

Onderzoek naar de spanningsuitdemping bij vierkant dieptrekken

Citation for published version (APA):

Dollevoet, M. H. P. (1992). *Onderzoek naar de spanningsuitdemping bij vierkant dieptrekken*. (TH Eindhoven. Afd. Werktuigbouwkunde, Vakgroep Produktietechnologie : WPB; Vol. WPA1323). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1992

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
Faculteit Werktuigbouwkunde
Vakgroep Produktietechnologie en Automatisering

**Onderzoek naar de spanningsuitdemping
bij vierkant dieptrekken**

H.S. Eindhoven - Eindstudieverslag
M.H.P. Dollevoet
Juni 1992

I.O.P.M-D WPA-nr 1323

In opdracht van: Hogeschool Eindhoven
 Afdeling Werktuigbouwkunde
 Vakgroep Produktietechniek en Materialen
Begeleider HSE : Ir. A.J.M. van Beckum
Begeleider TUE : Dr. Ir. J.A.H. Ramaekers

Samenvatting

Het dieptrekken van rotatiesymmetrische produkten is een omvormproces waaraan al veel onderzocht is. Om meer inzicht in onregelmatig gevormde produkten te krijgen is een begin gemaakt met het onderzoeken en het modelleren van het vierkant dieptrekken.

De uitdemping van de spanning in de wand van een vierkant dieptrekprodukt is een van de aspecten waar nog meer inzicht gewenst is.

Omdat het vierkante produkt een asymmetrische vorm heeft krijgen de hoge spanningen in de hoek van het produkt de gelegenheid om naar de vlakke wand te vloeien, waar lagere spanningen heersen. Hierdoor komt maar een gedeelte van de spanning die op de wand staat onderin de wand aan. De verhouding tussen de spanning bovenin en onderin de wand wordt omschreven als spanningsuitdemping.

Om meer inzicht in de plaats en de mate van uitdemping te krijgen wordt met behulp van het softwarepakket GIFTS (eindige elementen methode pakket) onderzocht wat de invloed van de geometrie van het produkt op de uitdemping in de wand is. Parameters als de hoekradius, grootte van het stripdieptrekgebied, de wandhoogte, dieptrekverhouding en de vorm van de belasting worden onderzocht.

Door het beperkte aantal simulaties dat uitgevoerd kon worden is alleen duidelijk geworden dat bij overschrijding van bepaalde afmetingen van het stripdieptrekgebied de grootte van het stripdieptrekgebied geen invloed meer zal hebben op de uitdemping van de spanning. Alleen als het stripdieptrekgebied redelijk klein is wordt de spanningsuitdemping beïnvloed. De vorm van de belasting op de produktwand blijkt juist de spanningsuitdemping erg weinig te beïnvloeden.

Bovendien zijn veel simulaties nodig om een redelijk goed beeld te creëren van de uitdemping van de spanning bij het vierkant dieptrekken als functie van de geometrie van de bak.

Voorwoord

Dit rapport is geschreven in opdracht van de Hogeschool Eindhoven, afdeling Werktuigbouwkunde.

Het rapport omvat de omschrijving en resultaten van het afstudeerproject, dat is uitgevoerd op de Technische Universiteit Eindhoven, faculteit Werktuigbouwkunde, vakgroep Produktietechnologie en Automatisering, Laboratorium voor Omvormtechniek.

Gedurende 3½ maand heb ik in deze vakgroep in een prettige werksfeer aan mijn onderzoek kunnen werken.

Mijn dank gaat dan ook uit naar alle medewerkers van de vakgroep. Met name wil ik mijn begeleider Dr. Ir. J.A.H. Ramaekers bedanken voor de goede begeleiding en voor zijn nuttige adviezen. Tevens wil ik ook Ir. H.J. Giessen bedanken voor zijn bijdragen omtrent het eindige elementen pakket 'GIFTS'.

M.H.P. Dollevoet

SYMBOLENLIJST

σ_t	tangentiële spanning
σ_r	radiële spanning
r_{st}	hoekradius binnenzijde bij vierkante produkten
r_p	stempelradius voor ronde produkten
r_u	momentane buitenstraal flens
r_{u0}	initiële buitenstraal flens
R	radius voor TNO-blenk
D	diameter ronde blenk
d_s	diameter ronde stempel
ρ_d	matrijsradius
ρ_{st}	bodemradius van de stempel
ρ	matrijsradius + $0.5 \cdot t$
t_0	oorspronkelijke plaatdikte
h	wandhoogte
B	breedte stripdieptrekzone
A_{blenk}	blenkoppervlak
$A_{stempel}$	stempeloppervlak
l_b	lengte binnenzijde van een vierkant produkt
β_0	initiële dieptrekverhouding
β_{0x}	plaatselijke dieptrekverhouding
β_{0max}	maximale dieptrekverhouding
β_0'	vaak in praktijk toegepaste initiële dieptrekverhouding
β'	vaak in praktijk toegepaste momentane dieptrekverhouding
μ_{flens}	wrijvingscoëfficiënt op de flens
μ_{rad}	wrijvingscoëfficiënt op de radius
F_N	normaalkracht
F_{buig}	theoretische buigkracht
F_{wflens}	wrijvingskracht op de flens
$F_{wradius}$	wrijvingskracht op de radius
F_{pl}	plooihouderkracht
F_{stvlak}	stempelkracht voor de vorming stripdieptrekzone
F_{stdiep}	stempelkracht voor dieptrekken ronde produkten
F^*	dimensieloze kracht
p_{plooi}	plooihouderdruk
C	karakteristieke deformatieweerstand
n	verstevigingsexponent
ϵ_0	voordeformatie
E	elasticiteitsmodulus
$\delta\sigma, \Delta\sigma$	dempingsfactor

INHOUDSOPGAVE

		blz.
Hoofdstuk 1	Inleiding	7
Hoofdstuk 2	Dieptrekken	9
2.1	Procesbeschrijving	
2.1.1	De spanningstoestand	10
2.2	Het dieptrekken van bijzondere vormen	
2.3	Vierkant dieptrekken	11
2.3.1	Het rotatiesymmetrisch gebied	13
2.3.2	Het stripdieptrekgebied	
2.3.3	Het overgangsgebied	
Hoofdstuk 3	Modellering vierkant dieptrekken	14
3.1	Blenkvorm en dieptrekverhouding	
3.1.1	Blenkvorm	
3.1.2	Dieptrekverhouding	
3.2	TNO praktijkregels	15
3.2.1	Blenkvorm voor vierkante produkten	
3.2.2	Maximale dieptrekverhouding	16
3.3	Stempelkrachtbepaling	18
3.3.1	Kracht stripdieptrekken	
3.3.2	Kracht op de dieptrekzone	20
3.3.3	De totale dieptrekkkracht	21
3.3.4	Resultaten/discussie van de proeven van Decortis/Graef	
3.3.5	Gegevens voor de berekeningen	22
Hoofdstuk 4	Spanningsuitdemping	23
4.1	Uitdempingsfactor	
4.2	Onderzoek naar de spanningsuitdemping door middel van EEM-simulatie	24
Hoofdstuk 5	De EEM-simulatie	25
5.1	Modelkeuze	
5.2	Materiaaleigenschappen	26
5.3	Geometrie	
5.4	Belasting op de produktwand	27

Hoofdstuk 6	Resultaten van de simulatie	28
6.1	Invloed van de radius	
6.2	Invloed van de grootte van de stripdieptrekzone	29
6.3	Invloed van de vorm van het belastingsprofiel	31
6.4	Invloed van de verhouding $\sigma_{\text{radius}}/\sigma_{\text{vlak}}$	32
6.5	De invloed van de dieptrekverhouding op de uitdempingsfactor	34
Hoofdstuk 7	Conclusies en aanbevelingen	35
Literatuurlijst		37
Bijlagen:		
Bijlage 1a	Uitwerking blenkuitslag van een vierkant produkt	40
Bijlage 1b	PASCAL-programma voor blenk- en krachtenbepaling	42
Bijlage 2	De werking van het EEM-programma GIFTS	46
Bijlage 3	Meetresultaten Descortis/Graef	53
Bijlage 4a	PASCAL-programma's voor bepaling uitdemping	55
Bijlage 4b	Uitdempingsfiguur	
Bijlage 5	Tabel modellen	59

Hoofdstuk 1: Inleiding

De vakgroep WPA, Produktietechnologie en Automatisering, werkt aan de ontwikkeling en toepassing van processen op het gebied van omvormen van metalen produkten. Een van de vervormingsprocessen waar de vakgroep zich mee bezig houdt is het dieptrekproces. Samen met andere bedrijven en instituten als DAF, Nedcar en TNO maakt de vakgroep WPA deel uit van het IOPM-dieptrekproject. Gemeenschappelijk probeert men dieptrekprocessen te analyseren.

Binnen de vakgroep WPA proberen een aantal mensen gelijktijdig op verschillende fronten een bijdrage aan dit project te leveren. Dat gebeurt door middel van de volgende methoden:

- opstellen van analytische modellen voor het dieptrekproces (bovengrensanalyses)
- computersimulatie van het dieptrekproces door middel van numerieke modellen

Daarbij worden de volgende vormen van dieptrekken onderzocht:

- axisymmetrisch dieptrekken
- dieptrekken van onregelmatige vormen en met name produkten met een vierkante, rechthoekige of conische vorm.

Recentelijk ligt de nadruk op het dieptrekken van vierkante produkten.

Voornamelijk het onderzoeken van de ideale blenkform en het berekenen van de benodigde krachten zijn voor de praktijk van groot belang. Deze twee factoren hangen namelijk sterk samen.

Er bestaan enkele fundamentele verschillen tussen het dieptrekken van ronde en vierkante onderdelen. Bij rotatiesymmetrisch dieptrekken heeft men te maken met een tweedimensionaal model vanwege gelijke spanningen en vervormingen in tangentiële richting. Bij het vierkant dieptrekken is dit niet het geval en varieert de tangentiële spanningstoestand.

De problemen concentreren zich voornamelijk in de hoeken van het bakje. Het globale spanningsverloop in het bakje is bekend. Er treden hoge spanningen in de hoekradius en lagere spanningen in de rechtopstaande wand op. Ook heerst er boven in de wand een hogere spanning in de wand dan onderin. Het spanningsverloop is afhankelijk van een aantal geometrische

factoren als:

- hoekradius
- wandhoogte
- materiaaldikte
- dieptrekverhouding
- blenkvorm

Onbekend is echter nog het verband tussen de spanning bovenin en onderin de wand, de zogenaamde uitdemping van de spanning. Mijn opdracht ligt daarin een factor tussen deze twee spanningen als functie van de geometrie van het bakje te bepalen. Dit zal gebeuren door middel van simulatie met het softwarepakket GIFTS (EEM-methode). De effecten onderin de wand ten gevolge van de geometrie van het bakje kunnen dan bekeken worden door het aanbrengen van spanningsprofielen.

Het nu volgende rapport beschrijft het onderzoek dat ik heb gedaan. Als eerste heb ik een beperkt literatuuronderzoek gedaan waarvan een overzicht is gegeven in hoofdstuk 2.

In hoofdstuk 3 is de modellering van een vierkant dieptrekprodukt weergegeven. Daar wordt een overzicht gegeven van de blenkbepaling, de dieptrekverhouding en de stempelkrachtbepaling.

In hoofdstuk 4 wordt het verschijnsel spanningsuitdemping verklaard en zal de toepassing van het softwarepakket GIFTS verklaard worden.

In hoofdstuk 5 worden de materiaaleigenschappen, de geometrie van het produkt, de wijze van belasting en de model- en elementkeuze voor de EEM-simulatie toegelicht.

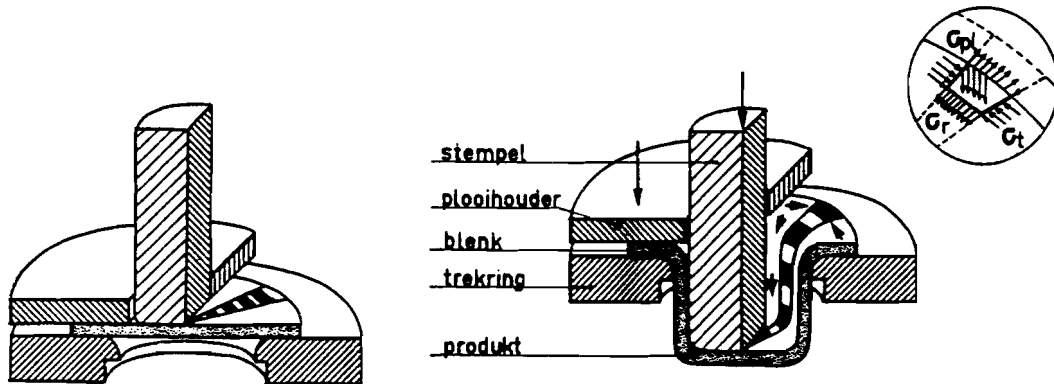
In hoofdstuk 6 is een overzicht van de resultaten van de simulaties gegeven.

In hoofdstuk 7 tenslotte, worden nog verschillende conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan met betrekking tot een vervolg op dit onderzoek.

Hoofdstuk 2: Dieptrekken

2.1 Procesbeschrijving

Dieptrekken is een koud plaatvormproces, waarbij uit vlakke plaat holle produkten worden vervaardigd die aan één zijde open zijn. Figuur 1 geeft een schematische voorstelling van het dieptrekproces en de daarbij behorende gereedschappen.



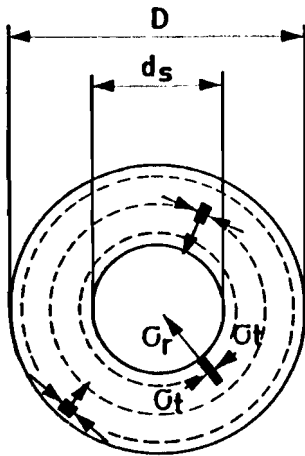
Figuur 1: Het dieptrekproces

De meest elementaire vorm van dieptrekken is het dieptrekken van cilindrische produkten. De vlakke uitgangsplaat, ook wel blenk genoemd, ligt tussen de matrijs en de plooihouder. Het materiaal wordt door de trekspleet - gevormd door stempel en matrijs - getrokken en om de stempel gevormd. De omtrek van de blenk wordt hierbij verkleind tot de omtrek van de stempel. Het deel van de blenk dat groter is dan het bodemoppervlak van de stempel vormt de wand van het produkt. De stempel moet de kracht overbrengen om het materiaal te vervormen en de wrijvingskracht (tussen blenk en matrijs, tussen blenk en plooihouder en tussen blenk en matrijsradius) te overwinnen. De trekkracht wordt via de krachtoverdrachtszone in de vervormingszone ingeleid. De vervormingszone bestaat uit de flens tussen plooihouder en matrijs en uit de bocht op de matrijsafronding. De krachtoverdrachtszone bestaat uit de gevormde bodem en wand van het werkstuk.

2.1.1 De spanningstoestand

Tijdens het dieptrekken worden spanningen opgewekt in dat deel van de blenk, dat tussen de plooihouder en de matrijs zit. Door de geometrie van de vervormingszone ontstaan tangentiële drukspanningen, die opgeroepen worden door de tangentiële rekken. Deze zijn een noodzakelijk gevolg van de opgedrongen verplaatsingen in radiële richting.

