

## De kritische dieptrekkraft : onderzoek van de invloedsfactoren

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

Bongaerts, P. C. P. (1993). *De kritische dieptrekkraft : onderzoek van de invloedsfactoren*. (TH Eindhoven. Afd. Werktuigbouwkunde, Vakgroep Productietechnologie : WPB; Vol. WPA1498). 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 en Automatisering

**De kritische dieptrekkraft.**  
Onderzoek van de invloedsfactoren.

Bongaerts P.C.P.

TUE - Onderzoeksrapport

mei 1993

IOPM-D 055

WPA 1498

Begeleider: Dr. Ir. J.A.H. Ramaekers.

## Samenvatting

Naar het dieptrekproces wordt al geruime tijd onderzoek verricht. Er zijn momenteel twee modellen die de kritische dieptrekkracht goed voorspellen. Het eerste model laat de geometrie van de stempel buiten beschouwing, terwijl het tweede model deze invloed wel in rekening brengt.

Voor beide modellen zijn de veranderingen van de kritische dieptrekkrachten bij variaties in de parameters in beeld gebracht. Het is nu snel te zien hoe de kritische dieptrekkracht zal veranderen wanneer een parameter verandert.

Verder zijn voor beide modellen de berekende waarden voor de kritische dieptrekkracht getoetst aan de hand van experimenten.

Uit de experimenten blijkt dat het model waarin de invloed van de geometrie van de stempel in rekening is gebracht, voor aluminium goed voldoet echter voor staalsoorten niet kritisch genoeg is. Het model waarbij de invloed van de geometrie van de stempel buiten beschouwing gebleven is voldoet voor staal goed. Het is soms te kritisch.

Het model waarin de invloed van de geometrie van de stempel verwerkt is, levert een veilige benadering voor de kritische dieptrekkracht. Dit komt doordat het model over het algemeen te kritisch is. Hierdoor worden lagere kritische krachten berekend dan de waarden die uit experimenten volgen.

Voor een minimale veiligheidsmarge kan het model zonder invloed van de geometrie van de stempel, een betere benadering van de kritische dieptrekkracht leveren.

## Inhoudsopgave

	blz.
Samenvatting	2
Voorwoord	4
Symbolenlijst	5
Inleiding	6
De materiaal modellen	8
Modellen voor de kritische dieptrekkkracht	9
Bepaling van de anisotropiefactor	10
Parameter-onderzoek van de modellen	12
Eerste serie meetdata	17
Tweede serie meetdata	20
Verificatie van theorie en experimenten	22
Conclusies	27
Literatuurlijst	28
Bijlage I	29
Bijlage II	31
Bijlage III	33

## Voorwoord

Tijdens mijn onderzoeksopdracht ben ik in het kader van het IOPM-dieptrekproject werkzaam geweest. Het IOPM-dieptrekproject is een onderzoeksproject waarin wordt samengewerkt door het Laboratorium voor Omvormtechnologie TUE, TNO en enkele grote Nederlandse bedrijven.

Ik wil iedereen bedanken die mij met raad en daad hebben bijgestaan tijdens mijn onderzoeksopdracht en op een of andere wijze een bijdrage hebben geleverd tot de totstandkoming van dit rapport.

Eindhoven, mei 1993  
P. Bongaerts

## Symbolenlijst.

$F$	kracht	[N]
$F_p$	stempelkracht	[N]
$F_c$	kritische dieptrekkraft	[N]
$F_c^*$	dimensieloze kritische dieptrekkraft	[-]
$C$	karacteristieke deformatie weerstand	[N/mm <sup>2</sup> ]
$n$	verstevingsexponent	[-]
$R$	anisotropiefactor	[-]
$R_y$	normaanisotropiefactor	[-]
$R_{0,1}$	anisotropiefactor bij $\epsilon = 0,1$	[-]
$R_{0,2}$	anisotropiefactor bij $\epsilon = 0,2$	[-]
$\sigma_v$	vloeispanning	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_i$	spanning ( $i = 1,2,3$ )	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\bar{\epsilon}$	effectieve rek	[-]
$\epsilon_i$	logaritmische rek	[-]
$\epsilon_{ic}$	kritische rek	[-]
$\epsilon_0$	voordeformatie	[-]
$\rho_p$	stempelradius	[mm]
$\rho_p^*$	dimensieloze stempelradius ( $\rho_p/s_0$ )	[-]
$r_p$	stempelstraal	[mm]
$r_p^*$	dimensieloze stempelstraal ( $r_p/s_0$ )	[-]
$s$	momentane wanddikte	[mm]
$s_0$	initiële wanddikte	[mm]

## Inleiding.

Bij het dieptrekken wordt gesproken over de benodigde en kritische dieptrekkracht; deze zijn als volgt te beschrijven:

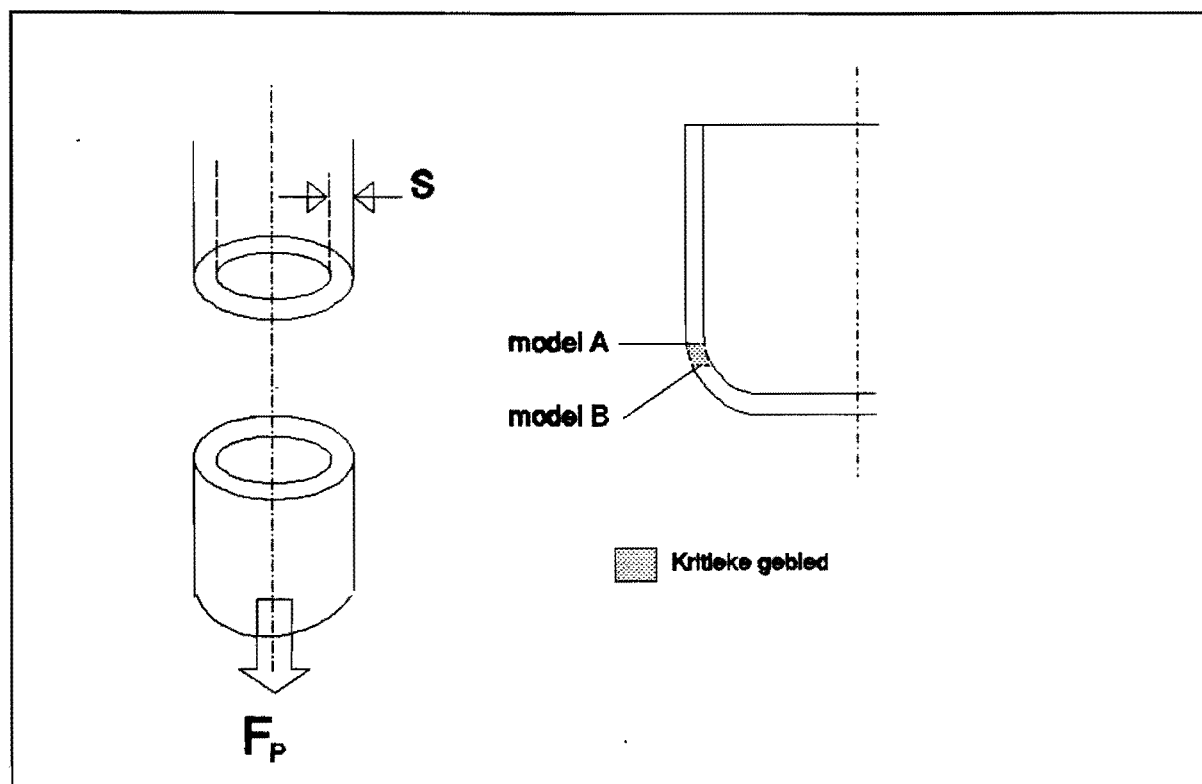
Voor het maken van een produkt is een bepaalde kracht ( $F_p$ ) nodig.

Dit is de sommatie van de volgende krachten:

- kracht voor het stuiken van de flens
- kracht om de wrijving tussen plooihouder en blank te overwinnen
- kracht om de wrijving tussen blank en matrijsafronding te overwinnen
- kracht die nodig is voor de blank twee keer (heen en terug) om de matrijsafronding te buigen.

De kritische dieptrekkracht ( $F_c$ ) is als volgt te omschrijven:

de kritische dieptrekkracht is de kracht die de wand van het produkt kan opvangen tot insnoering optreedt. Het kritieke gebied waar de insnoering optreedt zal zich bevinden in de overgang van de wand naar het afgerond deel van de bodem. Zie Figuur 1.



**Figuur 1** Het kritieke gebied bij dieptrekken.

Er zullen twee modellen besproken worden. Het eerste model (A) houdt geen rekening met de invloed van de geometrie van de stempel en is alleen buiten de afronding geldig, zoals in figuur 1 is weergegeven. In het tweede model (B) is de invloed van de geometrie van de stempel wel in rekening gebracht.

Wanneer voor het maken van een produkt de benodigde dieptrekkraft groter is dan de kritische dieptrekkraft, moet het produkt als niet vervaardigbaar worden gezien omdat scheurvorming optreedt.

Om onderlinge vergelijkingen van verschillende materialen mogelijk te maken is gekozen om de berekende kritische dieptrekkraft op de volgende manier dimensieloos te maken:

$$F_c^* = \frac{F_c}{2\pi r_p s_0 C} \quad (1)$$



## Materiaal modellen.

In bijlage I zijn formules afgeleid voor de effectieve rek en de vloeivoorwaarde van een materiaal. Voor deze afleiding is verondersteld dat het om bewerking van plaatmateriaal gaat. Het is dan mogelijk om met vlakspanning te rekenen. Er volgt voor de effectieve rek:

$$\epsilon_v = |\epsilon_1| \frac{R+1}{\sqrt{2R+1}} \quad (2)$$

Voor de vloeivoorwaarde volgt:

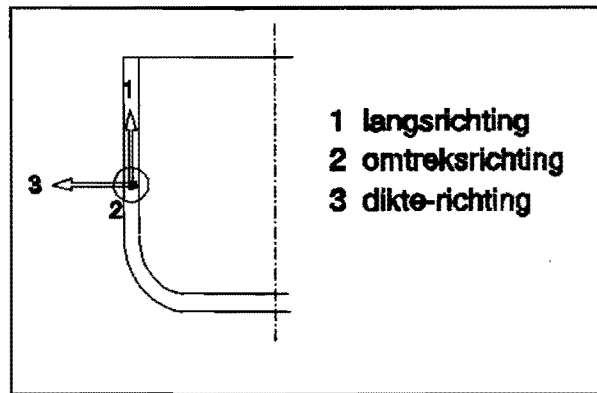
$$\sigma_v = |\sigma_1| \frac{\sqrt{2R+1}}{R+1} \quad (3)$$

Om de versterking van het materiaal tijdens de deformatie in rekening te brengen wordt het materiaal als exponentieel versterkend verondersteld met een voordeformatie. Dan volgt:

$$\bar{\sigma} = (\bar{\epsilon} + \epsilon_0)^n \quad (4)$$

## Modellen voor de kritische dieptrekkraft.

In figuur 2 staan de drie hoofdkeurichtingen aangegeven zoals deze in navolgende formules worden gebruikt.



