager ligt dan voor smering met finarol.

Voor model B (R) zijn in *figuur 5* en *6* ook dergelijke grafieken afgedrukt met respectievelijk finarol- en talksmering.



*Figuur 5.* Vergelijking van de metingen met model B (R) voor smering met finarol.



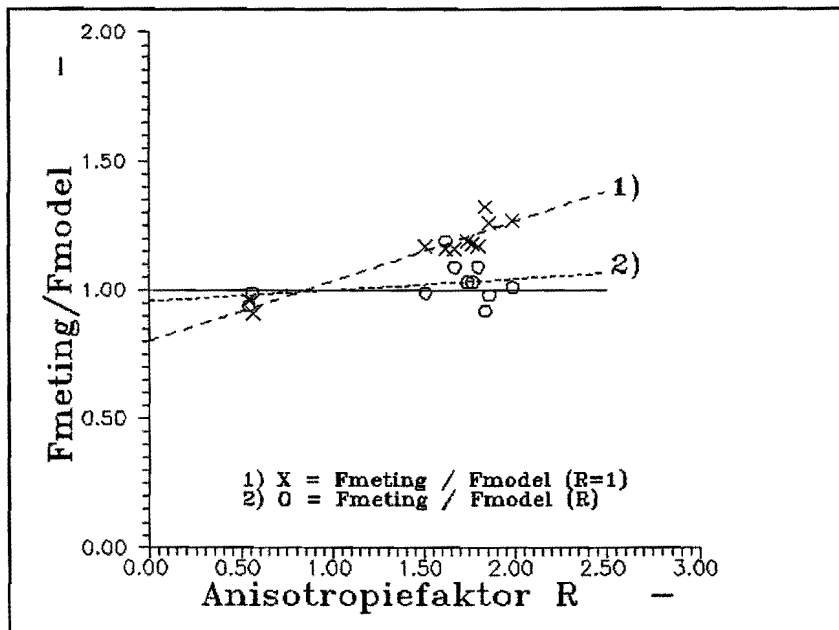
*Figuur 6.* Vergelijking van de metingen met model B (R) voor smering met talk.

Uit *figuur 5* en *6* blijkt dat alle meetpunten liggen onder de theoretische lijn van model B(R). Het model is minder kritisch dan de werkelijkheid.

Ook hier blijkt dat de manier van smeren geen grote invloed heeft op de resultaten.

Het verschil tussen de aluminiumsoorten en de staalsoorten is gering. Beide liggen aan de zelfde kant van de theoretische lijn met een absolute afwijking die ongeveer even groot is. Ook voor dit model geldt dus dat het meenemen van de anisotropie in de modellering het geconstateerde verschil tussen aluminium en staal adequaat beschrijft.

In de figuren 3 t/m 6 komt de relatie tussen R en de gemeten kritische kracht niet expliciet naar voren. Uit de grafieken blijkt weliswaar dat er geen grote verschillen meer bestaan tussen aluminium en staal en in vergelijking met isotrope modelresultaten blijkt een grote verbetering, maar het is nog niet eenduidig weergegeven. Hiervoor is *figuur 7* opgenomen. In deze figuur zijn de metingen met behulp van het isotrope model  $A(\rho_p, R=1)$  en het anisotrope model  $A(\rho_p, R)$  uitgezet tegen de anisotropiefactor.



*Figuur 7. Grafische vergelijking van de metingen met de modellen en de invloed van de anisotropie daarop.*

Om de metingen met elkaar te kunnen vergelijken zijn deze dimensieloos gemaakt. Dit is gedaan door de metingen te delen door de theoretisch verwachte waarde volgens het isotrope respectievelijk anisotrope model, formule (43) en (44).

$$\frac{F_{meting}}{F_{model}(R=1)} \quad (43)$$

$$\frac{F_{meting}}{F_{model}(R)} \quad (44)$$

De theoretische ligging van de meetpunten is onafhankelijk van de anisotropiefactor en is in de grafiek weergegeven door de ononderbroken horizontale lijn op  $F_{meting}/F_{model}=1$ .