Vanwege deze tangentiële spanningen is het noodzakelijk om een plooihouderkracht aan te brengen teneinde plooivorming in de flens tegen te gaan.



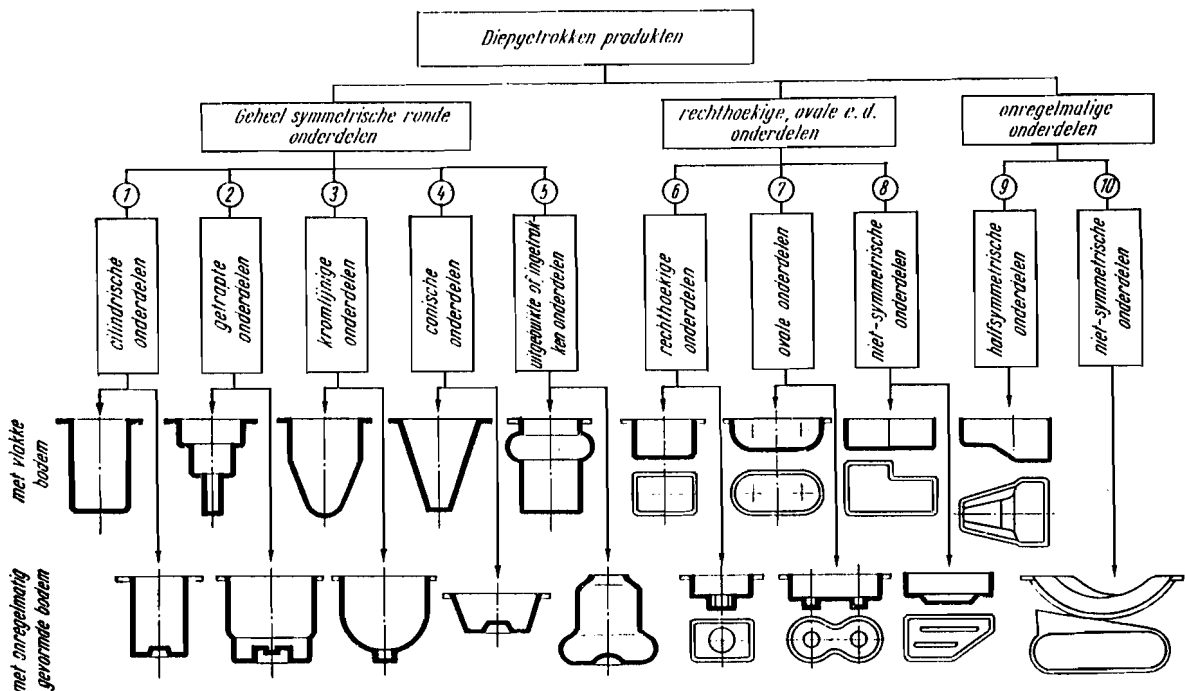
Figuur 2: Spanningen in de flens bij het dieptrekken van cilindrische produkten

De grootte van deze spanningen is voornamelijk afhankelijk van de vorm van het trekstempel, de grootte van de stempelkracht en de grootte van de blenk. Bij gegeven stempelafmeting en gelijkblijvende omstandigheden stijgt de benodigde trekkracht bij groter wordende blenk. Daarmee worden de trekspanningen in de krachtoverdrachtszone ook groter, totdat op een plaats in deze zone een kritische spannings- cq. vervormingstoestand bereikt wordt. Bij overschrijding van de kritische grenswaarde zal het materiaal gaan scheuren en kan het produkt niet meer foutvrij diepgetrokken worden.

2.2 Het dieptrekken van bijzondere vormen

De meeste wetenschappelijke kennis over het dieptrekken betreft het rotatiesymmetrisch dieptrekken. Hiervan zijn al bruikbare wiskundige modellen bekend. In de praktijk komen

echter veel onregelmatig gevormde dieptrekprodukten voor. Hieronder is een overzicht gegeven van verschillende vormen van dieptrekprodukten.



Figuur 3: Overzicht bijzonder gevormde dieptrekprodukten

Mogelijk kan van dit overzicht gebruik gemaakt worden om overeenkomsten te ontdekken tussen onregelmatig gevormde produkten en de beschikbare, eenvoudiger gevormde, dieptrekprodukten. Een onregelmatig gevormd produkt zou in segmenten kunnen worden verdeeld die gelijkenis vertonen met de beschikbare eenvoudig gevormde produkten. Hiermee zou men dan voorspellingen over onregelmatig gevormde produkten kunnen doen.

2.3 Vierkant dieptrekken

Het vierkant of rechthoekig dieptrekken is gecompliceerder dan het rotatiesymmetrisch dieptrekken, omdat tijdens het vormen van het produkt in feite twee bewerkingen worden uitgevoerd:

- Strip trekken voor het vormen van de vlakke wanden
- Dieptrekken voor het vormen van de hoekradius

Het grote verschil tussen rotatiesymmetrisch dieptrekken en vierkant dieptrekken is dat er bij rotatiesymmetrisch dieptrekken sprake is van een tweedimensionaal model. Dit komt

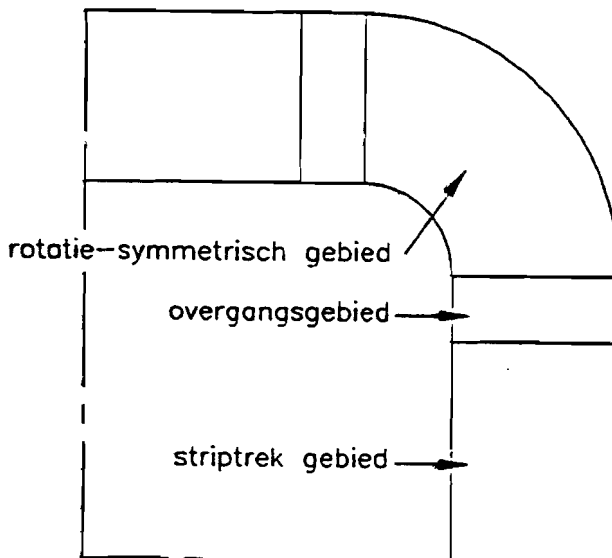
omdat de spanningen en vervormingen in tangentiële richting op eenzelfde straal om het middelpunt van het stempel even groot zijn. Dit geldt tevens voor de spanningen en vervormingen in de radiële richting.

Bij vierkant dieptrekken is dit juist niet het geval en kan de tangentiële spanningstoestand variëren van een rotatiesymmetrische toestand in het midden van de hoekradius tot een stripdieptrekachtige toestand in het midden van de vlakke wand, zodat hier sprake is van een driedimensionale spanningstoestand.

Daarom kan men bij de modellering van een vierkant produkt drie gebieden onderscheiden:

- het rotatiesymmetrische gebied
- het stripdieptrekgebied
- het overgangsgebied

Bij het vierkant dieptrekken kan vanwege symmetrie worden volstaan met het bekijken van het achtste deel van het produkt. Om een goed overzicht te houden zal bij de modellering een kwart produkt beschouwd worden.



Figuur 4: Kwart produkt bij modelvorming

2.3.1 Het rotatiesymmetrisch gebied

Tijdens het dieptrekken in het rotatiesymmetrische gebied wordt de flens door de neergaande beweging van de stempel richting het centrum van de hoekradius van de stempel getrokken, waardoor radiële en tangentiële spanningen veroorzaakt worden. De totale kracht die de stempel moet leveren bestaat uit de kracht voor het stuiken en rekken van de flens, de kracht t.b.v. de wrijving en de kracht t.b.v. buigen en terugbuigen van de flens over de matrijsafronding.

2.3.2 Het stripdieptrekgebied

In het stripdieptrekgebied vindt alleen dubbele buiging om de matrijsradius plaats. Hier treden alleen maar radiële spanningen op en bij benadering geen tangentiële spanningen.

2.3.3 Het overgangsgebied

In het overgangsgebied loopt de tangentiële spanning van het rotatiesymmetrische gebied geleidelijk af tot nul in het stripdieptrekgebied. Hier loopt ook de radiële spanning van het rotatiesymmetrische gebied geleidelijk af tot de radiële spanning van het stripdieptrekgebied. Tijdens voorgaande onderzoeken is bij het vierkant dieptrekken het begin van het overgangsgebied gedefinieerd daar waar de hoekradius, wiskundig gezien, overgaat in de vlakke wand (figuur 4). Deze definitie is inmiddels achterhaald. In een meer recente definitie begint het overgangsgebied al in het rotatiesymmetrische gebied. Aangezien het spanningsprofiel dat ten gevolge van het dieptrekken in het rotatiesymmetrische gebied ontstaat nog niet helemaal duidelijk is, is op dit moment nog niet aan te wijzen waar het overgangsgebied begint. Door middel van simulaties met verschillende spanningsprofielen in het rotatiesymmetrische en overgangsgebied zal getracht worden hierin meer inzicht te verkrijgen.

Hoofdstuk 3: Modelling vierkant dieptrekken

3.1 Blenkvorm en dieptrekverhouding

3.1.1 Blenkvorm

Indien voor een bepaald produkt het dieptrekken als een mogelijkheid wordt gezien, dan zal een van de eerste vragen zijn hoe groot de blenkuitslag is. In de meeste gevallen zullen van het te vervaardigen produkt de afmetingen bekend zijn, zodat de daarvoor nodige uitslag moet worden berekend. Een exacte berekening is, indien theoretisch mogelijk, praktisch niet uitvoerbaar, zodat met een benaderingsberekening moet worden volstaan. Toch is het belangrijk dat de blenk vrij nauwkeurig wordt bepaald, aangezien de optredende vervormingskrachten direct verband houden met de grootte van de blenk. Bij een benaderingsberekening is een van de belangrijkste aannamen, dat het gemiddelde materiaaloppervlak constant blijft en gelijk is aan die van de blenk.

Bij een ronde blenkvorm is een cirkelvormige blenk noodzakelijk. Immers, spanningen van dezelfde aard en gelijke grootte brengen dezelfde vervormingen teweeg. Hieruit mag echter niet de conclusie worden getrokken dat voor een vierkant produkt een vierkante blenk nodig is. Bij een vierkante vorm is de ideale vorm vrij gecompliceerd, vandaar dat deze vorm vaak benaderd wordt door een vierkant met afgeschuinde hoeken.

3.1.2 Dieptrekverhouding

Als de blenkafmeting eenmaal vastligt is de volgende stap het controleren of het produkt met deze blenk wel in één bewerking kan worden diepgetrokken. Wanneer de blenkafmeting is berekend, ligt daarmee ook de dieptrekverhouding vast. Deze is als volgt gedefinieerd:

$$\beta_0 = \sqrt{\frac{A_{blenk}}{A_{stempel}}} \quad (1)$$

Voor rotatiesymmetrische produkten, die uit een cirkelvormige blenk worden getrokken kan formule (1) worden geschreven als:

$$\beta_0 = \frac{D}{d_s} \quad (2)$$

Voor andere produktvormen als rotatiesymmetrische moet formule

(1) worden gehanteerd omdat bij die produkten de dieptrekverhouding per plaats kan verschillen.

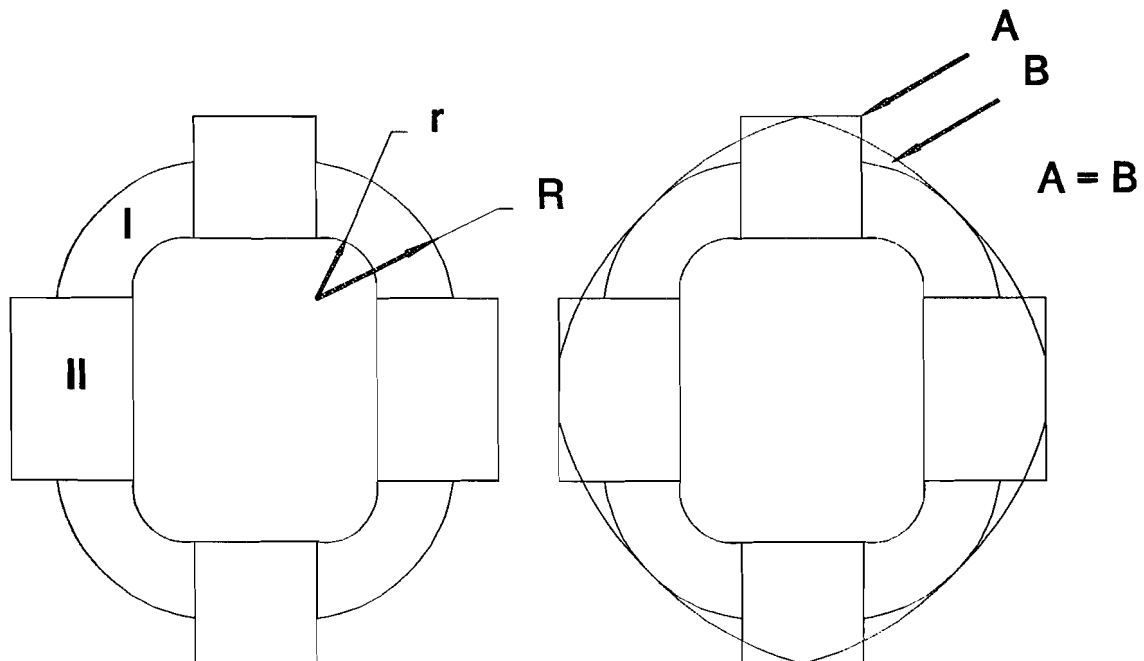
3.2 TNO praktijkregels

3.2.1 Blenkvorm voor vierkante produkten

Deze methode wordt het meest toegepast. Het is een vrij goede benadering van de ideale blenkvorm en het blijkt in de praktijk goed te functioneren.

TNO maakt in principe weinig onderscheid tussen het rond en vierkant dieptrekken. Strikt genomen wordt de uitslag van een vierkant of rechthoekig produkt verdeeld in:

- dieptrekzones (I)
- buigzones (II)



Figuur 5: Theoretische en praktische blenkuitslag volgens TNO

Het materiaal in zone I bevindt zich tegenover de hoekradius van het produkt, hetgeen betekent dat het een tangentiële stuik ondergaat. Als gevolg hiervan zal het materiaal een radiële verlenging ondergaan. Indien de radius met de volgende formule wordt berekend zal de juiste hoeveelheid materiaal worden toegevoegd. Gemakshalve wordt hierbij de bodemradius op nul gesteld.

$$R = \sqrt{r^2 + 2 \cdot r \cdot h} \quad (3)$$

Hierin is: r = de hoekradius van het produkt
 h = de produkthoogte

Omdat zone II een buigfase voorstelt is de breedte van de flens van deze zone bij benadering gelijk aan de produkthoogte. Omdat de straal R aanzienlijk kleiner is dan de breedte van zone II ontstaat een wat vreemde situatie op de grens van zone I en II. Theoretisch zou dit betekenen dat aan de ene zijde (van zone I) een maximale tangentiële drukspanning zal heersen, terwijl aan de andere zijde deze totaal niet aanwezig zou zijn. In werkelijkheid is dit natuurlijk niet het geval, maar zullen de tangentiële drukspanningen daar ter plaatse niet abrupt tot nul afnemen maar in zone II doorlopen en geleidelijk verminderen. Dit bevestigt het vermoeden uit § 2.3.3 dat het overgangsgebied niet pas begint op de overgang van het rotatiesymmetrische gebied naar het stripdieptrekgebied, maar al in het rotatiesymmetrische gebied.