**Figuur 2** Hoofdkeurichtingen.

In bijlage II staat de afleiding van de formule voor de dimensieloze kritische dieptrekkraft wanneer de geometrie van de stempel geen invloed heeft. In figuur 1 geldt deze formule vanaf het horizontale stukje van het gemarkeerde gebied.

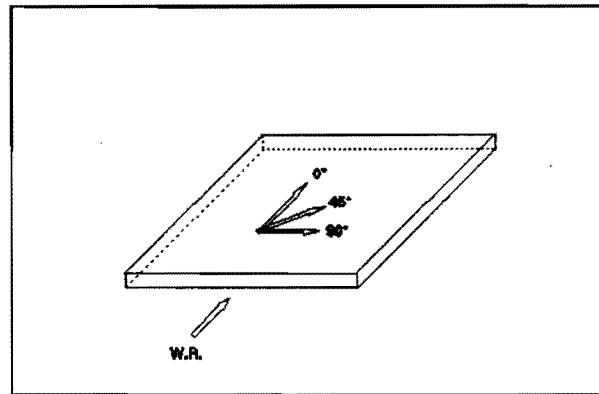
$$F_c^* = \left( \frac{R+1}{\sqrt{2R+1}} \right)^n \cdot \left( \frac{n}{e} \right)^n \cdot \exp \left( \frac{\sqrt{2R+1}}{R+1} \epsilon_0 \right) \quad (5)$$

In bijlage III staat de afleiding voor de dimensieloze kritische dieptrekkraft waar wel rekening is gehouden met de invloed van de geometrie van de stempel. In figuur 1 geldt deze formule dus voor het gemarkeerde gebied.

$$F_c^* = 2 \cdot \sqrt{\frac{R+1}{R+5}} \cdot \left( \frac{R+1}{\sqrt{2R+1}} \right)^n \cdot n^n \cdot \left[ \frac{1}{r_p^*} + \frac{1}{\rho_p^*} + \exp \left( n - \frac{\sqrt{2R+1}}{R+1} \epsilon_0 \right) \right]^{-1} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{2r_p^*} \exp \left( \frac{\sqrt{2R+1}}{R+1} \epsilon_0 - n \right) \right] \quad (6)$$

### Bepaling van de anisotropiefactoren.

De anisotropiefactor geeft aan of een materiaal een bepaalde voorkeursrichting heeft om te deformereren. Dit wordt bijvoorbeeld veroorzaakt doordat een plaat gewalst is. Hierdoor worden de materiaaldeeltjes in een bepaalde oriëntatie gedwongen.



**Figuur 3** Gewalste plaat.

In het vlak van de plaat zijn drie kenmerkende richtingen; te onderscheiden de  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  en de  $90^\circ$ -richting (zie figuur 3). Trekstaven worden in deze richtingen uitgesneden om de materiaalgegevens te bepalen.

De rek in het vlak van de plaat is:  $\epsilon_d$

De rek loodrecht op de plaat:  $\epsilon_n$

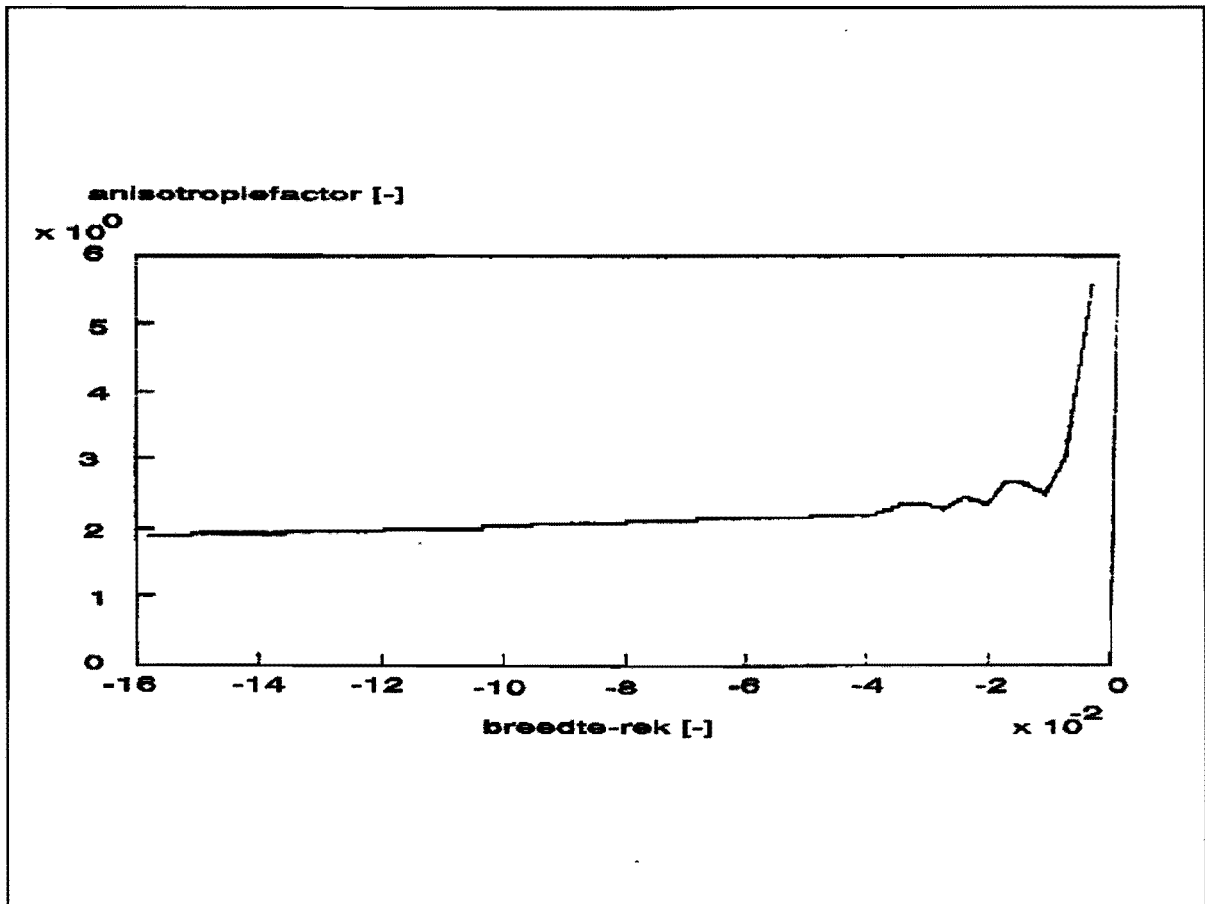
De anisotropiefactor is gedefinieerd als:

$$R = \frac{\epsilon_d}{\epsilon_n} \quad (7)$$

Bij berekeningen wordt gewerkt met de normaalanisotropie. Dit is de gemiddelde waarde van de anisotropiefactoren in de verschillende richtingen.

$$R_y = \frac{R_0 + 2 \cdot R_{45} + R_{90}}{4} \quad (8)$$

Bij het rekenen met anisotropiefactoren is enige voorzichtigheid geboden. De anisotropiefactoren worden verkregen door middel van het "trekproefanalyse programma". Tijdens de beginfase van een trekproef is de diktereductie zeer gering. Omdat de verplaatsingsopnemers een beperkte resolutie hebben, zullen de kleine verplaatsingen niet correct meetbaar zijn binnen de nauwkeurigheid van de verplaatsingsopnemers. Hierdoor worden bij de eerste metingen zeer kleine dikte-rekken ( $\epsilon_n$ ) gemeten. Het gevolg hiervan is dat de berekende anisotropiefactoren dan zeer hoog uitvallen. Figuur 4 geeft het verloop van de anisotropiefactor weer, zoals deze ook te zien is in het meetrapport [1].



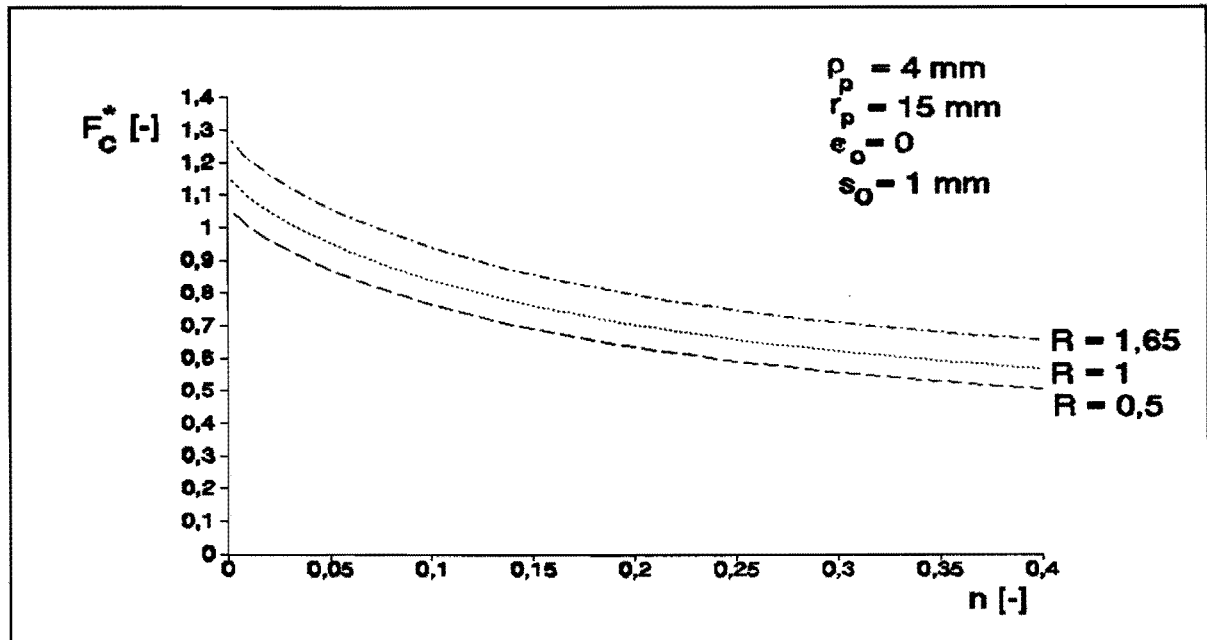
**Figuur 4** Anisotropiefactor als functie van de breedte-rek.

