

Vierkant dieptrekken : bepaling van de kritische dieptrekkraft

Citation for published version (APA):

Janssen, R. J. P. (1993). *Vierkant dieptrekken : bepaling van de kritische dieptrekkraft*. (TH Eindhoven. Afd. Werktuigbouwkunde, Vakgroep Produktietechnologie : WPB; Vol. WPA1502). 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

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 Productietechnologie & Automatisering
Laboratorium voor Omvormtechnologie

VIERKANT DIEPTREKKEN
Bepaling van de kritische dieptrekkracht

H.S. Eindhoven - Eindstudieverslag
R.J.P. Janssen
Juni 1993

V.F. Code: D3 WPA 1502

In opdracht van : Hogeschool Eindhoven
Afdeling Werktuigbouwkunde
Vakgroep Produktietechniek & Materialen
Afstudeerperiode : 1-2-1993 t/m 8-6-1993
Begeleider H.S.E. : Ir. A.J.M. van Beckum
Begeleider T.U.E. : Dr. Ir. J.A.H. Ramaekers

SAMENVATTING

Op de TUE wordt het dieptrekproces onderzocht met als doel het opstellen van praktisch bruikbare ontwerprichtlijnen voor de maakbaarheid van produkten en de te gebruiken middelen daarbij. Het bepalen van de kracht waarbij het produkt faalt, de kritische stempelkracht, vormt een gedeelte van het onderzoek. In dit rapport is de kritische stempelkracht voor vierkante dieptrekprodukten bepaald.

Voor het vierkant dieptrekken is een model opgesteld waarbij als referentie dienen :

- TNO blenkuitslagmethode
- Bepaling van de benodigde stempelkracht door het verdelen van het produkt in een gebied dat diepgetrokken wordt en een gebied dat zuiver op dubbele buiging wordt belast.

Dit model is geverifieerd door middel van experimenten. Hieruit blijkt dat de krachtenmodellering sterk afhankelijk is van het gebruikte uitgangsmateriaal.

Hoe meer de praktische blenk de volgens TNO ideale blenkvorm benadert des te kleiner het verschil tussen de theoretische en praktisch bepaalde stempelkracht wordt.

Uit de experimenten is gebleken dat de kritische stempelkracht voor vierkante produkten een gering verschil vertoont met de kritische stempelkracht voor cilindrische produkten.

Bij vierkante produkten treedt tengevolge van de asymmetrische vorm uitdemping van de spanning op. Door de asymmetrische vorm stroomt tijdens het vormen van het produkt het materiaal vanuit de hoek naar de vlakke wand. Door deze materiaalstroom zullen de spanningen wegvloeien. Dit wegvloeien van spanningen is gedefinieerd als spanningsuitdemping en is gesimuleerd met het eindige elementen pakket GIFTS.

Bij cilindrische produkten treedt geen spanningsuitdemping op uit symmetrie-overweging.

Bij vierkant dieptrekken treedt falen altijd onderin de produktwand van het dieptrekgebied op. Hiermee wordt het uitscheuren van de bodem ingeleid. Met behulp van de benodigde stempelkracht voor het vormen van het gebied dat diepgetrokken wordt en de spanningsuitdemping kan de belasting onderin de produktwand bepaald worden. Indien falen van het produkt optreedt is de kritische stempelkracht bereikt. Voor cilindrische produkten geldt:

$$- F_{cr\circ}^* = 0.72$$

Voor vierkante produkten is de kritische stempelkracht bepaald. Hiervoor geldt:

$$- F_{cr\Box}^* = 1.10$$

Hieruit blijkt dat vierkante produkten bij een hogere belasting falen dan cilindrische produkten met gelijke stempelradius. Dit criterium is geldig binnen de onderzochte grenzen.

VOORWOORD

Dit rapport is tot stand gekomen naar aanleiding van mijn eindstudie-opdracht bij de vakgroep Produktietechniek & Materialen van de Hogeschool Eindhoven. De opdracht is uitgevoerd binnen de vakgroep Produktietechnologie en Automatisering van de Technische Universiteit Eindhoven.

Deze vakgroep verricht onderzoek naar het omvormen van metalen produkten.

Een van deze vervormingsprocessen is het dieptrekproces, waarbij een onderscheid wordt gemaakt tussen het dieptrekken van rotatiesymmetrische en van onregelmatig gevormde produkten.

Dit rapport maakt deel uit van het onderzoek naar onregelmatig gevormde produkten.

Hierbij bedank ik onderstaande personen die mij hebben geholpen bij mijn eindstudie-opdracht en het verstrekken van informatie:

- Dhr. Ramaekers, begeleider TUE
- Dhr. van Beckum, begeleider HSE
- E. Deckers, afstudeerder TUE
- Dhr. Smeets, begeleider bij de uitgevoerde experimenten
- Dhr. Giessen, docent GIFTS
- Dhr. Rutjens, gereedschapsmaker HSE

R.J.P. Janssen

1-6-1993

INHOUDSOPGAVE

	blz.
1. INLEIDING	8
2. HET DIEPTREKPROCES	8
2.1 Procesomschrijving	8
2.2 De spanningstoestand	8
2.3 Het dieptrekken van rotatiesymmetrische produkten	9
2.4 Het dieptrekken van onregelmatig gevormde produkten	10
2.4.1 Spanningsuitdemping	11
2.4.2 Kritische spanning	12
2.4.3 Anisotropie	12
3. MODELLERING VAN HET VIERKANT DIEPTREKKEN	13
3.1 Parameters	13
3.2 De blenkvorm	14
3.2.1 De blenkuitslagmethode volgens TNO	14
3.3 Dieptrekverhoudingen	16
3.4 Bepalen van de benodigde stempelkracht	17
3.4.1 Krachten in de rotatiesymmetrische gebieden	18
3.4.2 Krachten in de striptrekgebieden	18
3.4.3 De totaal benodigde dieptrekkkracht	20
3.5 Evaluatie modellering	20
4. VERIFICATIE VAN HET OPGESTELDE MODEL	22
4.1 Inleiding	22
4.2 Gebruikte gereedschappen	22
4.3 Het gebruikte materiaal	23
4.4 Stempelkrachten	24
4.4.1 Stempelkrachten bij een ronde blenk	26
4.4.2 Stempelkrachten bij een ronde blenk met afgeknipte hoeken	27
4.4.3 Evaluatie van de stempelkrachtmetingen	28
4.5 Kritische stempelkracht	28
4.6 De produkthoogte	29
4.7 Het verloop van de produktdikte	29
4.8 Visuele waarnemingen	30

5. SIMULATIE VAN DE SPANNINGSUITDEMPING	32
5.1 Simulatiepakket GIFTS	33
5.2 Modelkeuze	34
5.3 Input van het gifts-model	35
5.4 Aangebrachte belasting	36
5.5 Dempingsfactor	37
5.5.1 Invloed van de stempelradius	37
5.5.2 Invloed van de globale dieptrekverhouding	38
5.5.3 Uitdempingsmatrix	39
5.5.4 Evaluatie van de spanningsuitdemping	40
6. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	41
6.1 Conclusies	41
6.2 Aanbevelingen	42
LITERATUURLIJST	43
BIJLAGEN	
Bijlage 1 : Resultaten dieptrekkracht vierkant dieptrekken Decortis/Graef	44
Bijlage 2 : Meetstaat van de stempel- en matrijsafmetingen	45
Bijlage 3a : Pascal programma voor het bepalen van de modelleringsparameters	46
Bijlage 3b : Output pascal programma	49
Bijlage 4 : Theoretische en praktische waarden van de blenkgeometrie	50
Bijlage 5a : Benodigde krachten voor het deformereren van het rot. sym. gebied	51
Bijlage 5b : Benodigde krachten voor het deformereren van het striptrekgebied	52
Bijlage 6a : Meetresultaten ronde blenk	53
Bijlage 6b : Meetresultaten ronde blenk met afgeknipte hoeken	55
Bijlage 7 : Meetresultaten bepaling kritische kracht	56
Bijlage 8 : Meetstaat van de bereikte produkthoogten	57
Bijlage 9 : Meetstaat van het verloop van de wanddikte	58
Bijlage 10 : Input van het gifts-model	59
Bijlage 11a : Pascal programma voor het bepalen van gifts-input	61
Bijlage 11b : Output pascal programma	62
Bijlage 12 : Toegepaste belastingen voor de simulaties	63

SYMBOLENLIJST

A_{blenk}	blenkoppervlak
A_{stempel}	stempeloppervlak
b_p	stempel breedte
B	breedte striptrekgebied
C	karakteristieke deformatie weerstand
D	diameter ronde blenk
E	elasticiteitsmodulus
f_d	fictieve blenk diameter
F^*	dimensieloze kracht
F_D	deformatiekracht
F_N	normaalkracht
F_p	stempelkracht
F_{pt}	plooihouderkracht
F_{rot}	benodigde stempelkracht voor de vorming van een cilindrisch produkt
F_{strip}	benodigde stempelkracht voor de vorming van het striptrekgebied
F_w	wrijvingskracht
h	produkthoogte
l	blenklengte
n	verstevigingsexponent
P_{pt}	plooihouderdruk
r	anisotropie
r_d	matrijsradius
r_p	stempelradius
r_u	momentane blenk radius
r_{u0}	oorspronkelijke blenk radius
R	blenk radius
s	momentane plaatdikte
s_0	oorspronkelijke plaatdikte
β_0	globale dieptrekverhouding
β_0^*	lokale dieptrekverhouding
$\beta_{0 \text{ max}}$	maximale globale dieptrekverhouding
ϵ_0	voordeformatie
μ_{fl}	wrijvingscoëfficiënt op de flens
μ_{pd}	wrijvingscoëfficiënt op de matrijsafronding
ρ_d	matrijsafronding
ρ_p	stempelafronding
σ_i	intrekspanning
σ_{pt}	spanning t.g.v. plooihouderkracht
σ_t	tangentiale spanning
$\Delta\sigma$	dempingsfactor

1. INLEIDING

De vakgroep Produktietechniek en Automatisering van de TUE verricht onderzoek naar het omvormen van metalen produkten. Het doel van het onderzoek is het opstellen van praktisch bruikbare ontwerprichtlijnen omtrent de maakbaarheid van het eindprodukt.

Het dieptrekproces is een van de vervormingsprocessen waar onderzoek naar wordt verricht.

Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen het dieptrekken van:

- rotatiesymmetrische produkten
- onregelmatig gevormde produkten, met name produkten met een vierkante of rechthoekige vorm.

Dit rapport beschrijft het onderzoek naar de stempelkracht waarbij falen van het produkt optreedt. Deze stempelkracht wordt gedefinieerd als de kritische stempelkracht.

Om inzicht in het dieptrekproces te verkrijgen is een literatuurstudie verricht.

Hoofdstuk 2 bevat de voor het onderzoek van belang zijnde bevindingen van de literatuurstudie.

Voor het dieptrekken van vierkante - en rechthoekige produkten is een model opgesteld in hoofdstuk 3, dat vervolgens door middel van experimenten is geverifieerd (hoofdstuk 4).

Om de kritische stempelkracht te bepalen is in hoofdstuk 5 een model opgesteld om de spanningsuitdemping in de produktwand te simuleren. Hierbij is gebruik gemaakt van het eindige elementen pakket GIFTS. Het programmeertechnische gedeelte van het programma zal in dit rapport summier worden beschreven, omdat dit volledig van het gebruikte softwarepakket afhankelijk is.

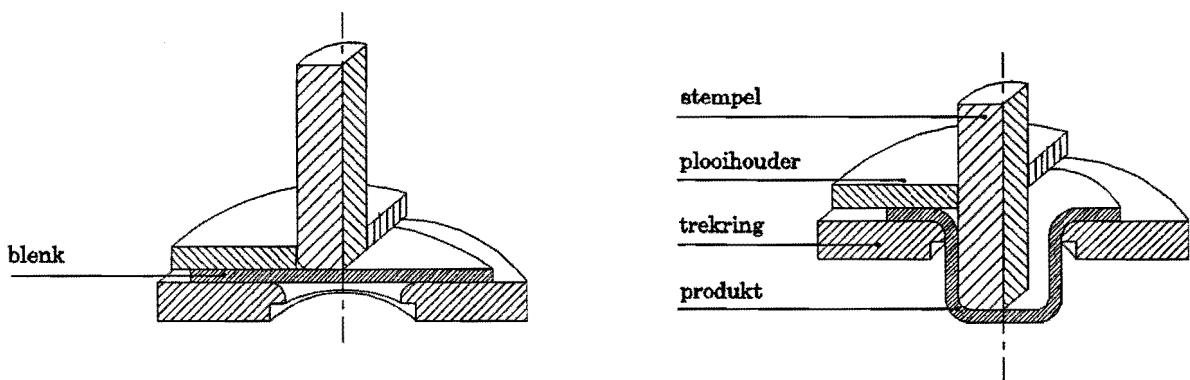
In hoofdstuk 6 tenslotte, worden enkele conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan met betrekking tot een eventueel vervolg op dit onderzoek.

2. HET DIEPTREKPROCES

2.1. Procesomschrijving

Het dieptrekproces behoort tot de groep van spaanloze bewerkingen. Het is een koud plaatvormproces, waarbij uit een vlakke plaat (de blenk), een hol produkt wordt vervaardigd dat aan één zijde open is. De vorm van de blenk is afhankelijk van de vorm van het produkt. De meest elementaire vorm is het cilindrische produkt waarbij uit symmetrie-overweging een ronde blenk als uitgangsmateriaal genomen wordt.

Figuur 1 geeft een overzicht van het verloop van het axi-symmetrisch dieptrekproces en de daarbij gebruikte gereedschappen.



Figuur 1 : Het dieptrekproces

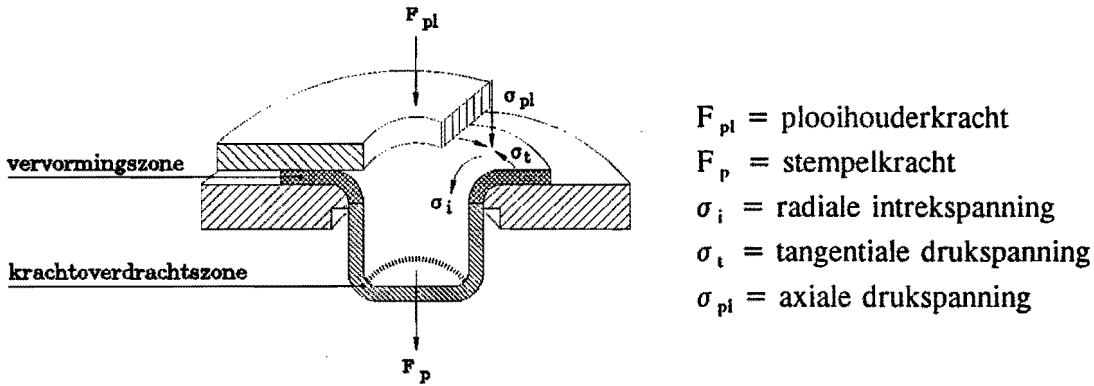
Bij het dieptrekken ligt het uitgangsmateriaal (de blenk), ingeklemd tussen de plooihouder en de trekkring (ook wel matrijs genoemd). Het materiaal wordt door het indringen van de stempel tussen de plooihouder en de trekkring uitgetrokken en neemt de vorm van de stempel aan. De wand van het produkt wordt dus gevormd door het gedeelte van de blenk dat zich niet onder het stempeloppervlak bevindt.

Als al het blenk materiaal volledig om de stempel is gevormd, is het produkt klaar en kan van de stempel verwijderd worden.

2.2. De spanningstoestand

Tijdens het vormen van het produkt zijn twee voor het dieptrekken specifieke gebieden te onderscheiden: de krachtoverdrachtszone en de vervormingszone. De krachtoverdrachtszone bestaat uit de gevormde bodem en wand van het produkt. De vervormingszone bestaat uit de flens tussen plooihouder en matrijs en uit het reeds gevormde produkt dat zich op de matrijsafrondding bevindt.

Figuur 2 geeft een overzicht van deze gebieden met de optredende spanningen.



Figuur 2 : Spanningstoestand

De stempel moet de kracht om het materiaal te vervormen en om de wrijving te overwinnen overbrengen. De stempelkracht wordt via de krachtoverdrachtszone in de vervormingszone geleid. Tengevolge van de door de stempel opgedrongen verplaatsing van de flens in radiale richting, ontstaan in de vervormings-zone radiale intrekspanningen en tangentele drukspanningen. Door deze tangentele drukspanningen is het bij dunne plaat noodzakelijk een plooihouderkracht aan te brengen om plooiing van de flens te voorkomen. Deze plooihouderkracht veroorzaakt een axiale drukspanning in de flens.

De grootte van de optredende spanningen is voornamelijk afhankelijk van :

- de vorm en grootte van de trekstempel
- de vorm en grootte van de blenk
- de grootte van de stempel- en plooihouderkracht

Bij gelijkblijvende stempelafmetingen en dieptrekcondities zal de benodigde stempelkracht stijgen bij een groter gekozen blenk. Hierdoor zullen de spanningen in de krachtoverdrachtszone groter zijn en kan een kritische spanningstoestand bereikt worden. Bij het overschrijden van deze kritische spanningstoestand zal het materiaal scheuren.

2.3. Het dieptrekken van rotatiesymmetrische producten

Naar het dieptrekken van rotatiesymmetrische producten is al vrij veel wetenschappelijk onderzoek verricht [4]. Enkele belangrijke gegevens omtrent spanningen en blenkvervormingen zullen behandeld worden om een goede vergelijking met het dieptrekken van onregelmatig gevormde producten te kunnen maken. Tevens zijn verschillende gegevens voor het modelleren van vierkant dieptrekken gebaseerd op het dieptrekken van rotatiesymmetrische producten.

Bij het dieptrekken van cilindrische produkten treedt een 2-dimensionale spanningstoestand op. Er heersen, op elke plaats aan de omtrek van een denkbeeldige cirkel om het middelpunt van de stempel, spanningen welke gelijk van aard en grootte zijn.

