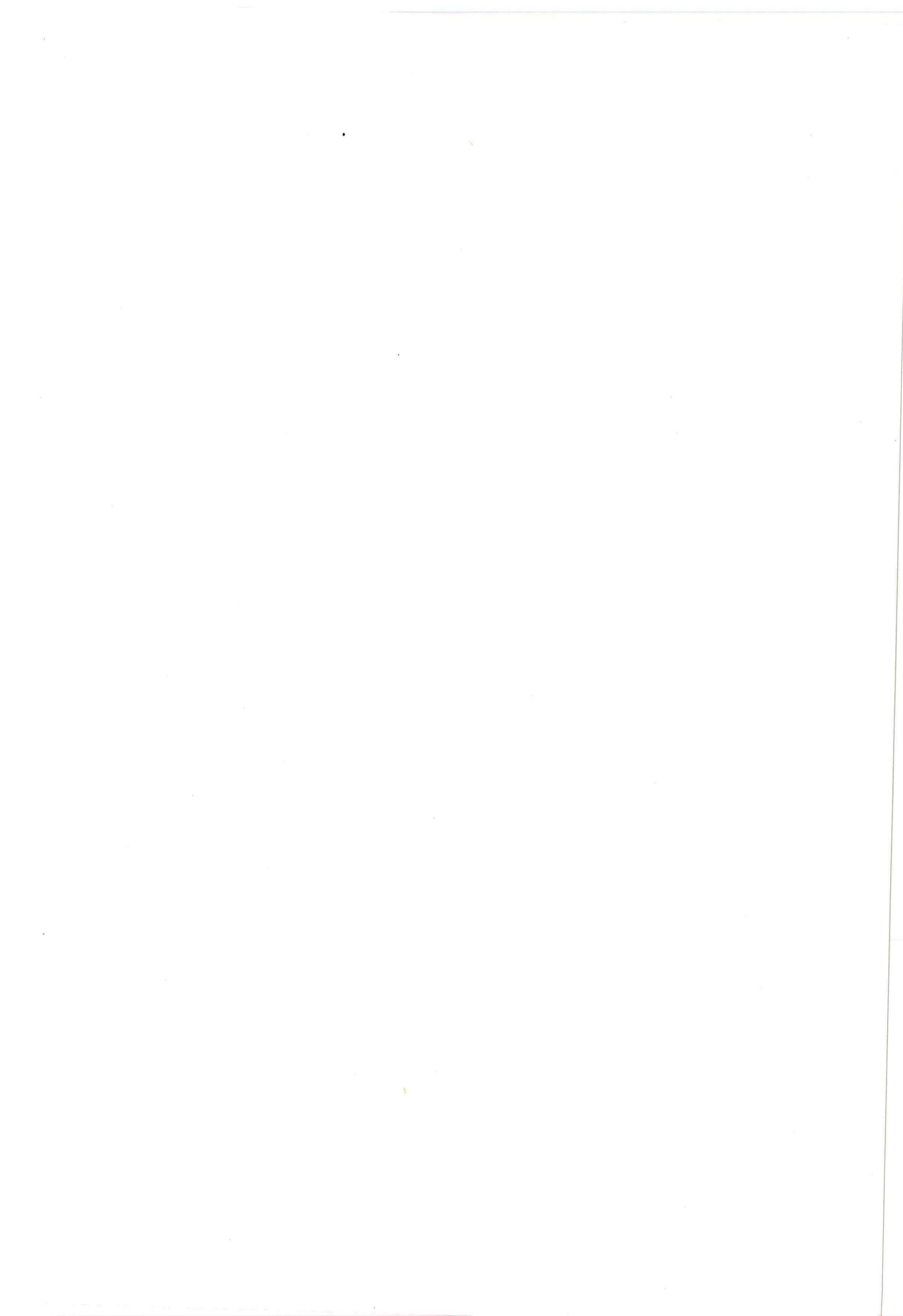


DE DRUK-DEBIETKARAKTERISTIEK VAN EEN  
DUBBELSCHROEFEXTRUDER

L. P. H. R. M. Mulders



## SAMENVATTING

In dit verslag wordt de drukdebietkarakteristiek van een dubbel-schroefextruder besproken.

Er zijn metingen verricht aan een model, gevuld met newtonse vloeistof, met als variabelen toerental, viscositeit en speling tussen de schroeven. De nadruk van de mathematische behandeling ligt op de beschrijving van de ingewikkelde geometrie.

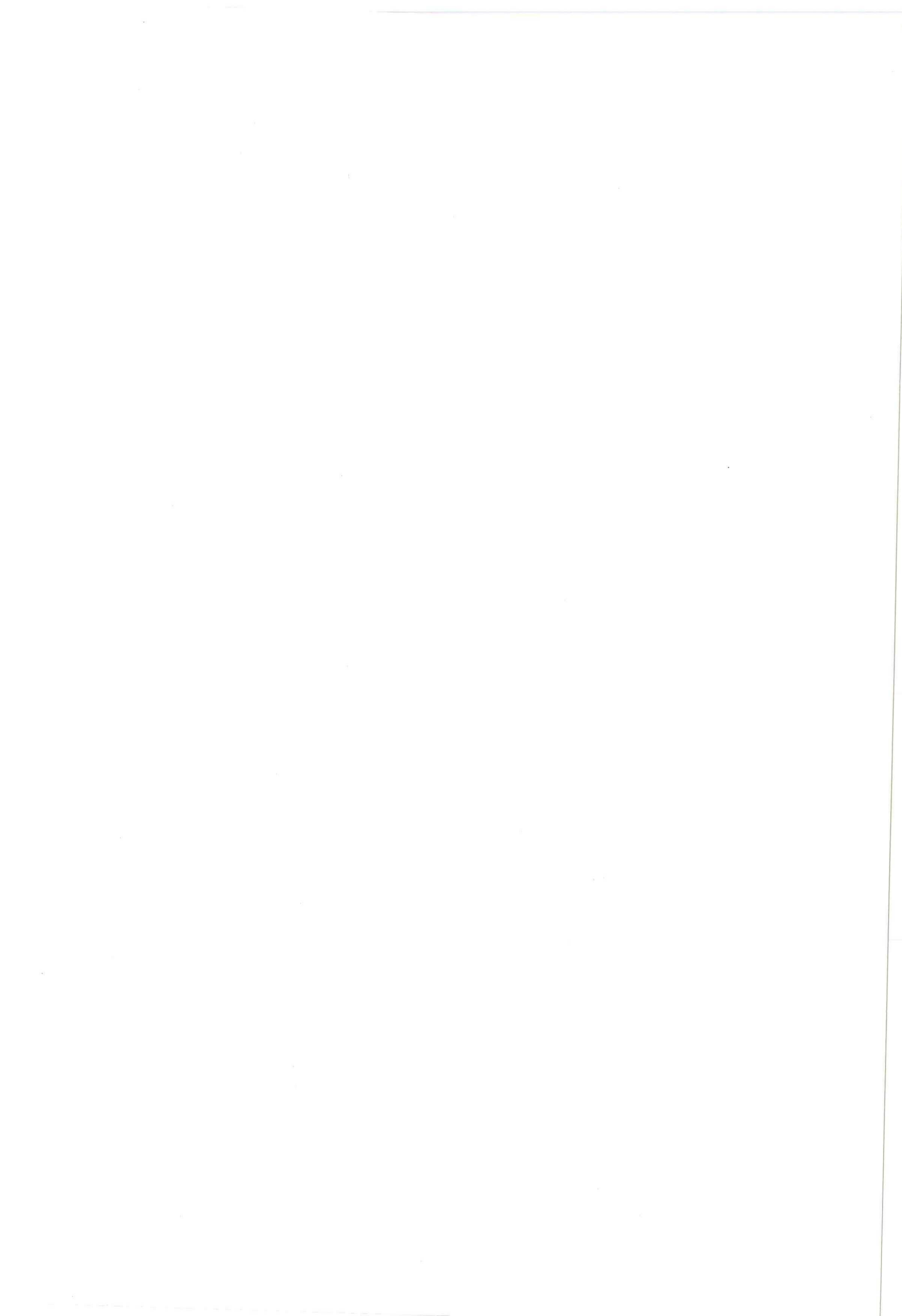
De allereenvoudigste stromingsberekeningen geven resultaten van de goede orde, terwijl tot nu toe slechts publicaties van Schenkel (1) en Dobóczy (11) die een veel minder juiste voorspelling gaven, beschikbaar waren.

Voor het zichtbaar maken van de stromingen en voor het meten van verblijftijdspreidingen zijn voorbereidingen verricht.

Voor het voortzetten van het onderzoek, zowel op experimenteel als op theoretisch gebied worden suggesties gedaan.

Er is een bescheiden verzameling programma's voor berekeningen aan geometrie en stromingen opgebouwd.

- - - - -



INHOUDSOPGAVE

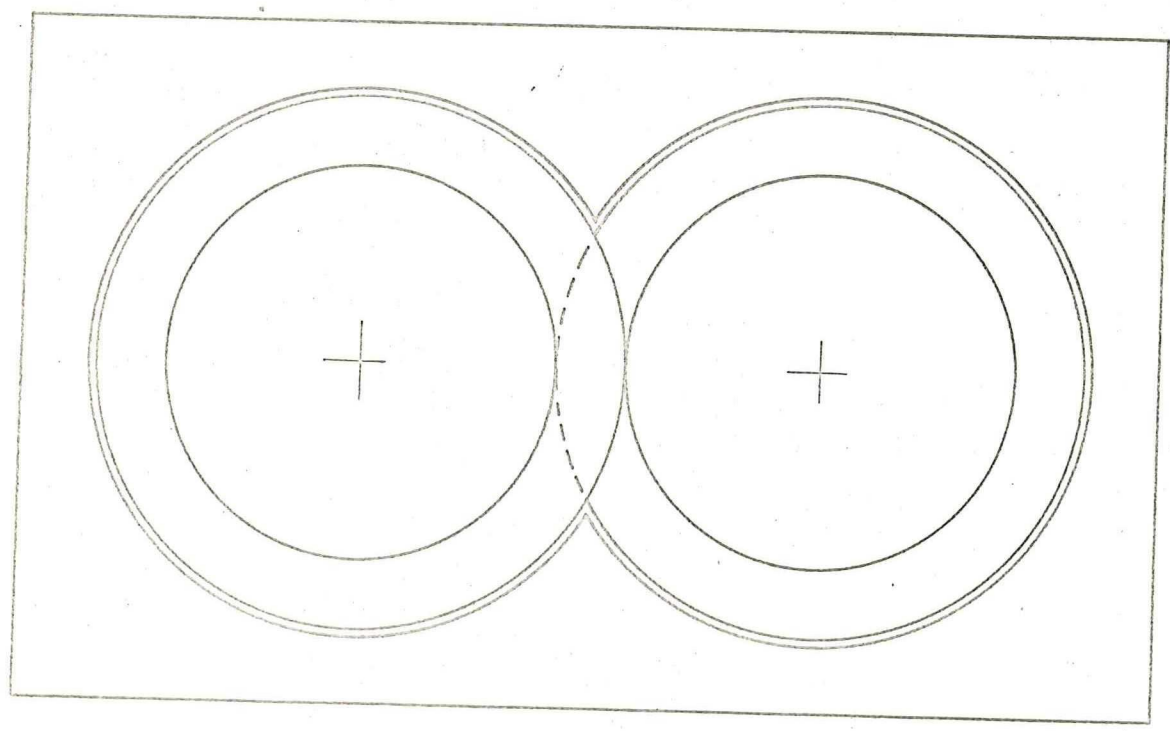
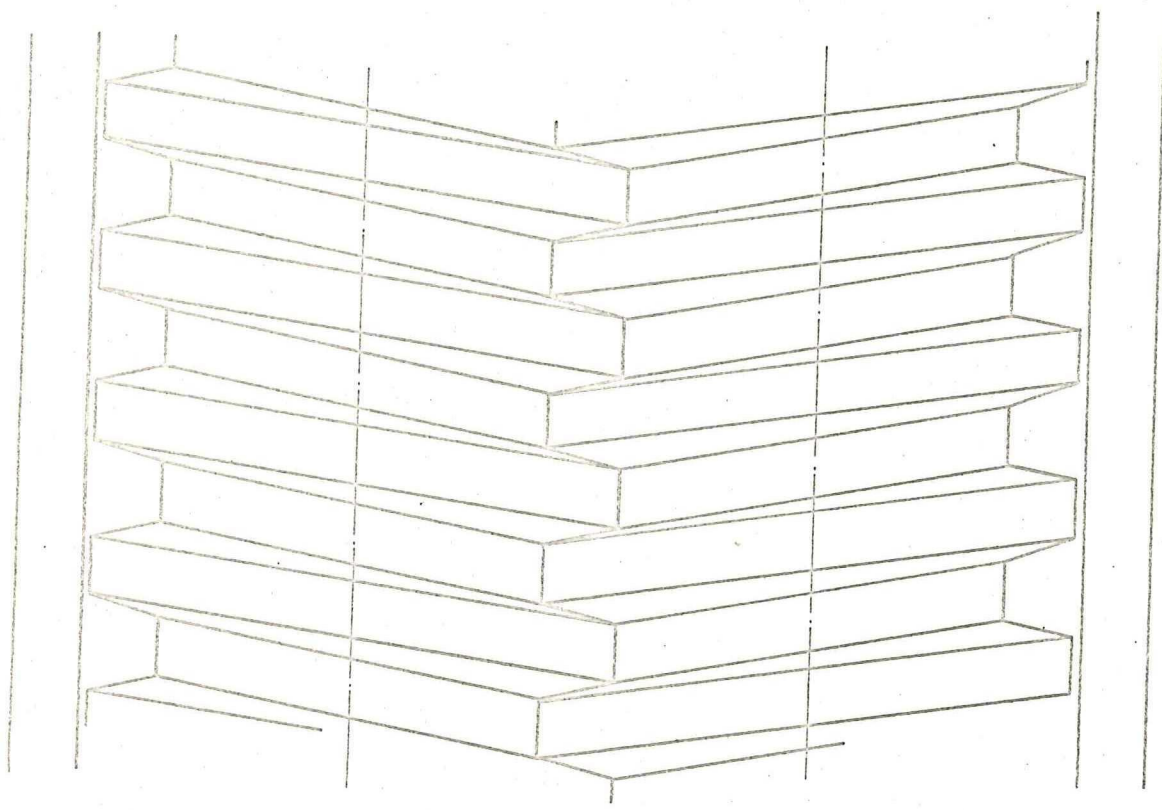
SAMENVATTING