Wanneer gewerkt wordt met de gemiddelde anisotropiefactor over het meettraject, zal een grote fout geïntroduceerd worden.

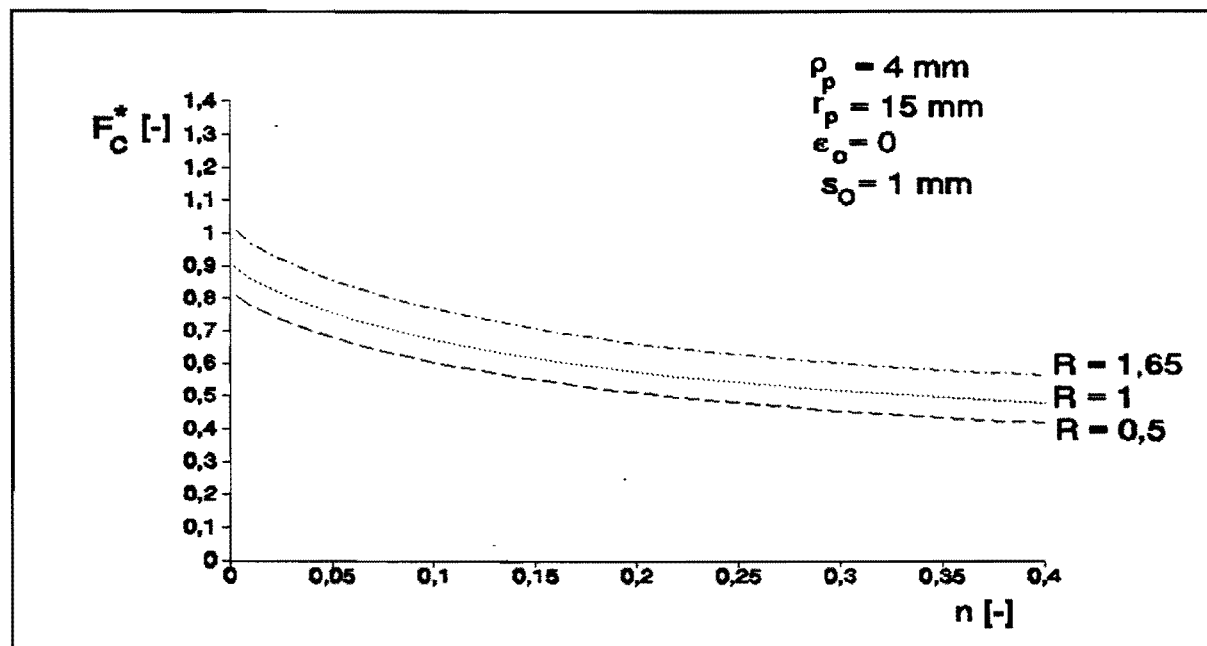
Zoals uit figuur 4 blijkt is het beter de anisotropiefactor bij een langstrek ( $\epsilon_1 = -\epsilon_b - \epsilon_s$ ) die tussen de 0,1 en 0,2 ligt te nemen, omdat de geïntroduceerde fout dan klein is.

## Parameter-onderzoek van de modellen.

Kritische dieptekracht als functie van de versterkingsexponent.



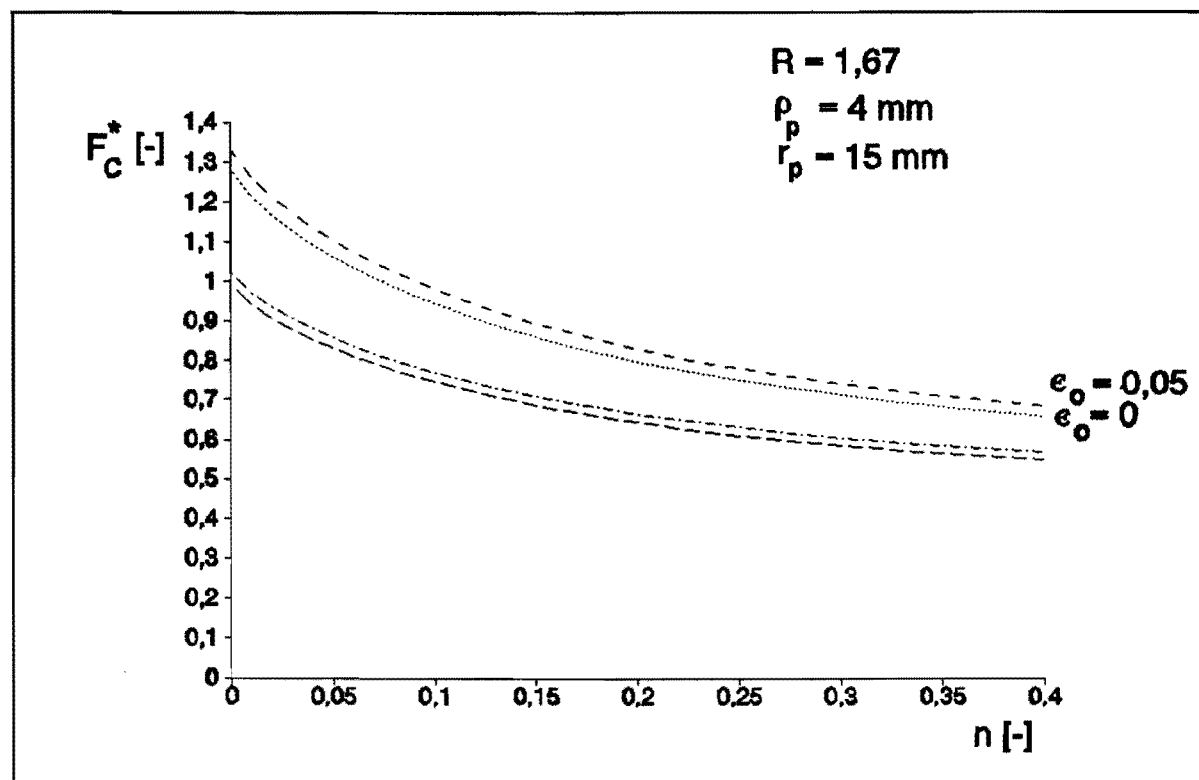
Figuur 5  $F_c^*$  volgens formule (5).



Figuur 6  $F_c^*$  volgens formule (6).

Voor afnemende waarden van de versterkingsexponent stijgt  $F_c^*$  snel. De afhankelijkheid van de versterkingsexponent is voor de berekeningen met formule (5) iets groter dan formule (6), vooral voor kleine  $n$ -waarden.

Kritische dieptrekkraft als functie van de voordeformatie  $\epsilon_0$ .

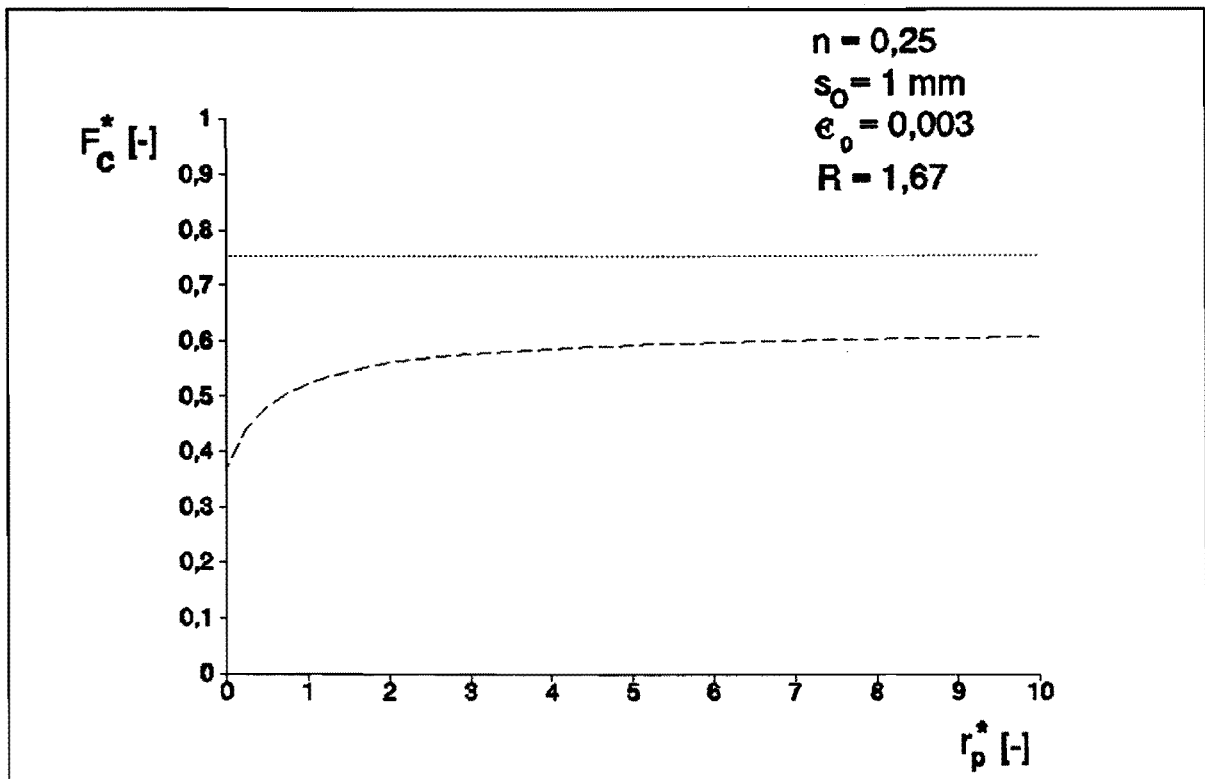


Figuur 7  $F_c^*$  als functie van  $\epsilon_0$ .

De bovenste twee lijnen in figuur 7 zijn volgens de berekening met formule (5) en de onderste lijnen volgens formule (6).

Door voordeformatie wordt de kritische dieptrekkraft iets groter. Het materiaal is door een voordeformatie reeds verstevigd.

Kritische dieptrekkraft als functie van de dimensieloze stempelstraal  $r_p^*$ .