TNO geeft nu de theoretisch gevonden blenkuitslag een vloeiend verloop, waarbij er vanuit wordt gegaan dat de gevonden lengte van de uitslag in het midden van de rechte zijde van het produkt juist is.

In de praktijk wordt doorgaans niet gestreefd naar een ideale blenkvorm. Het is belangrijker een juiste afschatting te maken, tussen de ideale blenkvorm en de benodigde kracht. Meestal zal het erop neerkomen, dat er toch meer van de ideale blenkvorm voor het vierkant dieptrekken wordt afgeweken en er dus wat meer kracht moet gebruiken.

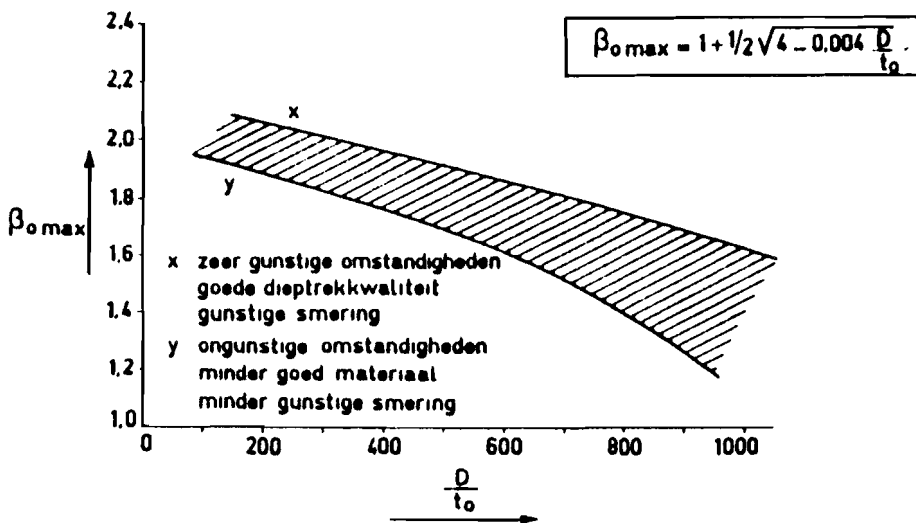
3.2.2 Maximale dieptrekverhouding

Ook bij de bepaling van de maximale dieptrekverhouding maakt TNO weinig onderscheid tussen rond en vierkant dieptrekken. TNO heeft aan de hand van praktijkgegevens de in figuur 6 weergegeven grafiek bepaald. Hierin is het verband aangegeven tussen de maximale dieptrekverhouding en de D/t_0 -verhouding. De dieptrekverhouding wordt in principe bepaald door de sterkte

van het produktdeel dat al gevormd is en door de radiële intrekspanningen in de flens met de wrijvingskrachten tussen matrijsradius en flens. Het is aannemelijk dat bij grotere D/t_0 -verhouding de wrijvingskrachten toenemen, waardoor de dieptrekbaarheid van het produkt daalt.

Voor andere vormen dan de ronde blenk moet voor het hanteren van de grafiek de door TNO opgestelde praktijkregel worden gebruikt:

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot A_{blenk}} \quad (4)$$



Figuur 6: Verband tussen de maximale dieptrekverhouding en D/t_0 -verhouding

Naast de toetsing van de dieptrekverhouding volgens figuur 6 moet voor niet-rotatiesymmetrische produkten ook de zgn. plaatselijke dieptrekverhouding worden bepaald. Deze is door TNO als volgt gedefinieerd:

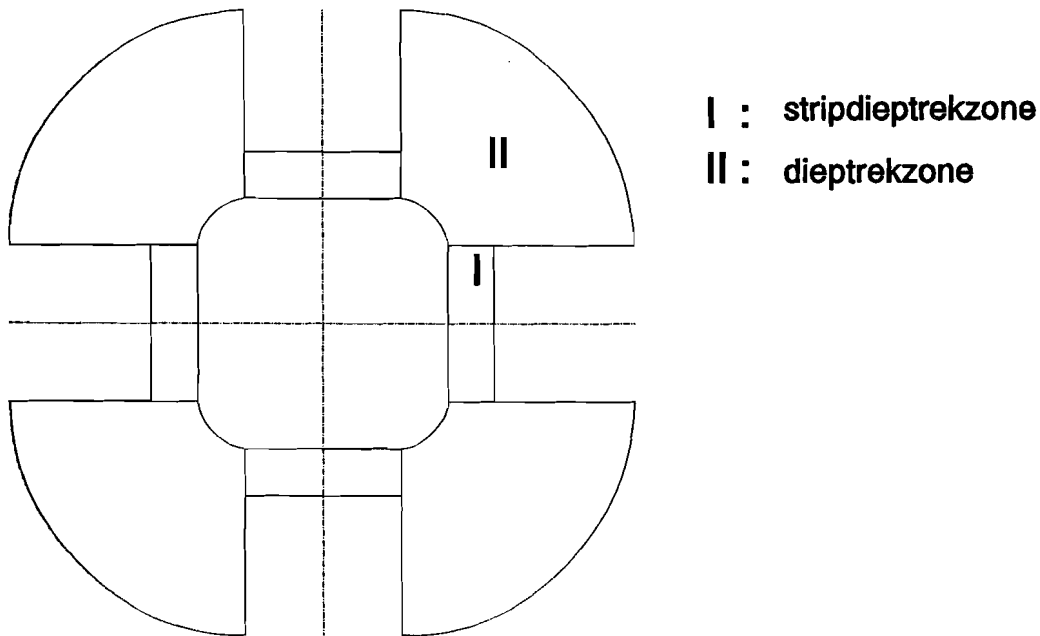
$$\beta_0^x = \frac{R}{r} \quad (5)$$

Deze plaatselijke dieptrekverhouding kan veel groter zijn dan de dieptrekverhouding weergegeven in figuur 6 en kan oplopen tot ongeveer 5 bij hoge produkten, waarbij de lengte van de wand relatief groot ten opzichte van de radius is.

3.3. De stempelkrachtbepaling

Om de stempelkracht te bepalen wordt de bak opgedeeld in 4 stripdieptrek- en 4 dieptrekzones. De stempelkracht wordt nu opgebouwd uit de deelkrachten in die zones. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat het gebied rond de radius wordt diepgetrokken en dat er, zoals in figuur 7 weergegeven is, een abrupte overgang is naar de stripdieptrekzone is.

De opbouw uit deelkrachten lijkt een goede benadering ondanks de aanwezigheid van een overgangsgebied tussen deze 2 zones.



Figuur 7: Deelkrachten bij vierkant produkt

3.3.1 Kracht stripdieptrekken

Bij de krachtbepaling voor het stripdieptrekken wordt gebruik gemaakt van de modellering van Decortis/Graef [10].

De stempelkracht voor het stripdieptrekken kan in drie deelkrachten opgesplitst worden:

- F_{buig} : Als de plaat over de matrijsradius wordt getrokken treedt dubbele buiging op. Resultaat voor de totale buigkracht is:

$$F_{\text{buig}} = \frac{8 \cdot \left[\frac{2}{\sqrt{3} \cdot \rho} \right]^n \cdot c \cdot \left(\frac{t}{2} \right)^{n+2} \cdot b}{\sqrt{3} \cdot (n+2) \cdot \rho} \quad (6)$$

- F_{wflens} : Tijdens het vierkant dieptrekken ondervindt de flens in de stripdieptrekzone aan beide zijden van de flens een wrijvingskracht. Deze wrijvingskracht treedt op als gevolg van de plooihouderkracht. Resultaat voor wrijvingskracht van de flens is:

$$F_{\text{wflens}} = \mu_{\text{flens}} \cdot F_{\text{pl}} \quad (7)$$

- F_{wradius} : Om de wrijvingskracht op de radius te kunnen berekenen is gebruik gemaakt van resultaten uit striptrekproeven die op de TU zijn genomen. Uit de proeven bleek onder meer dat de wrijvingscoëfficiënt bij verschillende buigradii varieert. Voor de wrijvingscoëfficiënt geldt nu:

$$F_{\text{w radius}} = \mu_{\text{radius}} \cdot F_N \quad (8)$$

Voor de normaalkracht kunnen we het volgende schrijven:

$$F_N = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(F_{\text{wflens}}^2 + F_{\text{stvlak}}^2) \cdot \cos \left[45^\circ - \arctan \left(\frac{F_{\text{wflens}}}{F_{\text{stvlak}}} \right) \right]} \quad (9)$$

Door het samenstellen van de deelkrachten is de stempelkracht van het stripdieptrekgedeelte te bepalen:

$$F_{\text{st vlak}} = F_{\text{buig}} + F_{\text{wflens}} + F_{\text{wradius}} \quad (10)$$

Omdat de stempelkracht bij de bepaling van de normaalkracht zelf als variabele aanwezig is, is de stempelkracht te berekenen door iteratief oplossen of door het toepassen van een vereenvoudigde vergelijking voor het bepalen van de normaalkracht. De vergelijking voor de stempelkracht van het stripdieptrekgedeelte luidt dan:

$$F_{\text{st vlak}} = \frac{F_q + \mu_{\text{radius}} \cdot \sqrt{F_{\text{wflens}}^2 \cdot (1 - \mu_{\text{radius}}^2) + F_q^2}}{1 - \mu_{\text{radius}}^2} \quad (11)$$

waarin:

$$F_q = F_{\text{buig}} + F_{\text{wflens}} \quad (12)$$

3.3.2 Kracht op de dieptrekzone

In november 1991 heeft dhr. Ramaekers een afleiding (11) opgesteld voor de bepaling van de kracht voor een rond produkt (onlangs aangepast). De totale stempelkracht wordt daarvoor in 4 delen gesplitst:

- F_1 : Kracht benodigd voor het rekken en stuiken van de flens
- F_2 : Wrijvingskracht op de flens
- F_3 : Wrijvingskracht t.b.v. wrijving tussen flens en matrijsradius
- F_4 : Dubbele buiging

Uit die (aangepaste) afleiding gelden voor de deelkrachten de volgende vergelijkingen:

$$F_1^* = 1.04 \cdot \sqrt{\frac{\beta'_0}{\beta'}} \cdot \left[\left(\left(\ln \frac{\beta'_0}{\beta'} + \epsilon_0 \right)^n - 1 \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta'} \right) + \ln \beta' \right] \quad (13)$$

$$F_2^* = \frac{2 \cdot \mu_1 \cdot p_{ploo} \cdot r_p \cdot (\beta' - 1)}{C \cdot t_0} \quad (14)$$

$$F_3^* = \pi \cdot \mu_1 \cdot (F_1^* + F_2^*) \quad (15)$$

$$F_4^* = \left[\left(\left(\ln \frac{\beta'_0}{\beta'} + \epsilon_0 \right)^n - 1 \right) \cdot \frac{1}{\beta'} + 1 \right] \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\beta'_0}{\beta'} \cdot \left(\frac{p_d}{t_0} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{\beta'_0}{\beta'}} \right)^{-1} \quad (16)$$

Deze krachten zijn dimensieloos geschreven. Om voor de praktijk bruikbare waarden te krijgen, is tot slot de volgende berekening noodzakelijk:

$$F_{stdiep} = (F_1^* + F_2^* + F_3^* + F_4^*) \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_p \cdot t_0 \cdot C \quad (17)$$

Aangezien deze berekening erg bewerkelijk is, heb ik hiervoor een PASCAL-programma geschreven. Het programma is terug te vinden in bijlage 1b.

3.3.3 De totale dieptrekkracht

Omdat we het produkt in 2 zones, nl. rotatiesymmetrische zone en stripdieptrekzone, hebben opgedeeld kunnen we het volgende zeggen.

Er zijn 4 zones in een vierkant produkt waar rotatiesymmetrisch diepgetrokken wordt en 4 zones die gevormd worden door stripdieptrekken.

Sommatie van de stempelkrachten (11) en (17) levert de totale stempelkracht:

$$F_{st} = F_{stvlak} + F_{stdiep} \quad (18)$$

Met deze formule is dus te voorspellen hoeveel perskracht benodigd is om het produkt te kunnen vormen.

3.3.4 Resultaten/Discussie van de proeven van Decortis/Graef

Door Decortis/Graef [10] zijn stripdieptrekproeven gedaan om hun theoretisch model te controleren. Bij het stripdieptrekken wordt een strip in een U-vorm getrokken. Tijdens de deformatie wordt de plooihouderkracht constant gehouden ($\mu_{flens} = \text{constant}$) en worden de stempelkracht en de wrijvingskracht gemeten. Hieruit kunnen de wrijvingscoëfficiënten voor flens en radius bepaald worden. Deze resultaten zijn weergegeven in bijlage 3. Uit deze resultaten blijkt dat de gemeten waarden ongeveer 14% hoger uitvallen dan de berekende waarden. Voor mij is dit aanleiding geweest om voor mijn verdere berekeningen een factor 1.14 toe te voegen bij de bepaling van de stripdieptrekkracht.

Decortis/Graef hebben ook dieptrekproeven gedaan met vierkante produkten. Uit de resultaten van die dieptrekproeven blijken de berekende waarden voor het dieptrekken beduidend hoger te liggen dan de gemeten waarden. Dit is te wijten aan de te hoge (berekende) kracht voor het dieptrekken van het rotatiesymmetrische gedeelte. De aanname dat de kracht geldt voor het gehele rotatiesymmetrische gebied is hiervan de oorzaak. Omdat de spanning bij vierkante produkten ook vanuit de radius, de vlakke wand in kan vloeien, is de spanning op de overgang van de radius in de vlakke wand lager dan de spanning in het midden van de radius. De totale kracht voor de radius is daardoor te hoog.

3.3.5 Gegevens voor de berekeningen

Bij de berekeningen zijn de volgende gegevens gebruikt:

$$\epsilon_0 = 0.005$$

$$\rho_d = 5 \text{ mm}$$

$$\mu_f = 0.05$$

$$\mu_r = 0.1$$

$$p_{pl} = 1 \text{ N/mm}^2$$

$$n = 0.22$$

$$C = 500 \text{ N/mm}^2$$

Hoofdstuk 4: Spanningsuitdemping

4.1 Uitdempingsfactor

In de inleiding en ook in § 2.3 hebben we gezien dat bij vierkante produkten de spanning in de wand niet constant is. Door de ongelijkmatige belasting op de wand ten gevolge van de deformatie van de flens treden in het rotatiesymmetrische gebied hoge en in het stripdieptrekgebied relatief hoge spanningen op. Door de asymmetrische vorm van het produkt, krijgt het materiaal in het rotatiesymmetrische gebied de gelegenheid om behalve richting middelpunt van de stempelradius, ook richting de vlakke wand te stromen. Door deze materiaalstroom zullen de spanningen zich niet alleen meer zuiver in het rotatiesymmetrische gebied concentreren, maar zal ook spanning wegvloeien naar het stripdieptrekgebied. Door dit verschijnsel komt echter maar een gedeelte van de spanning die bovenin de wand aanwezig is, onderin de wand aan. De verhouding tussen de spanning die onderin de wand aankomt en de spanning die bovenin aanwezig is wordt omschreven als spanningsuitdemping. De uitdempingsfactor kunnen we dan als volgt beschrijven:

$$\Delta \sigma = \frac{\sigma_h}{\sigma_{hmax}} = \frac{\text{spanning op hoogte } h \text{ in de produktwand}}{\text{spanning op maximale hoogte in de produktwand}}$$

In de praktijk blijkt met name de spanning die onderin de wand heerst belangrijk. Wanneer het materiaal begint in te snoeren wordt de zogenaamde kritische spanning overschreden, wat zal leiden tot uitscheuren van de bodem.