1. INLEIDING EN GEOMETRIE	4
1. 1. Inleiding	4
1. 2. Schroefgeometrie	5
1. 3. Het kamervolume	6
1. 4. De rugspleet	7
1. 5. De calanderspleet	8
1. 6. De tetraëderspleet	8
2. METINGEN	13
2. 1. De meetopstelling	13
2. 2. De meetresultaten	17
3. STROMINGEN EN BEREKENINGEN	20
3. 1. Stromingen in de extruder	20
3. 2. De lek door de rugspleet	21
3. 3. De lek door de calanderspleet	22
3. 4. De stroming door een dwarsdoorsnede van de kamer	25
3. 5. De lek door de tetraëderspleet	28
4. CONCLUSIE EN SUGGESTIES	30
4. 1. Vergelijking van theorie en metingen	30
4. 2. Conclusie	33
4. 3. Suggesties voor voortzetting van het onderzoek	33
APPENDIX A Reactiveerbare tracers	37
APPENDIX B Source listing van de programma's	
Lijst van gebruikte symbolen	40
Literatuur	42





Fig. 1. De dubbelschroefextruder.





## 1. INLEIDING EN GEOMETRIE.

### 1.1. Inleiding.

Hoewel dubbelschroefextruders steeds meer toepassing vinden is naar hun specifieke eigenschappen weinig fundamenteel onderzoek verricht. De voordelen van dubbelschroefextruders ten opzichte van enkelschroefextruders lijken vooral te liggen in de hogere opbrengst en de geringere verblijftijdspreiding. Dit laatste maakt de dubbelschroefextruder in het bijzonder aantrekkelijk voor het verwerken van materialen die gevoelig zijn voor degraderen, zoals polyvinylchloride. Dit materiaal is zeer geschikt om bij de vervaardiging van duurzame extrusieproducten, zoals pijpen, schaarse en vaak giftige metalen als lood en koper te vervangen. Gezien de behoefte aan drinkwaterleiding- en rioleringsstelsels lijkt een goede technologische ondergrond voor dubbelschroefextrusie gewenst. Een dubbelschroefextruder bestaat uit een verwarmd huis waarin twee schroeven in gelijke of tegengestelde richting draaien, zie fig. 1. In het laatste geval is er sprake van een linkse en een rechtse schroef en noemen we de schroeven tegenlopend, in tegenstelling tot meelopend.

Doordat de ruggen van de ene schroef in de gangen van de andere schroef grijpen wordt het doorlopende schroefkanaal van elke schroef steeds onderbroken, aldus vormen zich C-vormige kamers die bij draaiende schroeven in axiale richting bewegen. Volkomen hermetisch sluiten van deze kamers is niet alleen onmogelijk maar ook ongewenst, omdat dit de levensduur van de schroeven beperkt; er moet een compromis gezocht worden tussen levensduur en proceseigenschappen waarbij het wellicht mogelijk is door geschikte schroefvormen beide te dienen.

In de volgende paragrafen worden besproken: de schroefgeometrie, het kamervolume en de drie verschillende lekspleten.





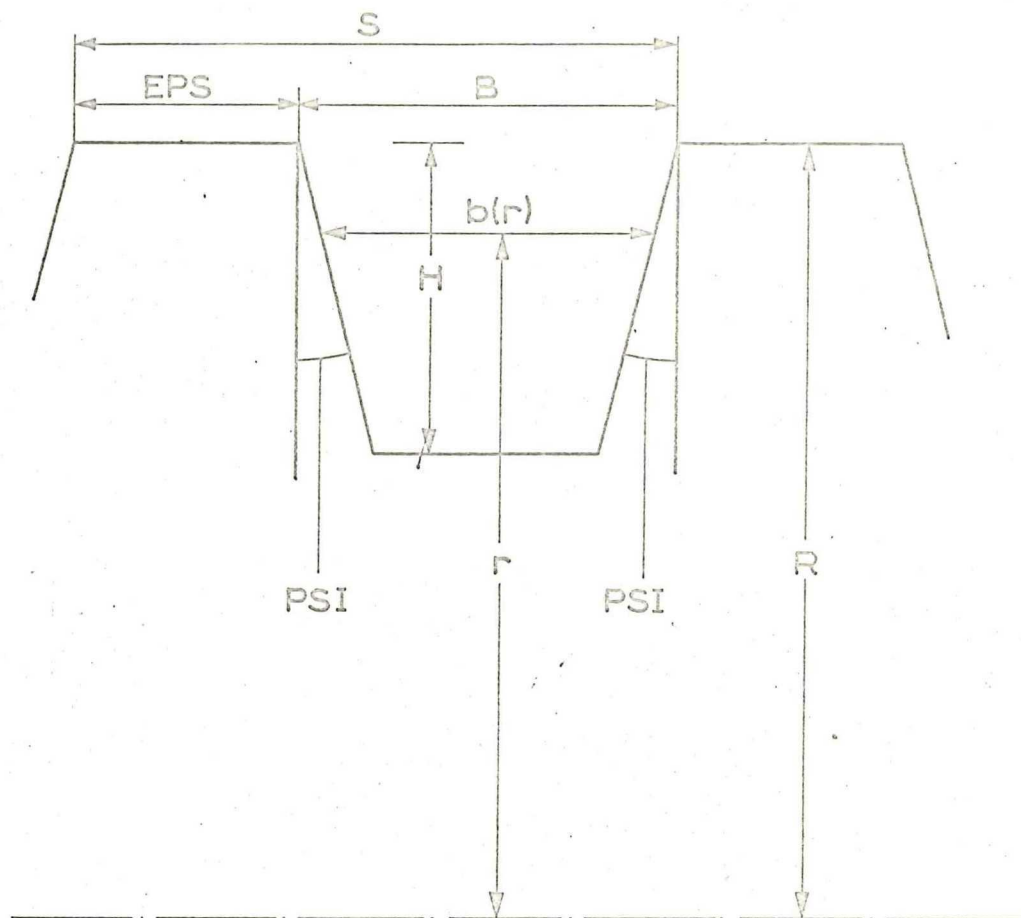


fig.2. De geometrie van trapeziumvormige schroefdraad.

- $S$  = spoed
- $EPS$  = rugbreedte
- $B$  = kamerbreedte
- $H$  = kamerhoogte
- $PSI$  = flankhoek
- $R$  = straal van de schroef.

### 1.2. Schroefgeometrie.

In dit verslag wordt uitgegaan van een symmetrische, trapeziumvormige schroefdraad, rechthoekige draad als grensgeval inbegrepen.

Experimenten en berekeningen zijn uitgevoerd voor tegenlopende schroeven, het is echter eenvoudig om de apparatuur en programma-tuur aan het andere geval aan te passen, terwijl de berekeningen ook uitgevoerd kunnen worden voor schroefdraad waarbij de breedte van de kamer niet lineair met de hoogte verandert. Fig. 2 toont een doorsnijing van de schroef met een vlak door de schroefas.

Er geldt:

$$S = B + EPS. \quad (1.1)$$

Bij zo volledig mogelijk sluitende schroeven geldt tevens:

$$B - 2HtgPSI = EPS, \quad (1.2)$$

dat wil zeggen rug past precies in kamer. B kan echter ook groter zijn, moet dit zelfs zijn bij kleine PSI. Van belang is verder de hoek PHI tussen flank en een vlak loodrecht op de schroefas, aanschouwelijker de hoek die de flank met op de as gemonteerde schijven maakt. Deze schroefhoek is afhankelijk van de straal; er kan niet gezegd worden dat het kanaal een bepaalde hoek met de as maakt. PHI kan gevonden worden door te bedenken dat het zij-aanzicht van een lijn met constante straal op het schroefoppervlak een sinus is, zie fig. 3.