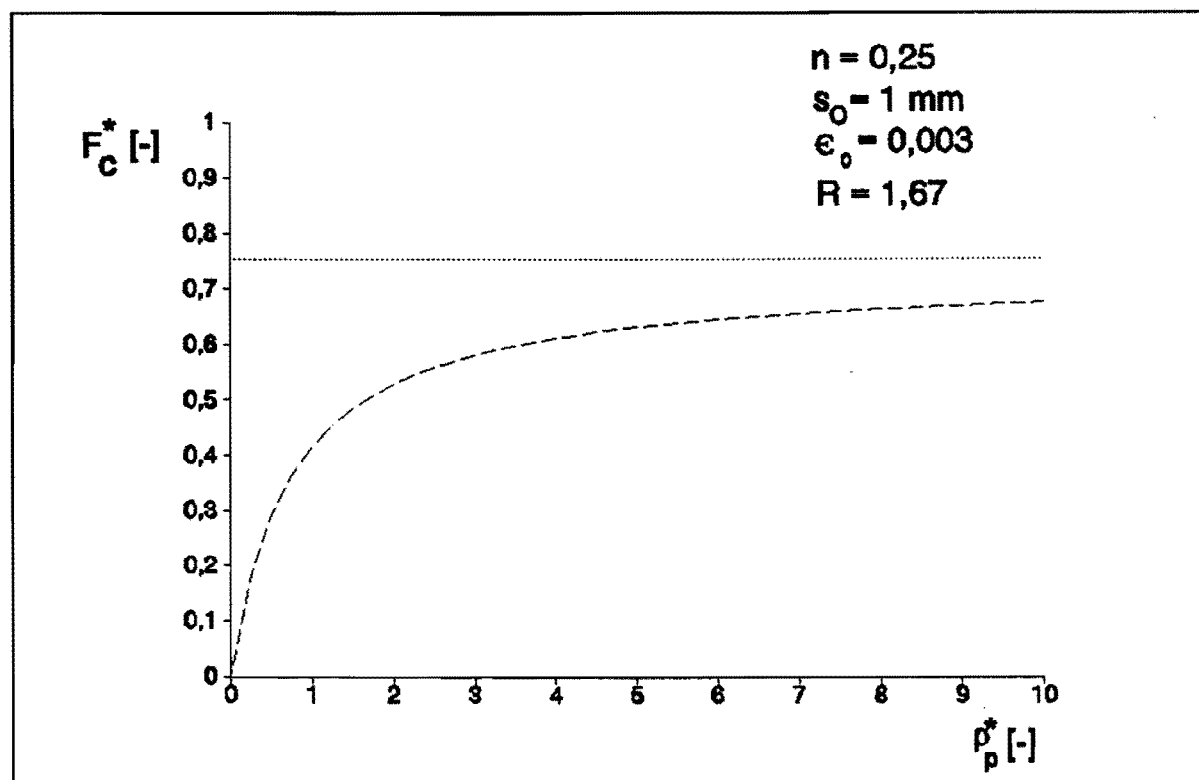
Figuur 8  $F_c^*$  als functie van  $r_p^*$ .

De horizontale lijn is het verloop zoals dat volgens model A wordt berekend en de gekromde lijn geeft het verloop volgens model B weer.

Voor kleine waarden van  $r_p^*$  daalt de kritische dieptrekkraft sterk. De gekromde lijn gaat niet door de oorsprong, dit wordt veroorzaakt door de kleine stempel/plaatdikte verhouding. In formule (6) is de laatste term van doorslaggevend belang.

Bij in de praktijk voorkomende dieptrekprocessen, zal vrijwel altijd worden gewerkt met  $r_p^*$ -waarden die zich buiten het gekromde deel van de lijn bevinden.

Kritische dieptekracht als functie van de dimensieloze stempelradius  $\rho_p^*$ .



Figuur 9  $F_c^*$  als functie van  $\rho_p^*$ .

De horizontale lijn zijn de theoretische waarden zoals deze met formule (5) worden berekend, de gekromde lijn zijn de theoretische waarden zoals deze met formule (6) worden berekend.

Hier is een sterke afname van de kritische dieptekracht voor  $\rho_p^* < 4$ .

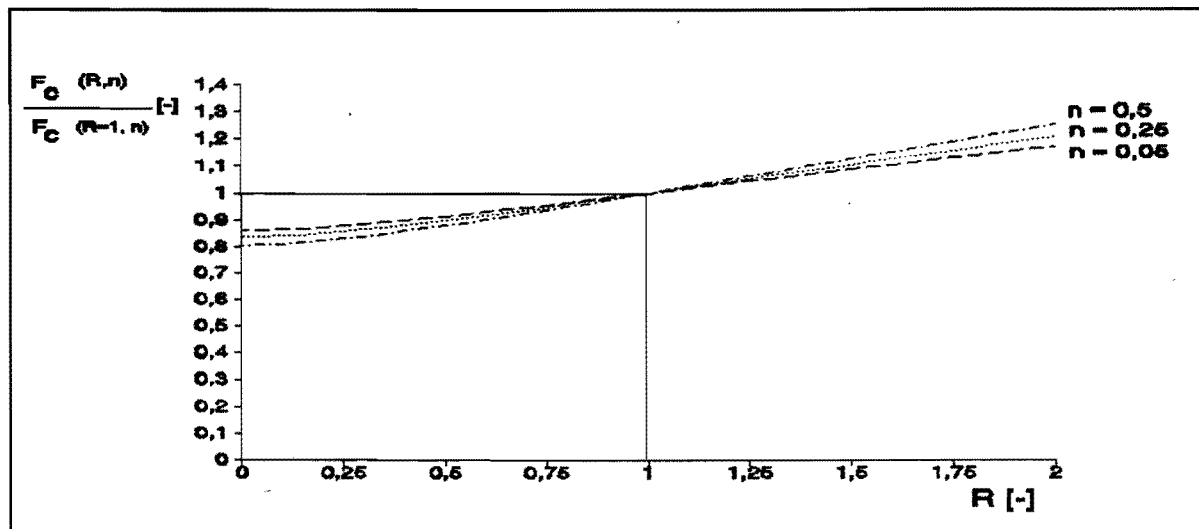
De gekromde lijn gaat hier wel door de oorsprong.

Voor de stempelradius worden in de praktijk wel waarden voor  $\rho_p^*$  genomen, die zich juist in het gekromde deel van de lijn bevinden.

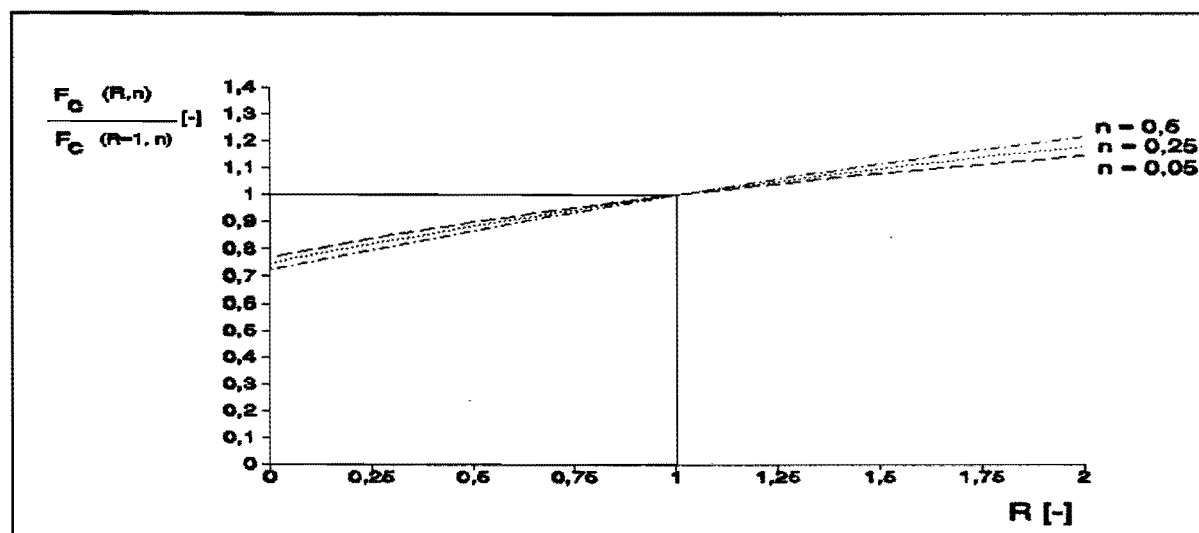


Kritische dieptrekkraft als functie van de anisotropiefactor.

Om alleen de invloed van de anisotropie mee te nemen is ervoor gekozen de berekende waarden van de kritische dieptrekkraft te normeren op de kritische dieptrekkraft bij een anisotropiefactor  $R = 1$ . Hierbij wordt de versterkings-exponent als parameter genomen.



Figuur 10 Genormeerde kritische dieptrekkraft volgens (5).



Figuur 11 Genormeerde kritische dieptrekkraft volgens (6).

Uit figuur 10 en 11 blijkt dat de invloed van de anisotropie voor beide modellen gelijk is voor het traject  $0,6 < R < 2$ . Voor  $R < 0,6$  is volgens formule (5) bijna geen invloed meer van de anisotropie en voor model (6) neemt de afhankelijkheid van de anisotropie juist toe.

**Eerste serie meetdata [2].**

De codering en omschrijving van de beproefde materialen luidt als volgt:

- 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 15 onbekleed (Hoogovens code 8921)
- materiaal 12, Hoogovens, St 15 bekleed, Thermische zinklaag laagdikte 10  $\mu\text{m}$ , (hotdip), (Hoogovens code 9121)
- materiaal 13, Hoogovens, St 15 bekleed, Elektrolytische zinklaag 10  $\mu\text{m}$ , (Hoogovens code 9122)
- materiaal 14, Hoogovens, St 15 bekleed, Duplexsysteem: Elektrolytische zinklaag 10  $\mu\text{m}$ , primer 5  $\mu\text{m}$ , Topcoat polyurethaan, (hoogovens code 9120).