De dimensieloze meetpunten zijn door X resp. O weergegeven in de grafiek. De punten zijn lineair benaderd door de onderbroken lijnen 1) en 2).

Uit de grafiek blijkt dat lijn 1) voor het isotrope model sterk afwijkt van de theoretische lijn. Blijkbaar worden de metingen beïnvloed door de anisotropie. Dit wordt bevestigd door lijn 2) voor het anisotrope model. Deze lijn loopt bijna horizontaal over de theoretische lijn.

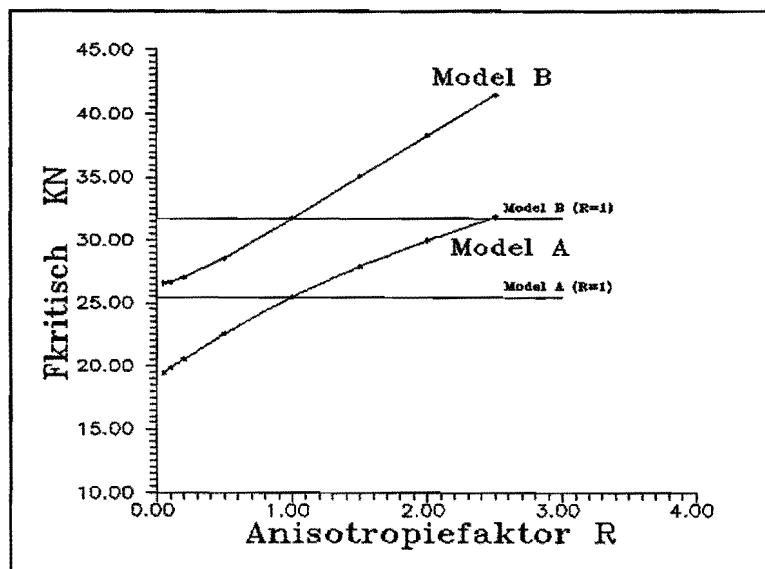
Uit de grafiek blijkt dat het anisotrope model de werkelijkheid beter beschrijft dan het isotrope.

Aan de hand van deze resultaten kunnen we aannemen dat het verschil, dat bij eerdere onderzoeken aan het licht was gekomen tussen aluminium- en staalsoorten, bij modellen voor de kritische kracht gelegen is in de invloed van de anisotropie. Door deze grootte in de modellering mee te nemen kan het model voor beide materiaalsoorten geldig gemaakt worden.



## 4. Vergelijking van de modellen met elkaar

In *figuur 8* zijn beide modellen in een grafiek naast elkaar uitgezet tegen de anisotropiefactor  $R$ . Het bijzondere geval  $R=1$  is ook aangegeven.



*Figuur 8.* De kritische kracht volgens model A ( $\rho_p, R$ ) en model B ( $R$ ) als functie van de anisotropiefactor.

De modellen laten dezelfde trend zien, maar verschillen onderling in absolute waarde. Welk model het meest geschikt is hangt af van de situatie en zal nog nader onderzocht moeten worden, onder andere aan de hand van meerdere metingen. In dit onderzoek is van belang dat de kritische kracht wordt beïnvloed door de anisotropie en de manier waarop. In beide modellen komt dit duidelijk en eenduidig naar voren.

De kritische kracht voor materialen met een lage anisotropiefactor (ongeveer  $R=0.5$ ) ligt ongeveer 40% lager dan voor materialen met een hoge anisotropiefactor ( $R=2$ ). Dit is in tegenstelling met eerdere aannamen zoals die waren gemaakt in lit. [5]. Hierin werd gesteld dat plastische instabiliteit in de overgangszone tussen wand en bodem wordt beïnvloed door  $n$  en niet door  $R$ . De  $R$  zou alleen tot uitdrukking komen bij het vervormen van het randmateriaal.