De consequentie hiervan is, dat ook de vervormingen op alle plaatsen aan de omtrek van die denkbeeldige cirkels gelijk zijn. Een cirkelvormige blenk blijft tijdens de vervorming dus zijn cirkelvorm behouden.

Het uiteindelijke produkt heeft na de dieptrekcyclus overal een gelijke produkthoogte.

Bovenstaande geldt overigens alleen als we met volkomen isotroop materiaal te maken hebben.

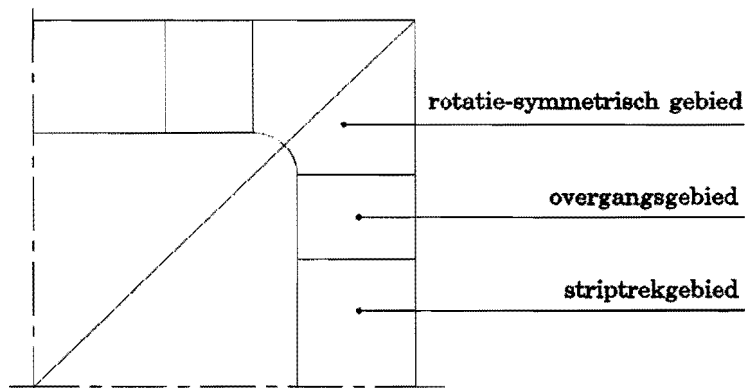
2.4. Het dieptrekken van onregelmatig gevormde produkten

De eenvoudigste vorm van het dieptrekken van onregelmatig gevormde produkten is het dieptrekken van vierkante of rechthoekige produkten, waarbij de wand loodrecht op de bodem staat.

Bij het modelleren van het vierkant dieptrekken onderscheiden we drie gebieden :

- het rotatiesymmetrisch gebied
- het striptrekgebied
- het overgangsgebied

In figuur 3 zijn deze gebieden weergegeven voor een kwart deel van de vierkante flens.



Figuur 3 : Een kwart flens met specifieke gebieden

Er treedt nu een 3-dimensionale spanningstoestand op.

In het striptrekgebied vindt dubbele buiging om de matrijsafronding plaats, waardoor er radiale spanningen optreden.

Het materiaal dat zich in het rotatiesymmetrisch gebied bevindt, ondervindt ten gevolge van de stempelkracht:

- radiale intrekspanningen
- tangentielle drukspanningen

Ten gevolge van de plooihouder ondervindt het materiaal axiale drukspanningen.

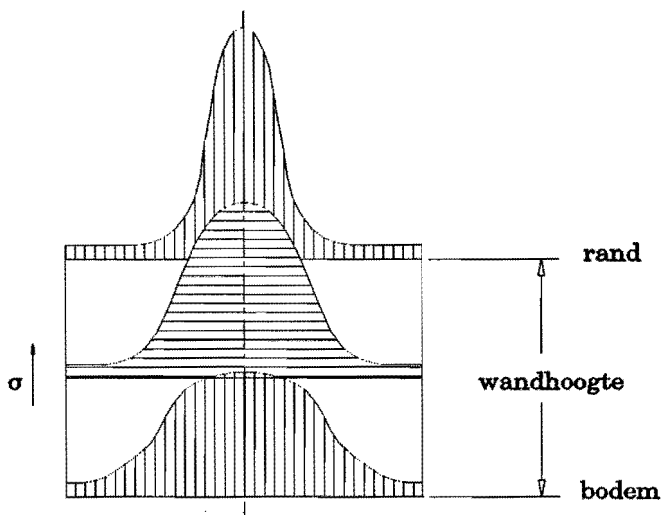
Strikt genomen zou er alleen maar een rotatiesymmetrisch- en striptrekgebied aanwezig zijn. Volgens deze theorie zou er dus een scheidingslijn tussen het rotatiesymmetrisch- en striptrekgebied zijn. De spanningstoestand zou dan aan beide zijden van de scheidingslijn verschillend zijn. Dit kan echter niet het geval zijn, hetgeen de aanwezigheid van een overgangsgebied verklaart.

De spanningen van het rotatiesymmetrisch gebied, nemen in het overgangsgebied af tot de spanningen welke in het striptrekgebied heersen.

2.4.1. Spanningsuitdemping

Uit reeds uitgevoerde onderzoeken [7] blijkt dat in de hoek van het rotatiesymmetrisch gebied de maximale spanning optreedt. Door de asymmetrische vorm van het produkt, stroomt tijdens het vormen van het produkt het materiaal vanuit het rotatiesymmetrisch gebied ook naar de vlakke wand. Door deze materiaalstroom zullen de spanningen wegvloeien uit het rotatiesymmetrisch gebied. Dit wegvloeien van spanningen is in dit rapport gedefiniëerd als spanningsuitdemping.

Figuur 4 geeft een overzicht van wat spanningsuitdemping inhoudt. Uitgezet is de hoofdspa-
ning die in de produktwand heerst, voor een kwart van het produkt.



Figuur 4 : Spanningsuitdemping

2.4.2. Kritische spanning

Omdat in de hoek van het rotatiesymmetrisch gedeelte de maximale spanningen optreden, is dit gebied het kritische gebied. Hierin neemt de wanddikte van het produkt van boven naar beneden af. Uit de reeds uitgevoerde onderzoeken [1], is gebleken dat falen van het dieptrekken van axisymmetrische produkten het eerst optreedt op de overgang van de bodemradius naar de wand.

Het materiaal zal op deze overgang gaan insnoeren, indien de kritische spanning wordt overschreden, waardoor het uitscheuren van de bodem wordt ingeleid. Deze scheuren blijken zich onder een hoek van 45° voort te planten in de wand [1].

2.4.3. Anisotropie

Door het productieproces van staalplaat, vertoont elke staalplaat "voorkeursrichtingen". Hierdoor bezit het materiaal niet in alle richtingen dezelfde eigenschappen. Dit verschijnsel noemt men anisotropie en wordt gekenmerkt door de anisotropiefactor welke richtingsafhankelijk is. Gebruikelijk wordt de anisotropiefactor in drie richtingen bepaald:

- r_0 = anisotropie in de walsrichting van de plaat
- r_{45} = anisotropie onder een hoek van 45° met de walsrichting
- r_{90} = anisotropie onder een hoek van 90° met de walsrichting

Isotroop materiaal is het tegengestelde van anisotroop materiaal. Het materiaal bezit dan in alle richtingen dezelfde eigenschappen.

Anisotropie kan bij het dieptrekproces variatie in de dieptrekparameters veroorzaken, zoals:

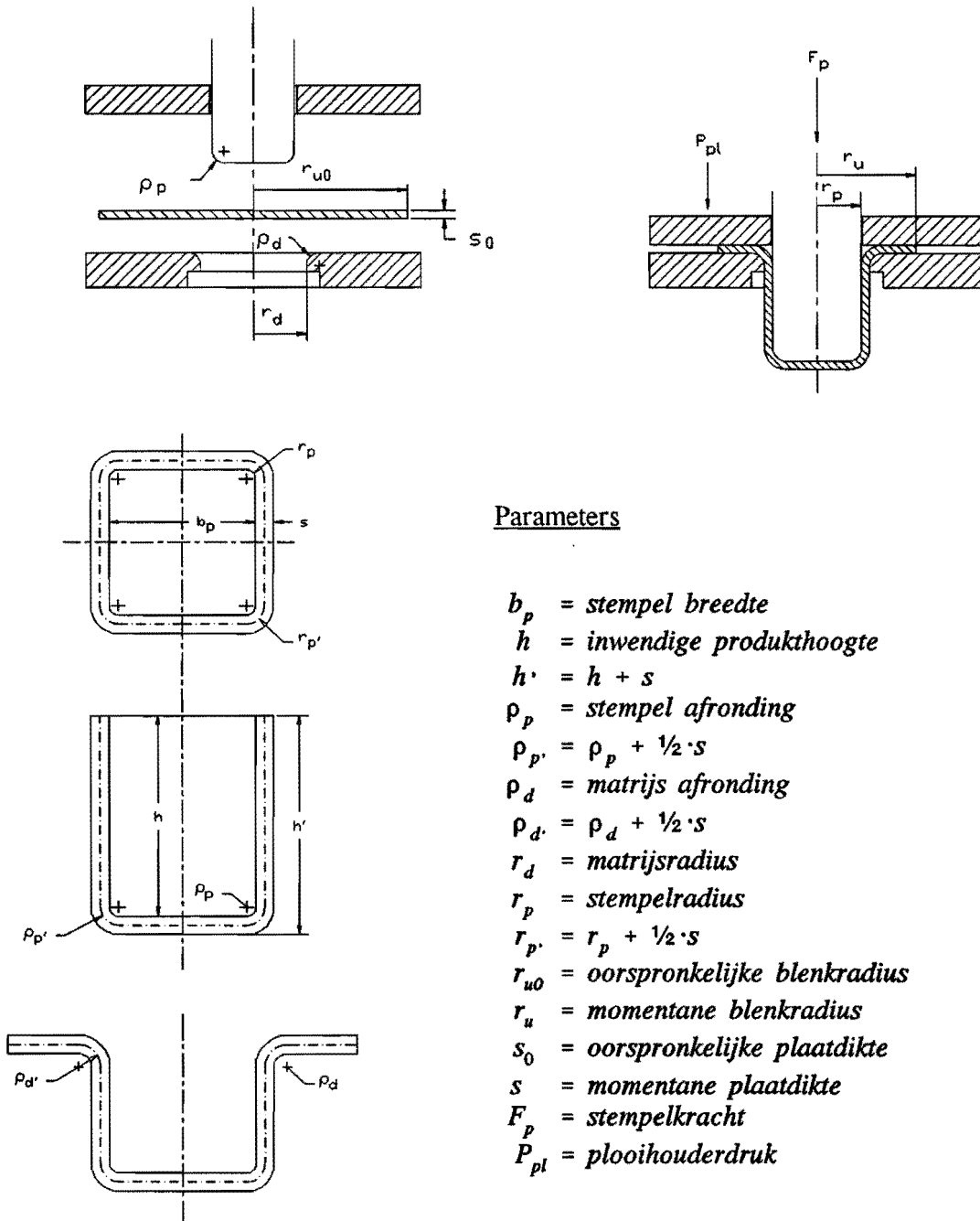
- oorsvorming
- benodigde stempelkracht
- haalbare dieptrekverhouding

3. MODELLERING VAN HET VIERKANT DIEPTREKKEN

3.1. Parameters

Omdat de parameters voor het vierkant dieptrekken nog niet volledig vast liggen, zijn deze, uitgaande van de gestandaardiseerde parameters voor het rond dieptrekken, voor dit rapport vastgelegd in figuur 5.

Deze figuur geeft een overzicht van de parameters van het rond dieptrekproces en de produkt-afmetingen welke voor het vierkant dieptrekken van belang zijn.



Parameters

- b_p = stempel breedte
- h = inwendige produkthoogte
- h' = $h + s$
- ρ_p = stempel afronding
- $\rho_{p'}$ = $\rho_p + \frac{1}{2} \cdot s$
- ρ_d = matrijs afronding
- $\rho_{d'}$ = $\rho_d + \frac{1}{2} \cdot s$
- r_d = matrijsradius
- r_p = stempelradius
- $r_{p'}$ = $r_p + \frac{1}{2} \cdot s$
- r_{u0} = oorspronkelijke blenkradius
- r_u = momentane blenkradius
- s_0 = oorspronkelijke plaatdikte
- s = momentane plaatdikte
- F_p = stempelkracht
- P_{pl} = plooihouderdruk

Figuur 5 : Parameters

3.2. De blenkvorm

Voor de praktijk is vooral het onderzoeken van het materiaalverbruik en het berekenen van de benodigde arbeid van belang. Deze twee factoren hangen sterk met elkaar samen.

De benodigde arbeid is namelijk direct afhankelijk van de grootte van de blenk.

Het is dus van groot belang om het blenkoppervlak zo gering mogelijk te kiezen, om een minimaal materiaalverbruik te realiseren. Zeker bij grotere series is dit van belang omdat het materiaalverbruik een belangrijk deel van de kostprijs van het produkt vormt (in het algemeen ca. 50 %).

Bij het modelleren van het vierkant dieptrekken is voor het bepalen van de blenkvorm uitgegaan van de, op praktijkgegevens gebaseerde, TNO blenkuitslagmethode [2].

3.2.1. De blenkuitslagmethode volgens TNO

Het doel van een blenkuitslagmethode is om na het dieptrekproces een produkt te verkrijgen met een zo gelijkmatig mogelijke hoogte, waaraan weinig of geen nabewerking noodzakelijk is. De berekening van de blenkuitslag is een benaderingsberekening. Er wordt namelijk aangenomen dat de materiaaldikte constant blijft tijdens het dieptrekproces. Volgens deze aanname zou het flensoppervlak van de blenk volledig in de produktwand gaan zitten, hetgeen gebaseerd is op volumeïnvariantie.

Er vindt echter altijd een dikteverloop van het produkt plaats, waarmee de TNO blenkuitslagmethode [2] geen rekening houdt. Met de TNO blenkuitslagmethode wordt de ideale blenkvorm echter redelijk benaderd.

Voor het dieptrekken van cilindrische produkten is een cirkelvormige blenk nodig.

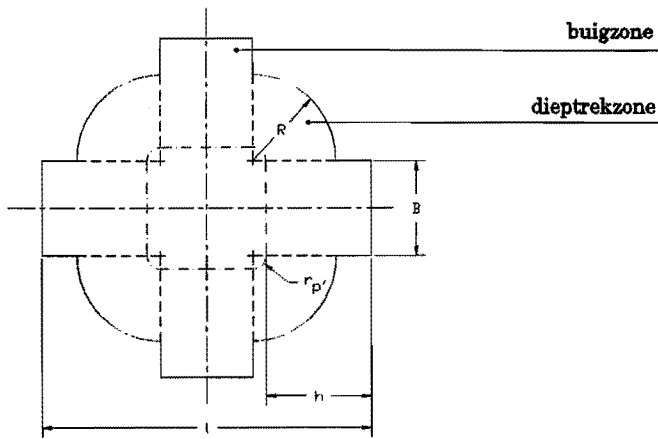
Hieruit mag niet worden geconcludeerd dat voor een vierkant produkt een vierkante blenk nodig is. Dit komt doordat het produkt niet axi-symmetrisch is.

TNO verdeelt de uitslag van een vierkant produkt in vier rotatiesymmetrische gebieden (dieptrekzones) en vier striptrekgebieden (buigzones).

Het materiaal in de dieptrekzone zal een tangentiële stuik ondergaan, waardoor het een radiale verlenging en een axiale verdikking ondergaat.

In de buigzones treedt dubbele buiging van het materiaal op. Het materiaal zal hier niet rekken, waardoor de lengte van deze buigzones de produkthoogte bepaalt.

Figuur 6 geeft een overzicht van de zone-indeling en de karakteristieke afmetingen van de theoretische TNO blenk.



Legende

B = breedte striptrekgebied

h = produkthoogte

l = blenklengte

R = blenkradius

Figuur 6 : Theoretische TNO blenkuitslag

Om de juiste hoeveelheid materiaal in de dieptrekzone te verkrijgen moet de blenkradius bepaald worden volgens :

$$R = \sqrt{(r_p')^2 + 2 \cdot r_p' \cdot h}$$

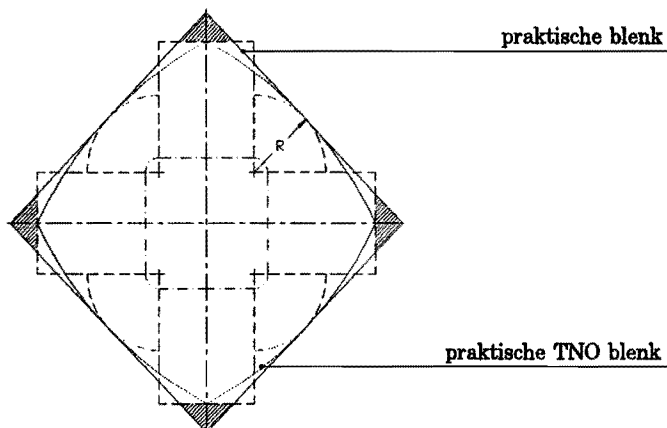
De blenklengte is de lengte van de uitslag van het produkt over de hartlijn.

Op het scheidingsvlak van de dieptrekzone en de buigzone treedt een merkwaardige situatie op. Volgens de theorie zou er in de dieptrekzone een maximale drukspanning heersen, terwijl in de buigzones deze drukspanning in zijn geheel niet aanwezig zou zijn. In werkelijkheid kan deze abrupte overgang niet mogelijk zijn. Dit verklaart het aanwezig zijn van het in § 2.4 vermelde overganggebied.

De uitslag van de theoretische TNO blenk wordt een vloeiend verloop gegeven, zoals in figuur 7 afgebeeld is.

Het maken van deze praktische TNO blenk, is echter zeer bewerkelijk en vereist kostbare gereedschappen. In de praktijk zal echter niet gestreefd worden naar een ideale blenkvorm.

De praktische TNO blenk wordt dan benaderd door een vierkante blenk met afgeknipte hoeken.



Figuur 7 : Praktische blenkuitslag

3.3. Dieptrekverhoudingen

Als de blenkafmetingen vast liggen moet men controleren of het produkt in één trekvang gemaakt kan worden, of dat er een of meerdere volgtrekken noodzakelijk zijn.

Dit kan men controleren door de globale dieptrekverhouding te bepalen.