Bij een axisymmetrische produkt zal het materiaal tangentieel scheuren op de overgang van de bodemradius naar de vlakke wand omdat de wanddikte van boven naar onder afneemt en onderin plaatselijk het dunst is.

Bij vierkante produkten begint de insnoering van het materiaal in het rotatiesymmetrische gebied omdat daar grotere spanningen heersen dan in het stripdieptrekgebied. Het rotatiesymmetrisch gebied is dus het kritische gebied. Omdat alleen in het rotatiesymmetrisch gebied wandverdunning plaatsvindt en niet in het stripdieptrekgebied, zal de uitscheuring in de hoek, op de overgang van de bodemradius naar de rechte wand, beginnen en zich dan onder een hoek van ongeveer 45° voortplanten in de wand.

4.2 Onderzoek naar de spanningsuitdemping d.m.v. EEM-simulatie

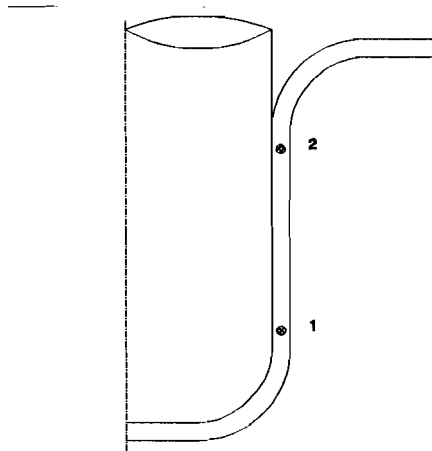
Met behulp van het softwarepakket GIFTS zal het uitdempingsgedrag van de spanning als functie van de geometrie van het vierkante produkt onderzocht worden.

Na de simulatie kunnen echter geen uitspraken worden gedaan over mogelijke relaties tussen de resultaten van de spanningsuitdemping ten aanzien van de kritische spanning onderin de wand.

De toepassing van het pakket GIFTS ligt in het lineair elastisch gebied, terwijl bij het dieptrekproces zowel elastische als plastische vervorming optreedt.

Omdat een momentopname wordt gedaan en alleen de reeds gevormde wand wordt beschouwd is aannemelijk te maken dat het pakket GIFTS wordt angewend. Bij het bekijken van de gevormde wand wordt verondersteld dat de punten 1 en 2 (zie figuur 9) zich, nadat zij beiden gevormd zijn, niet meer ten opzichte van elkaar verplaatsen en er dus geen plastische vervorming optreedt. Dit betekent dat er alleen elastische vervorming optreedt en dus het pakket GIFTS gebruikt kan worden om de spanningsuitdemping in beeld te brengen.

De mogelijkheden om de kritische spanning te onderzoeken en te bekijken of het produkt zal gaan scheuren, zijn dus niet aanwezig.

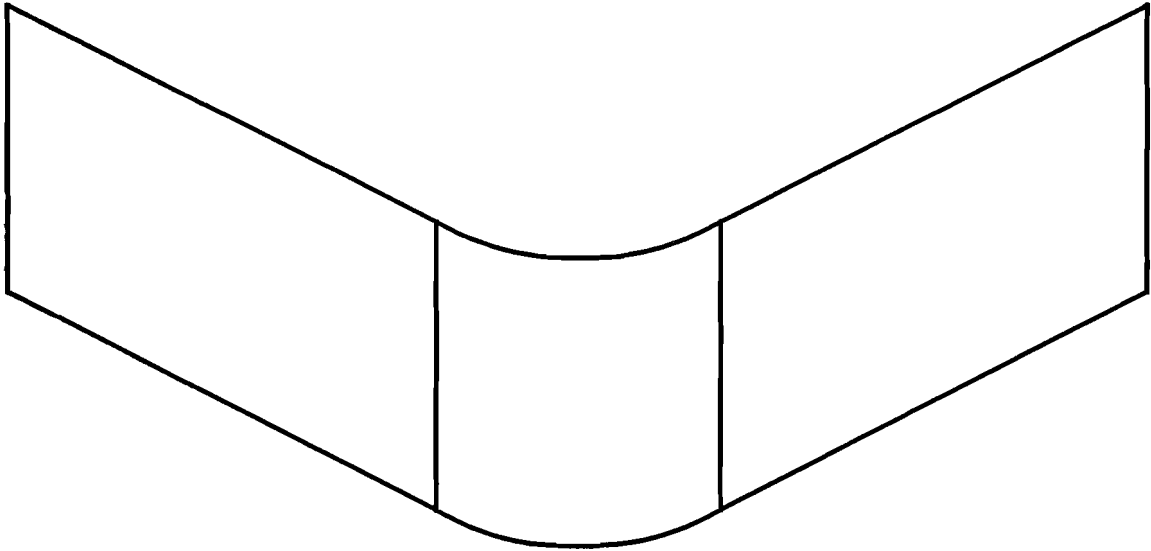


Figuur 9: Momentopname van de wand

Hoofdstuk 5: De EEM-simulatie

5.1 Modelkeuze

Om meer inzicht in de spanningsuitdemping te krijgen bij diepgetrokken vierkante produkten wordt het in figuur 10 weergegeven model gebruikt.



Figuur 10: Model

Het gaat hier om een zogenaamd $2\frac{1}{2}$ D-model, een gebogen plaat met constante plaatdikte t . Ten behoeven van de simulatie met dit model dient een elementtype gekozen te worden. Gekozen is voor het QB4-element, een vierzijdig plaalement dat zowel op trek als buiging belast kan worden. Hierdoor is het niet noodzakelijk dat het plaalement vlak is en kunnen modellen met gebogen plaat bekeken worden. Over de wandhoogte worden 10 elementen gebruikt. Over de wandlengte varieert het aantal elementen van ongeveer 15 tot 100 afhankelijk van de breedte van het stripdieptrekgebied.

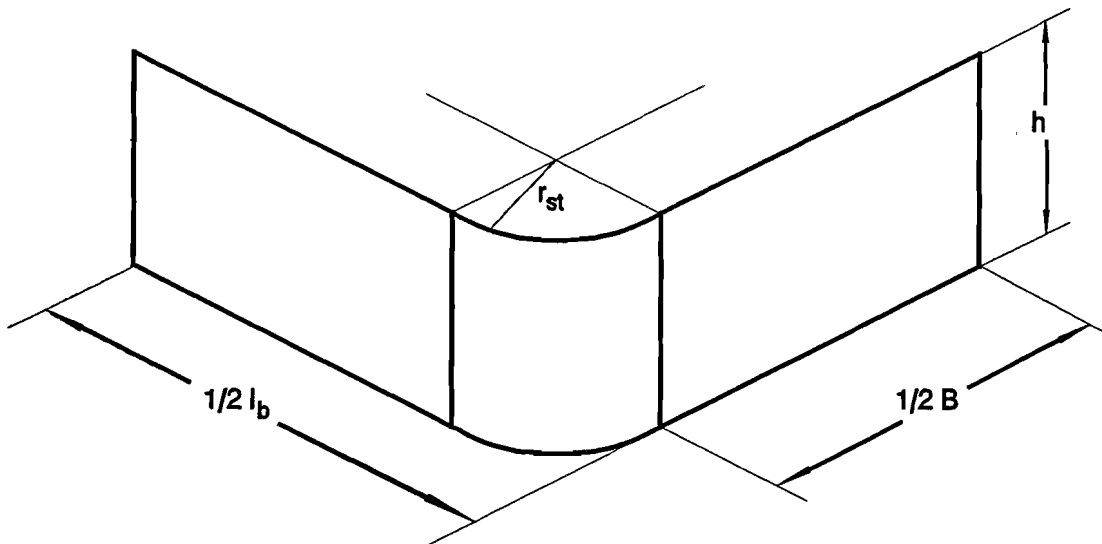
5.2 Materiaaleigenschappen

Er wordt van isotroop materiaalgedrag uitgegaan. Hieronder volgen de andere materiaaleigenschappen:

elasticiteitsmodulus	$E = 2.1E5$	$[\text{N}/\text{mm}^2]$
kar. deformatieweerstand	$C = 500$	$[\text{N}/\text{mm}^2]$
verstevigingsexponent	$n = 0.22$	$[-]$
voordeformatie	$\epsilon_0 = 0.005$	$[-]$

5.3 Geometrie

Bij de simulatie wordt gebruik gemaakt van het in figuur 11 weergegeven model



Figuur 11: Geometrie

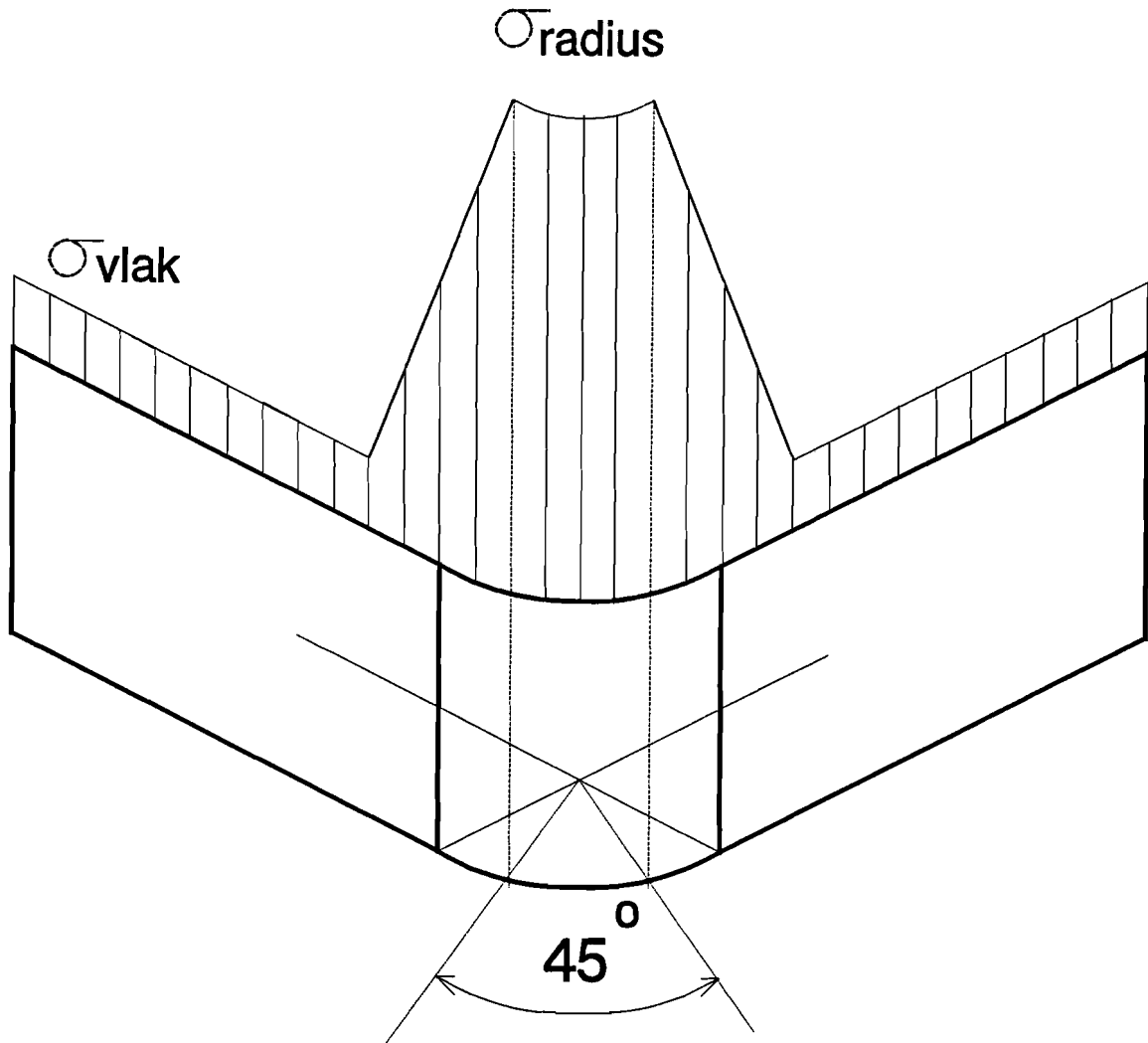
Omdat met het model met de afmetingen:

$$l_b * l_b = 40 * 40 \text{ mm}$$
$$r_{st} = 5 \text{ mm}$$

al berekeningen, simulaties en proeven gedaan zijn, lijkt het zinvol bij de simulatie met dit model te starten. Met behulp van de blenkberekening, zie hoofdstuk 3.2 en bijlage 2, is een blenk bepaald waarmee de maximale dieptrekverhouding en dus de maximale hoogte ($h=28$ mm) kan worden gehaald. Aan deze hoogte is bij de meeste andere modellen ook vastgehouden. De maten van de andere modellen zijn weergegeven in bijlage 5.

5.4 Belasting op de produktwand

Het bepalen van de grootte van de belasting op een model gebeurt op de wijze zoals in hoofdstuk 3 beschreven is. In GIFTS moet deze als lijnbelasting worden ingevoerd. Aangezien de maten en de plaats van het overgangsgebied niet bekend zijn, wordt deze bepaald.



Figuur 12: Belasting van het model

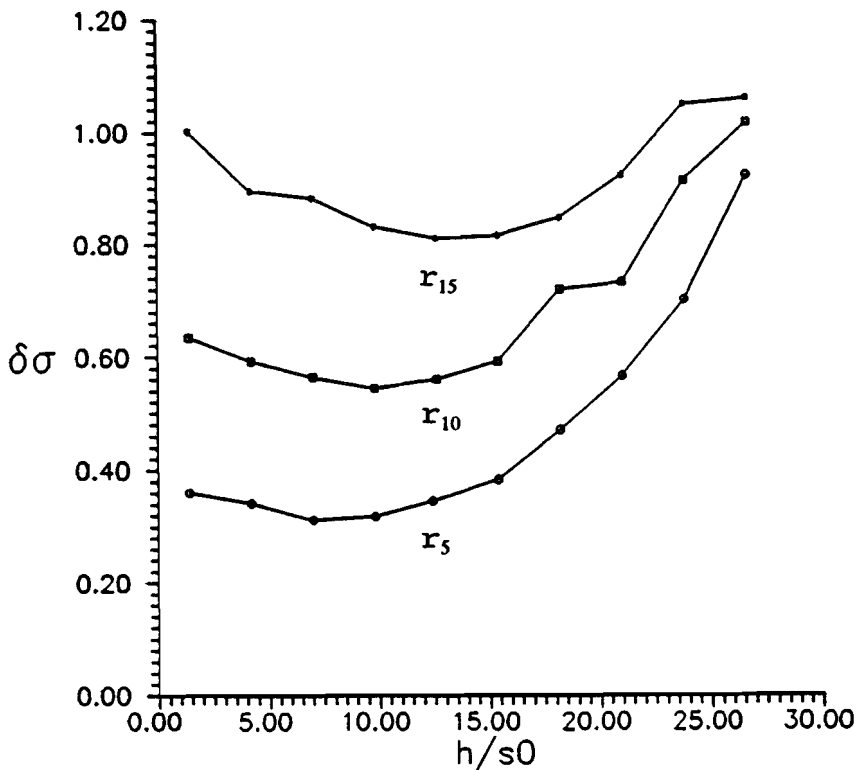
In de hoek van het produkt wordt over een hoek van 45° , zie figuur 12, de belasting aangebracht voor het rotatiesymmetrische gebied. Door nu een lineair verlopende belasting aan te brengen die loopt van σ_{rot} naar σ_{buig} en het oorspronkelijke oppervlak onder σ_{rot} gelijk te houden, wordt hiermee het overgangsgebied gedefinieerd. Tijdens de simulatie zal ook de invloed van de grootte van deze hoek op de spanningsuitdemping onderzocht worden.