Van deze materialen zijn de volgende gegevens door middel van trekproeven verkregen.

materiaal	C [N/mm <sup>2</sup> ]	n [-]	R <sub>0,2</sub> [-]	$\epsilon_0$ [-]	s <sub>0</sub> [mm]
mat 1	490	0,236	1,67	0,003	0,69
mat 2	498	0,246	1,62	0	0,88
mat 3	481	0,211	1,51	0,004	0,71
mat 4	507	0,267	1,80	0	0,75
mat 5	275	0,228	0,54	0	1,00
mat 6	254	0,3	0,56	0	1,02
mat 10	506	0,239	1,99	0,007	0,79
mat 11	531	0,291	1,77	0	0,80
mat 12	522	0,246	1,74	0,007	0,69
mat 13	495	0,259	1,86	0,003	0,70
mat 14	459	0,262	1,84	0,003	0,76

Bij deze experimenten zijn de smeermiddelen finarol en talk gebruikt.

Geometrische gegevens:

$$r_p = 15 \text{ mm}$$

$$\rho_p = 4 \text{ mm}$$

De experimenten leveren de volgende kritische dieptrekkrachten:

materiaal	F <sub>c</sub> talk [kN]	F <sub>c</sub> finarol [kN]
mat 1	23,00	23,85
mat 2	30,58	31,50
mat 3	21,85	23,19
mat 4	24,91	26,66
mat 5	12,50	12,71
mat 6	10,32	10,94
mat 10	26,80	27,88
mat 11	25,72	26,50
mat 12	23,73	24,44
mat 13	22,63	24,44
mat 14	22,13	22,22

In de onderstaande tabel zijn de metingen dimensieloos gemaakt omdat onderlinge vergelijking van verschillende materialen dan beter mogelijk is.

materiaal	metingen		berekeningen	
	$F_c^*$ talk [-]	$F_c^*$ finarol [-]	$F_c^*$ (5) [-]	$F_c^*$ (6) [-]
mat 1	0,722	0,748	0,765	0,656
mat 2	0,740	0,763	0,748	0,621
mat 3	0,684	0,726	0,768	0,657
mat 4	0,695	0,744	0,754	0,640
mat 5	0,482	0,490	0,616	0,499
mat 6	0,423	0,448	0,565	0,462
mat 10	0,711	0,740	0,808	0,672
mat 11	0,642	0,662	0,732	0,618
mat 12	0,699	0,720	0,768	0,657
mat 13	0,693	0,748	0,771	0,657
mat 14	0,673	0,676	0,766	0,646

### Tweede serie meetdata [3].

In deze serie zijn de materialen 2, 6, 11 en 23 beproefd.

Bij deze experimenten zijn de verschillende materialen diepgetrokken tot de kritische dieptrekkkracht waarbij de stempelradius gevarieerd is.

Bij deze experimenten is talk als smeermiddel toegepast.

Geometrische gegevens:

$$r_p = 16,25 \text{ mm}$$
$$\rho_p = 2 - 4 - 6 - 8 - 10 \text{ mm}$$

Omschrijving van materiaal 23.

materiaal 23, Hunter Douglas, Aluminium C4S bekleed met lak,  
Code H18\48.

Opmerking: Het materiaal 23 heeft een extreem lage versterkingsexponent zoals in onderstaande tabel te zien is. De C, n,  $\epsilon_0$  en R worden over een zeer kort interval bepaald. Zeer kleine afwijkingen leveren dus grote fouten in deze waarden.

In de volgende tabel staan de materiaolgegevens die door middel van trekproeven zijn verkregen.

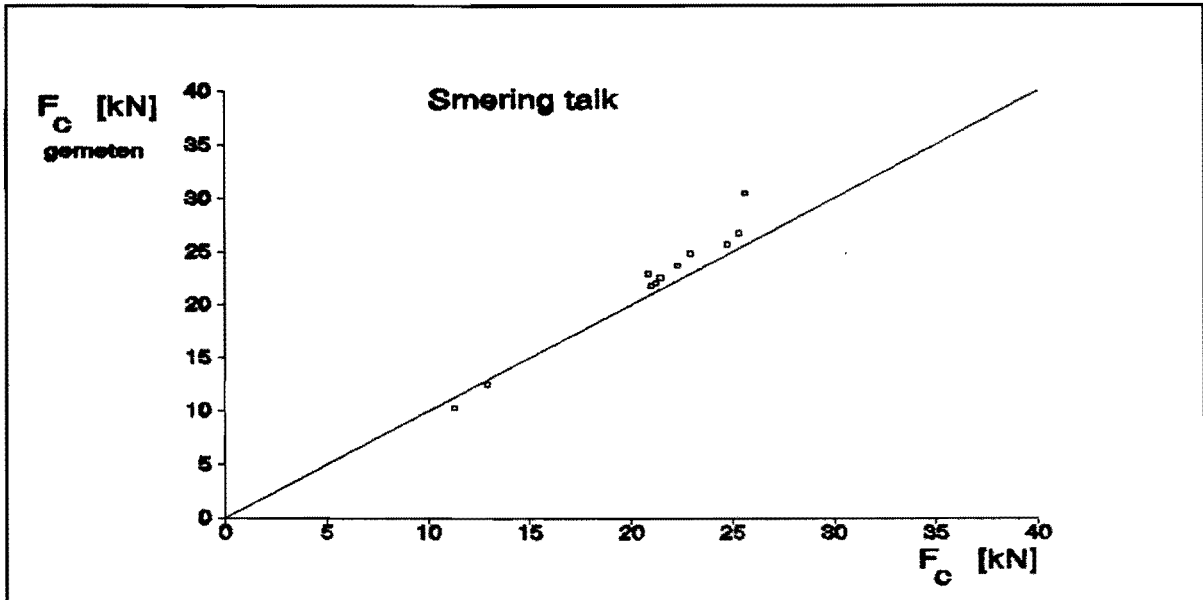
materiaal	C [N/mm <sup>2</sup> ]	n [-]	R [-]	$\epsilon_0$ [-]	s <sub>0</sub> [mm]
mat 2	500	0,247	1,64	0,001	0,90
mat 6	241	0,267	0,55	0,000	1,00
mat 11	516	0,273	1,62	0,001	0,80
mat 23	189	0,038	0,60	0,000	0,66

In onderstaande tabel staan de met formule (5) en (6) berekende waarden voor de dimensieloze kritische dieptrekkraft en de gemeten waarden voor de kritische dieptrekkraft voor verschillende  $s_0/\rho_p$  verhoudingen.

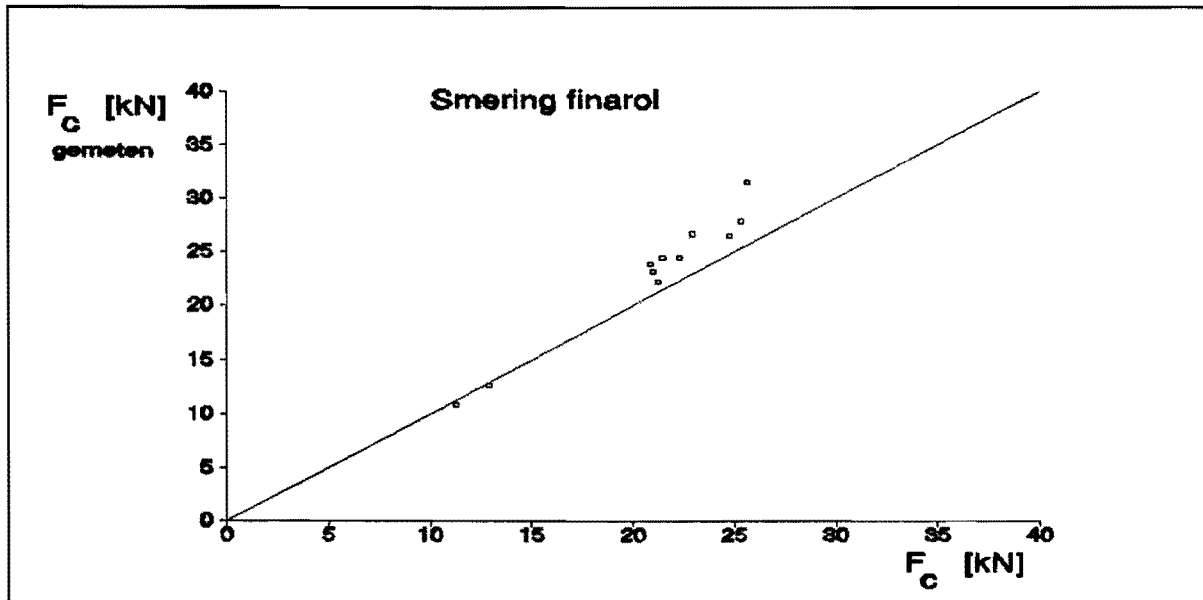
materiaal	$s_0/\rho_p$ [-]	metingen		berekening	
		$F_c$ [kN]	$F_c^*$ [-]	$F_c^*$ (5) [-]	$F_c^*$ (6) [-]
mat 2	0,45	32,75	0,71	0,75	0,54
mat 2	0,23	34,67	0,75	0,75	0,62
mat 2	0,15	34,63	0,75	0,75	0,65
mat 2	0,11	37,75	0,76	0,75	0,67
mat 2	0,09	35,25	0,77	0,75	0,68
mat 6	0,50	11,33	0,46	0,59	0,41
mat 6	0,25	12,46	0,51	0,59	0,48
mat 6	0,17	12,25	0,50	0,59	0,50
mat 6	0,13	12,48	0,51	0,59	0,52
mat 6	0,10	12,81	0,52	0,59	0,53
mat 11	0,40	28,88	0,69	0,73	0,55
mat 11	0,20	30,63	0,73	0,73	0,61
mat 11	0,13	29,75	0,71	0,73	0,64
mat 11	0,10	30,00	0,71	0,73	0,66
mat 11	0,08	30,13	0,71	0,73	0,67
mat 23	0,33	9,50	0,75	0,92	0,68
mat 23	0,17	10,63	0,83	0,92	0,78
mat 23	0,11	10,82	0,85	0,92	0,81
mat 23	0,08	10,63	0,83	0,92	0,83
mat 23	0,07	9,88	0,78	0,92	0,84

## Verificatie van theorie en experimenten.

Voor de twee gebruikte smeermiddelen, finarol en talk, worden de gemeten waarden voor  $F_c$  uitgezet tegen de berekende waarden voor  $F_c$ .