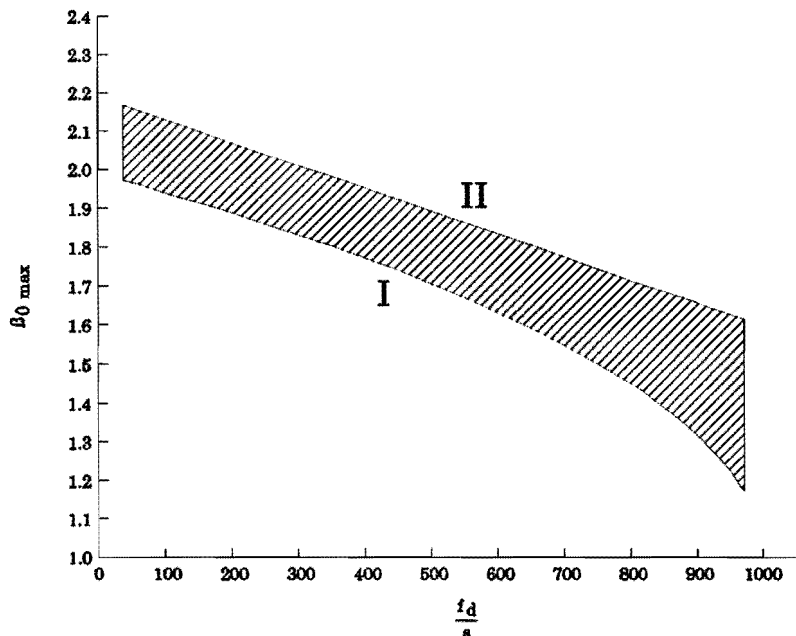
Deze is als volgt gedefinieerd :

$$\beta_0 = \sqrt{\frac{A_{blenk}}{A_{stempel}}}$$

Om deze globale dieptrekverhouding aan de maximale dieptrekverhouding volgens TNO te kunnen toetsen moet, voor niet-rotatiesymmetrische blenks, een fictieve diameter bepaald worden :

$$f_d = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot A_{blenk}}$$

TNO heeft met behulp van praktijkgegevens een grafiek, welke in figuur 8 weergegeven is, opgesteld. Deze grafiek geeft een gebied weer dat de maximaal haalbare dieptrekverhoudingen in één trekvang illustreert.



Figuur 8 : Maximale dieptrekverhoudingen volgens TNO

Voor zeer gunstige omstandigheden, met materiaal van een goede dieptrekkwaliteit en bij een gunstige smering (laboratorium omstandigheden) geldt volgens TNO voor de maximale dieptrekverhouding (II) :

$$\beta_{0\max} = 2,2 - 6 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{f_d}{s}$$

Voor ongunstige omstandigheden, met materiaal van een minder goede dieptrekkwaliteit en bij een minder goede smering geldt volgens TNO (I) :

$$\beta_{0\max} = 1 + \frac{1}{2} \sqrt{4 - 0.004 \cdot \frac{f_d}{s}}$$

Naast het toetsen van de maximaal te halen dieptrekverhouding dient bij niet cilindrische producten ook de lokale dieptrekverhouding bepaald te worden.

Deze is door TNO als volgt gedefinieerd :

$$\beta_0^* = \frac{R}{r_p}$$

Deze lokale dieptrekverhouding kan veel groter zijn dan de globale dieptrekverhouding. Als grenswaarde houdt TNO de waarde 5 aan. Overschrijding hiervan wordt als kritisch beschouwd.

3.4. Bepalen van de benodigde stempelkracht

Voor het bepalen van de stempelkracht wordt weer uitgegaan van de TNO benaderingsmodellering van vier rotatiesymmetrische- en vier striptrek-gebieden.

De totale kracht in de vervormingszone, is per gebied opgedeeld in vier deelkrachten :

- Kracht benodigd voor het deformereren van de flens.
Deze kracht is nodig voor het stuiken en rekken van de flens, en treedt in het benaderingsmodel alleen op in het rotatiesymmetrisch gebied.
- Wrijvingskracht tussen flens en plooihouder/matrijs.
Door het aanbrenge van de plooihouderkracht wordt aan beide zijden van de flens een wrijvingskracht opgewekt.
- Buigkracht om de matrijsafronding.
Als de blenk over de matrijsafronning wordt getrokken, treedt dubbele buiging op.
- Wrijving om de matrijsafronning.

De benodigde dieptrekkkracht voor het gehele produkt wordt bepaald door het sommeren van de afzonderlijke deelkrachten.

3.4.1. Krachten in de rotatiesymmetrische gebieden

De vier rotatiesymmetrische gebieden vormen tezamen een cilindrisch dieptrekprodukt, waarvoor de benodigde stempelkracht door Ramaekers [6] is afgeleid.

De totale stempelkracht voor cilindrische produkten wordt hiervoor opgedeeld in vier deelkrachten :

- deformerende van de flens

$$F_{Dfl}^* = 1.05 \cdot \sqrt{\frac{\beta_0}{\beta}} \cdot \left[\left(1 - \left(\ln \frac{\beta_0}{\beta} + \varepsilon_0 \right)^n \right) \cdot \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) + \ln \beta \right]$$

- wrijving tussen flens - plooihouder/matrijs

$$F_{Wfl}^* = \mu_{fl} \cdot \frac{P_{pl}}{C} \cdot \frac{r_p}{s_0} \cdot (\beta_0^2 - 1)$$

$$\text{waarbij} \quad \frac{P_{pl}}{C} \approx \left(2 + 0.01 \cdot \frac{r_p}{s_0} \right) \cdot 10^{-3}$$

- dubbele buiging om de matrijsafronding

$$F_{D\rho d}^* = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\beta_0}{\beta} \cdot \frac{s_0}{\rho_d} \cdot \left[1 - \left(1 - \left(\ln \frac{\beta_0}{\beta} + \varepsilon_0 \right)^n \right) \cdot \frac{1}{\beta} \right]$$

- wrijving om de matrijsafronding

$$F_{W\rho d}^* = 1.6 \cdot \mu_{\rho d} \cdot (F_{Dfl}^* + F_{Wfl}^*)$$

Deze deelkrachten zijn dimensieloos geschreven.

Voor de totaal benodigde stempelkracht in het rotatiesymmetrische gebied geldt :

$$F_{rot} = (F_{Dfl}^* + F_{Wfl}^* + F_{D\rho d}^* + F_{W\rho d}^*) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_p \cdot s_0 \cdot C$$

3.4.2. Krachten in de striptrekgebieden

Bij de bepaling van de krachten in het striptrekgebied wordt gebruik gemaakt van de resultaten van Decortis/Graef [3]. Zij hebben een model opgesteld voor het bepalen van de dieptrekkracht bij vierkant dieptrekken.

Dit model is met proeven gecontroleerd en blijkt een goede benadering van de praktijksituatie te zijn.

De totaal benodigde kracht voor het striptrekgebied wordt in het model van Decortis/Graef opgedeeld in drie deelkrachten :

- wrijving tussen flens - plooihouder/matrijs

$$F_{w \text{ flens}} = 2 \cdot \mu_{\text{flens}} \cdot F_{\text{plooi}}$$

- dubbele buiging om de matrijsafronding

$$F_{D \text{ buig}} = \frac{8 \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3} \cdot \rho_d} \right)^n \cdot C \cdot \left(\frac{s}{2} \right)^{n+2} \cdot B}{\sqrt{3} \cdot (n+2) \cdot \rho_d}$$

- wrijving om de matrijsafronding

$$F_{w \rho_d} = \mu_{\rho_d} \cdot F_N$$

waarbij

$$F_N = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \sqrt{(F_{w \text{ flens}}^2 + F_{\text{str}}^2) \cdot \cos \left(45^\circ - \arctan \left(\frac{F_{w \text{ flens}}}{F_{\text{str}}} \right) \right)}$$

De stempelkracht voor het striptrekgebied is een variabele in de formules voor het bepalen van de deelkrachten van het striptrekgebied, en moet dus iteratief bepaald worden.

Door echter een benadering voor de normaalkracht te hanteren ontstaat een meer bruikbare formulering voor de stempelkracht om het striptrekgebied te vormen.

Deze luidt :

$$F_{\text{str}} = \frac{F_{D \text{ buig}} + F_{w \text{ flens}} + \mu_{\rho_d} \cdot \sqrt{F_{w \text{ flens}}^2 \cdot (1 - \mu_{\rho_d}^2) + (F_{D \text{ buig}} + F_{w \text{ flens}})^2}}{1 - \mu_{\rho_d}^2}$$

Uit de proeven van Decortis/Graef is gebleken dat de gemeten krachten gemiddeld 14 % hoger liggen dan de berekende krachten. Voor de totaal benodigde kracht voor het striptrekgebied geldt :

$$F_{\text{strip}} = 1.14 \cdot F_{\text{str}}$$

3.4.3. De totaal benodigde dieptrekkracht

Sommatie van de benodigde stempelkrachten van de afzonderlijke gebieden levert de totale minimaal benodigde stempelkracht voor het dieptrekken van vierkante produkten :

$$F_p = F_{rot} + F_{strip}$$

3.5. Evaluatie modellering

Door het vierkant produkt in vier dieptrek- en vier buigzones te verdelen wordt aan een aantal essentiële zaken voorbij gegaan zoals :

- het aanwezig zijn van een overgangsgebied
- het optreden van versterking
- invloed van anisotropie
- invloed van wrijving tussen stempel en produkt

Decortis/Graef hebben stempelkrachtmetingen voor vierkante produkten uitgevoerd, om hun modellering te controleren. Hiervan zijn de resultaten in bijlage 1 weergegeven. Uit deze proeven blijkt dat de berekende stempelkrachten $\pm 6\%$ hoger liggen dan de gemeten waarden. De belangrijkste oorzaak hiervan moet gezocht worden in het ontbreken van het overgangsgebied in de modellering.

De aanname dat de stempelkracht voor het vormen van de dieptrekzones in de gehele dieptrekzone heerst is hiervan de oorzaak. Bij het dieptrekken van vierkante produkten treedt namelijk spanningsuitdamping op.

Bij de verdere modellering zal het model aangepast worden door het definiëren van een overgangsgebied.

De benodigde stempelkracht voor het vormen van de vervormingszone, wordt omgerekend naar een lijnbelasting op de reeds diepgetrokken wand. In het overgangsgebied wordt aan deze lijnbelastingen een vloeiend verloop gegeven.

Voor de lijnbelasting op de dieptrekzone geldt :

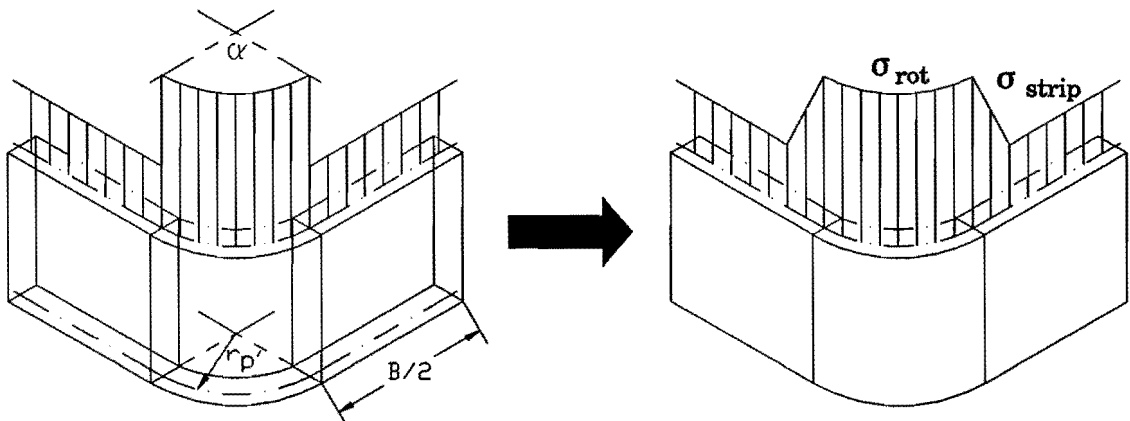
$$\sigma_{rot} = \frac{F_{rot}}{2 \cdot \pi \cdot r_p}$$

Voor de lijnbelasting op de buigzone geldt :

$$\sigma_{strip} = \frac{F_{strip}}{4 \cdot B}$$

De lijnbelastingen kunnen als een trekbelasting op de wand van de krachtoverdrachtszone worden weergegeven.

Figuur 9 illustreert de door de deelmodellering verkregen en de voor de verdere modellering gebruikte spanningstoestand op een kwart deel van de wand.



Figuur 9 : Spanningstoestand op de wand

De grootte van hoek α zal voor de verdere modellering op 90° worden gesteld. Uit de resultaten van de praktische experimenten moet, door vergelijking van de benodigde en de berekende stempelkracht, blijken of deze hoek van 90° voldoet.

Aangezien de berekeningen behorende bij de modellering erg bewerkelijk zijn, is voor het uitvoeren van de berekeningen een PASCAL-programma geschreven. Bijlage 2 bevat dit programma en een output van het programma.

4. VERIFICATIE VAN HET OPGESTELDE MODEL

4.1. Inleiding

Om het opgestelde model te toetsen aan de praktijk, is een aantal proeven genomen. Het doel van deze proeven is het controleren van het model op de volgende punten:

- de benodigde stempelkracht
- de kritische stempelkracht
- produkthoogte
- wanddikteverloop van het produkt
- kritische lokale dieptrekverhouding, volgens TNO met de waarde 5

4.2. De gebruikte gereedschappen

Voor het uitvoeren van de proeven is een aantal stempels met matrijzen vervaardigd. Bij het ontwerpen van deze gereedschappen heeft als uitgangspunt de kritische waarde van 5 voor de lokale dieptrekverhouding volgens TNO gediend.

Om een grote spreiding in de lokale dieptrekverhouding te realiseren is gekozen voor verschillende stempelradii en voor variatie van de globale dieptrekverhouding.

Tabel 1 geeft een overzicht van de bij de proeven gerealiseerde lokale dieptrekverhoudingen.

Tabel 1 : Bij de proeven gerealiseerde lokale dieptrekverhoudingen.

D	β_g	r_p				
		2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	10 mm
83 mm	1.8	7.76	5.96	4.95	4.31	2.88
91 mm	2.0	9.52	7.20	5.91	5.08	3.27
98 mm	2.2	11.03	8.27	6.74	5.75	3.62

Om alleen de invloed van de lokale dieptrekverhouding op de te onderzoeken parameters mee te nemen, zijn alle andere geometrie-eigenschappen van de stempel gelijk gehouden.

Bijlage 3 bevat een meetstaat met de afmetingen van de stempel en matrijs.

Hieruit blijkt dat de stempel-matrijs combinatie met een stempelradius van 10 mm een grotere trekspleet bezit dan de overige combinaties. Deze combinatie is toch meegenomen in de proeven om een grotere spreiding in de meetresultaten te verkrijgen.

Tijdens het deformereren van de blenk, wordt de stempelkracht gemeten en weergegeven op een X-Y schrijver. De X-Y schrijver geeft de stempelkracht als functie van de stempelverplaatsing weer.

4.3. Het gebruikte materiaal

De blenk, voor het vervaardigen van vierkante produkten met de afmetingen van 40 x 40 mm, bezit een fictieve diameter van ongeveer 90 mm.

Uit figuur 8 zijn de waarden van de globale dieptrekverhoudingen gekozen van resp. 1.8, 2.0 en 2.2. Praktisch wordt de globale dieptrekverhouding gevarieerd door de blenk diameter te wijzigen. De keuze van de blenk diameter is beperkt doordat er een beperkt aantal snijstempels aanwezig is.

Voor het exact bepalen van de theoretische- en praktische blenkafmetingen is met behulp van het programma uit bijlage 2 een aantal berekeningen uitgevoerd. De resultaten van deze berekeningen zijn weergegeven in bijlage 4.

Als uitgangsmateriaal is genomen :

Materiaal 2 : Sidmar Ocas

St. bekleed

$s_0 = 0.9$ mm

α	C [N/mm ²]	n [-]	ϵ_0 [-]	r_α [-]
0°	498	0.246	0	1.47
45°	510	0.245	0	1.55
90°	493	0.251	0.001	1.90

Voor de berekeningen is gerekend met de gemiddelde waarden $C = 500$ N/mm² en $n = 0.247$.

Omdat voor dit materiaal geen wrijvingscoëfficiënten bekend zijn, is uitgegaan bij de berekeningen van de gemiddelde waarden die Decortis/Graef (bijlage 1) bij hun proeven voor bekleed materiaal bepaald hebben :

- $\mu_{fl} = 0.037$
- $\mu_{pd} = 0.18$

Om de invloed van de anisotropie bij de proeven te elimineren, zijn alle blenks uit dezelfde plaat gesneden en is de walsrichting aangegeven. De blenks zijn bij het inleggen in de machine allemaal met de walsrichting loodrecht op de vlakke wand van de stempel geïmponeerd.

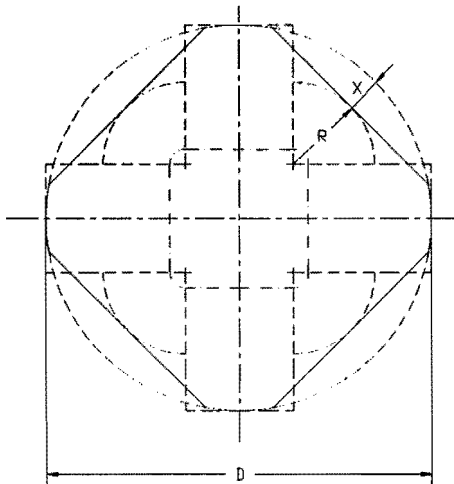
4.4. Stempelkrachten

Voor het controleren van de berekende stempelkrachten, zijn proeven uitgevoerd met twee verschillende blenkvormen:

- ronde blenk
- ronde blenk met afgeknipte hoeken

De ronde blenk met afgeknipte hoeken is een redelijke benadering van de door TNO geformuleerde ideale blenkvorm.

Figuur 10 geeft een grafische voorstelling van de gebruikte blenkvormen.



Figuur 10 : De beproefde blenkvormen

Voor de afstand X is een waarde genomen, waarbij de theoretische blenkstraal R wordt bereikt. Tabel 2 geeft een overzicht van de waarden van X bij de verschillende globale dieptrekverhoudingen.

Tabel 2 : Waarden van X voor de verschillende globale dieptrekverhoudingen.