Hoofdstuk 6: Resultaten simulatie

6.1. Invloed van de radius

Bij het onderzoeken van de invloed van de radius op de uitdempingsfactor hebben we gekozen voor een produkt van 40*40 mm. Hiermee kan naast het bekijken van de invloed van de radius ook gekeken worden naar de overgang van vierkant naar rond dieptrekken, waarbij de hoeken van het produkt elkaar gaan beïnvloeden. De hoekradius r_{st} wordt gevarieerd van $r_{st} = 5$ mm tot $r_{st} = 15$ mm, met stappen van 5 mm. Bij $r_{st} = 15$ mm is het produkt namelijk bijna rond.

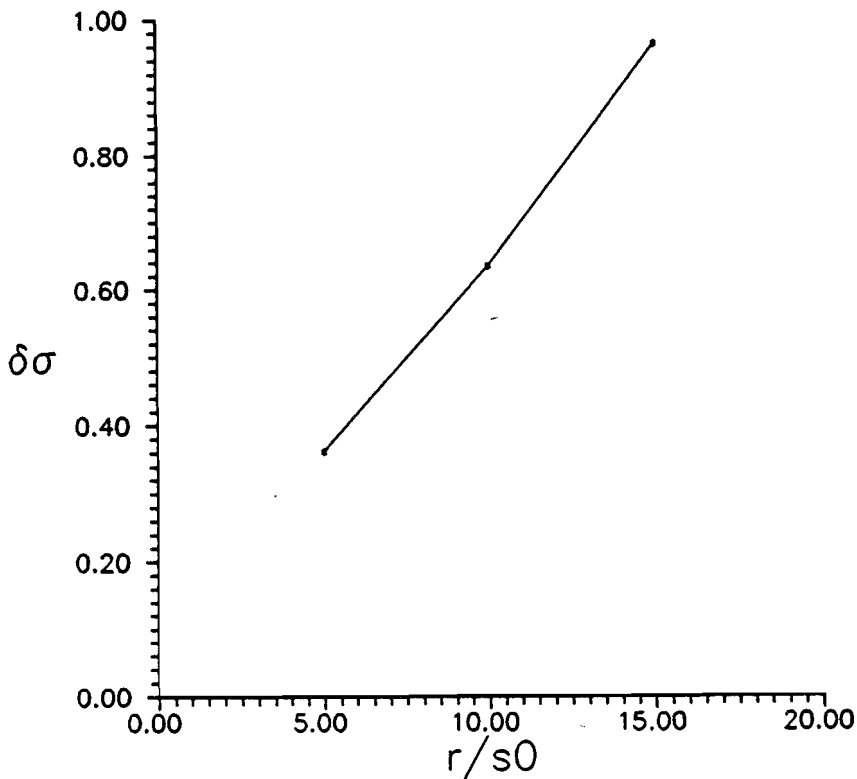
Er is voor elke radius het juiste model (krachten en afmetingen) bepaald, wat daarna in GIFTS wordt ingevoerd en doorgerekend. M.b.v. een drietal PASCAL-programma's (bijlage 4a) worden de berekende spanningen uitgezet tegen de plaats waar deze optreden en is te zien hoe de spanning in de wand uitdempt. Omdat we met name geïnteresseerd zijn in de uitdempingsfactor zijn alleen deze resultaten in dit rapport opgenomen. Er is als voorbeeld één figuur waarin het spanningsverloop te zien is, weergegeven in bijlage 4b.



Figuur 13: Invloed radius op spanningsuitdemping

In figuur 13 is de uitdempingsfactor uitgezet tegen de dimensieloze hoogte.

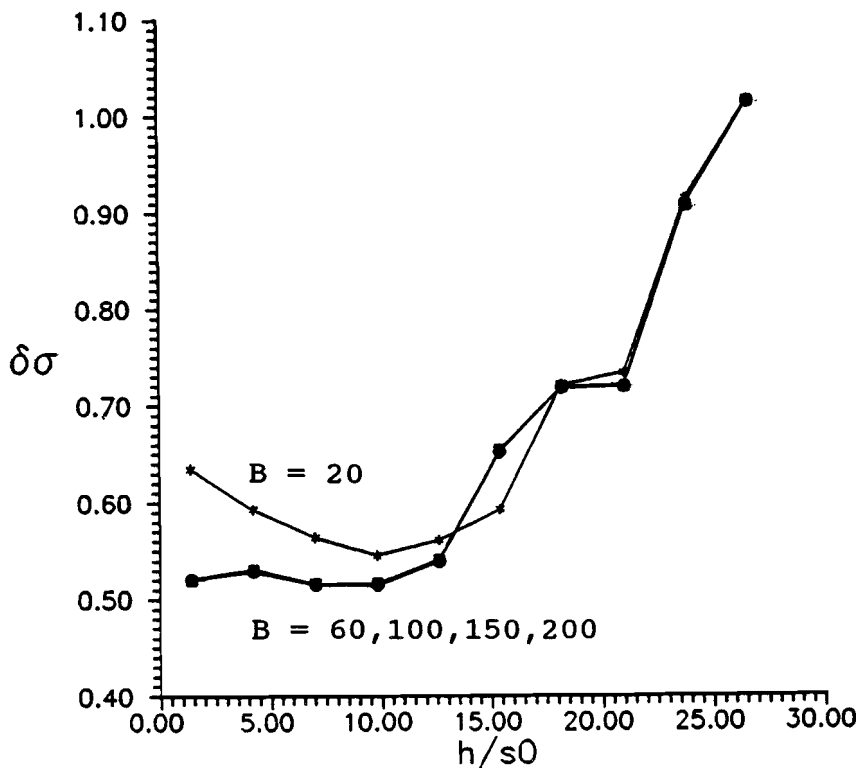
Er is te zien dat bij $r_{st} = 5 \text{ mm}$ (onderste lijn) de spanning het meest uitdempt (uitdempingsfactor is dan laag) en de uitdemping afneemt naarmate de hoekradius r_{st} toeneemt. In figuur 14 is dat ter aanvulling aanschouwelijk gemaakt. Toch moeten we deze resultaten sceptisch bekijken, omdat hier eigenlijk twee zaken tegelijkertijd bekeken worden. Namelijk, het effect van de radius op de uitdempingsfactor en de overgang van vierkant dieptrekken naar rond dieptrekken. Om zuiver de invloed van de radius op de dempingsfactor te bekijken zal een simulatie gedaan moeten worden van een groter produkt, waarbij de hoeken van het produkt elkaar niet beïnvloeden.



Figuur 14: Verband uitdempingsfactor en r/s_0 -verhouding

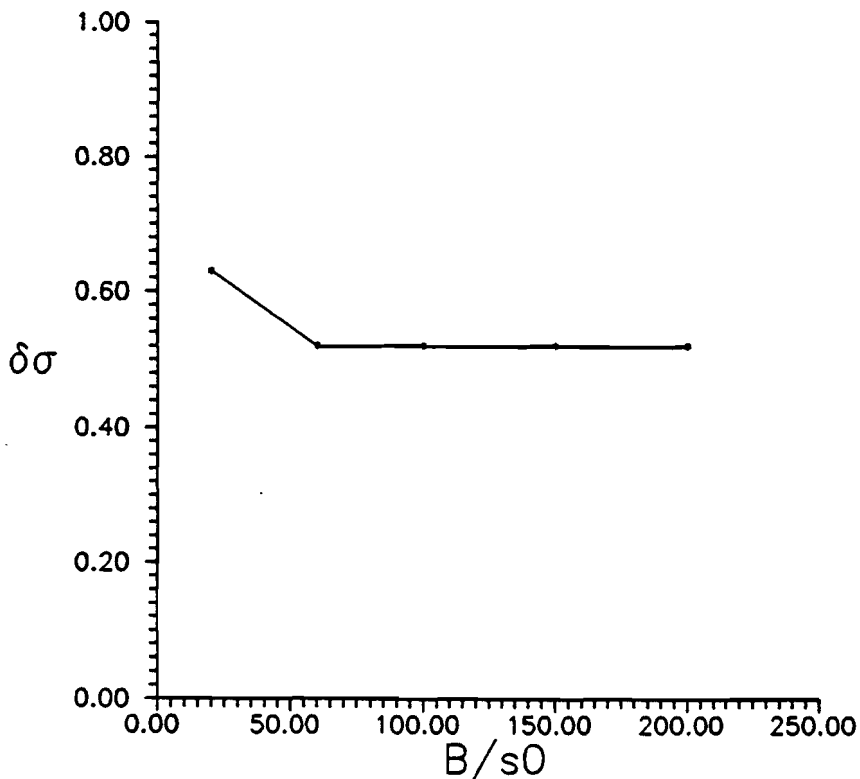
6.2 Invloed van de grootte van de stripdieptrekzone

De breedte van de stripdieptrekzone is gevarieerd van $B = 20$ mm tot $B = 200$ mm, met verschillende tussenstappen. Hierbij wordt het rotatiesymmetrische gebied constant gehouden op $r_{st} = 10$ mm. Hiervoor zijn 5 modellen opgesteld. De lijnbelasting voor het stripdieptrekgebied en het rotatiesymmetrische gebied is in GIFTS voor alle 5 de modellen hetzelfde. De resultaten hiervan zijn in figuur 15 en 16 weergegeven. In figuur 15 zijn de dimensieloze hoogtes van de 5 modellen uitgezet tegen de uitdempingsfactor. Elke lijn in deze figuur bezit een B/r_{st} -verhouding. De bovenste lijn in de figuur heeft een B/r_{st} -verhouding van 2. In de figuur is duidelijk waarneembaar dat de andere 4 lijnen over elkaar vallen. Zij bezitten een B/r_{st} -verhouding die varieert van 6 tot 20. Aan de hand van figuur 16 is eenvoudig te verklaren dat vanaf een stripdieptrekgebied van ongeveer $B = 60$ mm de uitdempingsfactor niet meer verandert. Dit verschijnsel is als volgt te verklaren. De hoge spanning in het rotatiesymmetrische gebied wil wegvloeien naar het stripdieptrekgebied omdat daar lagere spanningen heersen. Hoe kleiner echter het stripdieptrekgebied is, des te minder spanning in dit gebied kan vloeien, waardoor de spanning onderin de wand, in het rotatiesymmetrische gebied, niet de minimale waarde kan bereiken.



Figuur 15: Uitdempingsfactor uitgezet tegen dimensieloze hoogte

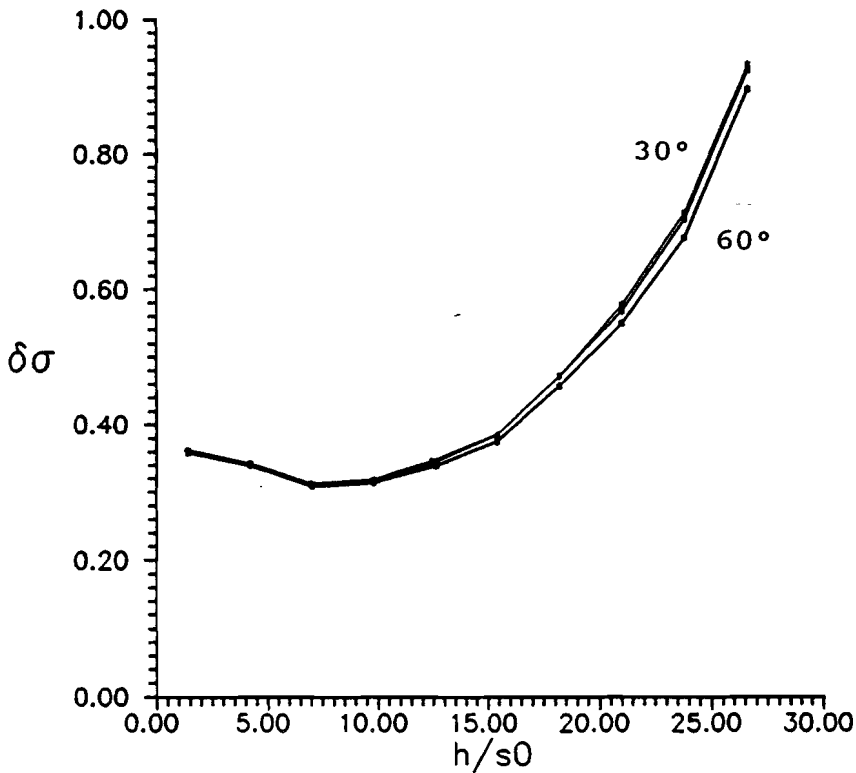
Om een beter beeld te krijgen van de kromme uit figuur 16, zullen nog enkele extra simulaties gedaan moeten worden voor stripdieptrekgebieden van $B = 60$ mm en kleiner. De punten zijn nu namelijk verbonden met rechte lijnen. Het is dus niet helemaal zeker dat de knik bij $B = 60$ mm ligt.