De getekende functie is:

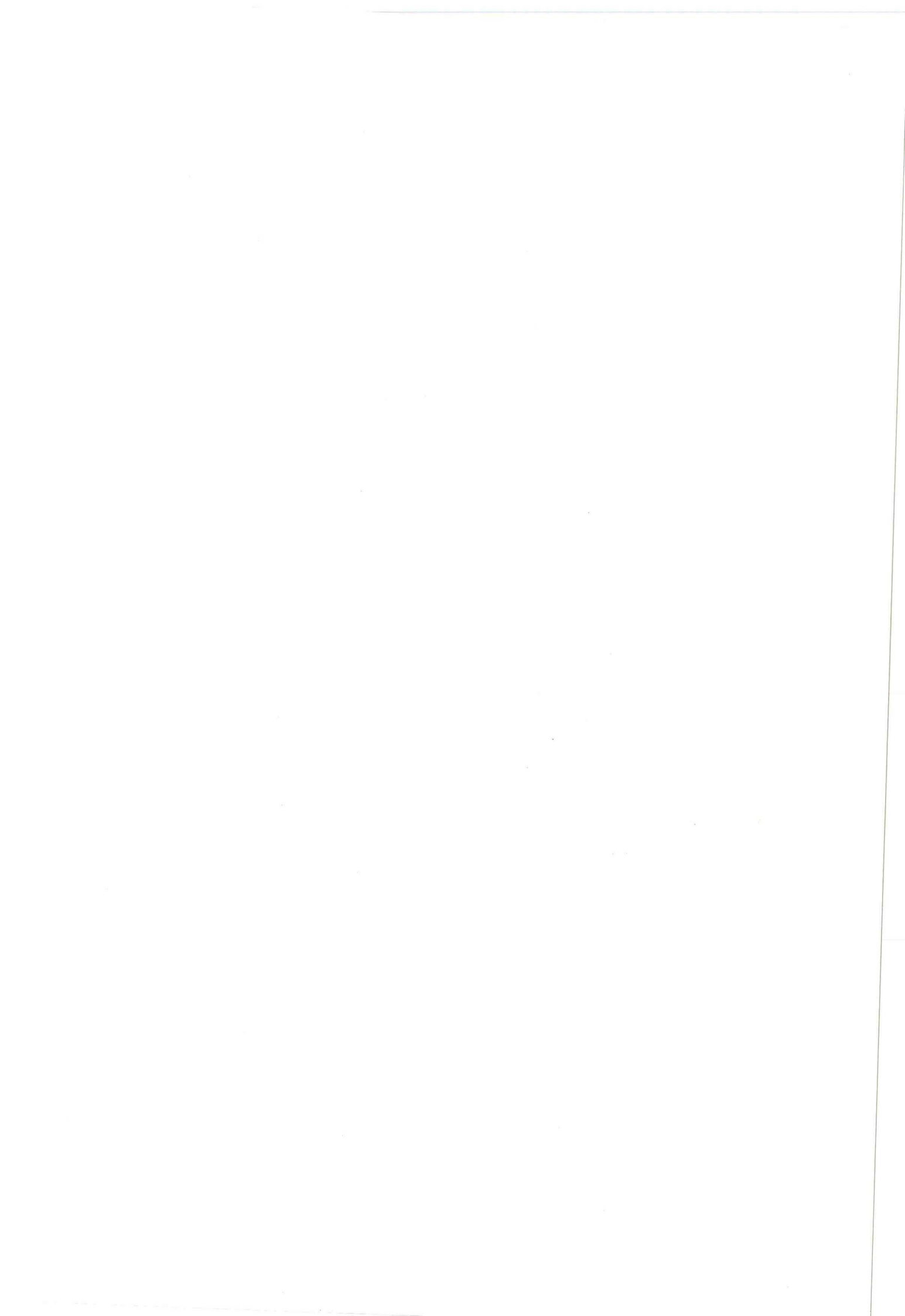
$$F(x) = \frac{D}{2} \sin \frac{2 \pi x}{S} \quad (1.3)$$

Differentiëren geeft

$$\cotg \text{ PHI} = \left( \frac{d F(x)}{dx} \right)_{x=0} = \frac{\pi D}{S} \quad (1.4)$$

ofwel:

$$\text{PHI} = \arctan \frac{S}{\pi D} \quad (1.5)$$





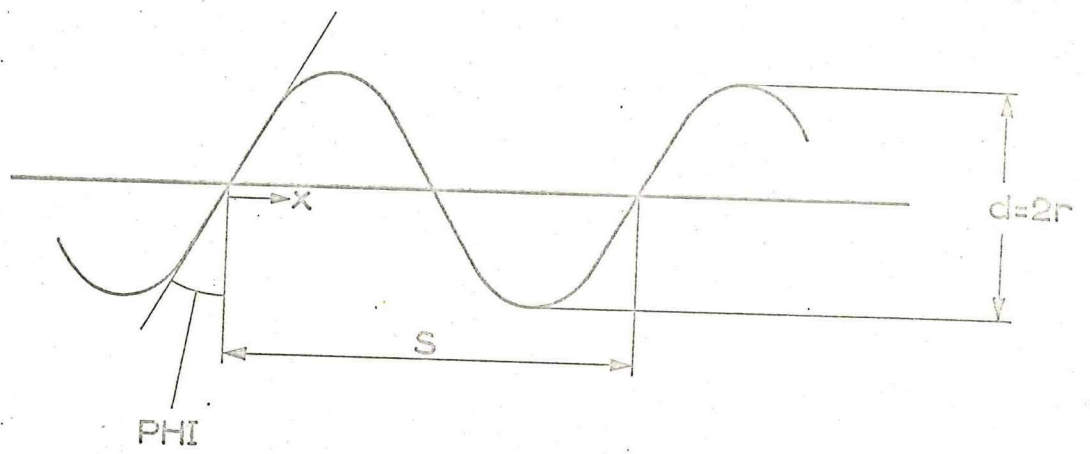


fig.3. Zijaanzicht van een lijn op het schroefoppervlak.





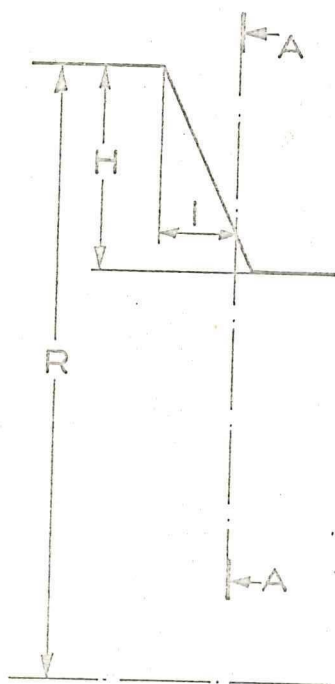
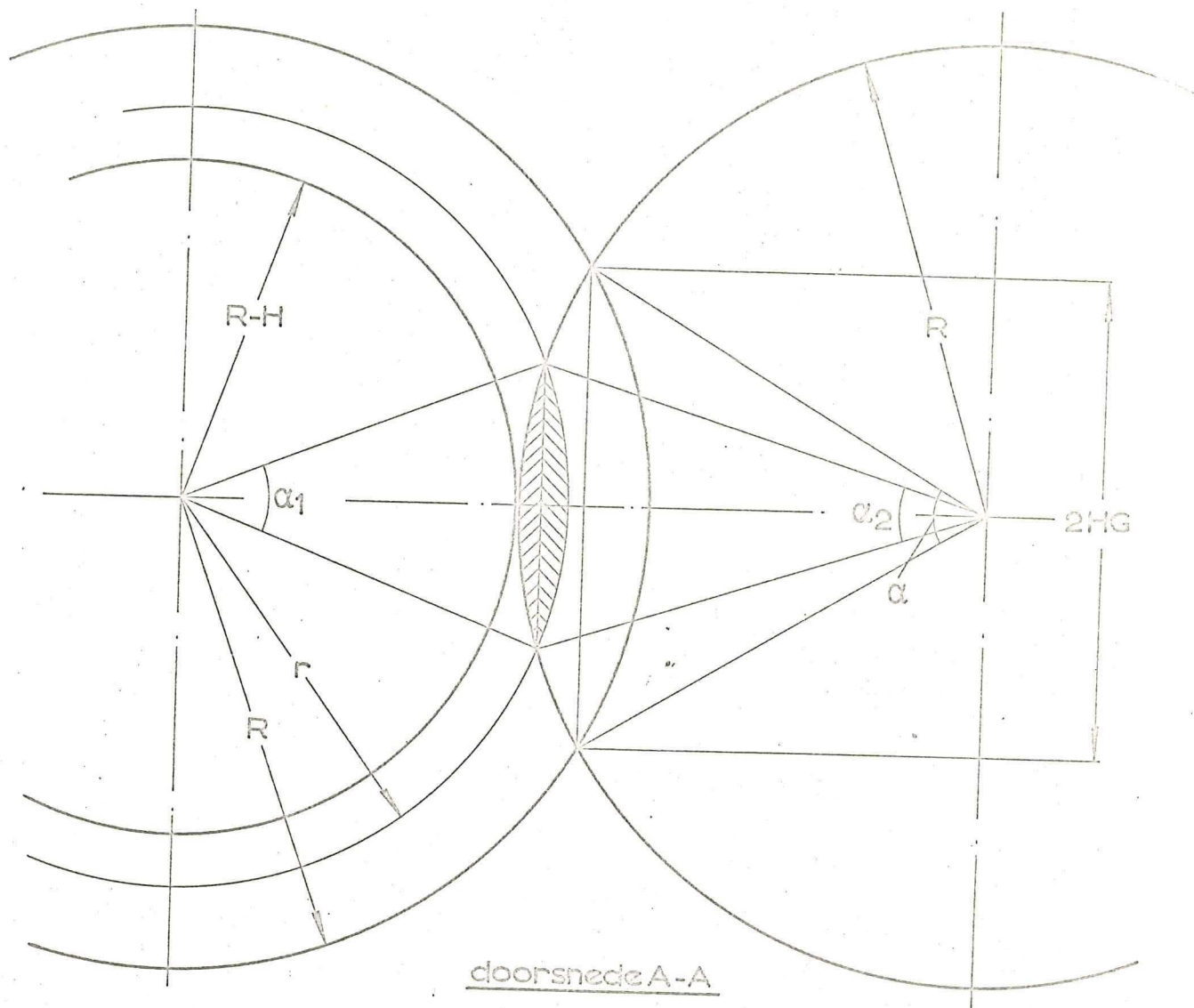


fig.4. Doorsneden door een schijven-  
 model ter berekening van het  
 kamervolume.  
 Gearceerd de overlappingsoppervlakte A.

1.3. Het kamervolume.

Voor het berekenen van het kamervolume V kan het effect van de spoed buiten beschouwing gelaten worden, dit is immers een zuivere afschuiving in axiale richting. Het kamervolume is dan het "volle" volume van de uitgedraaide schijf min het gedeelte dat de tegenoverliggende schijf in de kamer grijpt. Het volle volume is:

$$V_{\text{vol}} = \int_{R-H}^R 2 \pi r b(r) dr, \quad (1.6)$$

hetgeen voor trapeziumvormige draad, waar

$$b(r) = B - 2(R - r) \text{tg PSI}, \quad (1.7)$$

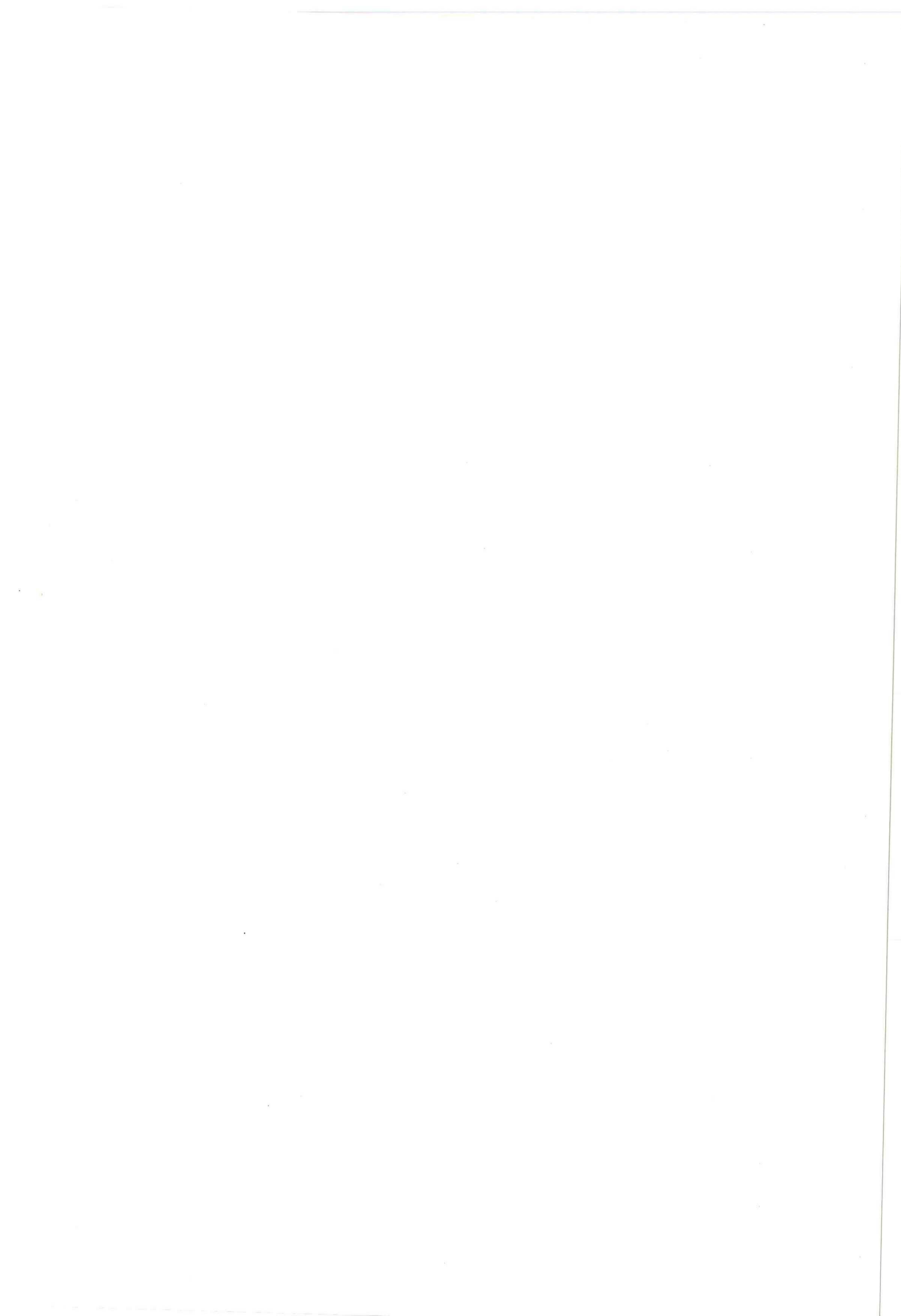
uitkomt op:

$$V_{\text{vol}} = \pi (R^2 - (R-H)^2)(B - 2R \text{tg PSI}) + \frac{4}{3} \pi (R^3 - (R-H)^3) \text{tg PSI}. \quad (1.8)$$

Het ingrijpende gedeelte van de tegenoverliggende schijf is te splitsen in het middengedeelte waar deze schijf de maximale straal  $r = R$  heeft en de twee zijkanten waar de straal toeneemt van  $r = R-H$  tot  $r = R$ , zie fig. 4 waar de linkerschijf op deze wijze in de rechterkamer gaat groeien. Het middengedeelte heeft een volume

$$R^2 (\alpha - \sin \alpha) EPS \quad (1.9)$$

Het volume van de twee kegelgedeelten aan weerszijden hiervan noemen we int en berekenen we als volgt:



$$\text{int} = \int_0^{\text{HtgPSI}} A(l) dl \quad (1.10)$$

$$\text{met} \quad A = \frac{R^2}{2} (\alpha_2 - \sin \alpha_2) + \frac{r^2}{2} (\alpha_1 - \sin \alpha_1) \quad (1.11)$$

$$r = R - \frac{1}{\text{tgPSI}} \quad (1.12)$$

$$\alpha_1 = 2 \arctan \sqrt{\left( \frac{2r(2R-H)}{3R^2 + H^2 - 4RH + r^2} \right)^2 - 1} \quad (1.13)$$

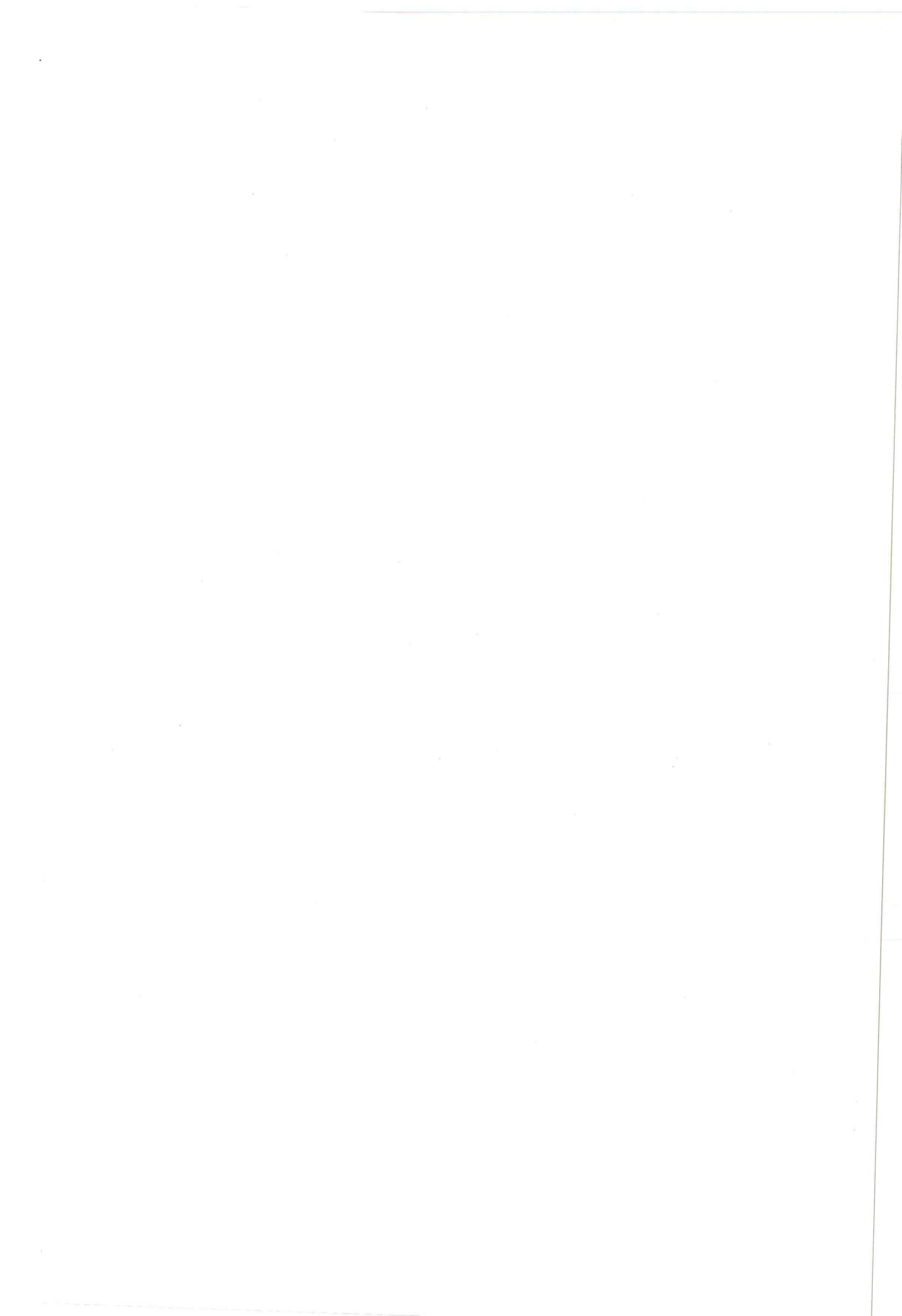
$$\alpha_2 = 2 \arctan \sqrt{\frac{R^2}{\left( 2R - H - \frac{3R^2 + H^2 - 4RH + r^2}{4R - 2H} \right)^2} - 1} \quad (1.14)$$

Analytische integratie is mogelijk, maar moeizaam en nog moeizamer indien  $b$  en dus  $l$  niet lineair van  $r$  afhangt: het programma vol berekent het kamervolume  $V$  alsmede  $\alpha$  en  $HG$ . Schenkel (1) geeft benaderende formules die gelden voor  $\text{PSI} = 0$  en  $H \ll R$ .

#### 1.4. De rugspleet.

Tussen schroefrug en wand zal zich een spleet bevinden die hier verder rugspleet genoemd wordt, zie fig. 5. De spleethoogte is  $\delta$  en de diepte  $EPS$ . Deze spleet treedt ook op bij enkelschroefextruders en is voor dit onderzoek niet interessant.

Het enige verschil is dat de spleet niet over de volle omtrek optreedt, maar per kamer slechts een uitgeslagen lengte  $(2\pi - \alpha)R$  heeft.





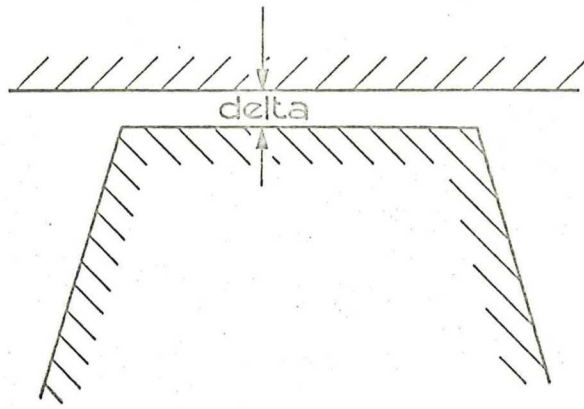


fig.5. De rugspleet.

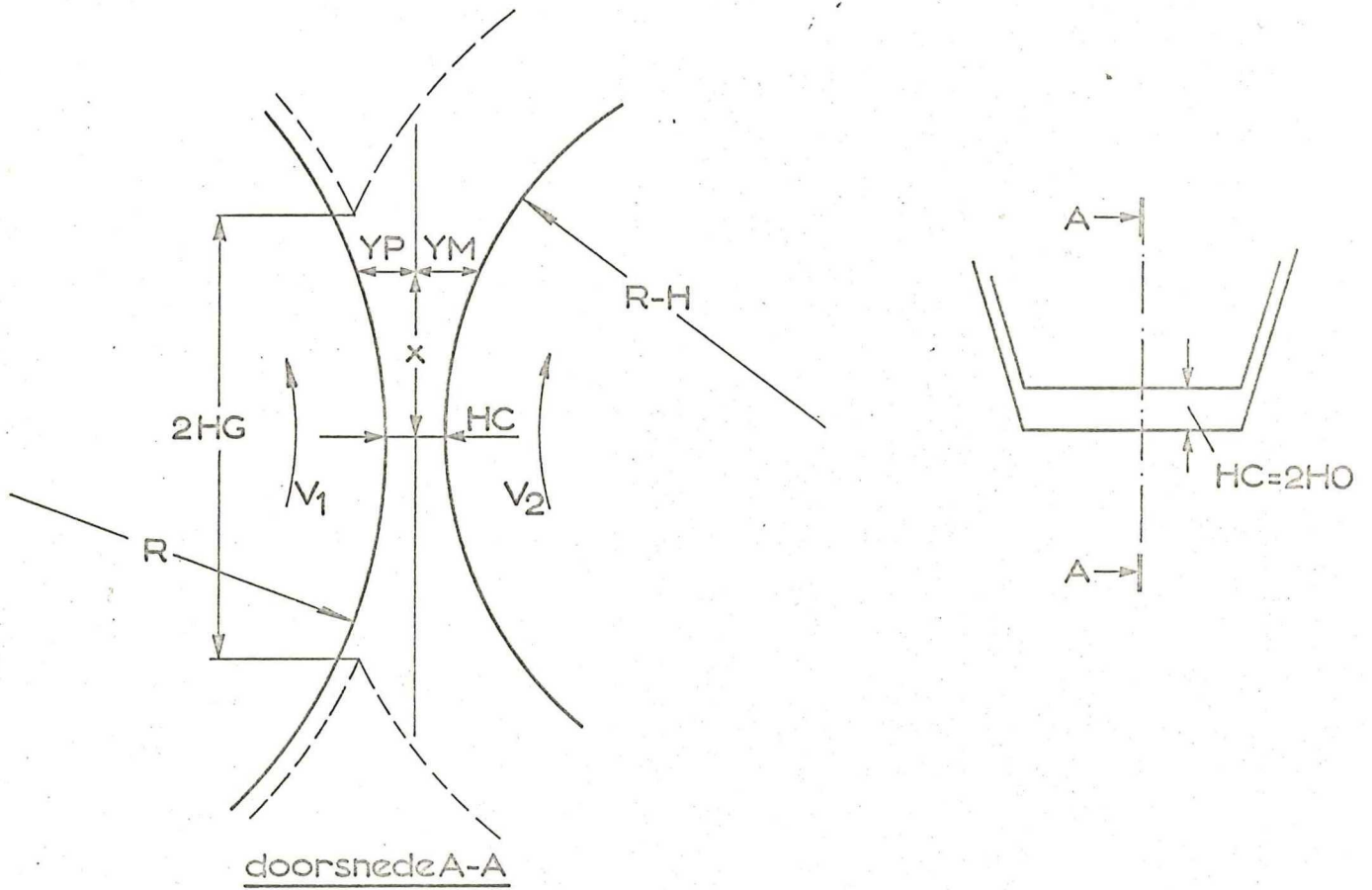


fig.6. De calanderspleet.