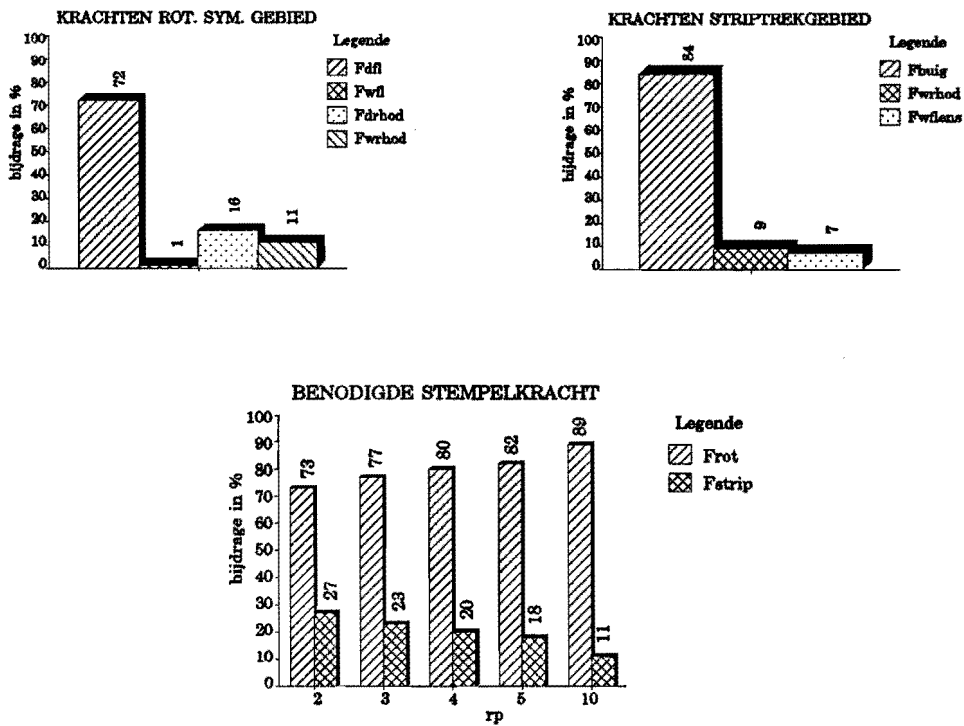
β_g	D [mm]	X [mm]
1.8	83	7
2.0	91	9
2.2	98	11

Voordat met de proeven is begonnen, zijn voor alle lokale dieptrekverhoudingen de benodigde krachten bepaald met het pascal-programma uit bijlage 1.

De resultaten van deze berekeningen dienen als input voor de in te stellen parameters.

Bijlage 5 bevat een overzicht van de benodigde krachten voor het deformeren van het rotatiesymmetrisch gebied en het striptrekgebied.

Uit deze bijlage volgt dat de stempelkracht bij de toegepaste deelmodellering is opgebouwd zoals weergegeven in figuur 11.



Figuur 11 : Opbouw van de stempelkracht

Voor het bepalen van de stempelkracht zijn op de Erichsen-testbank enkele proeven genomen. Als smeermiddel is gebruik gemaakt van talk, ook wel schaapsvet genoemd.

Bij elke proef is de kracht-weg kromme bepaald.

De plooihouderkracht is bij elke globale dieptrekverhouding constant gehouden om de meetresultaten met elkaar te kunnen vergelijken. Uit de berekeningen (bijlage 5) blijkt dat de plooihouderkracht weinig spreiding vertoont bij dezelfde globale dieptrekverhouding en variërende stempelradius. Tabel 3 geeft een overzicht van de ingestelde plooihouderkrachten.

Tabel 3 : Ingestelde plooihouderkrachten.

β_g	F_{pt} [N]
1.8	3300
2.0	4400
2.2	5400

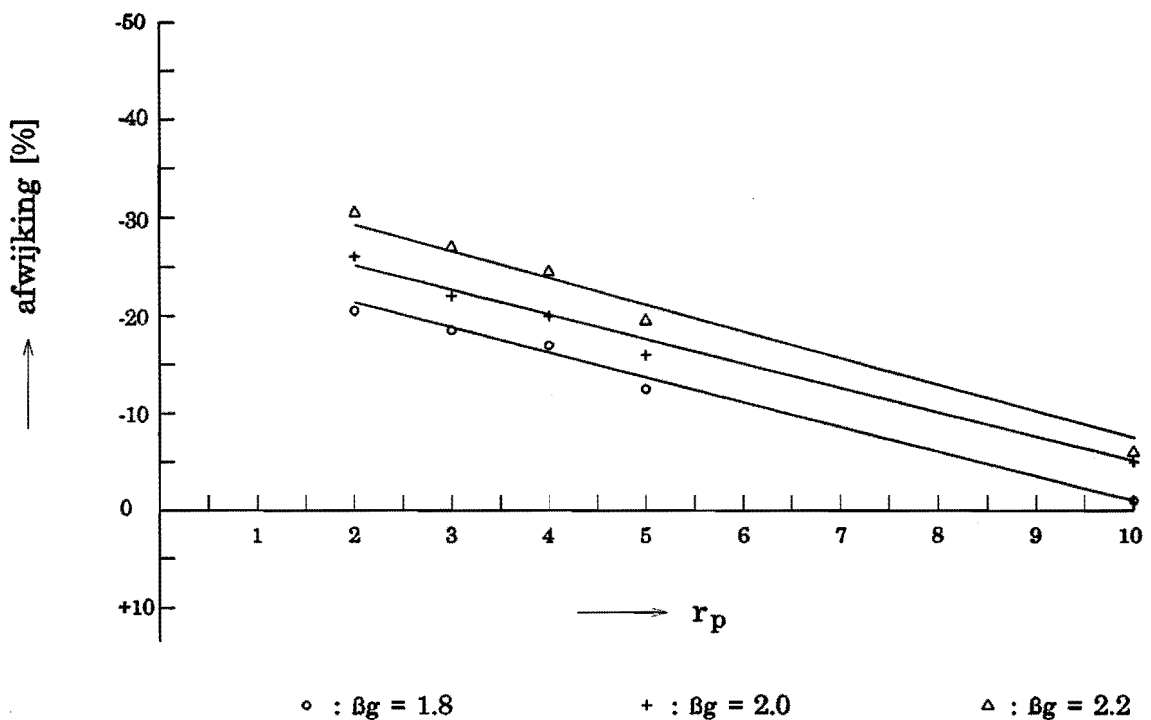
De meetresultaten van de proeven zijn opgenomen in bijlage 6.

Alle proeven zijn twee maal uitgevoerd om representatieve meetwaarden te verkrijgen.

De meetwaarden vertoonden slechts een zeer geringe spreiding.

4.4.1. Stempelkrachten bij een ronde blenk

Figuur 12 geeft een grafisch overzicht van de afwijking van de berekende t.o.v. de gemeten stempelkracht voor de verschillende stempelradii, bij een ronde blenk als uitgangsmateriaal.



Figuur 12 : Afwijking in stempelkracht bij ronde blenk

Uit deze figuur blijkt dat we met ondermodellering te maken hebben. De met het opgestelde model berekende stempelkracht is voor alle combinaties van stempelradius en globale dieptrekverhouding lager dan de gemeten stempelkracht. Er is echter wel een trend waar te nemen. Om deze trend zichtbaar te maken is door de meetpunten een rechte lijn getrokken.

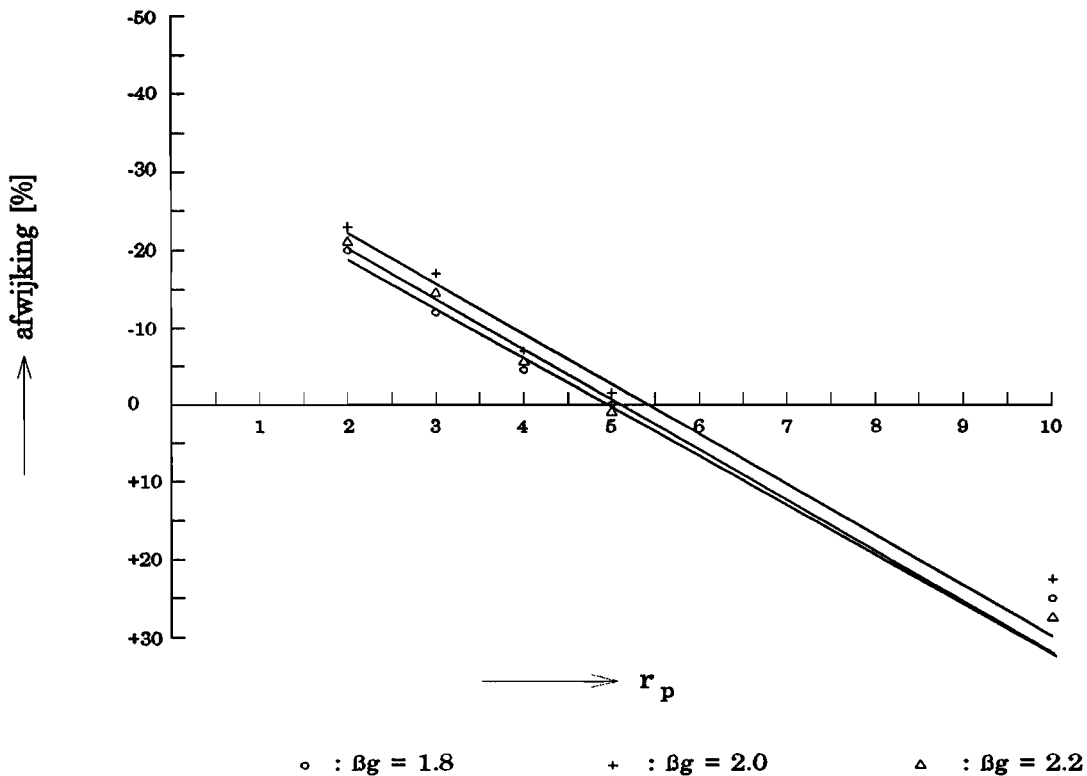
Het dieptrekken met een ronde blenk als uitgangsmateriaal, levert producten op met oren in het rotatiesymmetrisch gebied. Dit komt doordat lokaal gezien de ronde blenk sterk afwijkt van de ideale blenkform.

Bij de keuze van een ronde blenk zal er tijdens de nabewerking veel materiaal verloren gaan.

Om de invloed van een andere blenkvorm op de dieptrekkracht te onderzoeken zijn tevens proeven uitgevoerd met een ronde blenk met afgeknipte hoeken.

4.4.2. Stempelkrachten bij een ronde blenk met afgeknipte hoeken

Figuur 13 geeft een grafisch overzicht van de afwijking van de berekende t.o.v. de gemeten stempelkracht voor de verschillende stempelradii, bij een ronde blenk met afgeknipte hoeken als uitgangsmateriaal.



Figuur 13 : Afwijking in stempelkracht bij een ronde blenk met afgeknipte hoeken

Uit deze figuur blijkt dat we voor een stempelradius kleiner dan 5 mm met een ondermodellering te maken hebben, en voor grotere waarden dan 5 met een overmodellering. Deze resultaten vertonen ook een trend. De meetresultaten van voor de stempelradius van 10 mm vallen buiten deze trend, wat te wijten is aan een grotere trekspleet, waardoor de benodigde dieptrekkracht daalt.

Het dieptrekken met een ronde blenk met afgeknipte hoeken als uitgangsmateriaal, levert producten op die een grillige bovenrand bezitten. Het verschil in produkthoogte is echter veel geringer dan bij de producten met een ronde blenk als uitgangsmateriaal. Dit komt door het ontbreken van de oren in het rotatiesymmetrisch gebied.

4.4.3. Evaluatie van de stempelkrachtmetingen

Uit de resultaten van de metingen blijkt dat de blenkform een grote invloed op de benodigde stempelkracht heeft.

De met de modellering berekende stempelkracht vertoont enige afwijking met de gemeten stempelkracht. De oorzaak hiervan is het verwaarlozen van het overgangsgebied bij het bepalen van de stempelkracht. Er is echter wel een trend waarneembaar in de afwijking van de berekende t.o.v. de gemeten stempelkracht.

4.5. Kritische stempelkracht

Voor het bepalen van de kritische stempelkracht is een aantal proeven genomen met blenks waarvan de globale dieptrekverhouding groter gekozen is dan maximaal toelaatbaar.

De stempelkracht waarbij materiaalbreek optreedt is dan de kritische stempelkracht.

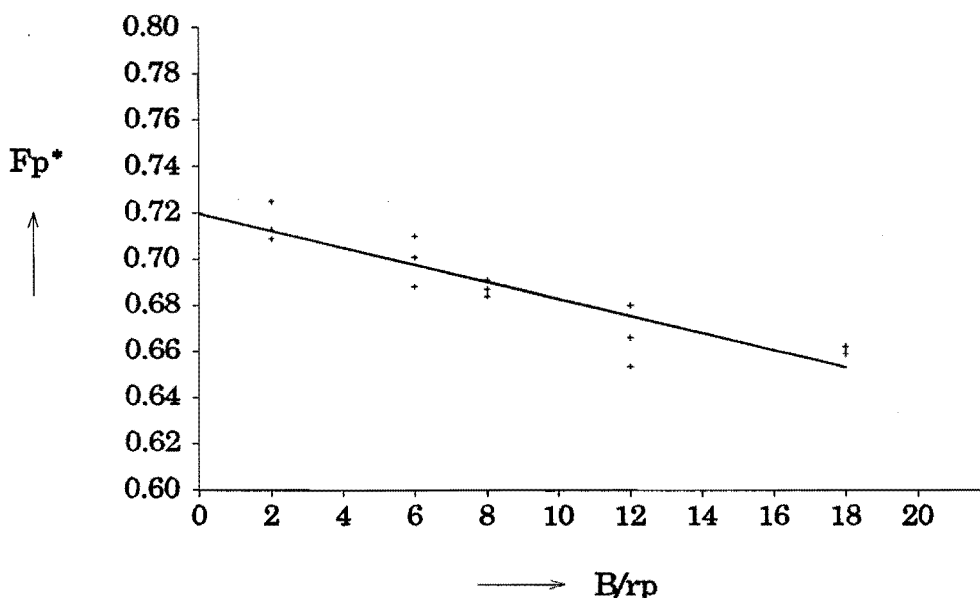
Bijlage 7 bevat de meetresultaten van de kritische stempelkrachtbepaling.

Om de kritische stempelkracht te kunnen vergelijken met de kritische stempelkracht voor cilindrische producten wordt de gemeten stempelkracht dimensieloos geschreven:

$$F_p^* = \frac{F_p}{[(2 \cdot \pi \cdot r_p) + (4 \cdot B)] \cdot C \cdot s_0}$$

Voor cilindrische producten uit staalplaat, is de dimensieloze stempelkracht 0.72 [6].

Figuur 14 bevat een overzicht van de meetresultaten.



Figuur 14 : Gemeten kritische dimensieloze stempelkracht

Door de meetpunten is een rechte lijn getrokken om het verloop van de dimensieloze kracht weer te geven. Hiervoor geldt:

$$F_p^* = F_{p0}^* \cdot \left(1 - 0.005 \cdot \frac{B}{r_p} \right)$$

Deze formulering is een redelijke benadering van de praktische bepaalde kritische stempelkracht.

4.6. De produkthoogte

Om te controleren of het striptrekgebied alleen op dubbele buiging om de matrijsafronding wordt belast, zijn de minimaal bereikte produkthoogten gemeten.

Bijlage 8 bevat een meetstaat van de gemeten produkthoogten.

Uit deze bijlage blijkt dat de berekeningen en de gemiddelde meetwaarden 3 % afwijking vertonen. De aanname dat het striptrekgebied alleen op dubbel buiging wordt belast is dus geldig bij de toegepaste B/r_p verhoudingen. Als de B/r_p verhouding naar 0 nadert (waardoor het vierkante produkt een cilindrisch produkt benadert) zal de beïnvloeding van het striptrekgebied door het rotatiesymmetrisch gebied toenemen. Het striptrekgebied wordt dan niet meer op zuivere buiging belast, maar tevens op axiale rek, waardoor de produkthoogte zal toenemen.

4.7. Het verloop van de produktdikte

Om inzicht te verkrijgen in het verloop van de wanddikte van het gevormde produkt, zijn metingen aan de diepgetrokken produkten verricht. De dikte van de produktwand is over het midden van het striptrekgebied en over de diagonaal van het rotatiesymmetrisch gebied bepaald ter hoogte van :

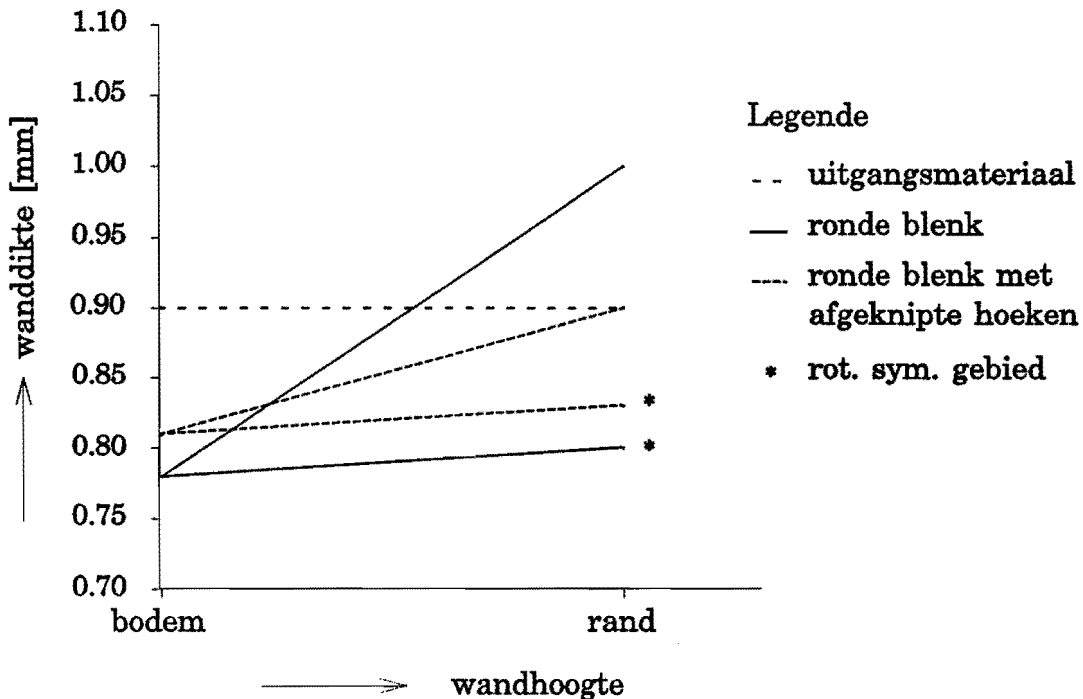
- de overgang bodemradius-produktwand
- de minimale produkthoogte

Uit de metingen blijkt dat in het rotatiesymmetrisch gebied een zeer gering verloop van de wanddikte optreedt. De wanddikte in het striptrekgebied vertoont grote verschillen.