Figuur 16: Uitdempingsfactor tegen dimensieloze breedte stripdieptrekgebied

6.3 Invloed van de vorm van het belastingsprofiel

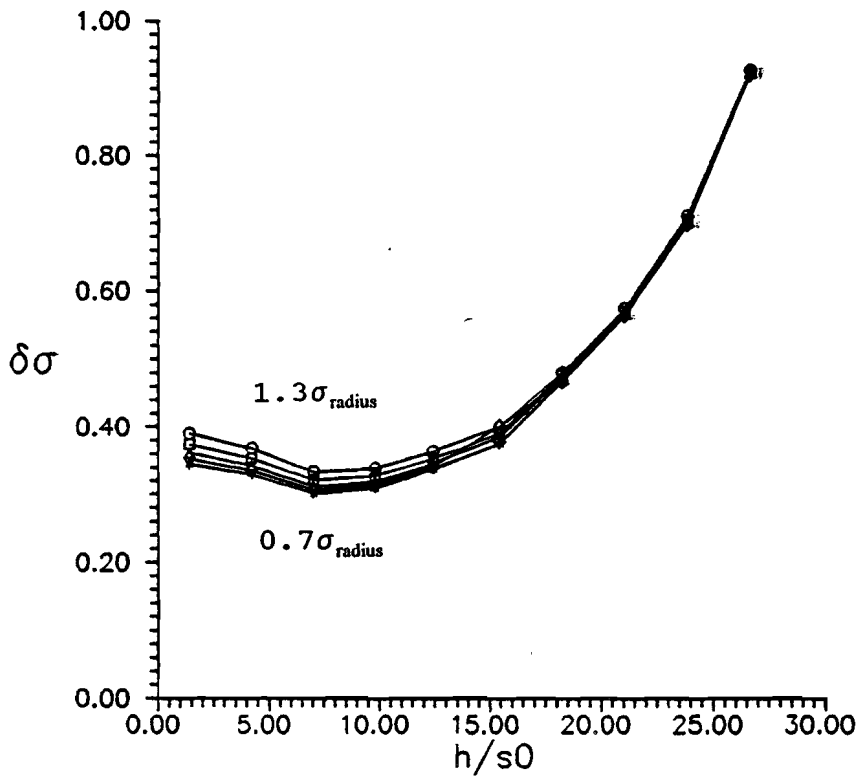
In § 5.4 hebben we gezien dat in het midden van het rotatiesymmetrische gebied een belasting werd aangebracht over een hoek van 45° . Aan de hand van de modellen 1, 8 en 9 zal onderzocht worden wat het effect is op de uitdempingsfactor als de hoek waarover de belasting wordt aangebracht gevarieerd wordt. Model 1 wordt belast over een hoek van 45° , model 8 wordt belast over een hoek van 30° en model 9 wordt belast over een hoek van 60° . In figuur 17 zijn de resultaten hiervan weergegeven. Hierin is duidelijk te zien dat de hoek waarover het rotatiesymmetrische gebied belast wordt zeer weinig of geen invloed heeft op de uitdempingsfactor. De drie lijnen eindigen namelijk alle bij een uitdempingsfactor van ongeveer 0.36. Hieruit zou misschien de voorzichtige conclusie getrokken mogen worden, dat met de vorm van het spanningsprofiel, waarvan we niet precies wisten hoe deze eruit zag, beduidend minder rekening gehouden behoeft te worden dan voorheen gedacht werd.



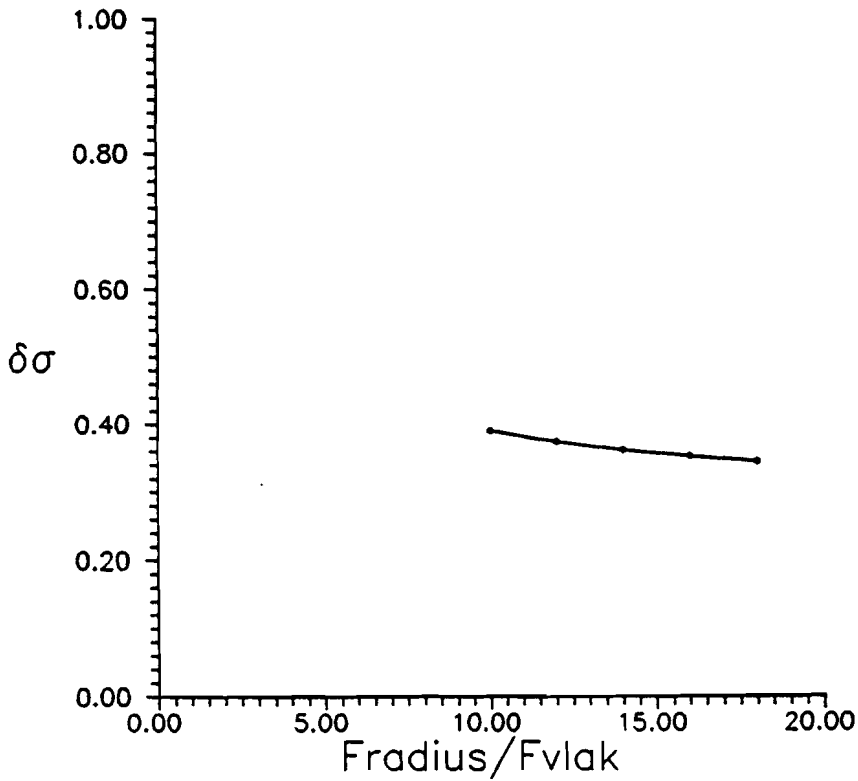
Figuur 17: Invloed van de vorm van het belastingsprofiel op de uitdempingsfactor

6.4 Invloed van de verhouding $\sigma_{\text{radius}}/\sigma_{\text{vlak}}$

Met de huidige modellering voor het vierkant dieptrekken berekenen we voor een produkt een bepaalde belasting, gevormd door σ_{radius} en σ_{vlak} . Als gevolg van een niet helemaal perfecte modellering is het mogelijk dat de berekende verhouding tussen σ_{radius} en σ_{vlak} niet helemaal de juiste waarde heeft. Nu wordt onderzocht hoe en in welke mate de uitdempingsfactor wordt beïnvloed als deze verhouding wordt veranderd. Hiervoor is model 1 gekozen, waarbij de σ_{vlak} constant is gehouden (alsook de resterende parameters) en σ_{radius} respectievelijk ongeveer 30% is verhoogd en 30% is verlaagd ten opzichte van de berekende waarde. De resultaten van deze simulatie zijn in figuur 18 en 19 weergegeven. Hieruit blijkt dat de verhouding $\sigma_{\text{radius}}/\sigma_{\text{vlak}}$ wel degelijk invloed heeft op de uitdempingsfactor. Het is echter niet zo dat de verhoging resp. verlaging van de verhouding evenredig doorwerkt. Een verhoging van σ_{radius} met 30% resulteert namelijk maar in een verhoging van de spanning onder in de wand van 10%. Dit betekent een verlaging van de uitdempingsfactor. Als σ_{radius} verlaagd wordt met 30% leidt dit tot een verlaging van de spanning onder de wand van ongeveer 10% en dus een verhoging van de uitdempingsfactor. Een derde deel van de eventuele afwijking van σ_{radius} werkt dus door in de spanning onder in de wand.



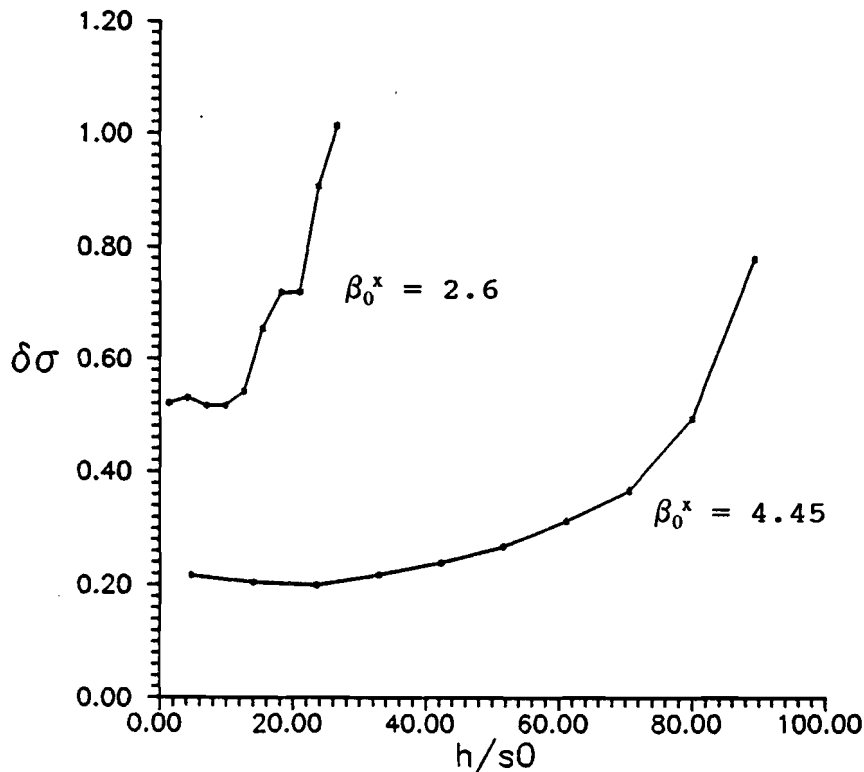
Figuur 18: De invloed van $\sigma_{\text{radius}}/\sigma_{\text{vlak}}$ op de uitdempingsfactor



Figuur 19: Uitdempingsfactor tegen $F^{\text{radius}}/F_{\text{vlak}}$

6.5 De invloed van de dieptrekverhouding op de uitdempingsfactor.

We hebben een bakje met de afmetingen 170 * 170 mm met hoogte 28 bekeken in § 6.2. De maximale dieptrekverhouding voor een produkt met die afmetingen is 4.45. De hoogte van het produkt is dan 94 mm. Beide modellen hebben een hoekradius van 10 mm. Beide modellen zijn bekeken met GIFTS. De resultaten hiervan zijn weergegeven in figuur 20. De meest linkse lijn levert een uitdempingsfactor van ongeveer 0.52, de rechtse lijn een uitdempingsfactor van ongeveer 0.22.



Figuur 20: Invloed van de dieptrekverhouding op uitdempingsfactor

Een produkt met hoge wand en eenzelfde hoekradius als een produkt met een lage wand heeft een lagere uitdempingsfactor. De reden hiervan kan gezocht worden in het feit dat de hoge spanningen in het rotatiesymmetrische gebied over een grotere afstand de gelegenheid hebben om richting het stripdieptrekgebied te vloeien.

Hoofdstuk 7: Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

Het softwarepakket GIFTS (Eindige Elementen Methode) is zeer geschikt om de spanningsuitdemping bij het dieptrekken van vierkante produkten te bekijken.

Om de kritische spanning of kritische kracht bij het vierkant dieptrekken te onderzoeken is GIFTS niet geschikt. GIFTS werkt namelijk in het lineair elastisch gebied, terwijl bij het vierkant dieptrekken elastische en plastische vervorming optreedt.

Met de modellen waarmee simulaties zijn gedaan is het niet mogelijk om de invloed van de radius op de uitdempingsfactor eenduidig te beschrijven, omdat tegelijkertijd nog een ander verschijnsel optrad, nl. hoeken die elkaar beïnvloedden.

Met de simulaties is duidelijk geworden dat de breedte van het stripdieptrekgebied van invloed is op de uitdempingsfactor. Bij een $r_{st}=10$ mm heeft een striptrekgebied groter dan ongeveer 60 mm geen invloed meer op de uitdempingsfactor. Om dit punt nauwkeuriger vast te leggen zijn meer simulaties noodzakelijk.

De hoek waarover σ_{radius} in het rotatiesymmetrische gebied wordt aangebracht heeft weinig tot geen invloed op de uitdempingsfactor.

Voor het uitvoeren van een EEM-simulatie is een goed werkend EEM-pakket alleen niet toereikend. Een kritische analyse van de resultaten is noodzakelijk.

Alleen als het model en zijn randvoorwaarden zorgvuldig gedefinieerd zijn, biedt GIFTS een goede oplossingsmethode. Het niet eenduidig vastgelegd zijn van bepaalde modelgegevens leidt vaak tot een vroegtijdig einde van de simulatie

GIFTS is een geavanceerd pakket, wat niet van de handleidingen gezegd kan worden. Raadpleging van derden is noodzakelijk.

Aanbevelingen

Door middel van veel simulaties per variabele kan beter inzicht worden verkregen, .

Er zouden simulaties gedaan kunnen worden in verschillende gebied om te kijken of de dimensieloze getallen die uit de simulaties komen representatief zijn en of schaling noodzakelijk is.

LITERATUURLIJST

- [1] Plastische bewerking van metalen, Procesbeheersing in de onderdelenfabricage.

Auteurs: Dr.Ir. J.A.H. Ramaekers
Ir. L.J.A. Houtackers
Ir. P.B.G. Peeters
Uitgever: OMTEC, 5e druk september 1991

- [2] Practicum Fundamentele Werktuigkunde
GIFTS-handleiding; WPA 4586

Auteur: H. Giesen
Uitgever: Technische Universiteit Eindhoven,
Najaar 1990, voorjaar 1991

- [3] Eindige Elementen Methoden pakket
GIFTS. Startcursus deel 1. Dictaat 834

Auteur: J. Bootsma
Uitgever: Hogeschool Eindhoven,
januari 1989

- [4] Blechbearbeitung. Band 3

Auteur: K. Lange
Uitgever: Springer Verlag, 2e druk 1990

- [5] Onderzoek naar de kritische kracht bij vierkant dieptrekken. WPA 1125

Auteur: R. Hens
Uitgever: Technische Universiteit Eindhoven,
december 1991

- [6] Eenvoudige modellering voor een axisymmetrisch dieptrekprodukt. Vergelijking van 6 verschillende modellen voor een flens van een axisymmetrisch dieptrekprodukt. WPA 1260
- Auteur: J. van Lieshout
Uitgever: Technische Universiteit Eindhoven,
februari 1992
- [7] Technologie van het dieptrekken.
- Auteur: J.N. Borsboom
Uitgever: Metaalinstituut TNO, Centrum voor
Metaalbewerking
- [8] Handboek voor de moderne stanstechniek
- Auteur: W.P. Romanovski
Uitgever: VEB Verlag Technik Berlin
- [9] Onderzoek naar de dieptrekkkracht bij vierkant dieptrekken. WPA 1301
- Auteurs: M. Decortis
M. Graef
Uitgever: Technische Universiteit Eindhoven,
april 1992
- [10] Modellering van het vierkant dieptrekken.
WPA 1075
- Auteur: D.F.J.M. Heuvelmans
Uitgever: Technische Universiteit Eindhoven,
mei 1991

[11] Afleiding benodigde stempelkracht voor
rotatiesymmetrische produkten.

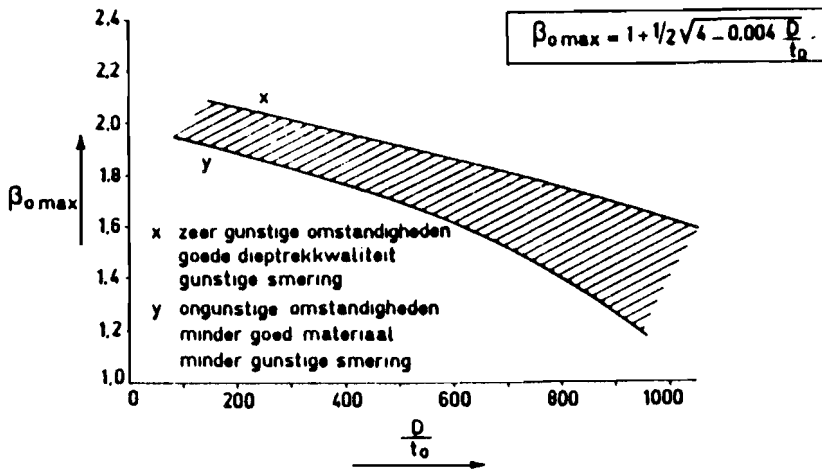
Auteur: Dr.Ir. J.A.H. Ramaekers
Uitgever: Technische Universiteit Eindhoven,
november 1991

Bijlage 1a Uitwerking blenkuitslag van een vierkant produkt

Gegeven:

Produktvorm	: vierkant bodemoppervlak
Lengte l_b	: 40 * 40 mm
Hoekradius r_b	: 10 mm
Materiaaldikte t	: 1 mm
Materiaal	: Hoogovens St15
Kar.def.weerst. C	: 500 N/mm ²
Verstevingingsexp. n	: 0.22
Voordeformatie ϵ_0	: 0.005

TNO heeft aan de hand van praktijkgegevens de in figuur b1 weergegeven grafiek samengesteld.