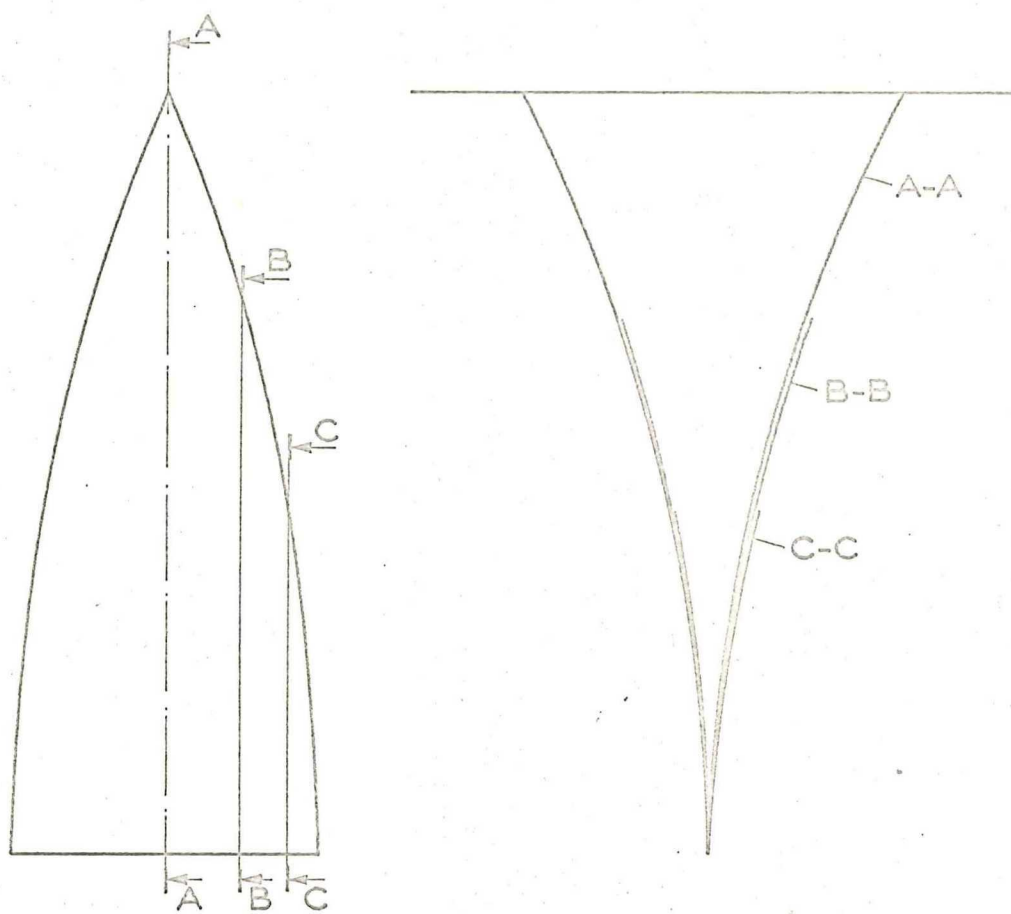


fig.7. Doorsneden door de tetraëderspleet bij een schijvenmodel.

### 1.5. De calanderspleet.

Fig. 6 toont de spleet die zich tussen de rug van de ene en de kamerbodem van de andere schroef bevindt. De minimale spleethoogte wordt HC, of waar dit prettiger werkt  $2 HO$  genoemd. De breedte van de spleet is aan de rugzijde EPS en aan de bodemzijde  $B - 2 H tg PSI$ , bij nauw sluitende schroeven is dit gelijk, in andere gevallen kan het gemiddelde aangehouden worden.

### 1.6. De tetraëderspleet.

De laatste spleet die optreedt is de ruimte die overblijft tussen de twee flanken van in elkaar grijpende schroefruggen.

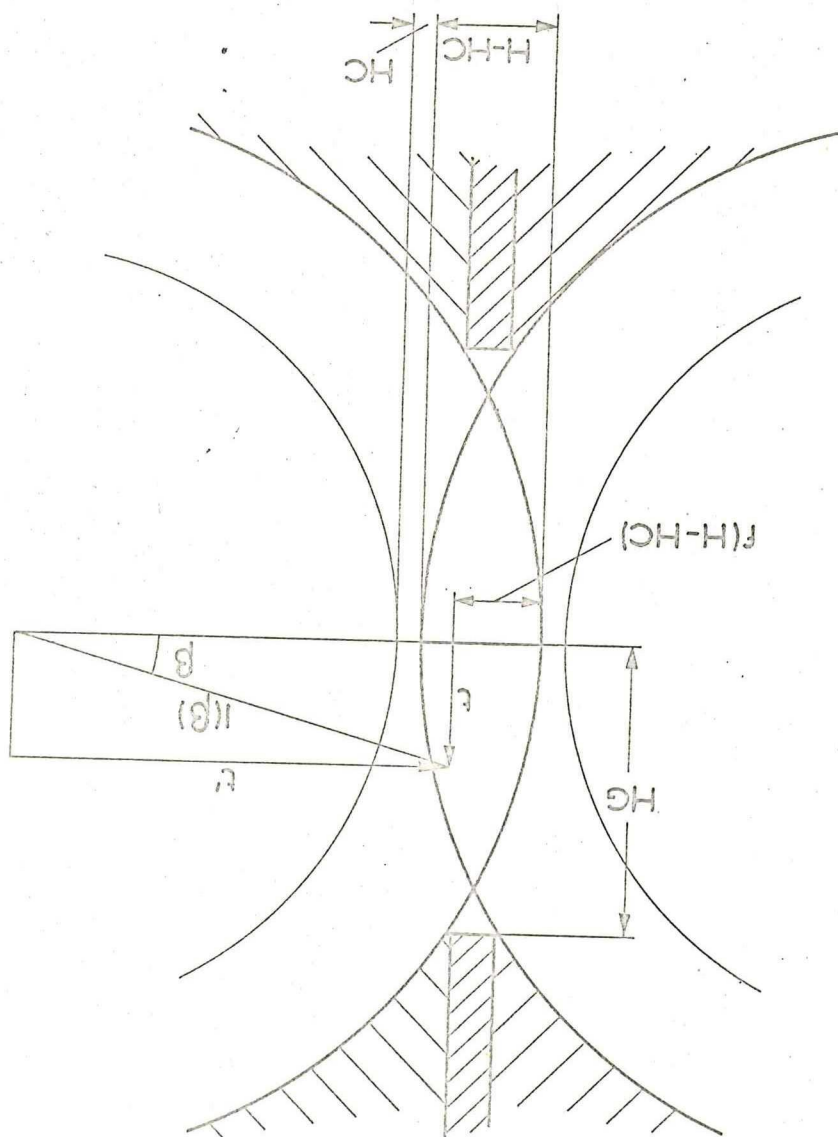
Omdat deze spleet wat moeilijker voor te stellen is wordt eerst een schroef zonder spoed, dat wil zeggen een as met in elkaar grijpende schijven beschouwd.

Stel dat de calanderspleet nul is, de schijfflanken (dit zijn kegeloppervlakken) raken elkaar dan in een lijn in het vlak dat de twee schroefassen verbindt (het horizontale vlak). Zijaanzicht van en doorzicht door deze spleet zijn weergegeven in fig. 7. De twee "zijmuren" van de spleet zijn in het zijaanzicht cirkelsegmenten die in het doorzicht parabolisch uiteenwijken. De bovengrens wordt gevormd door de extruderwand. Omdat de vorm van deze spleet enige gelijkenis met een tetraëder vertoont (boven het breedst en onder het diepst) wordt verder van de tetraëderspleet gesproken. Het is duidelijk dat grotere H de spleet verdiept en verhoogt en dat grotere PSI de spleet verbreedt. Indien nu schroeven in plaats van schijven beschouwd worden en ook de calanderspleet in rekening wordt gebracht, kunnen de grenzen van de spleet vastgelegd worden door de schroeven met een verticaal vlak evenwijdig aan de schroefassen te snijden. De hoogte in het vlak wordt aangegeven door de parameter  $t$  en de plaats van het vlak door de parameter  $f$ , zie fig. 8.





Fig. 8. De berekening van de zijgrenzen van de tetraederspleet.



Als men vanuit het startpunt, dat op de horizontale lijn in fig. 8 ligt, omhoog gaat, maar men blijft op het flankoppervlak, dan treedt er verplaatsing op in de richting loodrecht op het papier.

Allereerst door de spoed van de schroef, deze verplaatsing is onafhankelijk van de straal, maar uitsluitend afhankelijk van de hoek  $\beta$ . Verder treedt verplaatsing in axiale richting op doordat bij het omhooggaan de voerstraal toeneemt, men wandelt als het ware de flank af.

Beide flanken zijn verder al gescheiden door de afstand  $HC \operatorname{tg} \text{PSI} + \frac{1}{2} (B - 2H \operatorname{tg} \text{PSI} - EPS)$ . Het punt op de onderliggende rechterflank beweegt dus "het papier in":

$$BR = HC \operatorname{tg} \text{PSI} + \frac{1}{2} (B - 2H \operatorname{tg} \text{PSI} - EPS) + \left\{ \sqrt{t^2 + (R - f(H - HC))^2} - (R - f(H - HC)) \right\} \operatorname{tg} \text{PSI} + \frac{S}{2\pi} \operatorname{atan} \frac{t}{R - f(H - HC)} \quad (1.15)$$

en de bovenliggende, linkerflank gaat het papier in:

$$BL = - \left\{ \sqrt{t^2 + (R - (1-f)(H - HC))^2} - (R - (1-f)(H - HC)) \right\} \operatorname{tg} \text{PSI} + \frac{S}{2\pi} \operatorname{atan} \frac{t}{R - (1-f)(H - HC)} \quad (1.16)$$

Deze formules gelden voor tegenlopende schroeven, voor meelopende schroeven moet in BL het teken van S omgedraaid worden. Op dit punt aangekomen kan worden ingezien dat tegenlopende schroeven met rechthoekige draad ( $\text{PSI} = 0$ ) nooit perfect ( $HC = 0$ ,  $B = EPS$ ) in elkaar kunnen passen. Beschouw b.v.  $f = 0,25$ . De rechter- respectievelijk linkerflank gaan dan het papier in:

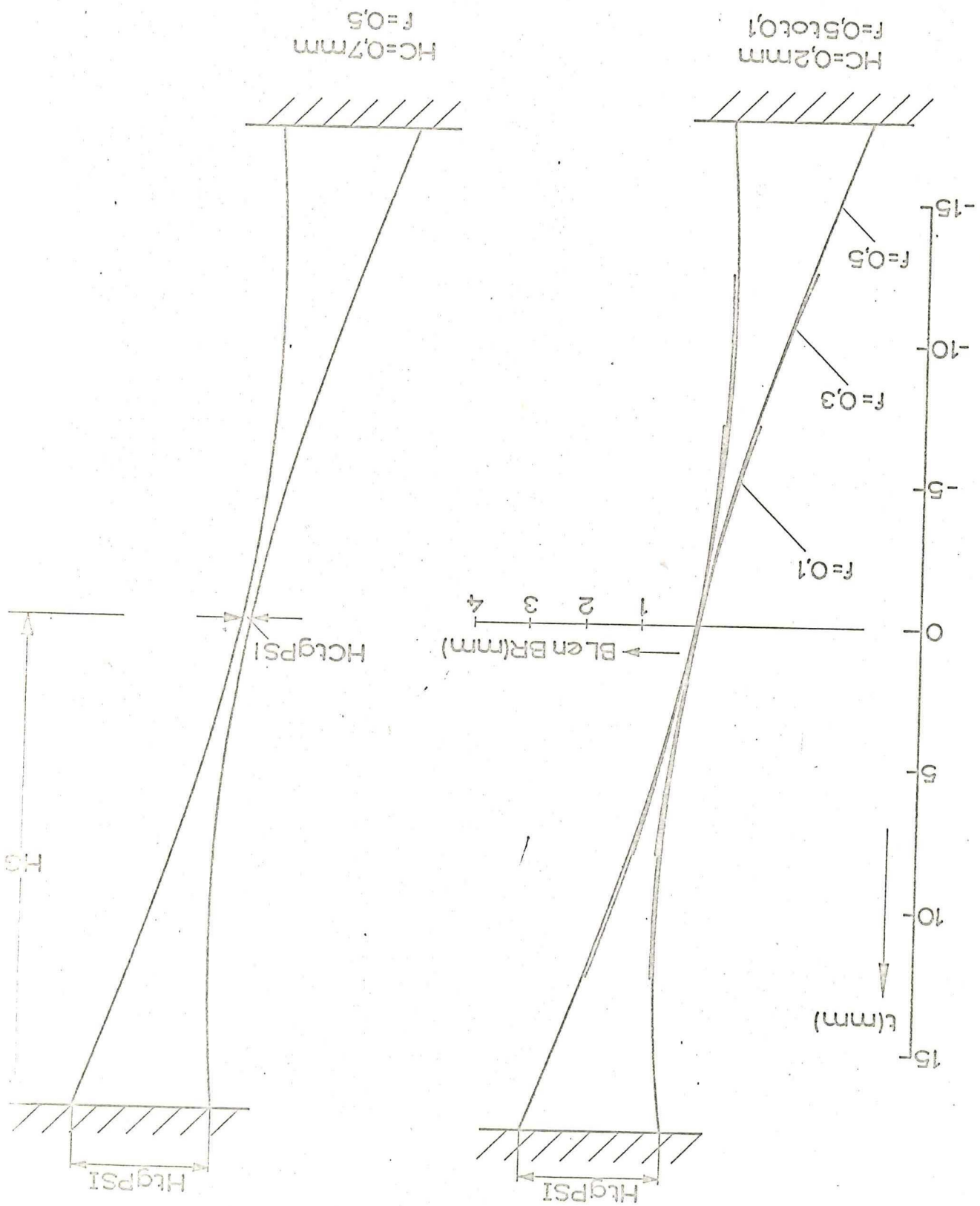
$$BR = \frac{\beta_r S}{2\pi} \quad \text{en} \quad BL = \frac{\beta_l S}{2\pi} \quad (1.16a)$$







Fig. 9. Doorsneden door de tetraëderspleet bij twee verschillende calanderspleeten.



Het is duidelijk dat  $\beta_1$  groter is dan  $\beta_r$  dus de bovenliggende flank zou de onderliggende snijden.

Dit effect is het sterkst voor  $f$  is bijna 0 en voor  $f$  is bijna 1, het kan opgevangen worden door  $B$  groter dan  $EPS$  te nemen en/of door  $PSI$  te vergroten en als  $PSI$  eenmaal groter dan nul is door  $HC$  te vergroten.

Meelopende schroeven dreigen elkaar ook voor  $f = 0,5$  te snijden, namelijk voor negatieve  $t$ . Hiertegen kunnen dezelfde maatregelen genomen worden, die echter voor positieve  $t$  een zeer brede spleet tengevolge hebben. Dit zal de kanaaldiepte  $H$  (die immers de hoek  $\alpha$ , dat is de maximale hoek  $\beta$  bepaalt) sterk beperken waardoor een van de specifieke voordelen van dubbelschroefextruders verloren gaat.

Fig. 9 toont de doorsnede van de tetraëderspleet voor verschillende  $f$ 's en voor twee verschillende calanderspletten voor de schroefgeometrie zoals die bij de experimenten gebruikt is, zie hoofdstuk 2.

Zoals blijkt convergeert de spleet iets, maar dit is gering. Een grotere calanderspleet verlaagt en verbreedt de tetraëderspleet. Een ander punt is nog dat de doorgang door de tetraëderspleet niet loodrecht op de schroefassen staat, in fig. 9 zouden de doorsnijdingen voor verschillende  $f$ 's eigenlijk steeds in horizontale richting verschoven getekend moeten worden. Voor  $t = 0$  is onmiddellijk in te zien dat de hoek van de wand met de loodlijn door de schroefassen  $PSI$  bedraagt. Voor  $t$  ongelijk aan nul kunnen de hoeken die spleetwanden (de flanken) met het vlak loodrecht op de schroefassen maken berekend worden door de flanken te snijden met een horizontaal vlak op hoogte  $t$  boven de schroefassen (dit komt neer op een verwisselen van rol van  $t$  en  $f$ ) en de aldus verkregen krommen te differentiëren naar  $t'$  in het punt  $t$ ,  $R - f (H - HC)$  zie fig. 8.



De krommen worden gegeven door:

rechterflank:

$$BR' = \left\{ \sqrt{t'^2 + t^2} - \sqrt{(R-f(H-HC))^2 + t^2} \right\} \text{tgPSI} +$$

$$\frac{S}{2\pi} \left\{ \text{atan} \frac{R-f(H-HC)}{t} - \text{atan} \frac{t'}{t} \right\} + H C \text{tgPSI} +$$

$$\frac{1}{2} ( B - 2H \text{tgPSI} - EPS ) \quad ( 1.17 )$$

en de linkerflank:

$$BL' = - \left\{ \sqrt{(2R-(H-HC) - t')^2 + t^2} - \sqrt{(R-(1-f)(H-HC))^2 + t^2} \right\} \text{tgPSI} +$$

$$\frac{S}{2\pi} \left\{ \text{atan} \frac{R-(1-f)(H-HC)}{t} - \text{atan} \frac{2R-(H-HC) - t'}{t} \right\} \quad ( 1.18 )$$

Differentiëren naar  $t'$ , substitueren  $t' = R - f \cdot (H - HC)$  en de arctangens nemen levert voor de hoeken op:

rechterflank:

$$\text{atan} \left\{ \frac{R-f(H-HC)}{\sqrt{t^2 + (R-f(H-HC))^2}} \text{tgPSI} - \frac{S}{2\pi} \frac{t}{t^2 + (R-f(H-HC))^2} \right\} \quad ( 1.19 )$$

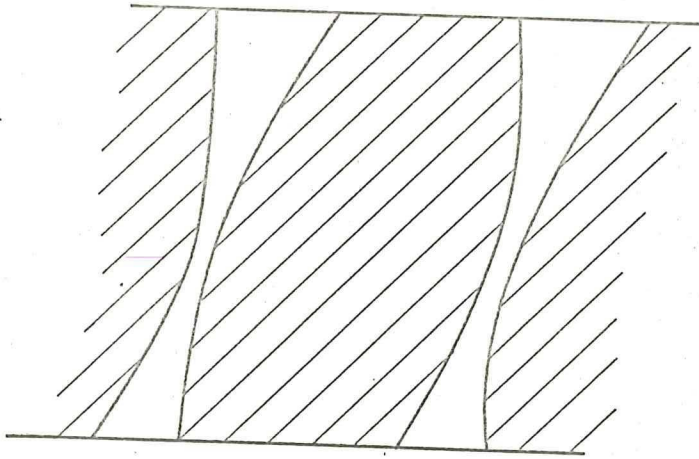
linkerflank:

$$\text{atan} \left\{ \frac{R - (1-f)(H-HC)}{\sqrt{t^2 + (R - (1-f)(H-HC))^2}} \text{tgPSI} + \frac{S}{2\pi} \frac{t}{t^2 + (R - (1-f)(H-HC))^2} \right\} \quad ( 1.20 )$$

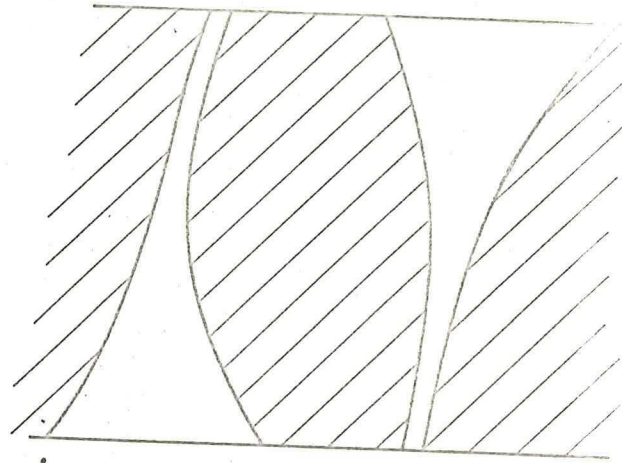
Het programma tetrac berekent zowel de grenzen van de tetraëder-  
spleet als de beide hoeken en hun cosinussen in een te kiezen  
aantal stappen voor  $t$  ( $t$  loopt van  $-HG$  tot  $HG$ ) en voor elke gewenste  $f$ .







tegenlopende schroeven



meelopende schroeven

fig.10. De tetraëderspletten vanuit de kamer gezien.



Het programma kan gebruikt worden om snel de invloed van variabelen in de schroefgeometrie op de tetraëderspleet te onderzoeken en om te testen of een gewenste geometrie mogelijk is. Nog sneller werken is mogelijk door de tetraëderspleet te laten plotten. Voor niet trapeziumvormige draad kan het programma aangepast worden door de termen waar  $\text{tg } \psi$  als faktor optreedt te corrigeren. Wellicht ten overvloede geeft fig. 10 een beeld van de vier tetraëderspleeten vanuit de kamer gezien, voor tegen- en voor meelopende schroeven.



## 2. METINGEN.

### 2.1. De meetopstelling.

Voor de metingen werd gebruikt gemaakt van een extrudermodel met perspex mantel, zie fig. 11 t/m 13.

Dit model biedt de mogelijkheid na toevoegen van een geschikte tracer de stromingen en het mengproces in de extruder waar te nemen. De perspex mantel bestaat uit twee helften die elk een schroef bevatten en waartussen in dikte oplopende vulplaten kunnen worden aangebracht, om aldus de calanderspleet HC te variëren. De voor het vervangen van een vulplaat benodigde de- en montage van de extruder vergt na enige oefening ongeveer een dag. Hierbij dient de grootst mogelijke zorgvuldigheid in acht te worden genomen, opdat geen vuil in de extruder valt en de schroeven bij montage niet op elkaar botsen, hetgeen onmiddellijk butsen in de schroeven en krassen in de mantel tengevolge zou hebben.

Voor aan- en afvoer van de modelvloeistof werden sertokkoppelingen op het huis aangebracht, zodat de reservoirs met modelvloeistof snel aan- en losgekoppeld kunnen worden. De twee uitgangen werden via een zorgvuldig symmetrisch en enigszins flexibel (om de verschillen in HC te kunnen overbruggen) uitgevoerd T-stuk tot één stroom samengevoegd. Een in deze leiding bij wijze van spuitkop aangebracht naaldventiel biedt de mogelijkheid de uitgang gedeeltelijk te sluiten om druk te kunnen opbouwen. Er werd voor gekozen om de tegenlopende schroeven aan bovenzijde uit elkaar te laten draaien omdat dit, vanwege de voordelen in de vaste- stof transportzone, veelal wordt toegepast.

Het opvangreservoir van de modelvloeistof werd op een weegschaal geplaatst en met een zeer flexibele rubberslang aan de extruder verbonden. Op de weegschaal werden bepaalde trajecten met een gecontroleerde gewichtendoos geijkt. In combinatie met een stopwatch was het op die manier mogelijk om het debiet te meten.