Bij een grote B/r_p verhoudingen is de beïnvloeding van het striptrekgebied door het rotatiesymmetrisch gebied duidelijk merkbaar. Hoe verder de blenk naar binnen wordt getrokken, des te meer materiaal dat wegstroomt uit het rotatiesymmetrisch gebied naar het striptrekgebied, wat een toenemende verdikking van het striptrekgebied tot gevolg heeft.

De resultaten van deze metingen zijn weergegeven in bijlage 9.

Figuur 15 geeft het gemiddeld verloop van de wanddikte voor de verschillende metingen weer.



Figuur 15 : Verloop van de wanddikte

4.8. Visuele waarnemingen

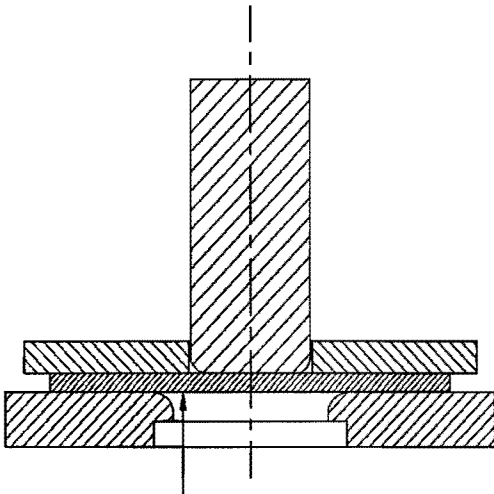
Op de overgang van stempelafronding naar de produktwand is bij alle produkten duidelijk een scheidingslijn waar te nemen. Bij de proeven voor het bepalen van de kritische kracht werd op deze overgang het insnoeren ingeleid.

Deze scheidingslijn zien we reeds verschijnen voordat de stempel het materiaal plastisch begint te vervormen. De oorzaak hiervan moet gezocht worden in het stick-slip effect dat optreedt voordat de flens van zijn statische begintoestand naar een dynamische toestand overgaat.

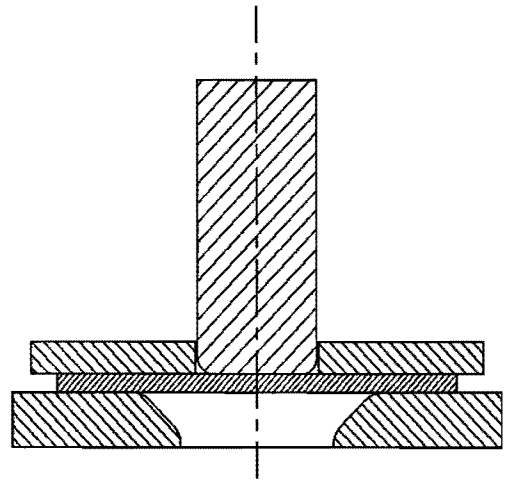
Door de combinatie van kleine stempel- en matrijsafronding treedt dit stick-slip effect eerder op. Tijdens de beginfase van het dieptrekproces zal daardoor meer sprake zijn van ponsen dan van dieptrekken, wat het ontstaan van deze scheidingslijn verklaart.

Een matrijsgeometrie, zoals weergegeven in figuur 16, zou dit probleem al voor een groot gedeelte kunnen oplossen.

Een nadeel van deze matrijsconstructie is dat de kans op plooivorming toeneemt.



ponseffect



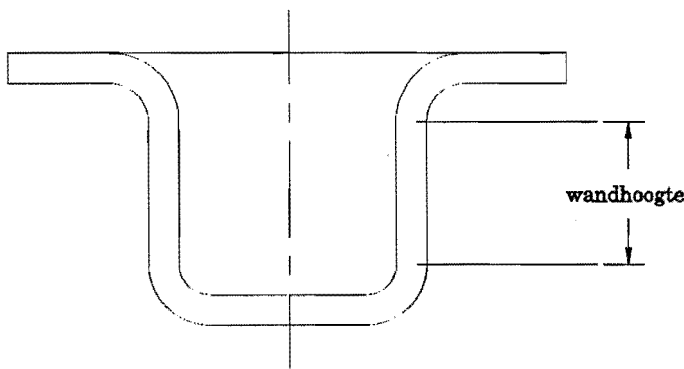
Figuur 16 : Matrijsgeometrie

5. SIMULATIE VAN DE SPANNINGSUITDEMPING

Om een indruk te krijgen van de spanningsuitdemping, in de produktwand over de diagonaal van het rotatiesymmetrisch gebied, is een model opgesteld met het eindige elementen pakket GIFTS [8],[9].

Voor de simulaties dienen de volgende parameters als referentie:

- De gemeten stempelkracht wordt naar een lijnbelasting op de krachtoverdrachtszone omgerekend.
- Bij de simulaties wordt de produktwand met de maximaal gemeten stempelkracht belast, omdat dan de maximale spanningen optreden. Uit de proeven bleek dat een produkt faalt voor of tijdens het bereiken van de maximale stempelkracht, maar nooit erna.
- Als simulatiehoogte is de actuele wandhoogte genomen tijdens het bereiken van de maximale stempelkracht. Figuur 17 geeft de gedefiniëerde wandhoogte weer.



Figuur 17 : Gedefiniëerde wandhoogte

De wandhoogte is bepaald uit de kracht-weg kromme. De resultaten hiervan zijn opgenomen in bijlage 8. Uit deze metingen blijkt dat de variatie in wandhoogte zeer gering is bij gelijk blijvende globale dieptrekverhouding en variërende stempelradius.

Voor de simulaties zijn als wandhoogte toegepast :

β_g	1.8	2.0	2.2
h_{wand} [mm]	9	11	14

- Omdat uit de metingen is gebleken dat in het rotatiesymmetrisch gebied een zeer gering verloop van de wanddikte plaatsvindt, is voor de simulaties uitgegaan van een constante produktdikte.

5.1. Simulatiepakket GIFTS

Om inzicht in het pakket GIFTS en de resultaten hiervan te verkrijgen, zal in deze paragraaf kort op de werking van dit pakket worden ingegaan, toegespitst op het opgestelde simulatiemodel voor de spanningsuitdemping.

Met GIFTS kan geen breukcriterium worden opgesteld, omdat GIFTS in het zuiver lineair elastisch gebied werkzaam is.

Bij de simulaties wordt uitgegaan van een momentopname van de reeds gevormde wand met de dan aanwezige belasting. Er zal dus geen plastische vervorming optreden, waardoor het pakket GIFTS toegepast kan worden.

Omdat we met een constante materiaaldikte rekenen en omdat het materiaal op trek belast wordt, is als elementtype het QB4 plaalement gekozen. Dit is een vierzijdig plaalement dat zowel op trek als op buiging belast kan worden.

Voor het invoeren van een model m.b.v. het QB4 plaalement, moet in GIFTS een aantal stappen doorlopen worden om het model op te bouwen:

- Het definiëren van het soort materiaal.
- Het toekennen van een dikte aan het plaalement.
- Het definiëren van keypoints. Deze leggen de hoekpunten van het model vast.
- Het definiëren van verbindinglijnen tussen de keypoints. Deze verbindinglijnen bepalen de contour van het model.
- Het aanbrengen van een rasterpatroon binnen de contour. Dit rasterpatroon wordt gevuld met de gekozen elementen, in dit geval QB4-elementen.
- Het opleggen of onderdrukken van vrijheidsgraden van de keypoints en/of verbindinglijnen.
- Het aanbrengen van de uitwendige belasting op het model.

Bijlage 10 bevat het invoer-gedeelte van een GIFTS-model.

GIFTS berekent voor elk afzonderlijk element de verplaatsingen en de spanningen in dat element. Met GIFTS is het mogelijk om deze spanningen en verplaatsingen grafisch weer te geven.

Voor het bekijken van de spanningsuitdemping zijn van belang;

- De hoofdspinningen per elementenkolom. Deze geven de spanningsuitdemping weer.
- De hoofdspinningen per elementenrij. Deze geven de spanningen op een bepaalde hoogte van de plaat weer.

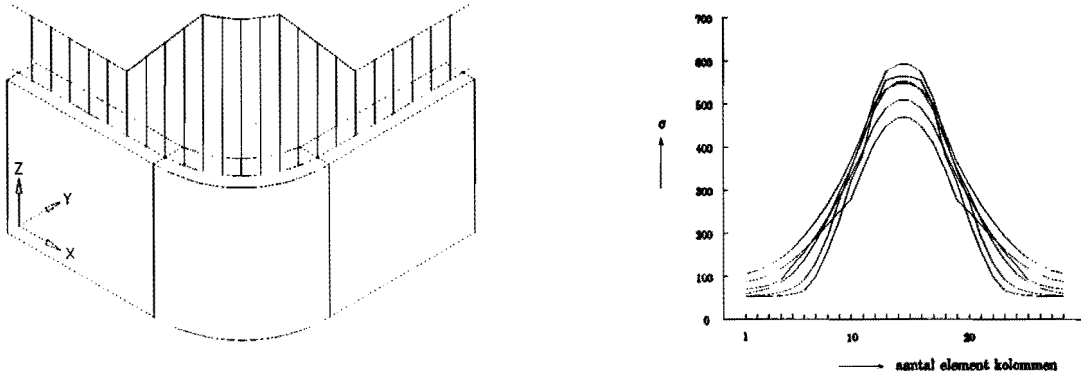
Combinatie van elementkolommen en rijen levert een spanningsbeeld op van de gehele plaat.

5.2. Modelkeuze

Voor het bepalen van de spanningsuitdemping m.b.v. GIFTS is een aantal modellen opgesteld. Deze modellen zijn alle met dezelfde belasting gerund.

In juni 1992 is door Dollevoet [5] een GIFTS model voor het bepalen van de spanningsuitdemping opgesteld. Dit model is een $2\frac{1}{2}$ D-model van een kwart produktwand.

Figuur 18 geeft een overzicht van het door Dollevoet opgestelde model met het bijbehorend spanningsbeeld.

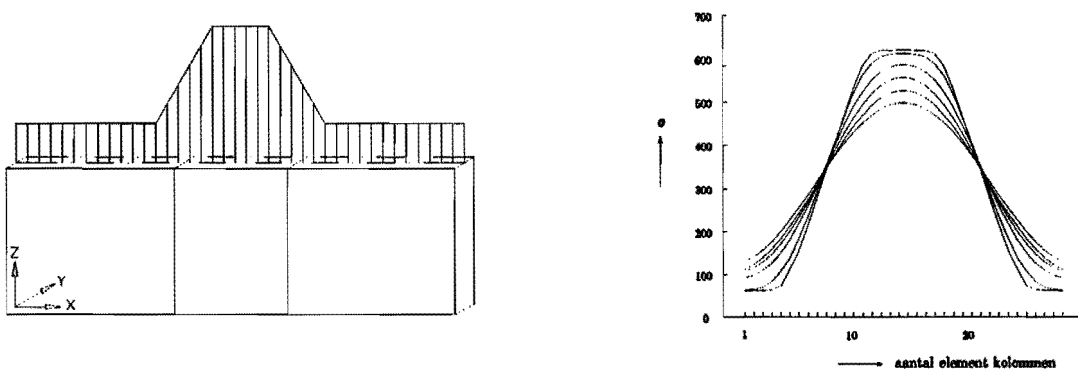


Figuur 18 : $2\frac{1}{2}$ D-model

Uit het spanningsbeeld blijkt dat het model het spanningsbeeld dat bekend is van spanningsuitdemping, zoals beschreven in § 2.4.1., vrij aardig benadert.

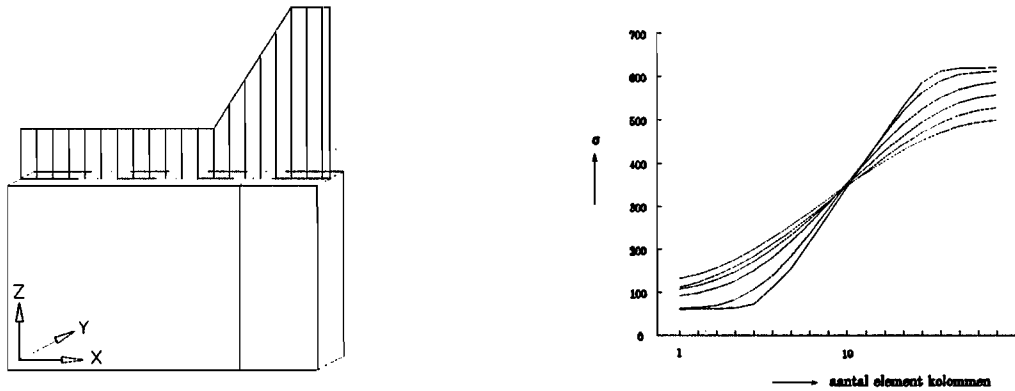
De tekortkoming van dit model zit in het opleggen van de vrijheidsgraden. Het materiaal kan in het rotatiesymmetrisch gebied niet vrij om de stempelradius bewegen. De verbindingslijnen die het rotatiesymmetrisch gebied vormen zijn zowel in de X- en in de Y-richting volledig vastgelegd. Dit heeft tot gevolg dat de spanning vanuit het rotatiesymmetrisch gebied belemmerd wordt naar het striptrekgebied weg te vloeien. Dit resulteert in een te hoge spanning onderin de wand.

Om dit probleem te vermijden is het $2\frac{1}{2}$ D-model getransformeerd naar een 2D-model, zoals weergegeven in figuur 19.



Figuur 19 : 2D-model

Uit symmetrie-overweging en om de CPU-tijd te verkorten is het 2D model gehalveerd. Figuur 20 geeft een overzicht van het 2D-model voor 1/8 deel van het produkt.



Figuur 20 : gehalveerd 2D-model

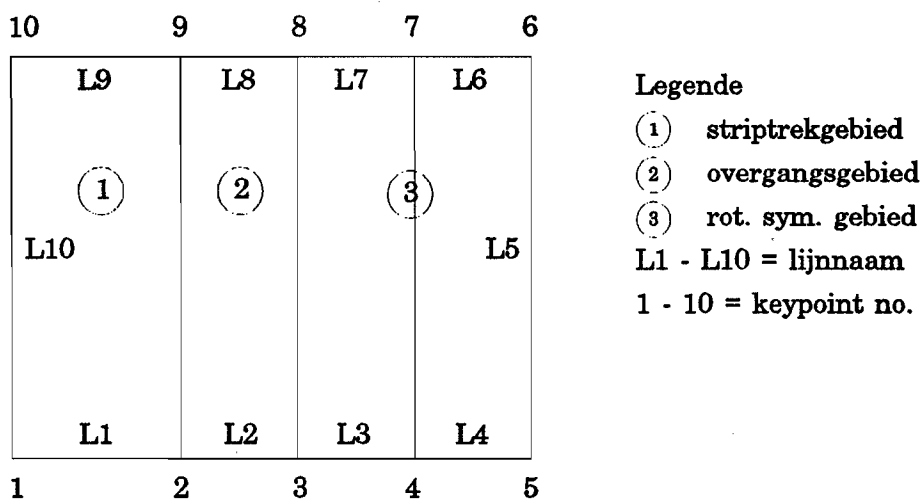
Dit model is een betere benadering dan het 2½D-model.

5.3. Input van het GIFTS-model

In GIFTS is het belangrijk om de elementen ongeveer van gelijke grootte te kiezen. Om dit te realiseren is een PASCAL programma geschreven voor het berekenen van de keypoints en de grootte van de elementen welke nodig zijn bij het invoeren van het model. Bijlage 11 bevat dit programma en een output van het programma.

Bij het invoeren van het model worden aan de verbindinglijnen namen toegekend en vrijheidsgraden opgelegd.

Figuur 21 geeft een overzicht van de namen die aan de verbindinglijnen zijn toegekend en in tabel 4 zijn de opgelegde beperkingen weergegeven.



Figuur 21 : Toegekende lijnnamen

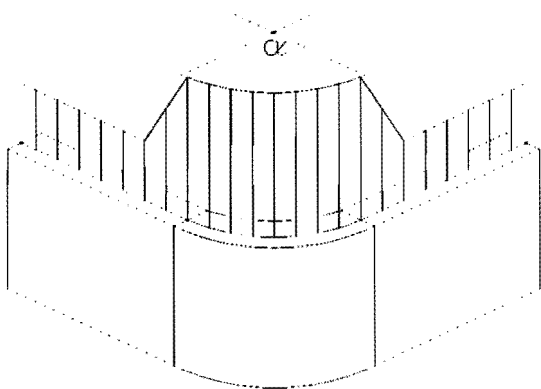
Tabel 4 : Opgelegde vrijheidsgraden

X-richting	L1	L2	L3	L4	L5					L10
Y-richting	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10
Z-richting	L1	L2	L3	L4						

5.4. Aangebrachte belasting

Bij het aanbrengen van de belasting is uitgegaan van de gemeten stempelkracht bij een ronde blenk met afgeknipte hoeken als uitgangsmateriaal, omdat deze blenk de ideale blenkvorm vrij goed benadert. Deze stempelkracht is omgerekend naar een lijnbelasting zoals in figuur 22 is weergegeven en in § 3.5. staat beschreven.

Tabel 5 bevat de waarden van de berekende hoek α voor de verschillende combinaties van stempelradius-globale dieptrekverhouding en de bij de GIFTS-simulatie toegepaste hoek α .



Figuur 22 : Belasting op de produktwand

Tabel 5 : Waarden van de berekende hoek α .

r_p	waarde van α			
	$\beta_g = 1.8$	$\beta_g = 2.0$	$\beta_g = 2.2$	simulatie
2	111°	117°	109°	110°
3	84°	96°	92°	90°
4	67°	70°	66°	70°
5	58°	59°	55°	60°
10	30°	32°	29°	30°

Bijlage 12 bevat een tabel met de berekende belastingen per gebied.