Figuur b1: Verband tussen de maximale dieptrekverhouding en D/t_0 -verhouding

In deze grafiek liggen twee lijnen. De bovenste lijn geldt in het geval van zeer gunstige omstandigheden, staal met een goede dieptrekkwaliteit en een dieptrekproces met goede smering. De onderste lijn geldt in geval van ongunstige omstandigheden als minder goed materiaal en minder goede smering. Om berekeningen te kunnen uitvoeren is een gemiddelde lijn bepaald door de bovenste lijn te benaderen door een rechte

$$\beta_{0\max \text{ boven}} = 2.2 - 6 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{D}{t} \quad (b1)$$

en door voor de onderste lijn de door TNO bepaalde formule te gebruiken,

$$\beta_{0\max} = 1 + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{4 - 0.004 \cdot \frac{D}{t}} \quad (b2)$$

waaruit voor de gemiddelde lijn volgt

$$\beta_{0\max, \text{gem}} = 1.6 - 3 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{D}{t} + \frac{1}{4} \cdot \sqrt{4 - 0.004 \cdot \frac{D}{t}} \quad (b3)$$

Met behulp van die grafiek en onderstaande formules is de blenkuitslag te bepalen.

$$A_{\text{stempel}} = l_b^2 - r_h^2 \cdot (4 - \pi) \quad (b4)$$

$$\beta_0 = \sqrt{\frac{A_{\text{blenk}}}{A_{\text{stempel}}}} \quad (b5)$$

$$,D' = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot A_{\text{blenk}}} \quad (b6)$$

Wanneer de vergelijkingen (b3), (b4), (b5) en (b6) gecombineerd worden kan iteratief bepaald worden hoe groot de 'fictieve diameter D' van de blenk is.

$$l_b^2 - r_h^2 \cdot (4 - \pi) = \frac{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2}{\left(1.6 - 3 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{D}{t} + \frac{1}{4} \cdot \sqrt{4 - 0.004 \cdot \frac{D}{t}}\right)^2} \quad (b7)$$

Met $A_{\text{stempel}} = 1514 \text{ mm}^2$ volgt dat $D = 89.5 \text{ mm}$

Hiermee zijn dan ook de maximale dieptrekverhouding en het blenkoppervlak te berekenen:

$$\beta_{0\max} = 2.04$$

$$A_{\text{blenk}} = 6291 \text{ mm}^2$$

Om de hoofdafmeting, de lengte l voor de blenk, te berekenen wordt een blenk in de vorm van een vierkant met afgeknipte hoeken als benadering gekozen. L is dan numeriek te berekenen met:

$$A_{\text{blenk}} = l^2 - 2 \cdot \left(\frac{l - l_b + 2 \cdot r_h}{2}\right)^2 \quad (b8)$$

Hieruit volgt dat $l = 95.7 \text{ mm}$

De hoogte van het vierkante dieptrekprodukt is vervolgens te berekenen uit:

$$h = \frac{1}{2} \cdot \left(l + (4 - \pi) \cdot r_h - l_b - \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot t \right) \quad (b9)$$

Hieruit volgt dat $h = 31.5$ mm

De radius 'R' van de blenk wordt bepaald met:

$$R = \sqrt{r^2 + 2 \cdot r \cdot h} \quad (b10)$$

Hieruit volgt dat $R = 27$ mm

Alle afmetingen om de blenk te construeren zijn hiermee bekend.

Wanneer onbekend is of een produkt met bepaalde afmetingen diepgetrokken kan worden, kan de - op de vorige pagina's beschreven - methode, via de tegengestelde weg gevolgd worden. Met behulp van het stempeloppervlak en de gewenste hoogte kunnen de blenkafmetingen bepaald worden, waarmee dan tevens de dieptrekverhouding β vastligt. Aan de hand van de grafiek van TNO kan dan bekeken worden of het produkt in één bewerking diep te trekken is, door de D/t_0 -verhouding te controleren. Voor deze blenkuitslagbepaling voor een vierkant produkt heb ik vanwege het vele rekenwerk het hier volgende PASCAL-programma geschreven.

Bijlage 1b PASCAL-programma voor blenk- en krachtenbepaling

```
program blenk_bepaling(input,output);
uses crt;
const delta=1E-6;
const delta1=1E-3;
var  fd,x,y,l,h,t,lb,b,z,rh,rhod,rho,Astempel,Ablenk,Rblenk,
    verschil1,verschil2,verschil3,verschil4:real;
    beta,pplooi,muflens,muradius,betam,xy,w,betal,n,epsilon,beta2,max,C,F
    stempel:real;
    Ftotster,F1ster,F1,F2ster,F2,F3ster,F3,F4ster,F4,Ftot,Fbuig,Fwflens,F
    plooi,Fstvlak,lijnbelastingrot,lijnbelastingvlak:real;
    Ar,Aradius,hsim,Fstvl14:real;
    nep:char;
begin
  clrscr;
  writeln('DIEPTREKKEN VAN VIERKANTE CUPS');
  writeln;
  write('Geef bodemlengte binnenzijde (lb) ');
  read(lb);
  write('Geef hoekradius binnenzijde cup (rh) ');
  read(rh);
  write('Geef matrijsradius (rhod) ');
  read(rhod);
  write('Geef plaatdikte van de blenk (t) ');
  read(t);
  write('Geef epsilon uitgangsmateriaal (epsilon) ');
  read(epsilon);
  write('Geef verstevigingsexponent (n) ');
  read(n);
  write('Geef karakteristieke deformatieweerstand (C) ');
  read(C);
  write('Geef wrijvingscoeff. flens/plooih (muflens) ');
  read(muflens);
  write('Geef wrijvingscoeff. flens/matrijsrad. (muradius) ');
  read(muradius);
  write('Geef plooihouderdruk in N/mm2 (pplooi) ');
  read(pplooi);
  Astempel:=sqr(lb)-sqr(rh)*(4-pi);
  Ar:=sqr(lb+2*rhod)-sqr(rh+rhod)*(4-pi);
  Aradius:=Ar-Astempel;
  fd:=1; {fictieve diameter}
  while fd<>1000 do
  begin
    w:=(1/4*pi*sqr(fd))/sqr(1.6-3E-4*fd/t+1/4*sqrt(4-0.004*fd/t));
    verschil:=(Astempel - w);
    if verschil < delta then
      begin
        x:=fd;
        fd:=1000;
      end
    else fd:=fd+0.01
  end;
  beta:=sqrt((1/4*pi*sqr(x))/Astempel);
```

```

Ablenk:=sqr(beta)*Astempel;
l:=1;
while l<>1000 do
begin
  y:=sqr(l)-2*sqr(0.5*l-0.5*lb+rh);
  verschil2:=(Ablenk - y);
  if verschil2 < delta then
    begin
      z:=1;
      l:=1000;
    end
  else l:=l+0.01
end;
h:=1/2*(z+(4-pi)*rh-lb-1/2*pi*t);
Rblenk:=sqrt(sqr(rh)+2*rh*h);
beta1:=Rblenk/rh;
write('stempeloppervlak = ',Astempel:6:1,' mm2      ');
writeln('fictieve diameter = ',x:4:2,' mm');
write('beta = ',beta:4:2,'                ');
writeln('blenkoppervlak = ',Ablenk:8:1,' mm2');
write('blenk lengte = ',z:5:2,' mm          ');
writeln('cuphoogte = ',h:5:2,' mm');
write('straal blenk TNO = ',Rblenk:5:2,' mm      ');
writeln('plaatselijke dieptrekverhouding = ',beta1:4:2);
max:=0; beta2:=1.1; verschil3:=1;
begin {krachtenberekening rotatiesymmetrisch gedeelte}
while verschil3 > delta do
begin
F1ster:=1.04*sqrt(beta1/beta2)*((exp(n*ln(ln(beta1/beta2)+epsilon))
-1)*(1-(1/beta2))+ln(beta2));
F2ster:=2*muflens*pplooi*rh*(beta2-1)/(c*t);
F3ster:=pi/2*muradius*(F1ster+F2ster);
F4ster:=(((exp(n*ln(ln(beta1/beta2)+epsilon))-1)*1/beta2+1)
*1/sqrt(3)*beta1/beta2*1/(rhod/t+0.5*sqrt(beta1/beta2)));
Ftotster:=F1ster+F2ster+F3ster+F4ster;
verschil3:=Ftotster-max;
if Ftotster > max
then begin
max:=Ftotster;
betam:=beta2;
beta2:=beta2+0.01;
end
else begin
Ftot:=Ftotster*2*pi*rh*t*C;
write('Ftotster = ',max:6:3,'                ');
writeln('beta2 = ',betam:5:3);
verschil3:=1e-7;
end;
end;
write('Ftotrot = ',Ftot:6:3,' N                ');
lijnbelastingrot:=Ftot/(2*pi*(rh+0.5*t));
writeln('Lijnbel.rot.symm.ged. = ',lijnbelastingrot:5:2,' N/mm');
{krachtenbepaling stripdieptrekgebied}
rho:=rhod+0.5*t;
b:=lb-2*rh;
Fbuig:=(8*C*exp(n*ln(2/(sqrt(3)*rho)))*exp((n+2)*ln(0.5*t)))*

```

```

4*b/(sqrt(3)*(n+2)*rho));
write('Fbuig = ',Fbuig:6:3,' N
');
Fplooi:=(Ablenk-Astempel-Aradius)*pplooi;
writeln('Fplooi = ',Fplooi:6:3);
Fwflens:=2*muflens*Fplooi;
writeln('Fwflens = ',Fwflens:6:3,' N');
Fstvlak:=1;
while Fstvlak <> 10000 do
begin
xy:=Fbuig+Fwflens+muradius*pi/(2*sqrt(2))*sqrt((sqr(Fwflens)+
sqr(Fstvlak))*cos(pi/4-arctan(Fwflens/Fstvlak)));
verschil4:=xy-Fstvlak;
if verschil4 > delta1
then begin
Fstvlak:=Fstvlak+10;
end
else begin
Fstvl14:=Fstvlak*1.14;
write('Fstvlak(1.14) = ',Fstvl14:6:3,' N
');
lijnbelastingvlak:=Fstvl14/(4*b);
writeln('lijnbelasting vlakke wand = ',lijnbelastingvlak:6:2,'
/mm');
Fstempel:=Ftot+Fstvl14;
write('tot.stempelkracht = ',Fstempel:6:3,' N
');
Fstvlak:=10000;
end;
end;
readln(nep);
end;
end.

```

Bijlage 2 De werking van het E.E.M.-programma GIFTS

Om het elastisch gedrag van een konstruktie te kunnen voorspellen zijn binnen het vakgebied van de mechanica veel methoden en formules ontwikkeld. Het is echter niet mogelijk om iedere konstruktie gebruik makend van de 'klassieke' mechanica theoriën te analyseren.

De Eindige Elementen Methode (afgekort E.E.M. of naar het engels F.E.M., Finite Element Method) biedt hier mogelijkheden. De E.E.M. wordt toegepast om spanningen, vervormingen en verplaatsingen in constructies te berekenen. De E.E.M. is een eenduidige oplosmethode en is daardoor uitstekend geschikt voor verwerking met de computer. Het pakket GIFTS wordt toegepast voor lineair elastisch gedrag van materialen en konstrukties.

In GIFTS wordt een konstruktie, in min of meer regelmatige elementen opgedeeld, ingevoerd. Een element wordt gedefinieerd als een elementaire konstruktie van een bepaald type (bijv. balk, staaf, plaat, e.d) dat zich uitstrekt tussen knooppunten.

Van de elementen kan het elastisch gedrag bepaald worden door de krachten op de knooppunten uit te drukken als funktie van de knooppuntsverplaatsingen. Dit levert een aantal vergelijkingen op en deze worden vastgelegd in de vorm van een matrix, de zgn. stijfheidsmatrix. Door nu de verplaatsingen van twee knooppunten van twee aanliggende elementen gelijk te stellen, kunnen de elementsstijfheidsmatrices samengevoegd worden. Het elastisch gedrag van de konstruktie is nu beschreven met n vergelijkingen en n onbekenden.

Na verplaatsingen en belastingen voorgeschreven te hebben kan dit stelsel vergelijkingen opgelost worden hetgeen de onbekende verplaatsingen en belastingen oplevert.

GIFTS bestaat uit een aantal processoren.

Voor 2-dimensionale problemen zijn er drie preprocessors:

- Bulkm : Voor het maken van 2D-meshes, uitgaande van drie- of vierzijdige grids
- Editm : Voor het aanpassen en controleren van modellen die m.b.v. Bulkm gemaakt zijn en voor het genereren van onregelmatige modellen
- Loadbc : Voor de invoer van dynamische en kinematische randvoorwaarden

Voor 3-dimensionale constructies is er eenzelfde indeling, met het verschil dat Bulkm en Editm vervangen zijn door Bulks en Edits.

Na het inbrengen van de benodigde gegevens met de preprocessoren volgt het uitvoeren van de formele berekeningen. Dit gebeurt in een aantal deelstappen, ieder afzonderlijk uitgevoerd door een processor. Het is mogelijk om de reeks van processoren aan te roepen m.b.v. een Macro-commando. Voorbeelden van dergelijk macro's zijn:

- Mstatic : Voor het berekenen van de verplaatsingen en de vervormingen als gevolg van de statische belasting
- Mmodes : Voor het bepalen van eigenfrequenties en eigentrilvormen
- Mstherm : Voor het uitvoeren van thermische analyses

De berekeningsresultaten kunnen worden weergegeven m.b.v. een drietal postprocessors:

- Result : Voor het maken van tabellen en plaatjes van de verplaatsingen, vervormingen en van de optredende spanningen voor 2D-constructies
- Posts : idem, voor 3D-constructies
- Postbm : Voor het tekenen van N-, D- en M-lijnen voor balkconstructies

Elke processor in GIFTS wordt opgestart door achter de GIFTS-prompt de naam van de processor in te typen.

Voor alle GIFTS-rekenprocedures kunnen we steeds vier stappen onderscheiden:

- 1 Modelgeneratie
- 2 Randvoorwaardeninvoer
- 3 Oplossingsprocedure
- 4 Resultaten

1 Modelgeneratie

Het proces van modelgeneratie omvat het invoeren van knooppunten op de gewenste geometrische lokaties en het definiëren van de materiaaleigenschappen. De knooppunten worden vervolgens door lijnstukken met elkaar verbonden. Daarna worden de plaaelementen (QM4 en QB4) gedefinieerd, met bijbehorende materiaalgroep, diktegroep en de lijnstukken waaruit ze opgebouwd worden. Omdat het model grote vlakken en een gekromde vorm heeft, moet de meshgenerator 'Bulkm' worden toegepast.

2 Randvoorwaardeninvoer

Nadat de geometrie van het model is vastgelegd, kunnen de belastingen en kinematische randvoorwaarden worden ingegeven. Vrijheidsgraden kunnen niet alleen aan knooppunten, maar ook aan lijnen en vlakken worden toegekend. Bij een 2D-model hoeven de vrijheidsgraden in de derde dimensie niet te worden ingegeven. Bij de toepassing van een lijnbelasting is het noodzakelijk de kracht in te voeren als kracht per meter.