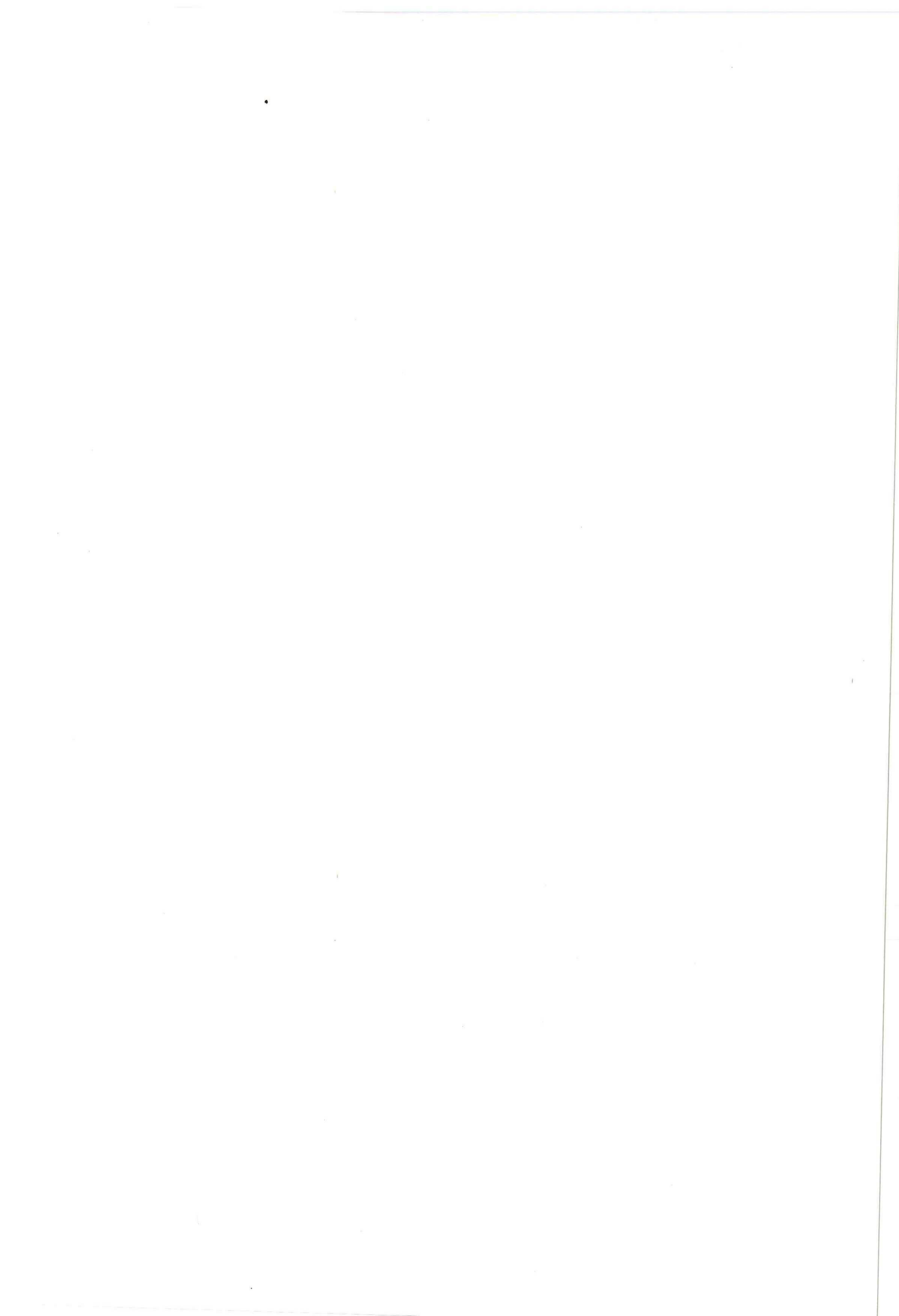
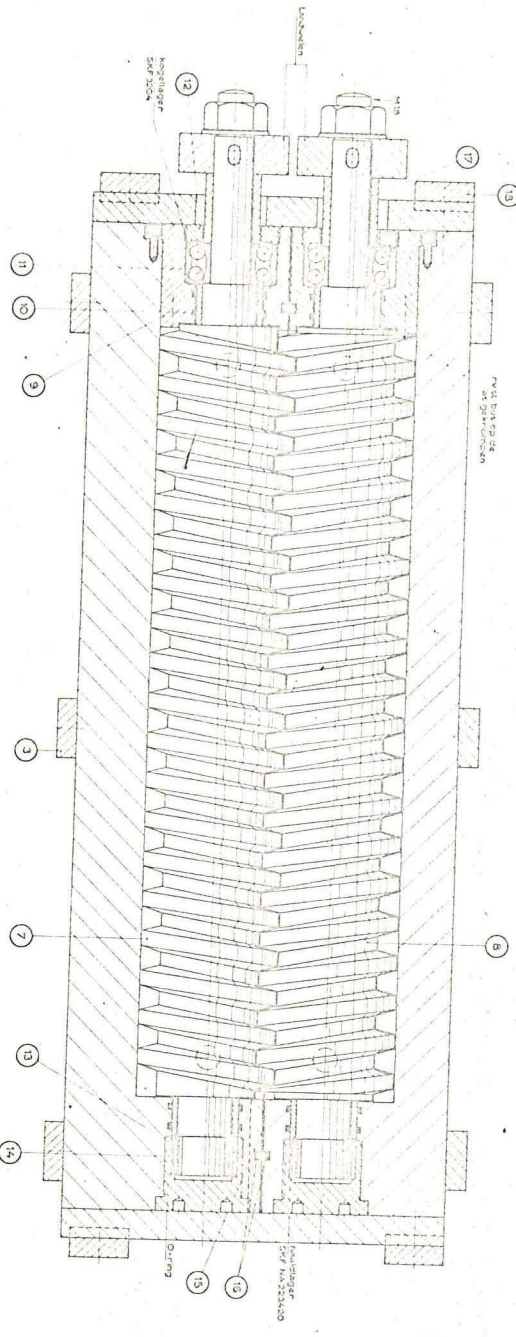
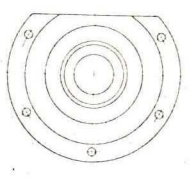
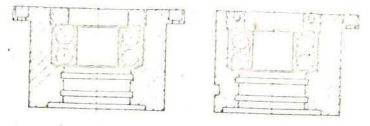




Fig. 11. Het extrudemodel.



Lab voor fys-technische T.M. inst. van d'1913

Dielectric warm extruder

Code	Product No.	Year	Construction
1	1	1913	1
2	2	1914	2
3	3	1915	3
4	4	1916	4
5	5	1917	5
6	6	1918	6
7	7	1919	7
8	8	1920	8
9	9	1921	9
10	10	1922	10
11	11	1923	11
12	12	1924	12
13	13	1925	13
14	14	1926	14
15	15	1927	15
16	16	1928	16
17	17	1929	17

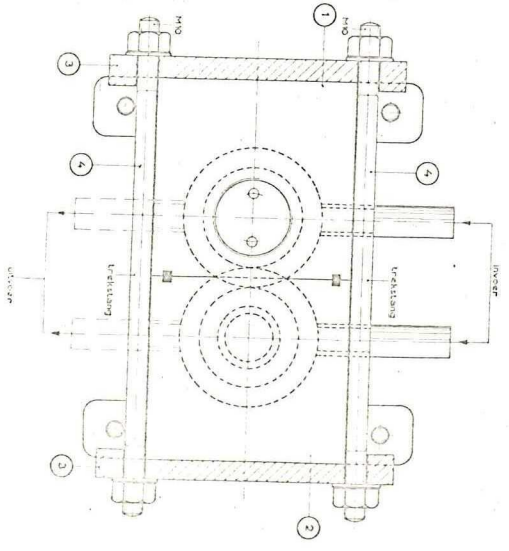
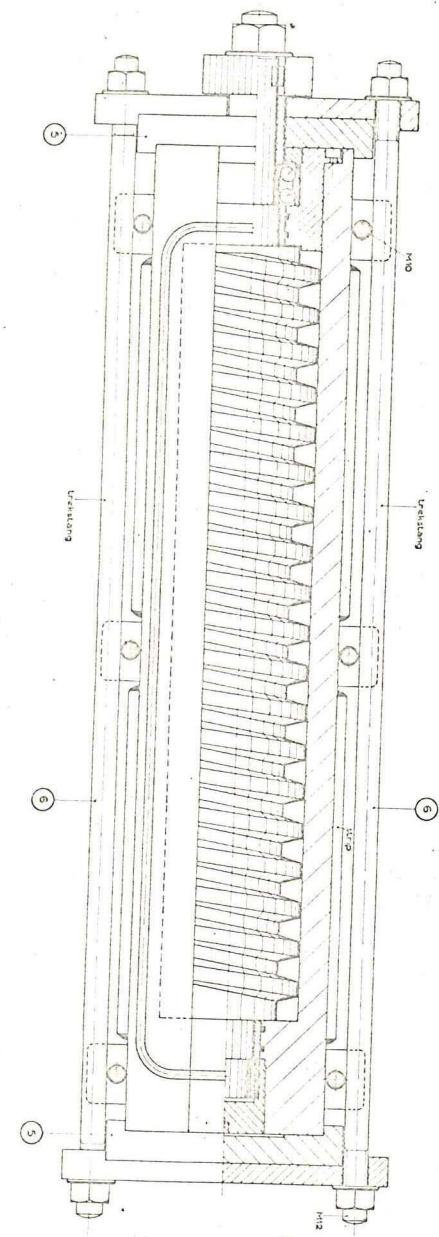
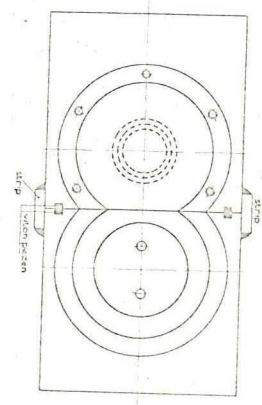
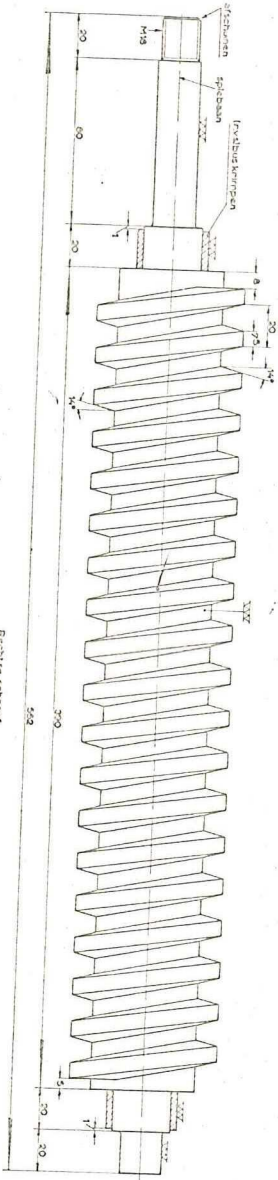
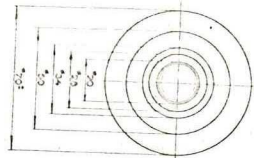
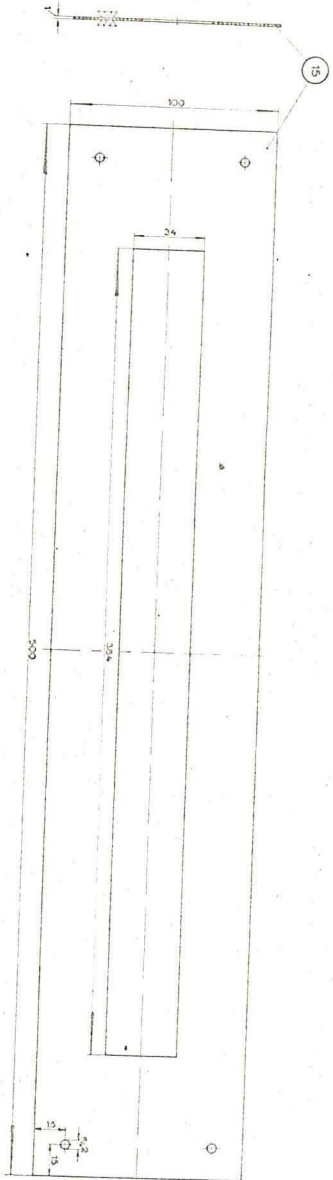
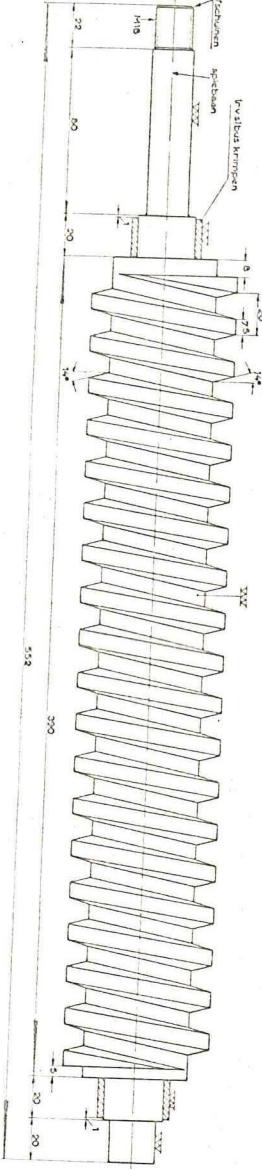
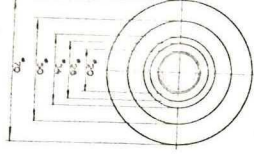
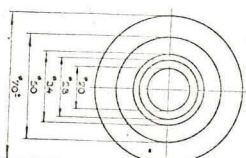