5.5. Dempingsfactor

De spanningsuitdemping wordt gekarakteriseerd door de dempingsfactor. Deze is als volgt gedefiniëerd :

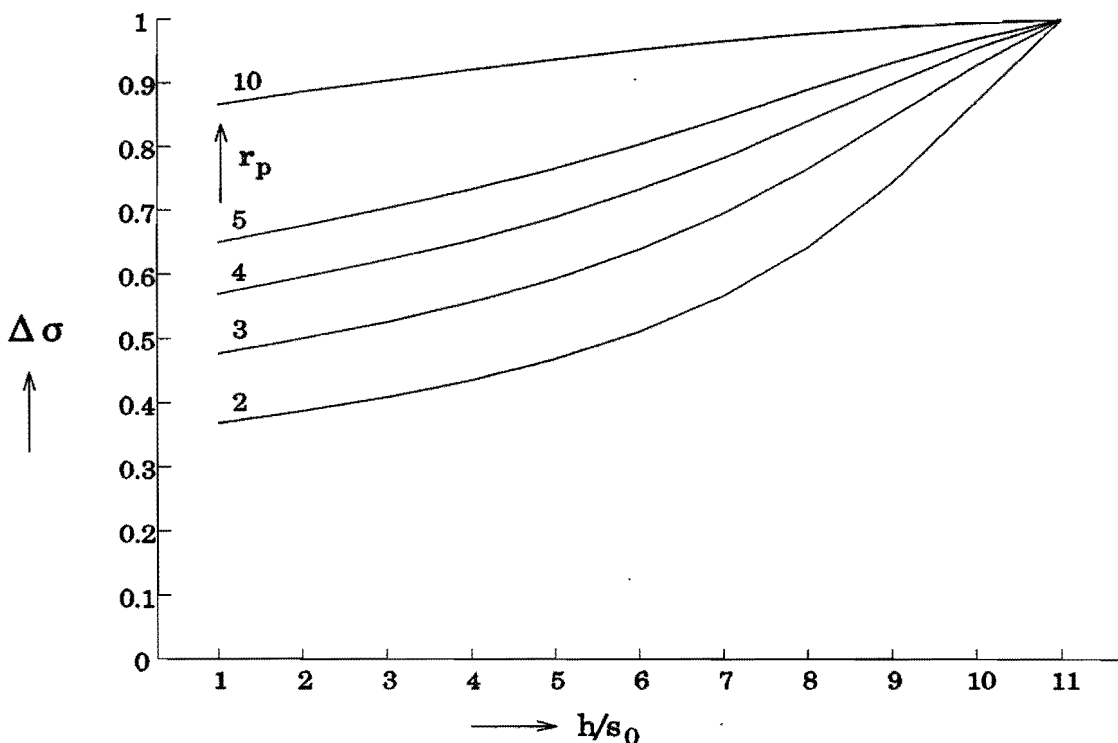
$$\Delta \sigma = \frac{\sigma_h}{\sigma_{rand}} = \frac{\text{spanning op hoogte } h \text{ in de produktwand}}{\text{spanning op de produktrand}}$$

Voor de ronde blink met afgeknipte hoeken bij de verschillende combinaties van stempelradius en globale dieptrekverhouding zijn simulaties met het GIFTS-model uitgevoerd en de dempingsfactor bepaald.

5.5.1. Invloed van de stempelradius

Om de invloed van de stempelradius op de spanningsuitdemping te bepalen zijn simulaties uitgevoerd met variërende stempelradius en constante globale dieptrekverhouding.

In figuur 23 is de dempingsfactor uitgezet tegen de dimensieloze wandhoogte bij een globale dieptrekverhouding van 2

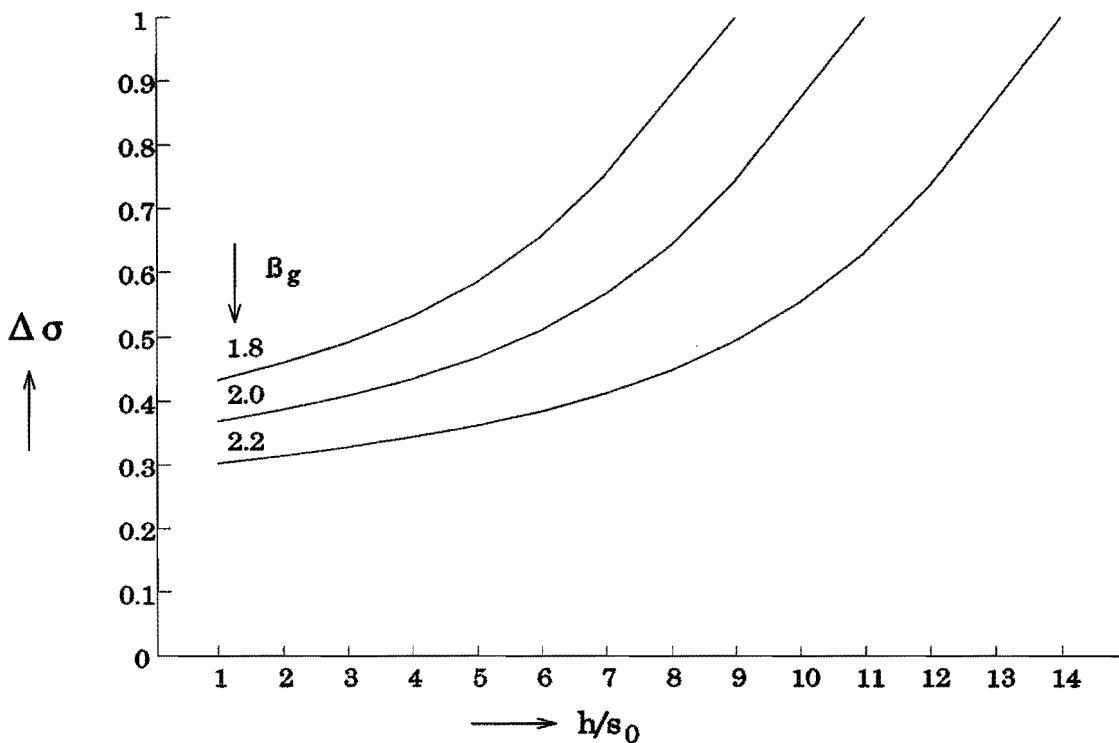


Figuur 23 : Invloed van de stempelradius op de dempingsfactor bij $\beta_0 = 2$

Uit figuur 23 blijkt dat bij afnemende stempelradius de spanningsuitdemping toeneemt. Bij een toenemende stempelradius zal de breedte van het striptrekgebied afnemen waardoor minder spanning vanuit het rotatiesymmetrisch gebied in het striptrekgebied kan wegvloeien. Tevens neemt bij een toenemende stempelradius de verhouding van de aangebrachte belastingen op de produktwand tussen het rotatiesymmetrisch gebied en het striptrekgebied af (zie bijlage 12). Het verschil tussen de heersende spanningen in de beide gebieden is geringer. De spanning zal daarom minder wegvloeien.

5.5.2. Invloed van de globale dieptrekverhouding

Door het variëren van de globale dieptrekverhouding treedt de maximale stempelkracht bij een grotere wandhoogte op. De simulaties met variërende globale dieptrekverhouding zijn dan ook met verschillende wandhoogtes uitgevoerd. In figuur 24 is de dempingsfactor uitgezet tegen de dimensieloze wandhoogte, bij een constante stempelradius van 2 mm.



Figuur 24 : Invloed van de globale dieptrekverhouding op de dempingsfactor bij $r_p = 2$ mm

Bij het toenemen van de globale dieptrekverhouding neemt de spanningsuitdemping toe. Door toename van de globale dieptrekverhouding zal de verhouding tussen de aangebrachte belastingen stijgen (zie bijlage 12), en daardoor ook het wegvloeien van de spanning toenemen.

5.5.3. Uitdempingsmatrix

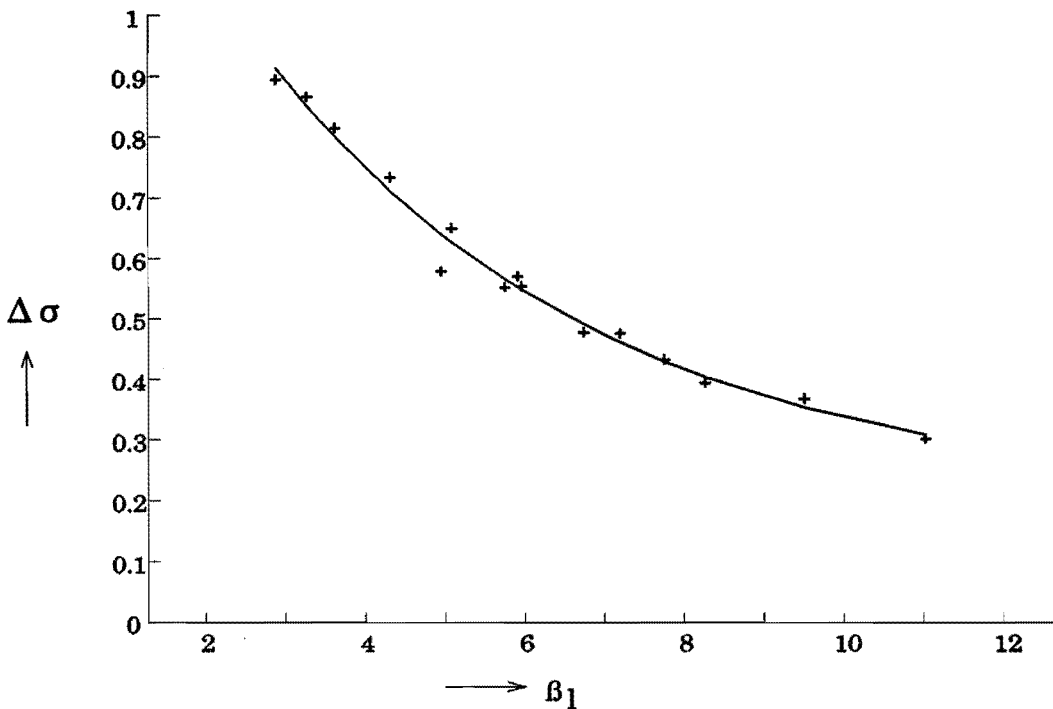
Door combinatie van de spanningsuitdemping als functie van de globale dieptrekverhouding en de verhouding breedte striptrekgebied-stempelradius, ontstaat een matrix voor de dempingsfactor. Tabel 6 geeft deze uitdempingsmatrix weer.

Tabel 6 : Uitdempingsmatrix voor de dempingsfactor $\Delta\sigma$

β_g	B/r_p				
	2	6	8	11.3	18
1.8	0.895	0.734	0.578	0.554	0.433
2.0	0.867	0.650	0.569	0.477	0.368
2.2	0.815	0.553	0.478	0.395	0.302

M.b.v. van deze matrix is het mogelijk om snel de spanningsuitdemping bij een gegeven gereedschaps- en materiaalgometrie te bepalen d.m.v. interpolatie.

De combinatie van globale dieptrekverhouding en stempelradius bepaalt de lokale dieptrekverhouding. De uitdempingsmatrix geeft dus de uitdemping als functie van de lokale dieptrekverhouding weer. In figuur 25 is de uitdempingsmatrix omgezet in een grafiek.



Figuur 25 : Dempingsfactor als functie van de lokale dieptrekverhouding

Door de punten is een beste lijn bepaald met het regressieprogramma SAS.

Met het regressieprogramma is als vergelijking gevonden:

$$\Delta\sigma = c + \exp(b_0 + b_1 \cdot \beta_1)$$

waarin : $c = 0.204971$
 $b_0 = 0.332782$
 $b_1 = -0.23474$

Met deze vergelijking is het mogelijk om snel en met een redelijke nauwkeurigheid de dempingsfactor te bepalen bij een bekende lokale dieptrekverhouding.

5.5.4. Evaluatie van de spanningsuitdemping

Bij rotatiesymmetrische produkten treedt geen spanningsuitdemping op vanwege de symmetrie. De dimensieloze kritische stempelkracht voor cilindrische produkten is 0.72 [6].

Als we alleen het rotatiesymmetrische gebied van een vierkant produkt bekijken, moet voor de spanning welke ter hoogte van de bodemradius heerst gelden:

$$F_{po}^* \cdot \Delta\sigma > 0.72$$

De aangebrachte belasting op het rotatiesymmetrisch gebied vermenigvuldigd met de dempingsfactor is voor onregelmatig gevormde produkten groter dan de kritische stempelkracht voor cilindrische produkten.

Tabel 7 bevat een overzicht van de kritische dimensieloze stempelkracht welke ter hoogte van de bodem in de produktwand heersen. Omdat de kritische stempelkracht bij een globale dieptrekverhouding van 2.2 is bepaald bevat tabel 7 de berekende waarden bij deze globale dieptrekverhouding.

Tabel 7 : Kritische dimensieloze uitgedempte stempelkracht voor het rotatiesymmetrisch gebied.

r_p	F_{po}^*	$\Delta\sigma$	$F_{po}^* \cdot \Delta\sigma$
2	3.3473	0.302	1.01
3	2.7357	0.395	1.08
4	2.3572	0.478	1.13
5	2.0891	0.553	1.15
10	1.4027	0.815	1.14

Uit deze tabel volgt dat vierkante produkten bij een hogere belasting falen dan cilindrische produkten met een gelijke stempelradius, binnen de onderzochte grenzen.

6. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1. Conclusies

Het onderzoek naar het vierkant dieptrekken concentreert zich voornamelijk op het controleren van de opgestelde modellering. Hierbij is alleen naar vierkante produkten gekeken.

Uit de resultaten van de experimenten blijkt dat de opgestelde modellering voor het bepalen van de stempelkracht een redelijke benadering is. De blenkgeometrie blijkt hierbij van zeer groot belang voor het bereikte dieptrekresultaat.

Door het uitvoeren van experimenten is naast praktische weg een breukcriterium voor het dieptrekken van vierkante produkten opgesteld. Uit de resultaten van de experimenten blijkt dat de kritische stempelkracht voor vierkante produkten die van rotatiesymmetrische produkten benadert, ongeacht de geometrie van de vierkante stempel.

Het eindige elementen pakket GIFTS is zeer geschikt om de spanningsuitdemping, die optreedt bij het dieptrekken van vierkante produkten, te simuleren. GIFTS is echter niet geschikt om de kritische belasting te onderzoeken, omdat GIFTS werkzaam is in het lineair elastisch gebied. Bij het dieptrekken treden zowel elastische als plastische vervormingen op.

Door het uitvoeren van verschillende simulaties is een uitdempingsmatrix opgesteld. Met behulp van deze matrix kan bij een bekende produktgeometrie de spanningsuitdemping voor vierkante produkten bepaald worden.

Praktisch heeft deze uitdempingsmatrix tot doel het bepalen van de belasting welke onderaan in de wand aanwezig is. Uit de experimenten is een breukcriterium voor het gehele produkt opgesteld. Daar dit in GIFTS niet mogelijk is, is een lokaal breukcriterium gemodelleerd. Hierbij is alleen het rotatiesymmetrisch gebied bekeken.

De belasting welke bij falen van het produkt onderin de produktwand heerst is afhankelijk van:

- de aangebrachte belasting op het rotatiesymmetrisch gebied, bij het bepalen van de kritische stempelkracht
- de berekende spanningsuitdemping

Met behulp van deze twee parameters is het mogelijk om een breukcriterium te definiëren voor het rotatiesymmetrisch gebied.

Uit eerder onderzoeken is gebleken dat voor cilindrische produkten geldt:

$$- F_{cr\circ}^* = 0.72$$

Voor vierkante produkten is de kritische stempelkracht bepaald. Hiervoor geldt:

$$- F_{cr\Box}^* = 1.10$$

Hieruit blijkt dat vierkante produkten bij een hogere belasting falen dan cilindrische produkten met een gelijke stempelradius. Dit breukcriterium is geldig binnen de onderzochte grenzen.

6.2. Aanbevelingen

Met het opgestelde model is het dus niet mogelijk om de praktische bepaalde kritische stempelkracht voor het volledige produkt te verifiëren.

Door een model op te stellen dat integrerend over de produktomtrek de onderaan in de produktwand aanwezige uitgedempte stempelkracht bepaalt, zou het mogelijk zijn om de kritische stempelkracht voor het volledige produkt te bepalen en te verifiëren met de hand van experimenten.

Bij het bepalen van de spanningsuitdemping bij vierkante produkten verloopt het spanningsbeeld mooi symmetrisch, door de gelijke lengtes van de striptrekgebieden. Er zouden simulaties uitgevoerd kunnen worden met rechthoekige en/of ruitvormige produkten om de invloed van verschillende lengtes van het striptrekgebied te onderzoeken. De uitdempingsmatrix kan dan voor meerdere onregelmatig gevormde produkten uitgebreid worden.

Om te controleren of de berekende spanningsuitdemping ook praktisch optreedt zouden er experimenten uitgevoerd moeten worden waarbij de spanning in de produktwand gemeten wordt. Doordat het dieptrekproces een gesloten proces is dit niet zo eenvoudig.

LITERATUURLIJST

- [1] Ramaekers, J. Houtackers, L. Peeters, P., Plastisch bewerken van metalen, procesbeheersing in de onderdelenfabricage, Omtec Mierlo, 1992, zesde druk.

- [2] Technologie van het dieptrekken, studiemap TNO metaalinstituut.

- [3] Decortis, M. Graef, M., Onderzoek naar de dieptrekkracht bij vierkant dieptrekken, TUE onderzoeksrapport WPA 1275, Eindhoven, 1992.

- [4] Romanovski, W.P., Handboek voor de moderne stanstechniek, Kluwer Deventer, 1966.

- [5] Dollevoet, R., Onderzoek naar de spanningsuitdemping bij vierkant dieptrekken, TUE onderzoeksrapport WPA 1323, Eindhoven, 1992.