3 Oplossingsprocedure

Nadat het model is aangemaakt en de belastingen en vrijheidsgraden zijn ingegeven, kan de berekening gestart worden. De procedure 'Mstatic', waarmee een groot aantal processoren worden opgeroepen om de statische berekeningen uit te voeren, zet de berekening in werking.

4 Resultaten

De processor 'Result' levert voor 2D-konstrukties tabellen en grafieken van verplaatsingen en spanningen per belastingsgeval.

De invoer voor een GIFTS-model

Hieronder volgt een overzicht van de gegevens die ingevoerd moeten worden om in GIFTS een model te krijgen waarmee een vierkant diepgetrokken produkt gesimuleerd kan worden.

\$ JOB: M4 13-MAY-92 9:16:43

AUTOOFF

ELMAT 3
 1
 1.0000E+02 2.1000E+05 3.0000E-01

ETH 1
 1
 1.0000E-00

KPOINT 0
 1 2
 .0000E+00 .0000E+00 .0000E+00
 4.6070E+01 .0000E+00 .0000E+00
 3 4
 5.0000E+01 .0000E+00 .0000E+00
 5.1950E+01 1.9000E-01 .0000E+00
 5 6
 5.3830E+01 7.6000E-01 .0000E+00
 5.5560E+01 1.6900E-00 .0000E+00
 7 8
 5.7070E+01 2.9300E-00 .0000E+00
 5.8310E+01 4.4400E-00 .0000E+00
 9 10
 5.9240E+01 6.1700E-00 .0000E+00
 5.9810E+01 8.0400E-00 .0000E+00
 11 12
 6.0000E+01 1.0000E+01 .0000E-00
 6.0000E+01 1.3930E+01 .0000E-00
 13 14
 6.0000E+01 6.0000E+01 .0000E-00
 6.0000E+01 6.0000E+01 2.8000E+01
 15 16
 6.0000E+01 1.3930E+01 2.8000E+01
 6.0000E+01 1.0000E+01 2.8000E+01
 17 18
 5.9810E+01 8.0400E-00 2.8000E+01
 5.9240E+01 6.1700E-00 2.8000E+01

19	20		
5.8310E+01	4.4400E-00	2.8000E+01	
5.7070E+01	2.9300E-00	2.8000E+01	
21	22		
5.5560E+01	1.6900E-00	2.8000E+01	
5.3830E+01	7.6000E-01	2.8000E+01	
23	24		
5.1950E+01	1.9000E-01	2.8000E+01	
5.0000E+01	.0000E-00	2.8000E+01	
25	26		
4.6070E+01	.0000E-00	2.8000E+01	
.0000E-00	.0000E-00	2.8000E+01	

SLINE 0

L12

1	2	24	
---	---	----	--

L23

2	3	3	
---	---	---	--

CARC 0

C3

3	4	5	3
---	---	---	---

C4

5	6	7	3
---	---	---	---

C5

7	8	9	3
---	---	---	---

C6

9	10	11	3
---	----	----	---

SLINE 0

L1112

11	12	3	
----	----	---	--

L1213

12	13	24	
----	----	----	--

L1314

13	14	11	
----	----	----	--

L1415

14	15	24	
----	----	----	--

L1516

15	16	3	
----	----	---	--

CARC 0

C7

16	17	18	3
----	----	----	---

C8

	18	19	20	3
C9				
	20	21	22	3
C10				
	22	23	24	3

SLINE	0		
L2425			
	24	25	3
L2526			
	25	26	24
L261			
	26	1	11

COMPLINE	0		
L1			
C10	L2425		
L2			
C8	C9		
L3			
L1516	C7		
L4			
L23	C3		
L5			
C4	C5		
L6			
C6	L1112		

COMPLINE						
LB1						
L12	L23	C3	C4	C5	C6	L1112
L1213						
LB2						
L1415	L1516	C7	C8	C9	C10	L2425
L2526						

GETY	0		
QB4			
	1	1	
GRID4	0		
G1			
LB1	L1314	LB2	L261

De volgende gegevens moeten ingevoerd worden om het model van een belastingsprofiel te voorzien

\$ JOB: M4 14-MAY-92 13:38:29

AUTOOFF

SUPL 0

L12

L23

C3

C4

C5

C6

L1112

L1213

SUPL 1

L261

L1415

L3

L2

C10

L1314

SUPL 2

L261

L1314

C7

L2

L1

L2526

LOADL 3

L1415

4.3000E+01 4.3000E+01

L3

4.3000E+01 4.6000E+02

L2

4.6000E+02 4.6000E+02

L1

4.6000E+02 4.3000E+01

L2526

4.3000E+01 4.3000E+01

Bijlage 3 Meetresultaten Decortis/Graef [10]

Tabel meetresultaten stripdieptrekken

mat	smeermiddel	F_{buig}	F_{stvlak}	$F_{\text{stvlak gem}}$	μ_r	μ_f	afwijking
		[N]	[N]	[N]	[-]	[-]	[%]
11	talk	987	1610	1820	0.11	0.03	8.9
11	platinol	987	1861	2170	0.13	0.039	14.3
11	finarol	987	2485	2940	0.11	0.076	15.5
12	talk	553	1150	1250	0.19	0.023	10.8
12	platinol	553	1590	1800	0.17	0.047	11.7
13	talk	475	1310	1500	0.18	0.037	12.7
13	platinol	475	1380	1690	0.17	0.041	18.3

Opmerking: matrijsradius bij stripdieptrekken = 5 mm

Tabel meetresultaten vierkant dieptrekken

mat	smeermiddel	F_{stvlak}	F_{stdiep}	F_{st}	$F_{\text{st gem}}$	afwijking
		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]
11	talk	4.5	30.2	34.7	31.7	8.6
11	platinol	4.8	30.9	35.7	34.0	4.8
11	finarol	5.4	30.3	35.7	34.8	2.5
12	talk	4.2	29.1	33.3	28.5	14.4
12	platinol	4.5	28.8	33.3	31.3	6.0
13	talk	4.0	26.7	30.7	27.8	9.5
13	platinol	3.9	28.1	32.0	32.0	0.0

Opmerking: afmetingen stempel $l \times b$ 40*40, $r_{\text{st}}=10$, $\rho_{\text{st}}=5$, $s_0=0.8$

Specificatie van de gebruikte materialen

Materiaal 11: Hoogovens St 15 onbekleed; 0.8 mm; code 8921;
C=499 N/mm² en n=0.259

Materiaal 12: Hoogovens St 15 bekleed met thermische zinklaag
10 μm (hotdip); 0.7 mm; code 9121; C=499 N/mm²
en n=0.212

Materiaal 13: Hoogovens St 15 bekleed met electrolitische
zinklaag 10 μm; 0.7 mm; code 9122; C=469 N/mm²
en n=0.241

Bijlage 4 Pascal-programma's voor bepaling uitdemping

```
PROGRAM regelsverwijderen; {$R+,B-}
  VAR invoer,uitvoer: text;
      i,j: integer;
      a: char;
      data: array [1..80] of char;
BEGIN
  assign(invoer, 'a:\spannin2.lpt');
  assign(uitvoer, 'a:\almod.dar');
  reset(invoer);
  rewrite(uitvoer);
  while not eof(invoer) do
    BEGIN
      for i:= 1 to 6 do
        begin
          for j:= 1 to 80 do
            if eoln(invoer)
            then data[j] := ' '
            else read(invoer, data[j]);
            readln(invoer);
            for j:= 1 to 79 do write(data[j]);

            writeln(data[80]);
          end;
          for i:= 7 to 33 do
            begin
              for j:= 1 to 80 do
                if eoln(invoer)
                then data[j] := ' '
                else read(invoer, data[j]);
                readln(invoer);
              for j:= 1 to 79 do write(uitvoer, data[j]);
              writeln(uitvoer,data[80]);
            end;
          END;
        END.

```



```
PROGRAM negennaartwee;
```

```
VAR
```

```
  uitvoer, invoer : TEXT;  
  s17 : STRING[17];  
  i1,i2,i3 : INTEGER;  
  r1,r2,r3,r4 : REAL;
```

```
BEGIN
```

```
  assign(invoer, 'a:a1mod.dar');  
  reset(invoer);  
  assign(uitvoer, 'a:b1mod.das');  
  rewrite(uitvoer);  
  REPEAT  
    readln(invoer, i1, s17, r1, i2, i3, r2, r3, r4);  
    writeln(uitvoer, i1, ' ', r3);  
  UNTIL EOF ( invoer );  
  close(invoer);  
  close(uitvoer);
```

```
END.
```

```

PROGRAM eenaaracht;
    VAR k1,i,j,n,k: integer;
        k2: real;
        invoer,uitvoer: text;
BEGIN
    assign(invoer, 'a:\b1mod.das');
    assign(uitvoer, 'a:\c1moda.dat');
    reset(invoer);
    rewrite(uitvoer);
    begin
        for j:=1 to 40 do
            begin
                readln(invoer,k1,k2);
                writeln(uitvoer,j,k2);
            end;
        end;
    close(uitvoer);
    assign(uitvoer, 'a:\c1modb.dat');
    rewrite(uitvoer);
    begin
        for j:= 1 to 40 do
            begin
                readln(invoer,k1,k2);
                writeln(uitvoer,j,k2);
            end;
        end;
    close(uitvoer);
    assign(uitvoer, 'a:\c1modc.dat');
    rewrite(uitvoer);
    begin
        for j:= 1 to 40 do
            begin
                readln(invoer,k1,k2);
                writeln(uitvoer,j,k2);
            end;
        end;
    close(uitvoer);
    assign(uitvoer, 'a:\c1modd.dat');
    rewrite(uitvoer);
    begin
        for j:= 1 to 40 do
            begin
                readln(invoer,k1,k2);
                writeln(uitvoer,j,k2);
            end;
        end;
    end;
end;

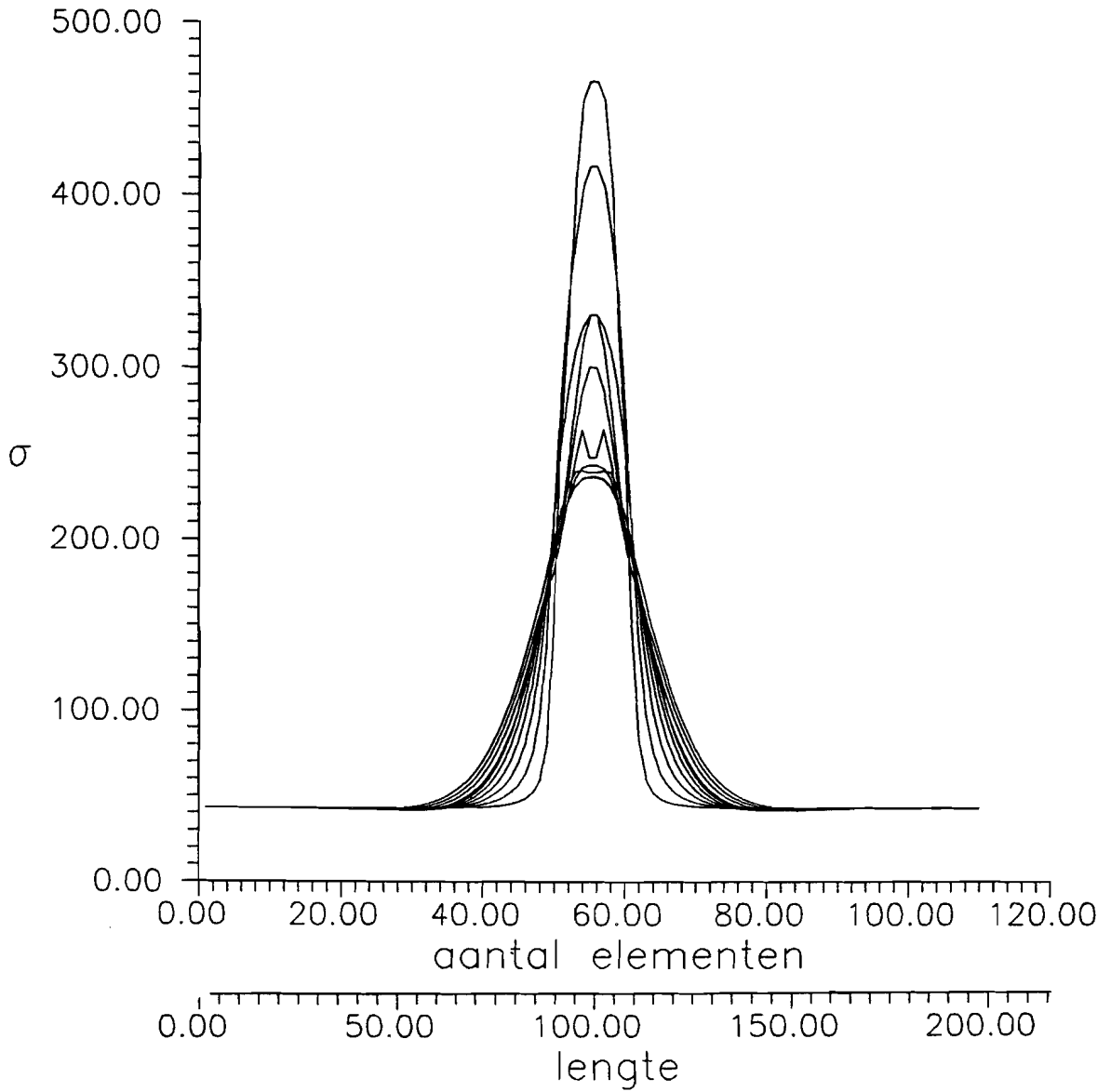
```

```

end;
close(uitvoer);
assign(uitvoer, 'a:\c1mode.dat');
rewrite(uitvoer);
begin
    for j:= 1 to 40 do
        begin
            readln(invoer,k1,k2);
            writeln(uitvoer,j,k2);
        end;
    end;
close(uitvoer);
assign(uitvoer, 'a:\c1modf.dat');
rewrite(uitvoer);
begin
    for j:= 1 to 40 do
        begin
            readln(invoer,k1,k2);
            writeln(uitvoer,j,k2);
        end;
    end;
close(uitvoer);
assign(uitvoer, 'a:\c1modg.dat');
rewrite(uitvoer);
begin
    for j:= 1 to 40 do
        begin
            readln(invoer,k1,k2);
            writeln(uitvoer,j,k2);
        end;
    end;
close(uitvoer);
assign(uitvoer, 'a:\c1modh.dat');
rewrite(uitvoer);
begin
    for j:= 1 to 40 do
        begin
            readln(invoer,k1,k2);
            writeln(uitvoer,j,k2);
        end;
    end;
end;
end.

```

Bijlage 4b Uitdempingsfiguur



Bijlage 5 Tabel modelgegevens

Model	Afmetingen	r_{st}	hoogte	Q_{radius}	Q_{vlak}	hoek belasting
	[mm]	[mm]	[mm]	[N/mm]	[N/mm]	[°]
1	40*40	5	28	570	41	45
2	40*40	10	28	440	43	45
3	40*40	15	28	360	75	45
4	80*80	10	28	460	43	45
5	120*120	10	28	460	43	45
6	170*170	10	28	460	43	45
7	220*220	10	28	460	43	45
8	40*40	5	28	570	41	30
9	40*40	5	28	570	41	60
10	170*170	10	94	750	52	45