## 5. Conclusies

- 1) De anisotropie heeft invloed op de kritische dieptrekkkracht. Naarmate de anisotropie hoger is, is de weerstand tegen breuk in de wand op de overgang van wand naar bodem ook groter. De wand kan grotere krachten doorleiden zonder te breken.
- 2) De invloed van de anisotropie op de kritische dieptrekkkracht is groot. De kritische kracht voor materialen met een lage anisotropiefactor ( $R = \pm 0.5$ ) ligt ongeveer 40% lager dan voor materialen met een hoge anisotropiefactor ( $R = \pm 2$ ).
- 3) De hier geteste modellen voldeden beide aan de metingen. Voor beide modellen komen de metingen en de berekeningen goed overeen. Model A ( $\rho_p, R$ ) is kritisch, terwijl model B ( $R$ ) soepel is.
- 4) De resultaten uit dit onderzoek verklaren de lage kritische kracht die gemeten wordt bij het dieptrekken van aluminiumsoorten. De afgeleide anisotrope modellen voldoen voor zowel staal- als aluminiumsoorten.
- 5) De invloed op de kritische kracht van het smeringsmiddel dat gebruikt wordt op de flens en de matrijsafroning is klein ten opzichte van de invloed van de anisotropie.

## 6. Literatuur

- [1] Kals, J.A.G. 'The quantitative effect of tool geometry and strain hardening on the critical punch-force in cup-drawing'  
  
Proceedings of the 12<sup>th</sup> Int. Machine tool design an research conference.  
The Macmillan Press Ltd. (1972)
- [2] Ramaekers, J.A.H. Plastisch bewerken van materialen.  
Houtackers, L.J.A. Procesbeheersing in de onderdelenfabricage  
Peeters, P.B.G. OMTEC 1976
- [3] De Winter, A. De kritische kracht voor ronde dieptrekproducten.  
Vergelijking van metingen en berekeningen.  
Augustus 1992  
Technische Universiteit Eindhoven  
WPA nr. 1388, IOPM-D 044
- [4] De Groot, M.th. Bepaling van de maximale en kritische kracht bij het  
Van der Net, A.J. dieptrekken.  
Mei 1992  
Technische Universiteit Eindhoven  
WPA nr. 1280, IOPM-D 034
- [5] Kals, J.A.G. Diktaat Bewerkingstechnologie blz. 1-15  
Diktaat nr. 4558

TABEL 1

materiaal nummer	proef gegevens					meetresultaten	
	s <sub>0</sub> [-]	ε <sub>0</sub> [-]	n [-]	R [-]	C [N/mm <sup>2</sup> ]	F <sub>krit</sub> [KN]	
						talk	finarol
1	0.69	0.003	0.236	1.67	490	23.00	23.85
2	0.88	0.0001	0.246	1.62	498	30.58	31.50
3	0.71	0.004	0.211	1.51	481	21.85	23.19
4	0.75	0.0001	0.267	1.80	507	24.91	26.66
5	1.00	0.0001	0.228	0.54	275	12.50	12.71
6	1.02	0.0001	0.300	0.56	254	10.32	10.94

**TABEL 1 (vervolg)**

materiaal nummer	materiaal gegevens					meetresultaten	
	$s_0$ [-]	$\epsilon_0$ [-]	n [-]	R [-]	C [N/mm <sup>2</sup> ]	Fkrit [KN]	
						talk	finarol
10	0.79	0.007	0.239	1.99	506	26.80	27.88
11	0.80	0.0001	0.291	1.77	531	25.72	26.50
12	0.69	0.007	0.246	1.74	522	23.73	24.44
13	0.70	0.003	0.259	1.86	495	22.63	24.44
14	0.76	0.003	0.262	1.84	459	22.13	22.22