- [6] Ramaekers, J., Afleiding van de benodigde stempelkracht voor rotatiesymmetrische producten, TUE, Eindhoven, 1993.

- [7] Deckers, J., Evaluatie van het onderzoek naar het vierkant dieptrekproces, TUE onderzoeksrapport WPA 1309, Eindhoven, 1992.

- [8] Bootsma, J., Eindige elementen methode pakket GIFTS, startcursus deel 1, dict. nr. 834, Hogeschool Eindhoven, 1990.

- [9] Giesen, H., Practicum fundamentele werktuigbouwkunde GIFTS handleiding, TUE dict. nr. 4586, Eindhoven, 1992.

Bijlage 1 : Resultaten dieptrekkkracht vierkant dieptrekken Decortis/Graef

Stempelafmetingen : 40 x 40 mm

Stempelradius : 10 mm

Stempelafronding : 5 mm

Gebruikte materialen :

- Materiaal 11 : Hoogovens St. 15, onbekleed; 0.8 mm; code 8921
C = 499 N/mm²; n = 0.259 (90° op de walsrichting)
- Materiaal 12 : Hoogovens St. 15, bekleed met een thermische zinklaag,
10 μm (hotdip); 0.7 mm; code 9121
C = 499 N/mm²; n = 0.212
- Materiaal 13 : Hoogovens St. 15, bekleed met electrolitische zinklaag,
10 μm; 0.7 mm; code 9122
C = 469 N/mm²; n = 0.241

mat	smeermiddel	F _{strip}	F _{rot}	F _p	F _{meting}	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

mat	μ _{pd}	μ _n
11	0.12	0.035
12	0.18	0.035
13	0.17	0.039

Bijlage 2 : Meetstaat van de stempel- en matrijsafmetingen

r_p	ρ_p	ρ_d	b_p	b_d	trekspleet
2	4	3	40.01	42.08	1.04
3	4	3	40.03	42.05	1.01
4	4	3	40.00	42.02	1.01
5	4	3	39.98	42.02	1.02
10	4	3	40.02	42.32	1.15

Bijlage 3a : Pascal programma voor het bepalen van de modelleringsparameters

```
PROGRAM blenk_krachten_bepaling;
```

```
USES crt;
```

```
CONST bp      = 40.00;      murad = 0.18;
      C       = 500.00;    n      = 0.247;
      delta1  = 1E-3;     pplooi = 1.00;
      delta2  = 1E-6;     rhop   = 4.00;
      eps0    = 0.005;    rhod   = 3.00;
      muflens = 0.037;    s      = 0.90;
```

```
VAR Abl, Ablenk, Ablenkr, Astempel, b, betac, betag, betamax, betagmb,
    betagmo, betagr, betal, betalr, D, fd, h, hr, hsimr, l, R, Rr, Ru,
    Rv, rd, rhods, rhops, rp, rps, sl, verschil : real;
```

```
Apl, Arhod, As, Fbuig, Fdfenster, Fdrhoster, Fplooi, Fstempel, Fstrip,
Ftot, Ftotster, Ftotstrip, Fwflens, Fwflster, Fwrhoster, Fwradius,
hsim, lijnbelastingrot, lijnbelastingvlak, max, som, verschil1,
verschil2 : real;
```

```
nep : char;
```

```
BEGIN
```

```
begin
```

```
clrscr;
```

```
writeln('BEPALEN VAN DE MAAKBAARHEID VAN VIERKANTE CUPS');
```

```
writeln('*****');
```

```
writeln;
```

```
writeln('----->      INVOEREN VAN GEGEVENS      <-----');
```

```
writeln;
```

```
write('stempel radius      = ');read(rp);
```

```
write('globale dieptrekverh. = ');read(betag);
```

```
writeln;
```

```
writeln('----->      MATERIAALGEGEVENS      <-----');
```

```
writeln;
```

```
writeln('voordeformatie  $\epsilon_0$       = ',eps0:7:3);
```

```
writeln('verstevingsexponent n      = ',n:6:2);
```

```
writeln('kar. deformatieweerstand C   = ',C:5:2,' N/mm2');
```

```
writeln('wrijvingscoëfficiënt  $\mu$  flens = ',muflens:7:3);
```

```
writeln('wrijvingscoëfficiënt  $\mu$  radius = ',muradius:7:3);
```

```
writeln('plooihouderdruk      = ',pplooi:6:2,' N/mm2');
```

```
writeln;
```

```
writeln('-----> BEREKENINGSRESULTATEN MAAKBAARHEID <-----');
```

```
writeln;
```

```
writeln('          TNO waarden      praktische waarden');
```

```
writeln;
```

```
sl := 1.1*s;
```

```
rd := rp + (sl);
```

```
rhods := rhod + (s/2);
```

```
rhops := rhop + (s/2);
```

```
rps := rp + (s/2);
```

```
Astempel := sqrt(bp) - ((4-pi)*sqrt(rp));
```

```
writeln('stempeloppervlak = ',Astempel:7:1,' mm2');
```

```
b := bp - (2*rp);
```

```
writeln('blenkbreedte      = ',b:7:1,' mm');
```

```
Ablenk := (sqrt(betag))*Astempel;
```

```
l := 1;
```

```

repeat
  l:=1+0.01;
  Abl:=sqr(l)-(2*sqr((l-b)/2));
  verschil:=(Ablenk-Abl);
until (verschil < delta2);
if (l < 87) then D:=83 else if (l < 97) then D:=91 else if (l < 105) then
D:=98 else D:=106;
writeln('blenklengte      = ',l:7:1,' mm');
h:=((l-(pi*rhops)+(2*rhop)-bp)/2)+rhop;
R:=sqr(sqr(rps)+2*rps*h);
write('blenkradius      = ',R:7:1,' mm');
readln(nep);
Ablenkr:=(pi/4)*sqr(D);
writeln('blenkoppervlak    = ',Ablenk:7:1,' mm²',Ablenkr:20:1,' mm²');
fd:=sqr(4*Ablenk/pi);
writeln('fictieve diameter  = ',fd:7:1,' mm',D:21:1,' mm');
hr:=((D-(pi*rhops)+(2*rhop)-bp)/2)+rhop;
writeln('produkthoogte     = ',h:7:1,' mm',hr:21:1,' mm');
Rv:=sin(pi/4)*(((l-bp)/2)+rp);
Rr:=(D/2)-(sqr(2*(sqr((bp/2)-rp))));
writeln('blenkstraal       = ',Rv:7:1,' mm',Rr:21:1,' mm');
betal:=Rv/((rp+rd)/2);
betalr:=Rr/((rp+rd)/2);
writeln('lokale dieptrekv.  = ',betal:8:2,betalr:24:2);
betagr:=sqr(Ablenkr/Astempel);
writeln('globale dieptrekv.  = ',betag:8:2,betagr:24:2);
betagmo:=1+(0.5*sqr(4-4E-3*fd/s));
writeln('max. globale dieptrekverhouding volgens ondergrens TNO =',
betagmo:5:2);
betagmb:=2.2-(6E-4*fd/s);
writeln('max. globale dieptrekverhouding volgens bovengrens TNO =',
betagmb:5:2);
writeln;
writeln('----->          CONCLUSIE          <-----');
writeln;
if (betag < betagmo) then writeln('CUP IS DIEPTREKBAAR') else
if (betag < betagmb) then writeln('CUP IS ONDER ZEER GUNSTIGE OMSTANDIGHEDEN
DIEPTREKBAAR')
else writeln('CUP IS NIET DIEPTREKBAAR');
end;

begin
  writeln;
  writeln('----->          KRACHTEN ROT. SYM GEBIED          <-----');
  writeln;
  betac:=betalr/(1+0.4*n);
  writeln('Kritische dieptrekverhouding = ',betac:4:2);
  max:=0;
  betamax:=1.1;
  verschil2:=1;
  repeat
    betamax:=betamax+0.01;
    Fdf1ster:=1.05*sqr(betalr/betamax)*(((1-(exp(n*ln(ln(betalr/betamax)+eps0))))
    *((1/betamax)-1))+ln(betamax));
    Fwflster:=muf1ens*((2+(0.01*(rp/s)))*1E-3)*(rp/s)*(sqr(betalr)-1);
    Fdrhoster:=1/(sqr(3))*(betalr/betamax)*(s/rhod)*(1-(1-(exp(n*ln(ln(betalr/betamax)+
    eps0))))*(1/betalr));
    Fwrhoster:=1.6*muradius*(Fdf1ster+Fwflster);
    Ftotster:=Fdf1ster+Fwflster+Fdrhoster+Fwrhoster;
  
```



```

verschil2:=Ftotster-max;
if (Ftotster>max) then
begin
max:=Ftotster;
end
until (Ftotster<max);
writeln('β max = ',betamax:6:2);
writeln('Fd fl* = ',Fdfenster:8:4);
writeln('Fw fl* = ',Fwflster:8:4);
writeln('Fd rho* = ',Fdrhoester:8:4);
writeln('Fw rho* = ',Fwrhoester:8:4);
writeln('Ftot* = ',Ftotster:8:1);
Ftot:=Ftotster*2*pi*rps*s*C;
writeln('Ftot.rot = ',Ftot:6:3,' N ');
lijnelastingrot:=Ftot/(2*pi*rps);
writeln('Lijnelasting rot. sym. ged., σ rot = ',lijnelastingrot:5:2,' N/mm');
readln(nep);
writeln('-----> KRACHTEN STRIPTREKGEBIED <-----');
writeln;
Fbuig:=(8*C*exp(n*ln(2/(sqrt(3)*rhods)))*exp((n+2)*ln(0.5*s))*4*b/(sqrt(3)*
(n+2)*rhods));
writeln('Fbuig = ',Fbuig:8:2,' N');
As:=sqrt(bp+(2*sl))-((4-pi)*(sqrt(rp+sl))-Astempel);
writeln('A plaatdikte = ',As:8:2,' mm²');
Arhod:=sqrt(bp+2*(sl+rhod))-((4-pi)*(sqrt(rp+sl+rhod))-Astempel-As);
writeln('A matrijsradius = ',Arhod:8:2,' mm²');
Apl:=Ablenk-Arhod-As-Astempel;
writeln('A plooihouder = ',Apl:8:2,' mm²');
Fplooi:=pplooi*Apl;
writeln('Fplooi = ',Fplooi:8:2,' N');
Fwflens:=2*muflens*Fplooi;
writeln('Fwflens = ',Fwflens:8:2,' N');
Fstrip:=1;
while Fstrip <> 10000 do
begin
Fwradius:=muradius*pi/(2*sqrt(2))*sqrt((sqrt(Fwflens)+sqrt(Fstrip))*cos
(pi/4-arctan(Fwflens/Fstrip)));
som:=Fbuig+Fwflens+Fwradius;
verschil1:=som-Fstrip;
if verschil1 > delta1 then Fstrip:=Fstrip+10 else
begin
writeln('Fstrip = ',Fstrip:8:2,' N');
writeln('Fwradius = ',Fwradius:8:2,' N');
Ftotstrip:=Fstrip*1.14;
writeln('Ftot.strip(1.14) = ',Ftotstrip:8:1,' N');
lijnelastingvlak:=Ftotstrip/(4*b);
writeln('lijnelasting vlakke wand σ strip = ',lijnelastingvlak:6:2,' N/mm');
Fstempel:=Ftot+Ftotstrip;
writeln('Tot. stempelkracht = ',Fstempel:6:1,' N');
Fstrip:=10000;
end;
end;
end;
readln(nep);
END.

```

Bijlage 3b : Output pascal programma

BEPALEN VAN DE MAAKBAARHEID VAN VIERKANTE CUPS

-----> INVOEREN VAN GEGEVENS <-----

stempel radius = 4
globale dieptrekverh. = 2

-----> MATERIAALGEGEVENS <-----

voordeformatie ϵ_0 = 0.05
verstevingsexponent n = 0.247
kar. deformatieweerstand C = 500 N/mm²
wrijvingscoëfficiënt μ flens = 0.037
wrijvingscoëfficiënt μ radius = 0.180
plooihouderdruk = 1.00 N/mm²

-----> BEREKENINGSRESULTATEN MAAKBAARHEID <-----

	TNO waarden	praktische waarden
stempeloppervlak	= 1586.3 mm ²	
blenkbreedte	= 32.0 mm	
blenk lengte	= 89.4 mm	
blenk radius	= 15.8 mm	
blenkoppervlak	= 6345.1 mm ²	6503.9 mm ²
fictieve diameter	= 89.9 mm	91.0 mm
produkthoogte	= 25.7 mm	26.5 mm
blenkstraal	= 20.3 mm	22.9 mm
lokale dieptrekv.	= 4.52	5.09
globale dieptrekv.	= 2.00	2.02
max. globale dieptrekverhouding volgens ondergrens TNO	= 1.95	
max. globale dieptrekverhouding volgens bovengrens TNO	= 2.14	

-----> CONCLUSIE <-----

CUP IS ONDER ZEER GUNSTIGE OMSTANDIGHEDEN DIEPTREKBAAR

-----> KRACHTEN ROT. SYM GEBIED <-----

β max = 3.11
Fd fl* = 1.5422
Fw fl* = 0.0154
Fd rho* = 0.3235
Fw rho* = 0.2492
Ftot* = 2.1302
Ftot.rot = 26803.0 N
Lijnbelasting rot. sym. ged., σ rot = 959.14 N/mm

-----> KRACHTEN STRIPTREKGEBIED <-----

Fbuig = 4837.76 N
Fplooi = 4457.78 N
Fwflens = 445.78 N
Ftot.strip(1.14) = 6695.00 N
lijnbelasting vlakke wand σ strip = 52.41 N/mm
Tot. stempelkracht = 33498.0 N

Bijlage 4 : Theoretische en praktische waarden van de blenkgeometrie.

Theoretische berekeningen volgens TNO						Praktische berekeningen			
rp	β_g	Astemp	Ablenk	fd	β_l	β_g	Ablenk	D	β_l
2,0	1,8	1597	5173	77,8	6,04	1,84	5411	83,0	7,76
3,0	1,8	1592	5159	78,4	4,55	1,84	5411	83,0	5,96
4,0	1,8	1586	5140	79,0	3,73	1,85	5411	83,0	4,95
5,0	1,8	1579	5115	79,7	3,23	1,85	5411	83,0	4,31
10,0	1,8	1514	4906	83,0	2,14	1,89	5411	83,0	2,88
2,0	2,0	1597	6386	88,0	7,51	2,02	6504	91,0	9,52
3,0	2,0	1592	6369	88,7	5,59	2,02	6504	91,0	7,20
4,0	2,0	1586	6345	89,4	4,56	2,02	6504	91,0	5,91
5,0	2,0	1579	6314	90,1	3,91	2,03	6504	91,0	5,08
10,0	2,0	1514	6056	93,6	2,49	2,07	6504	91,0	3,27
2,0	2,2	1597	7727	98,3	8,98	2,17	7543	98,0	11,03
3,0	2,2	1592	7706	99,1	6,67	2,18	7543	98,0	8,27
4,0	2,2	1586	7678	99,9	5,40	2,18	7543	98,0	6,74
5,0	2,2	1579	7640	100,7	4,59	2,19	7543	98,0	5,75
10,0	2,2	1514	7329	104,3	2,87	2,23	7543	98,0	3,62

Bijlage 5a : Benodigde krachten voor het deformeren van het rot. sym. gebied

r_p	2	3	4	5	10
β_g	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80
β_1	7.76	5.96	4.95	4.31	2.88
β_{Fmax}	3.24	3.11	2.95	2.76	2.23
F_{dfl}^*	1.8749	1.5515	1.3382	1.1826	0.7711
F_{wfl}^*	0.0133	0.0117	0.0107	0.0100	0.0086
$F_{d\rho}^*$	0.4132	0.3264	0.2819	0.2593	0.2017
$F_{w\rho}^*$	0.3021	0.2501	0.2158	0.1908	0.1247
F_{tot}^*	2.6034	2.1398	1.8467	1.6427	1.1061
F_{rot}	18035	20873	23235	25314	32682
σ_{rot}	1172	963	831	739	498
r_p	2	3	4	5	10
β_g	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
β_1	9.52	7.20	5.91	5.08	3.27
β_{Fmax}	3.25	3.20	3.11	2.98	2.42
F_{dfl}^*	2.1419	1.7789	1.5422	1.3678	0.8971
F_{wfl}^*	0.0201	0.0172	0.0154	0.0142	0.0114
$F_{d\rho}^*$	0.5084	0.3871	0.3235	0.2870	0.2159
$F_{w\rho}^*$	0.3459	0.2874	0.2492	0.2211	0.1453
F_{tot}^*	3.0164	2.4706	2.1303	1.8901	1.2697
F_{rot}	20895	24100	26803	29125	37515
σ_{rot}	1357	1112	959	851	571
r_p	2	3	4	5	10
β_g	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20
β_1	11.03	8.27	6.74	5.75	3.62
β_{Fmax}	3.23	3.22	3.19	3.10	2.72
F_{dfl}^*	2.3462	1.9526	1.6996	1.5110	1.0107
F_{wfl}^*	0.0271	0.0228	0.0202	0.0183	0.0142
$F_{d\rho}^*$	0.5943	0.4441	0.3623	0.3151	0.2138
$F_{w\rho}^*$	0.3797	0.3161	0.2752	0.2447	0.1640
F_{tot}^*	3.3473	2.7357	2.3572	2.0891	1.4027
F_{rot}	23188	26686	29659	32192	41444
σ_{rot}	1506	1231	1061	940	631
r_p	2	3	4	5	10
β_g	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35
β_1	12.74	9.49	7.67	6.52	4.00
β_{Fmax}	3.17	3.24	3.22	3.17	2.70
F_{dfl}^*	2.5523	2.1363	1.8581	1.6590	1.1056
F_{wfl}^*	0.0362	0.0302	0.0263	0.0237	0.0176
$F_{d\rho}^*$	0.7008	0.5083	0.4108	0.3521	0.2435
$F_{w\rho}^*$	0.4142	0.3466	0.3015	0.2692	0.1797
F_{tot}^*	3.7035	3.0214	2.5967	2.3040	1.5465
F_{rot}	25655	29473	32672	35504	45694
σ_{rot}	1667	1360	1169	1037	696