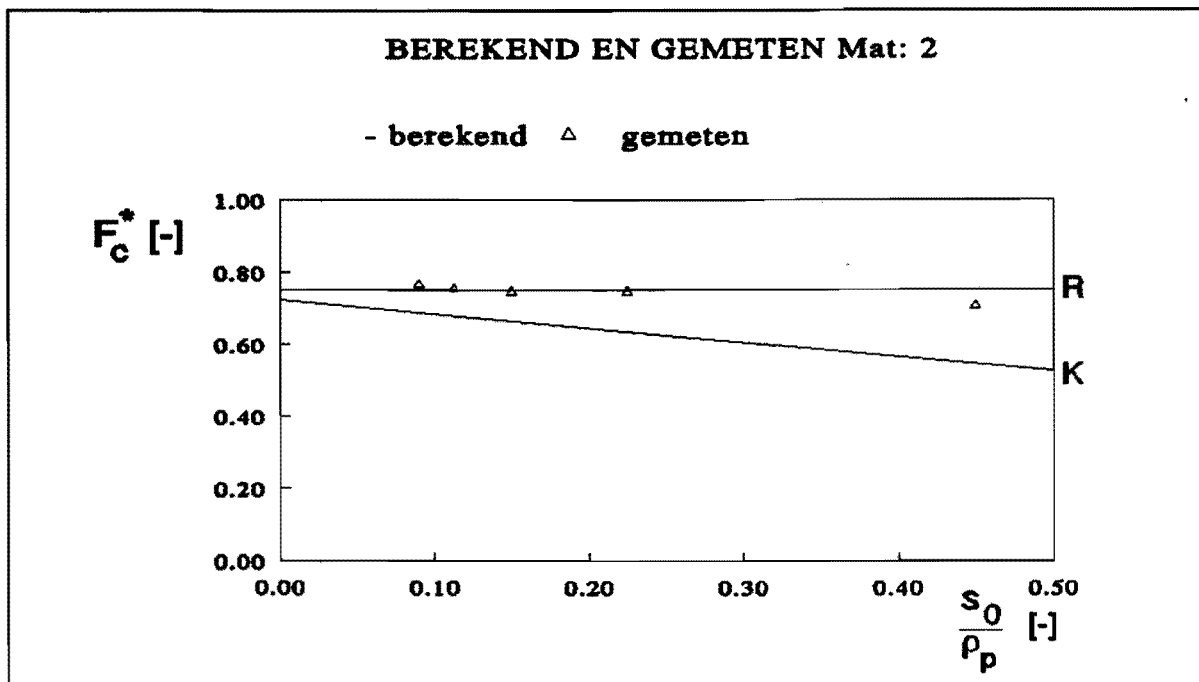
Figuur 12 Smeermiddel talk.



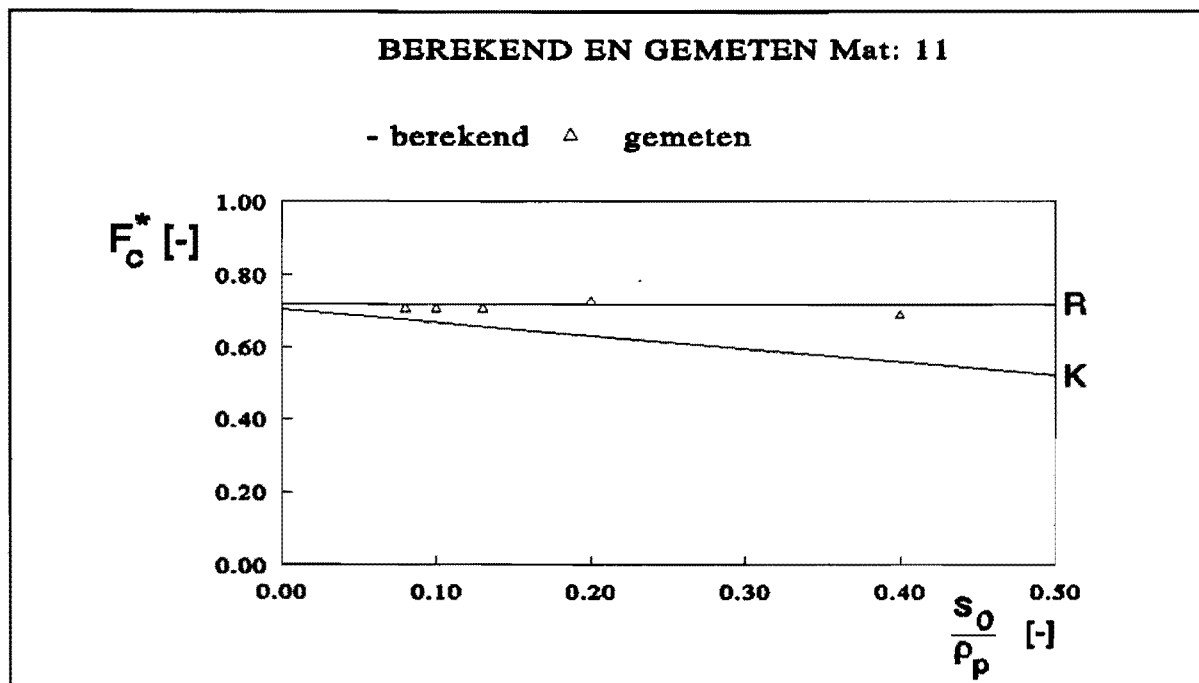
Figuur 13 Smeermiddel finarol.

Uit figuur 12 en 13 blijkt dat smearing met finarol een grotere spreiding van de kritische dieptrekkkrachten veroorzaakt dan smearing met talk.

De theoretische waarden en de metingen van de tweede serie meetdata. De lijnen zijn de lineaire benaderingen van berekende waarden van  $F_c^*$  met formule (5) (= R) en met formule (6) (= K). Voor de staalsoorten levert dit de figuren 14 en 15.



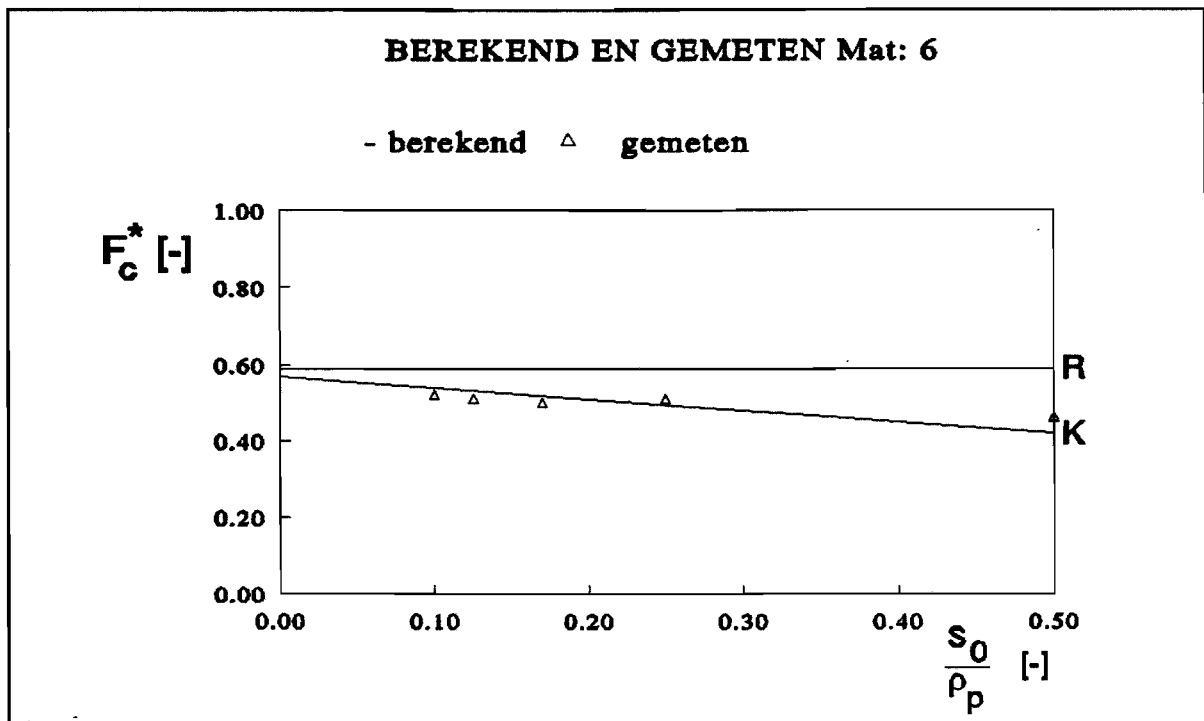
Figuur 14  $F_c^*$  als functie van  $s_0/\rho_p$ .



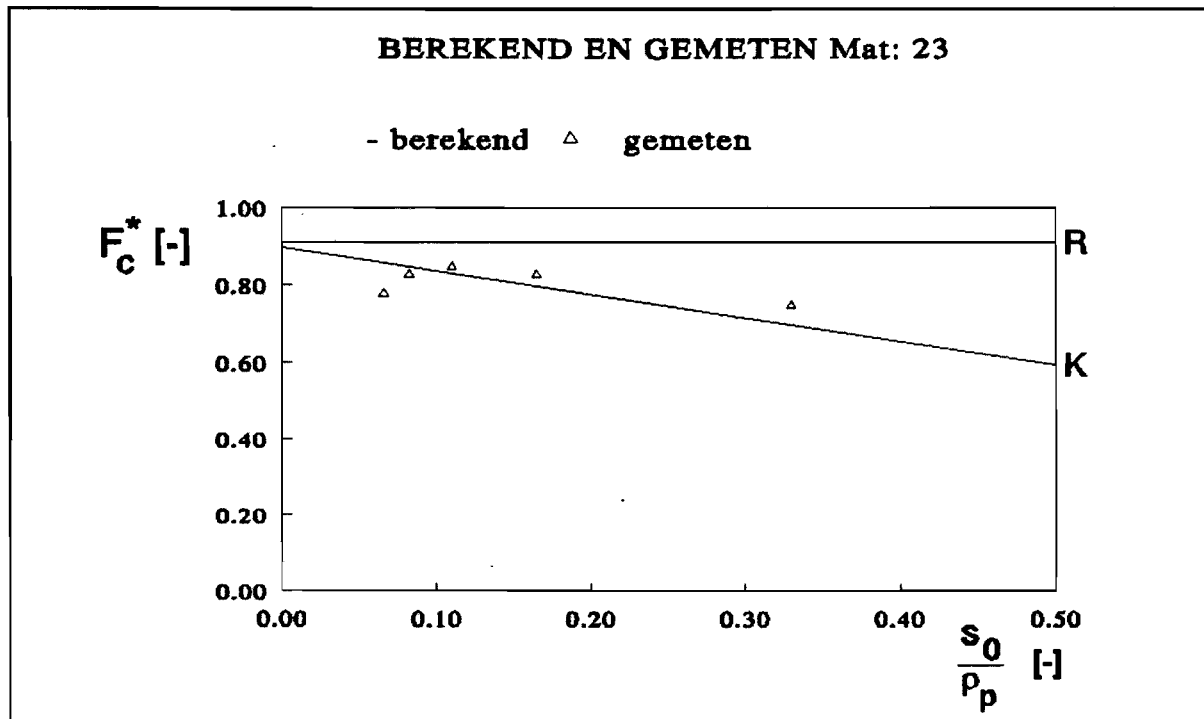
Figuur 15  $F_c^*$  als functie van  $s_0/\rho_p$ .