Bijlage 5b : Benodigde krachten voor het deformereren van het striptrekgebied

r_p β_g	2	3	4	5	10
	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80
F_{buig}	5442	5140	4838	4535	3024
$F_{\text{w flens}}$	334	335	336	338	346
F_{plooi}	3337	3350	3364	3380	3460
F_{strip}	7318	6936	6555	6174	4270
σ_{strip}	51	51	51	51	53

r_p β_g	2	3	4	5	10
	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
F_{buig}	5442	5140	4838	4535	3024
$F_{\text{w flens}}$	443	444	446	447	455
F_{plooi}	4430	4443	4457	4474	4553
F_{strip}	7457	7076	6695	6314	4410
σ_{strip}	52	52	52	53	55

r_p β_g	2	3	4	5	10
	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20
F_{buig}	5442	5140	4838	4535	3024
$F_{\text{w flens}}$	547	548	550	551	559
F_{plooi}	5469	5482	5496	5513	5592
F_{strip}	7589	7208	6827	6447	4543
σ_{strip}	53	53	53	54	57

r_p β_g	2	3	4	5	10
	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35
F_{buig}	5442	5140	4838	4535	3024
$F_{\text{w flens}}$	675	676	678	679	687
F_{plooi}	6751	6764	6778	6795	6874
F_{strip}	7753	7372	6991	6611	4708
σ_{strip}	54	54	55	55	59

Bijlage 6a : Meetresultaten ronde blenk

meting no.	mat	s ₀	r _p	β _z	β ₁	Fp max			Fplooï		resultaat
						berekend	meting	afw.	berekend	instel	
1	2	0.9	10	1.8	2.88	36952	37250	-1%	3460	3300	
2	2	0.9	10	2.0	3.27	41925	44500	-6%	4550	4400	
3	2	0.9	10	2.2	3.62	45987	48750	-6%	5590	5400	breuk bodem
4	2	0.9	5	1.8	4.31	31488	35750	-12%	3380	3300	
5	2	0.9	5	2.0	5.08	35439	42000	-16%	4475	4400	
6	2	0.9	5	2.2	5.75	38639	48625	-20%	5510	5400	breuk bodem
7	2	0.9	4	1.8	4.95	29790	35000	-15%	3364	3300	
8	2	0.9	4	2.0	5.91	33498	41250	-19%	4457	4400	
9	2	0.9	4	2.2	6.74	36486	48500	-25%	5500	5400	breuk bodem
10	2	0.9	3	1.8	5.96	27809	33000	-16%	3350	3300	
11	2	0.9	3	2.0	7.20	31176	39250	-21%	4443	4400	
12	2	0.9	3	2.2	8.27	33894	47250	-28%	5480	5400	breuk bodem
13	2	0.9	2	1.8	7.76	25353	31250	-19%	3337	3300	
14	2	0.9	2	2.0	9.52	28352	38500	-26%	4405	4400	
15	2	0.9	2	2.2	11.03	30777	44000	-30%	5470	5400	
16	11	0.8	10	2.2	3.62	40401	41000	-2%	5590	5400	ander mat.
17	11	0.8	5	2.2	5.75	31681	38000	-17%	5510	5400	ander mat.
18	11	0.8	2	2.2	11.03	27424	37500	-27%	5470	5400	ander mat.
19	2	0.9	5	2.2	5.06	38639	48250	-20%	5510	2500	< Fplooï
20	2	0.9	5	1.8	3.64	31488	37000	-14%	3380	3500	> Fplooï

Bijlage 6a : Meetresultaten ronde blenk

meting no.	mat	s ₀	r _p	β _g	β _l	Fp max			Fplood		resultaat
						berekend	meting	afw.	berekend	instel	
21	2	0.9	10	1.8	2.88	36952	37250	-1%	3460	3300	breuk bodem
22	2	0.9	10	2.0	3.27	41925	43750	-4%	4550	4400	
23	2	0.9	10	2.2	3.62	45987	48750	-6%	5590	5400	
24	2	0.9	5	1.8	4.31	31488	36250	-13%	3380	3300	
25	2	0.9	5	2.0	5.08	35439	42000	-16%	4475	4400	
26	2	0.9	5	2.2	5.75	38639	47500	-19%	5510	5400	
27	2	0.9	4	1.8	4.95	29790	37500	-20%	3364	3300	breuk bodem
28	2	0.9	4	2.0	5.91	33498	42500	-21%	4457	4400	
29	2	0.9	4	2.2	6.74	36486	48000	-24%	5500	5400	
30	2	0.9	3	1.8	5.96	27809	35250	-21%	3350	3300	
31	2	0.9	3	2.0	7.20	31176	40500	-23%	4443	4400	
32	2	0.9	3	2.2	8.27	33894	46000	-26%	5480	5400	
33	2	0.9	2	1.8	7.76	25353	32500	-22%	3337	3300	
34	2	0.9	2	2.0	9.52	28352	38500	-26%	4405	4400	
35	2	0.9	2	2.2	11.03	30777	45000	-31%	5470	5400	

Bijlage 6b : Meetresultaten ronde blenk met afgeknipte hoeken

meting no.	mat	s ₀	r _p	β _g	β _l	E _p max			E _p looi		resultaat
						berekend	meting	afw	berekend	instel	
36	2	0.9	10	1.8	2.88	36952	30000	+23 %	3460	3300	
37	2	0.9	10	1.8	2.88	36952	28750	+28 %	3460	3300	
38	2	0.9	10	2.0	3.27	41925	34000	+23 %	4550	4400	
39	2	0.9	10	2.0	3.27	41925	34250	+23 %	4550	4400	
40	2	0.9	10	2.2	3.62	45987	35750	+28 %	5590	5400	
41	2	0.9	10	2.2	3.62	45987	36250	+27 %	5590	5400	
42	2	0.9	5	1.8	4.31	31488	31500	0 %	3380	3300	
44	2	0.9	5	2.0	5.08	35439	36000	-1 %	4475	4400	
46	2	0.9	5	2.2	5.75	38639	38250	+1 %	5510	5400	
48	2	0.9	4	1.8	4.95	29790	31500	-5 %	3364	3300	
49	2	0.9	4	1.8	4.95	29790	31000	-4 %	3364	3300	
50	2	0.9	4	2.0	5.91	33498	36000	-7 %	4457	4400	
51	2	0.9	4	2.0	5.91	33498	35750	-6 %	4457	4400	
52	2	0.9	4	2.2	6.74	36486	39000	-6 %	5500	5400	
53	2	0.9	4	2.2	6.74	36486	38250	-5 %	5500	5400	
54	2	0.9	3	1.8	5.96	27809	31500	-12 %	3350	3300	
55	2	0.9	3	1.8	5.96	27809	31500	-12 %	3350	3300	
56	2	0.9	3	2.0	7.20	31176	38250	-18 %	4443	4400	
57	2	0.9	3	2.0	7.20	31176	38500	-19 %	4443	4400	
58	2	0.9	3	2.2	8.27	33894	40750	-17 %	5480	5400	
59	2	0.9	3	2.2	8.27	33894	40500	-16 %	5480	5400	
60	2	0.9	2	1.8	7.76	25353	31500	-20 %	3337	3300	
61	2	0.9	2	1.8	7.76	25353	31750	-20 %	3337	3300	
62	2	0.9	2	2.0	9.52	28352	36750	-23 %	4405	4400	
63	2	0.9	2	2.0	9.52	28352	36500	-22 %	4405	4400	
64	2	0.9	2	2.2	11.03	30777	38750	-21 %	5470	5400	
65	2	0.9	2	2.2	11.03	30777	38500	-21 %	5470	5400	

Bijlage 7 : Meetresultaten bepaling kritische kracht

meting no.	mat	s_0	r_p	β_g	β_1	Fp breuk meting	Eplooi		produkt hoogte	resultaat
							berekend	instel		
66	2	0.9	10	2.2	3.62	46750	5590	5400	18.8	breuk bodem
67	2	0.9	10	2.2	3.62	46500	5590	5400	19.2	breuk bodem
68	2	0.9	10	2.2	3.62	46500	5590	5400	20.6	breuk bodem
69	2	0.9	5	2.2	5.75	47750	5510	5400	23.1	breuk bodem
70	2	0.9	5	2.2	5.75	47250	5510	5400		
71	2	0.9	5	2.35	6.52	49250	6795	6500	13.0	breuk bodem
72	2	0.9	4	2.2	6.74	45000	5500	5400		
73	2	0.9	4	2.2	6.74	44250	5500	5400		
74	2	0.9	4	2.35	7.67	48250	6778	6500	12.6	breuk bodem
75	2	0.9	4	2.35	7.67	48250	6778	6500	12.6	breuk bodem
76	2	0.9	3	2.2	8.27	45250	5500	5400		
77	2	0.9	3	2.2	8.27	46250	5500	5400	19.8	breuk bodem
78	2	0.9	3	2.35	9.49	48250	6763	6500	12.6	breuk bodem
79	2	0.9	3	2.35	9.49	48250	6763	6500	12.6	breuk bodem
80	2	0.9	2	2.2	11.03	42750	5500	5400		
81	2	0.9	2	2.2	11.03	42750	5500	5400		
82	2	0.9	2	2.35	12.74	47250	6750	6500	15.4	breuk bodem
83	2	0.9	2	2.35	12.74	47500	6750	6500	15.4	breuk bodem
3	2	0.9	10	2.2	3.62	47750	5590	5400	17.0	breuk bodem
6	2	0.9	5	2.2	5.75	48625	5510	5400	18.6	breuk bodem
9	2	0.9	4	2.2	6.74	48500	5500	5400	17.4	breuk bodem
12	2	0.9	3	2.2	8.27	47250	5480	5400	19.8	breuk bodem
23	2	0.9	10	2.2	3.62	47750	5590	5400	17.0	breuk bodem
29	2	0.9	4	2.2	6.74	48000	5500	5400	16.2	breuk bodem

Bijlage 8 : Meetstaat van de bereikte produkthoogten

r_p	β_g	produkthoogte		wandhoogte
		berekend	min. gemeten	F_{max}
2	1.8	23.8	24.5	8.8
3	1.8	24.1	25.0	9.0
4	1.8	24.5	25.4	8.7
5	1.8	24.8	25.2	9.0
10	1.8	26.4	26.5	9.5
2	2.0	28.9	30.2	10.6
3	2.0	29.3	30.5	10.7
4	2.0	29.6	30.5	11.0
5	2.0	30.0	31.2	11.1
10	2.0	31.8	32.5	11.3
2	2.2	34.1	34.5	13.3
3	2.2	34.5	34.5	13.0
4	2.2	34.9	35.0	13.5
5	2.2	35.3	35.8	13.7
10	2.2	37.1	39.2	14.1

Bijlage 9 : Meetstaat van het verloop van de wanddikte

RONDE BLENK

meting no.	rot. sym. gebied		striptrekgebied	
	bodem	rand	bodem	rand
1+21	0.77	0.80	0.79	0.96
2+22	0.76	0.79	0.79	1.00
3+23	breuk			
4+24	0.77	0.78	0.80	0.97
5+25	0.79	0.81	0.77	1.00
26	0.75	0.82	0.72	1.02
7+27	0.77	0.77	0.80	0.95
8+28	0.80	0.80	0.78	1.01
29	breuk			
10+30	0.79	0.79	0.81	0.96
11+31	0.80	0.83	0.79	0.99
32	0.80	0.86	0.74	1.03
13+33	0.80	0.81	0.82	0.99
14+34	0.81	0.83	0.80	0.98
15+35	0.80	0.84	0.77	1.04

RONDE BLENK MET AFGEKNIPTE HOEKEN

meting no.	rot. sym. gebied		striptrekgebied	
	bodem	rand	bodem	rand
36+37	0.81	0.83	0.82	0.91
38+39	0.83	0.83	0.81	0.90
40+41	0.82	0.84	0.78	0.88
42	0.81	0.82	0.80	0.90
44	0.82	0.82	0.79	0.90
46	0.83	0.82	0.78	0.89
48+49	0.80	0.82	0.81	0.90
50+51	0.82	0.82	0.80	0.90
52+53	0.82	0.82	0.79	0.89
54+55	0.82	0.84	0.80	0.90
56+57	0.83	0.83	0.79	0.90
58+59	0.81	0.83	0.78	0.90
60+61	0.82	1.03	0.79	0.93
62+63	0.82	1.01	0.78	0.91
64+65	0.81	0.98	0.76	0.94

Bijlage 10 : Input van het gifts model

JOB: rp10_2.0 25-APR-93 9:00:00

AUTOOFF 0

ELMAT 3

1

1.0000E+02 2.1000E+05 3.0000E-01

ETH 1

1

9.0000E-01

KPOINT 0

1

.0000E+00 .0000E+00 .0000E+00

2

5.8960E+00 .0000E+00 .0000E+00

3

1.0000E+01 .0000E+00 .0000E+00

4

1.4104E+01 .0000E+00 .0000E+00

5

1.8207E+01 .0000E+00 .0000E+00

6

1.8207E+01 .0000E+00 1.1000E+01

7

1.4104E+01 .0000E+00 1.1000E+01

8

1.0000E+01 .0000E+00 1.1000E+01

9

5.8960E+00 .0000E+00 1.1000E+01

10

.0000E+00 .0000E+00 1.1000E+01

SLINE 0

L1

1 2 7

L2

2 3 5

L3

3 4 5

L4

4 5 5

L5

5 6 12

L6

6 7 5

L7

7 8 5

L8

8 9 5

L9

9 10 7

L10

10 1 12

COMPLINE 0

LC1

L7 L8

LC2

L1 L2 L3 L4

LC3

L6 L7 L8 L9

GETY 0

QB4

1 1

GRID4 0

G1

LC2 L5 LC3 L10

JOB: rp10_2.0 25-APR-93 9:00:00

AUTOOFF 0

SUPL 0

L1

L2

L3

L4

SUPL 1

L5

L10

SUPL 2

L5

L10

LC3

SYM 1

1.8207E+01 .0000E+00

SYM 1

.0000E+00 .0000E+00

LOADL 3

L6

5.7100E+02 5.7100E+02

LC1

5.7100E+02 5.5000E+01

L9

5.5000E+01 5.5000E+01

Bijlage 11a : PASCAL programma voor het bepalen van gifts input

```
PROGRAM coördinaten_berekening_gifts ;

USES crt;

VAR b, gridh, gridL1, gridL2, hsim, L1, L2, rp, x1, x2, x3, x4, x5,
    y1, z1 : real;

    nep : char;

CONST bp = 40.0;
      s = 0.9;

BEGIN
  clrscr;
  writeln('COORDINATENBEREKENING VOOR GIFTS INVOER');
  writeln;
  writeln('-----> invoeren van gegevens <-----');
  writeln;
  write('stempelradius      = ');read(rp);
  write('simulatiehoogte    = ');read(hsim);
  writeln;
  writeln('-----> berekeningsresultaten <-----');
  writeln;
  L2:=(2*pi*(rp+(s/2)))/16;
  gridL2:=(round(L2/1))+1;
  b:=(bp-2*rp)/2;
  L1:=b-L2;
  gridL1:=(round(L1/1))+1;
  gridh:=(round(hsim/1))+1;
  writeln('lengte L1 = ',L1:6:3,'      grid L1 = ',gridL1:4:1);
  writeln('lengte L2 = ',L2:6:3,'      grid L2 = ',gridL2:4:1);
  writeln('hoogte L5 = ',hsim:6:3,'      grid L5 = ',gridh:4:1);
  x1:=0;
  x2:=L1;
  x3:=b;
  x4:=b+L2;
  x5:=b+(2*L2);
  y1:=0;
  z1:=0;
  writeln;
  writeln(' x1 = ',x1:5:3,'   y1 = 0   z1 = 0');
  writeln(' x2 = ',x2:5:3,'   y2 = 0   z2 = 0');
  writeln(' x3 = ',x3:5:3,'   y3 = 0   z3 = 0');
  writeln(' x4 = ',x4:5:3,'   y4 = 0   z4 = 0');
  writeln(' x5 = ',x5:5:3,'   y5 = 0   z5 = 0');
  writeln(' x6 = ',x5:5:3,'   y6 = 0   z6 = ',hsim:5:3);
  writeln(' x7 = ',x4:5:3,'   y7 = 0   z7 = ',hsim:5:3);
  writeln(' x8 = ',x3:5:3,'   y8 = 0   z8 = ',hsim:5:3);
  writeln(' x9 = ',x2:5:3,'   y9 = 0   z9 = ',hsim:5:3);
  writeln(' x10 = ',x1:5:3,'   y10 = 0   z10 = ',hsim:5:3);
  readln(nep);
END.
```

Bijlage 11b : Output PASCAL programma

COORDINATENBEREKENING VOOR GIFTS INVOER

-----> invoeren van gegevens <-----

stempelradius = 10
simulatiehoogte = 9

-----> berekeningsresultaten <-----

lengte L1 =5.896 grid L1 =7.0
lengte L2 =4.104 grid L2 =5.0
lengte L5 =9.000 grid L5 =10.0

x1 = 0.000	y1 =0	z1 =0
x2 = 5.896	y2 =0	z2 =0
x3 =10.000	y3 =0	z3 =0
x4 =14.104	y4 =0	z4 =0
x5 =18.207	y5 =0	z5 =0
x6 =18.207	y6 =0	z6 =9.000
x7 =14.104	y7 =0	z7 =9.000
x8 =10.000	y8 =0	z8 =9.000
x9 = 5.896	y9 =0	z9 =9.000
x10 = 0.000	y10 =0	z10 =9.000

Bijlage 12 : Toegepaste belastingen voor de simulaties

r_p	$\beta_g = 1.8$			$\beta_g = 2.0$			$\beta_g = 2.2$		
	σ_{rot}	σ_{strip}	verh	σ_{rot}	σ_{strip}	verh	σ_{rot}	σ_{strip}	verh
2	1172	51	23	1357	52	26	1506	53	28
3	963	51	19	1112	52	21	1231	53	23
4	831	51	16	959	52	18	1061	53	20
5	739	51	14	851	53	16	940	54	17
10	498	53	9	571	55	10	631	57	11