Voor de aluminiumsoorten levert dit de figuren 16 en 17.



Figuur 16  $F_c^*$  als functie van  $s_0/\rho_p$ .

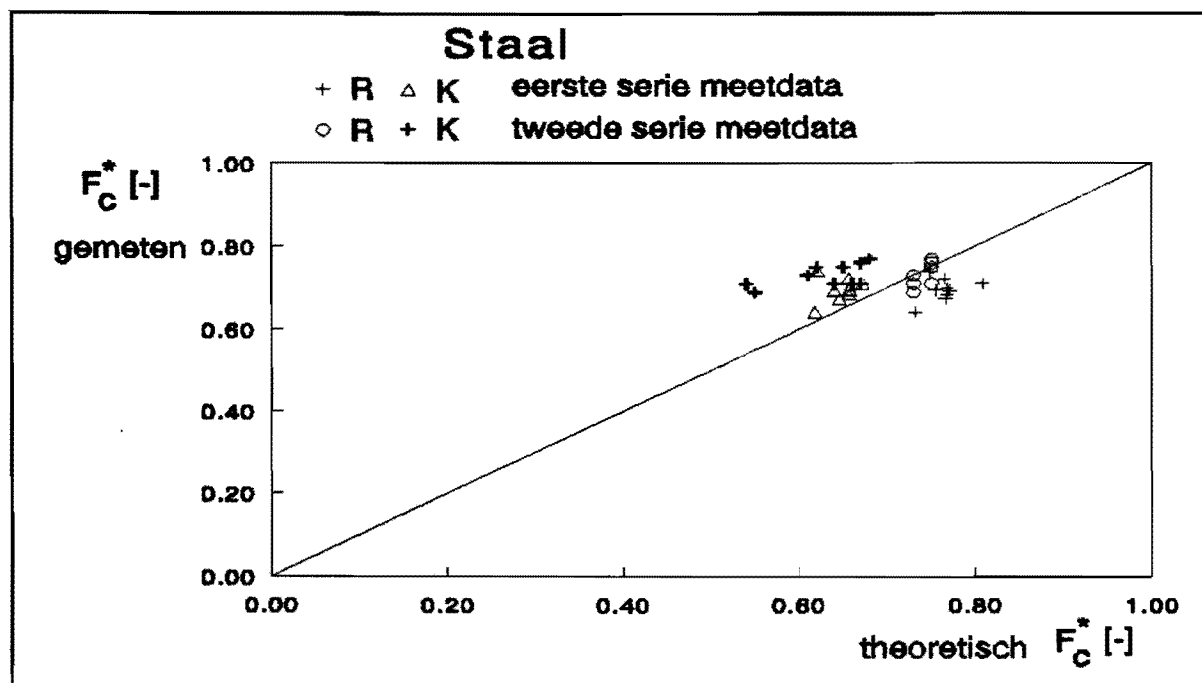


Figuur 17  $F_c^*$  als functie van  $s_0/\rho_p$ .

Nu wordt voor beide serie meetdata, de gemeten waarden voor de dimensieloze kritische dieptrekkraft uitgezet tegen de theoretische berekende waarden. Alleen de experimenten, waarbij talk als smeermiddel gebruikt is, zijn verwerkt. Door deze manier van weergeven is snel zichtbaar of met behulp van de theoretische modellen een te hoge of een te lage kritische dieptrekkraft wordt berekend.

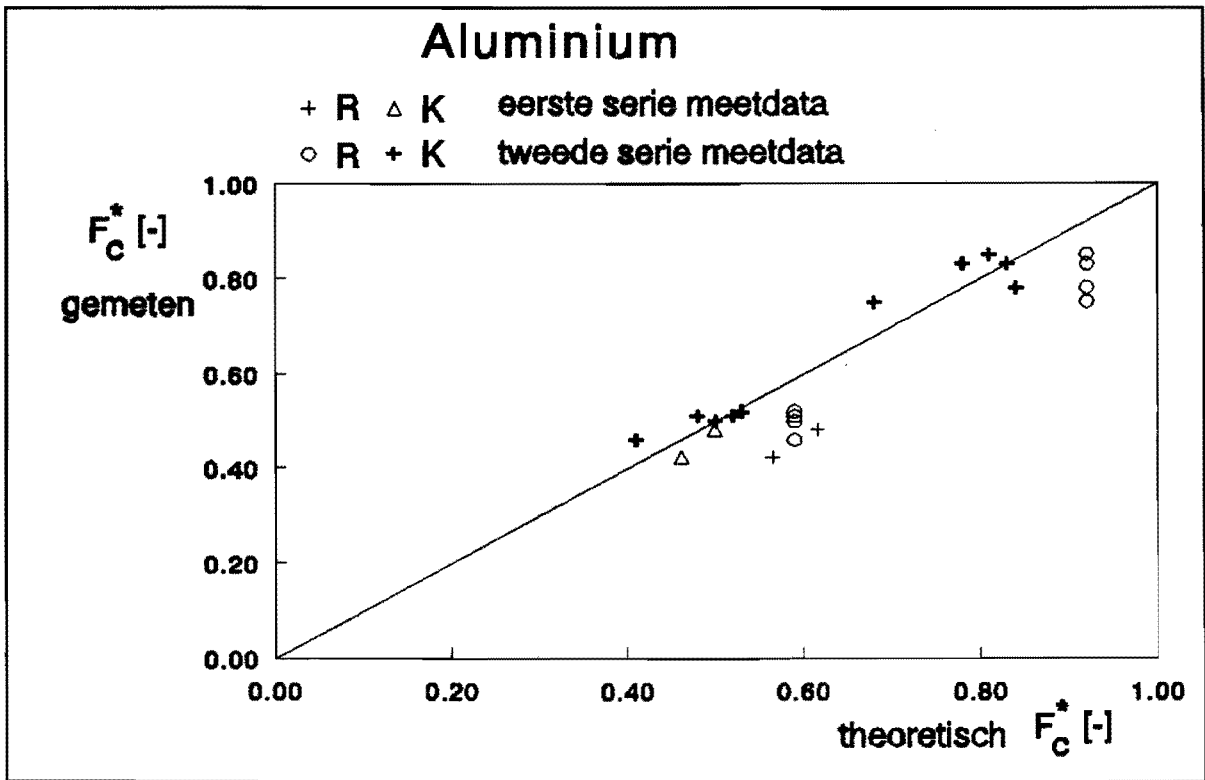
Staal en aluminium gedragen zich verschillend tijdens het dieptrekken. Dit is de reden dat voor beide materiaalsoorten de gegevens afzonderlijk weergegeven zijn.

Voor de staalsoorten levert dit figuur 18.



Figuur 18    Staalsoorten.

Voor de aluminiumsoorten levert dit figuur 19.



Figuur 19 Aluminiumsoorten.

## CONCLUSIES:

De berekeningen van de kritische dieptrekkkrachten met formule (5) liggen allemaal hoger dan de berekeningen met formule (6). De oorzaak hiervan is de invloed van de geometrie van de stempel die in formule (6) wel en in formule (5) niet is meegenomen.

Bij vergelijking van meetdata uit de eerste en tweede serie is enige voorzichtigheid geboden. Bij de experimenten is namelijk met verschillende geometrieën en materiaal gegevens gewerkt. Verder zijn plaatdikte, dieptrekverhouding en plooihouderkracht verschillend. De laatste twee zijn niet meegenomen in de theoretische afleidingen maar het is mogelijk dat deze wel invloed hebben op de kritische dieptrekkkracht.

Uit figuren 10 en 11 volgt dat bij materialen met een grote verstevigingsexponent, variaties in de anisotropiefactor een grotere afwijking in de berekening van de kritische dieptrekkkracht veroorzaken dan bij materialen met een lage verstevigingsexponent. Volgens formule (5) neemt de invloed van de anisotropie voor  $R < 0,6$  af en volgens formule (6) neemt deze invloed toe.

Afwijkingen tussen de theoretische modellen en praktijk kunnen worden veroorzaakt door de wrijvingsinvloed, deze is in beide modellen niet in rekening gebracht. Wrijving tussen de wand en de stempel heeft tot gevolg dat de kracht niet alleen door de wand wordt opgevangen doch ook door wrijvings-spanningen. Hierdoor wordt de wand iets ontlast, dus zal de gemeten kritische dieptrekkkracht hoger zijn.

Bij smering met talk zien we lagere gemeten kritische krachten, dit komt doordat talk een lagere wrijvingscoëfficiënt heeft. Verder blijkt dat bij smering met finarol een grotere spreiding in de metingen zit, dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het niet voldoende aanwezig zijn van smeermiddel bij finarolsmering, hierdoor zullen "materiaaltoppen" door de smeerlaag prikken. Er ontstaat het zogenaamde "Stick-slip" verschijnsel.

Uit de figuren 14 en 15 blijkt dat de kritische dieptrekkkrachten voor staalsoorten beter met behulp van formule (5) berekend kunnen worden. De invloed van de geometrie ( $\rho_p$ ) komt in de metingen niet zo sterk tot uiting, hoewel model B dit wel verwacht. Uit de figuren 16 en 17 is de invloed van de geometrie wel zichtbaar. Voor aluminiumsoorten voldoet formule (6) beter.

Uit de figuren 18 en 19 blijkt dat voor aluminium model B en voor staal model A goed voldoet. Wanneer de kritische dieptrekkkracht met een veilige marge berekend moet worden, verdient model B de voorkeur. Dit model berekend altijd lagere kritische dieptrekkkrachten dan uit metingen worden verkregen.

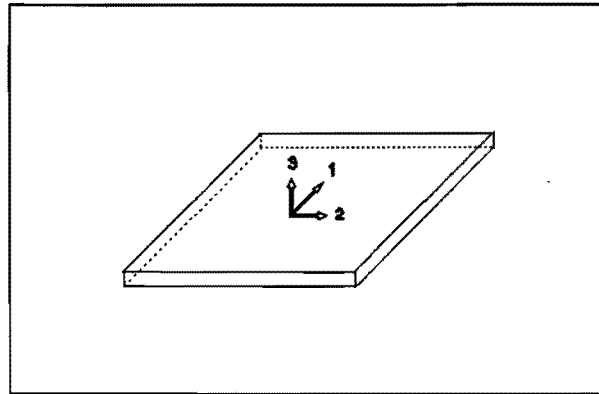
## Literatuurlijst

- [1] Buzeman, D  
Groot, M.Th. de  
Net, A.J. van der  
Het bepalen van de wrijvingscoëfficiënt met de  
striptrekproef  
November 1991  
Technische Universiteit Eindhoven  
WPA nr 1194, IOPM-D 014
- [2] Groot, M.Th. de  
Net, A.J. van der  
Bepaling van de maximale en kritische dieptrekkkracht bij het dieptrekken  
Mei 1992  
Technische Universiteit Eindhoven  
WPA nr. 1280, IOPM-D 034
- [3] Groot, M.Th. de  
Net, A.J. van der  
De invloed van gereedschapsgeometrie op de maximaal benodigde en de  
kritische dieptrekkkracht.  
Jan 1993  
Technische Universiteit Eindhoven  
WPA nr. 1460, IOPM-D 052
- [4] Kals, J.A.G.  
'The quantitative effect of tool Geometry and-strain hardening on the  
critical punch-force in cup-drawing'  
Dictaat bewerkingstechnologie H 2 voor bijlage I  
" " H 6 voor bijlage III
- [5] Ramaekers, J.A.H.  
Houtackers, L.A.J.  
Peeters, P.B.G.  
Plastisch bewerken van metalen  
1976  
ISBN 90-6808-007-5
- [6] Winter, A. de  
De invloed van de anisotropie op de kritische dieptrekkkracht bij  
het dieptrekken van ronde produkten.  
Vergelijking van twee modellen.  
Maart 1993  
Technische Universiteit Eindhoven  
WPA nr 1468

## Bijlage I

De basis formules zijn afkomstig uit [4].

In onderstaande afbeelding zijn de 3 hoofdrichtingen weergegeven, deze richtingen corresponderen met de indices in de formules.



Afbeelding 1 Hoofdrichtingen in de plaat.

Voor anisotroop materiaal geldt voor de effectieve rek:

$$\epsilon_v = \sqrt{\frac{R+1}{2R+1} (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + R\epsilon_3^2)} \quad (1)$$

Bij dieptrekken, wanneer het cupje zich al om de stempel heeft gevormd, is de rek in omstreksrichting ( $\epsilon_2$ ) gelijk aan 0. Met gebruikmaking van volumeïnvariantie volgt voor formule (1):

$$\epsilon_v = |\epsilon_1| \frac{(R+1)}{\sqrt{2R+1}} \quad (2)$$

Voor de vloeispanning geldt:

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{R+1} [R(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (3)$$

Met de veronderstelling van vlakspanning volgt dat  $\sigma_3 = 0$ .  
Dan volgt voor formule (3):

$$\sigma_v^2 = \sigma_1^2 - \frac{2R}{R+1} \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2 \quad (4)$$

Uit de Levi von Mises relaties volgt:

$$d\epsilon_2 = \frac{d\epsilon_v \cdot (\sigma_2 - \sigma_3) + R(\sigma_2 - \sigma_1)}{\sigma_v} \quad (5)$$

Omdat de rek in omstreksrichting  $\epsilon_2 = 0$ , volgt na substitutie hiervan in formule (5):

$$\sigma_2 = \sigma_1 \frac{R}{R+1} \quad (6)$$

Substitutie van (6) in (4) levert:

$$\sigma_v = |\sigma_1| \frac{\sqrt{2R+1}}{R+1} \quad (7)$$

## Bijlage II

In [5] is een afleiding gemaakt voor de kritische dieptrekkraft waarin de geometrie-invloed niet is meegenomen. Er is gerekend met isotroop materiaal. Nu zal een afleiding gegeven worden waarin de invloed van de anisotropie wel in rekening wordt gebracht.

Er geldt  $\sigma_3 = 0$  en  $\epsilon_2 = 0$ .

Met behulp van volumeïnvariantie volgt:

$$\begin{aligned} \epsilon_1 = -\epsilon_3 &= Ln \frac{S_0}{S} \\ S &= S_0 e^{-\epsilon_1} \end{aligned} \quad (1)$$

In bijlage I zijn de volgende 2 formules afgeleid:

$$\epsilon_v = |\epsilon_1| \frac{R+1}{\sqrt{(2R+1)}} \quad (2)$$

$$\sigma_v = |\sigma_1| \frac{\sqrt{2R+1}}{R+1} \quad (3)$$

Voor de kracht in de wand geldt:

$$F = 2\pi r_p S \sigma_1 \quad (4)$$

Uit (3) volgt voor  $\sigma_1$ :

$$\sigma_1 = \sigma_v \frac{R+1}{\sqrt{2R+1}} \quad (5)$$



Als versterkingsfunctie wordt de volgende formule gebruikt:

$$\sigma_v = C (\bar{\epsilon} + \epsilon_0)^n = C \left( \frac{R+1}{\sqrt{2R+1}} \cdot |\epsilon_1| + \epsilon_0 \right)^n \quad (6)$$

Substitutie van (6) in (5) en vervolgens in (4) levert:

$$F = 2\pi r_p s C \left( \frac{R+1}{\sqrt{2R+1}} \cdot |\epsilon_1| + \epsilon_0 \right)^n \quad (7)$$

De kritische rek wordt bereikt wanneer  $\partial F / \partial \epsilon_1 = 0$ , dan treedt insnoering op. Voor  $\epsilon_{1c}$  geldt dan:

$$\epsilon_{1c} = n - \frac{\sqrt{2R+1}}{R+1} \epsilon_0 \quad (8)$$

Deze kritische rek (8) en de wanddikte volgens (1) worden in (7) gesubstitueerd. Dit levert:

$$F_c = 2\pi r_p s_0 C \cdot \exp\left(-\left(n - \frac{\sqrt{2R+1}}{R+1} \epsilon_0\right) \cdot \frac{R+1}{\sqrt{2R+1}} \cdot \left(\frac{R+1}{\sqrt{2R+1}} \left(n - \frac{\sqrt{2R+1}}{R+1} \epsilon_0\right) + \epsilon_0\right)\right)^n \quad (9)$$

De dimensieloze kritische dieptrekkracht wordt nu:

$$F_c^* = \left(\frac{R+1}{\sqrt{2R+1}}\right)^n \cdot \left(\frac{n}{e}\right)^n \cdot \exp\left(\frac{\sqrt{2R+1}}{R+1} \epsilon_0\right) \quad (10)$$

### Bijlage III

In [4] is het spanningsevenwicht voor het cupje opgesteld, dit is gedaan ter plaatse van de afronding van de wand naar de bodem. Vervolgens is voor isotroop materiaal ( $R = 1$ ) de afleiding gemaakt voor de kritische dieptrekkraft. In [6] is in deze afleiding de anisotropie-invloed toegevoegd. Voor de kracht in de wand van het cupje geldt:

$$F = \frac{2\pi r_p s_0 C}{(1-j) \cdot \sqrt{\frac{R+5}{R+1}}} \cdot [\exp(-\epsilon_1)] \cdot \left( \frac{R+1}{\sqrt{2R+1}} \epsilon_1 + \epsilon_0 \right)^n \quad (1)$$

Hierin geldt voor  $j$ :

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

Voor de wanddikte geldt:

$$s = s_0 \exp(-\epsilon_1) \quad (3)$$

Het maximum van (1) wordt bereikt wanneer de afgeleide van de kracht naar de langsrek gelijk aan nul is. Dit is het moment dat insnoering optreedt.

Om tot een eenduidige oplossing te komen wordt de factor  $j$  constant verondersteld. Nu wordt de rek berekend waarvoor geldt  $\partial F / \partial \epsilon_1 = 0$ .

Dan volgt voor  $\epsilon_{1c}$ :

$$\epsilon_{1c} = n - \frac{\sqrt{2R+1}}{R+1} \epsilon_0 \quad (4)$$

De kritische dieptrekkraft wordt dimensieloos gemaakt met behulp van de volgende formules:

$$F_c^* = \frac{F_c}{2\pi r_p s_0 C} \quad ; \rho_p^* = \frac{\rho_p}{s_0} \quad ; r_p^* = \frac{r_p}{s_0} \quad (5)$$

Nu wordt (2) en (4) gesubstitueerd in (1), dit levert:

$$F_c = 2\pi r_p s_0 C \cdot \sqrt{\frac{R+1}{R+5}} \cdot \exp\left(\frac{\sqrt{2R+1}}{R+1} \epsilon_0 - n\right) \cdot n^n \cdot \left(\frac{R+1}{\sqrt{2R+1}}\right)^n \cdot \frac{2r_p \rho_p + s \rho_p}{r_p \rho_p + s(r_p + \rho_p)} \quad (6)$$

Vervolgens wordt met behulp van (3) de momentane wanddikte uit (6) geëlimineerd dan volgt:

$$F_c = 4\pi r_p s_0 C \cdot \sqrt{\frac{R+1}{R+5}} \cdot \left(\frac{R+1}{\sqrt{2R+1}}\right)^n \cdot n^n \cdot \left[ \frac{1}{\frac{s_0}{r_p} + \frac{s_0}{\rho_p} + \exp\left(n - \frac{\sqrt{2R+1}}{R+1} \epsilon_0\right)} \right] \cdot \left[ 1 + \frac{s_0}{2r_p} \exp\left(\frac{\sqrt{2R+1}}{R+1} \epsilon_0 - n\right) \right] \quad (7)$$

Met behulp van (5) levert dit de volgende dimensieloze kritische dieptrekkracht:

$$F_c^* = 2 \cdot \sqrt{\frac{R+1}{R+5}} \cdot \left(\frac{R+1}{\sqrt{2R+1}}\right)^n \cdot n^n \cdot \left[ \frac{1}{r_p^*} + \frac{1}{\rho_p^*} + \exp\left(n - \frac{\sqrt{2R+1}}{R+1} \epsilon_0\right) \right]^{-1} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{2r_p^*} \exp\left(\frac{\sqrt{2R+1}}{R+1} \epsilon_0 - n\right) \right] \quad (8)$$