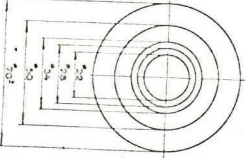
Fig. 12. Het extrudemodel.



Rechtige schroef  
 metlen mm  
 met 11,00  
 zand 12,00  
 zee zand 12,00



Rechtige schroef  
 metlen mm  
 met 11,00  
 zand 12,00  
 zee zand 12,00







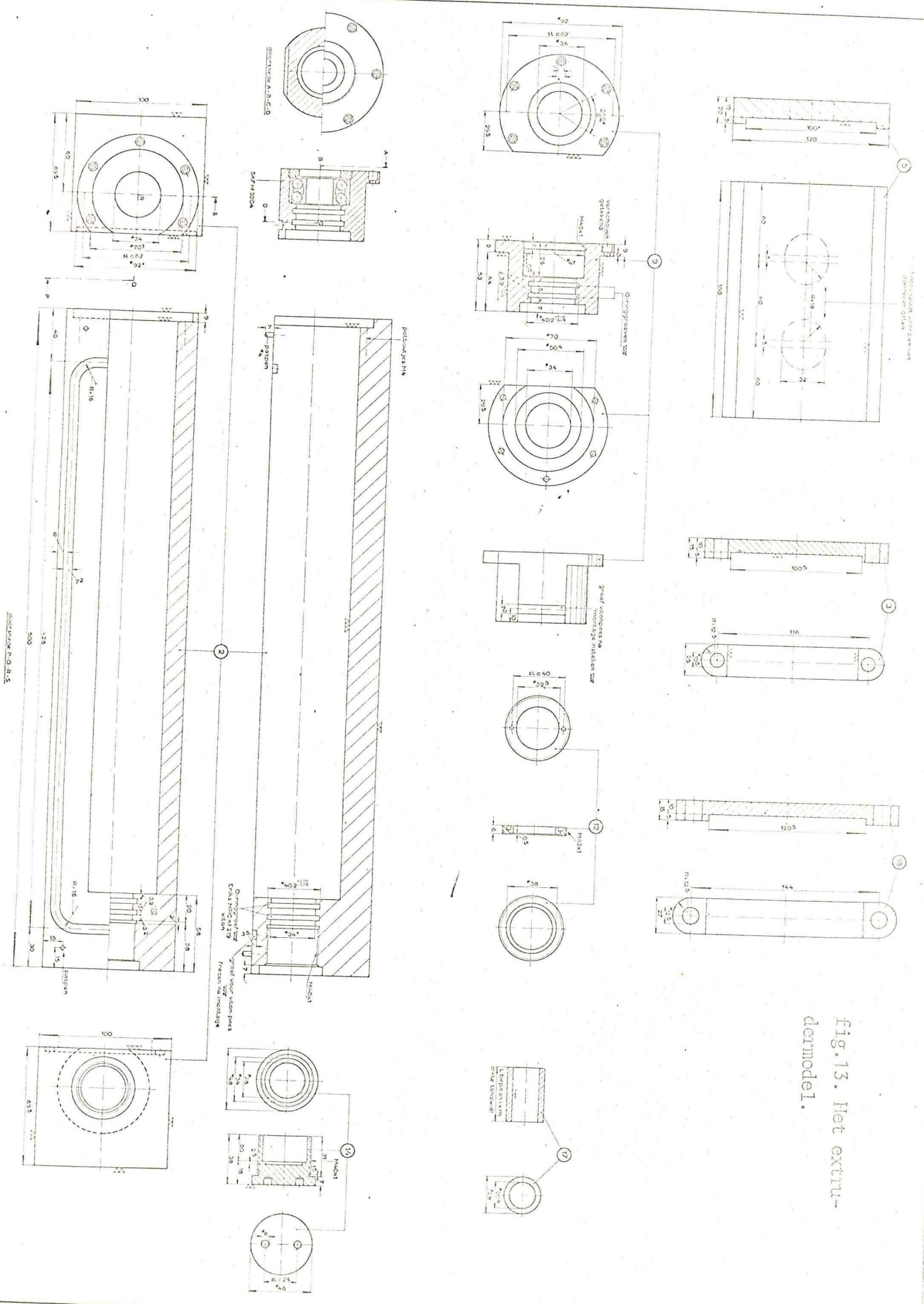


fig.13. Het extru-  
dermodel.

disinfectant, R.G. R.S.

Edinocit, E.L. S.S.E.L. 1.1



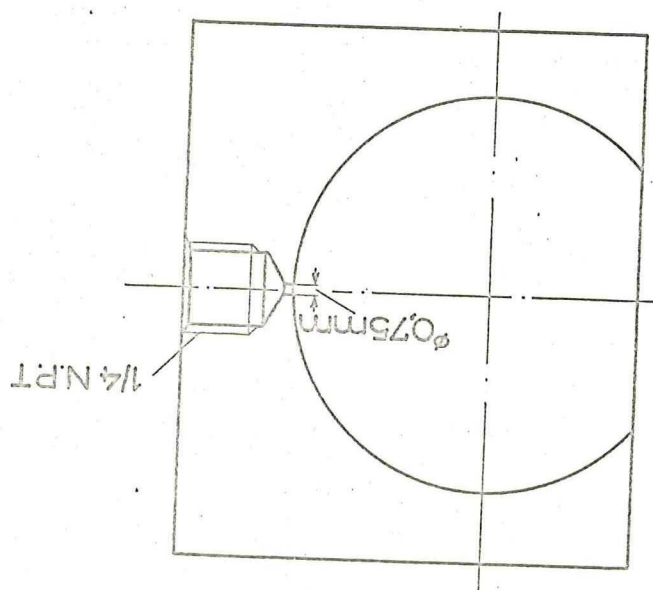


Fig. 14. De montage van de drujmeters.

De aandrijving van de extruder geschiedde door een synchronomotor via een traploos regelbare variator en een 1 op 10 vertragende tandwielkast. Het toerental van de extruder kan hiermee gevarieerd worden van 0 tot 0,83 Hz, daarboven gaat de opstelling te sterk vibreren. Omdat een van de schroeven na het vernikkelen (chemisch werd een laag van  $20 \mu$  nikkel opgebracht in verband met plannen om te gaan werken met PVP-oplossingen in water) tijdens het draaien een "zwaar punt" vertoonde nam het toerental van de extruder per omwenteling éénmaal snel toe en af; de belastingsvariatie door het zware punt kon niet door de variator opgevangen worden. Deze toerentalvariatie werkte onmiddellijk door in de op een recorder geregistreerde druk, aanvankelijk zo sterk dat een RC-demping op de ingang van de recorder moest worden toegepast. Na omzetten van de aandrijving op de andere schroef (wijzigde de draairichting van de variator), vervangen van de variator en verfijnen van de uitlijning van de extruder was het uitschieten van de druk tot redelijke proporties teruggebracht. Ook onzuiverheden in de tandwielkast, waarschijnlijk excentriciteit van één der assen, waren als een golf met periode 10 maal het toerental van de extruder duidelijk op de recorder te herkennen.

Uiteraard blijft altijd de drukvariatie tijdens het passeren van een schroefrug bestaan; dit werd benut om het toerental van de extruder te meten.

De drukmeting geschiedde door Kulite drukmeters in de zijkant van het extruderhuis aan te brengen. De hiertoe benodigde gaten, zie fig. 14, waren in de ene helft van het huis bij begin en eind van de schroef geplaatst en in de andere helft bovendien op  $1/3$  en  $2/3$  van de schroeflengte.

De drukmeters bestaan uit een klein membraan, waarop als rekstrookjes uitgevoerde weerstanden, geschakeld in een brug van Wheatstone zijn aangebracht. De afgegeven spanning van rond 90 mV bij de maximale druk van 3,5 ato werd op Honeywell recorders geregistreerd.



Bij de opstelling werd een open kwikmanometer met sertokkoppeling geplaatst om snel de drukmeters met behulp van perslucht te kunnen ijken en herijken zonder dat verwijderen uit de extruder nodig was. De door de drukmeters afgegeven spanning liep zeer lineair met de druk op, de fouten tegevolge van niet lineariteit en hysteresis bleven ruimschoots binnen de door de fabrikant opgegeven marge van 1% volle schaaluitslag.

Fig. 15 t/m 18 geven de ijklijnen voor de vier gebruikte drukmeters. De temperatuurafhankelijkheid bedroeg volgens de fabrikant 2 % per graad C hetgeen tot een fout van ongeveer 10% kan leiden. Na elke demontage van de extruder moesten de kamers van de drukmeters ontlucht worden, dit geschiedde door de extruder in de opstelling te monteren, te vullen, uit de opstelling te halen en op een zijkant te plaatsen, waarna door voorzichtig en langzaam de drukmeters iets in en uit hun gaten te draaien de opstijgende lucht verdreven kon worden.

Als modelvloeistof werd siliconenolie gekozen vanwege het newtons gedrag, de grote reeks van verkrijgbare viscositeiten, de grote helderheid en de tamelijk geringe temperatuurafhankelijkheid van de viscositeit, zie fig. 19 waaruit overigens blijkt dat bij een temperatuurschommeling van 5 C toch nog met een viscositeitsvariatie van 10% gerekend moet worden.

Nadelen van siliconenolie zijn de kostbaarheid en de lage oppervlaktespanning. Gebruikt werden de viscositeiten 0,1, 0,2 en 0,5 Ns/m<sup>2</sup>, die alle goed handelbaar waren, dat wil zeggen dat ingesloten luchtbelletjes binnen enkele uren weer verdwenen waren. Dichtheden werden gemeten met de arëometer, viscositeiten met de viscosimeter volgens Ubbelohde waarbij in de viscositeit inderdaad verschillen tot 10% van het gemiddelde werden geconstateerd.

Bij het overgaan op een andere viscositeit werden de reservoirs met ether uitgespoeld en een etmaal met gefilterde perslucht doorgeblazen.







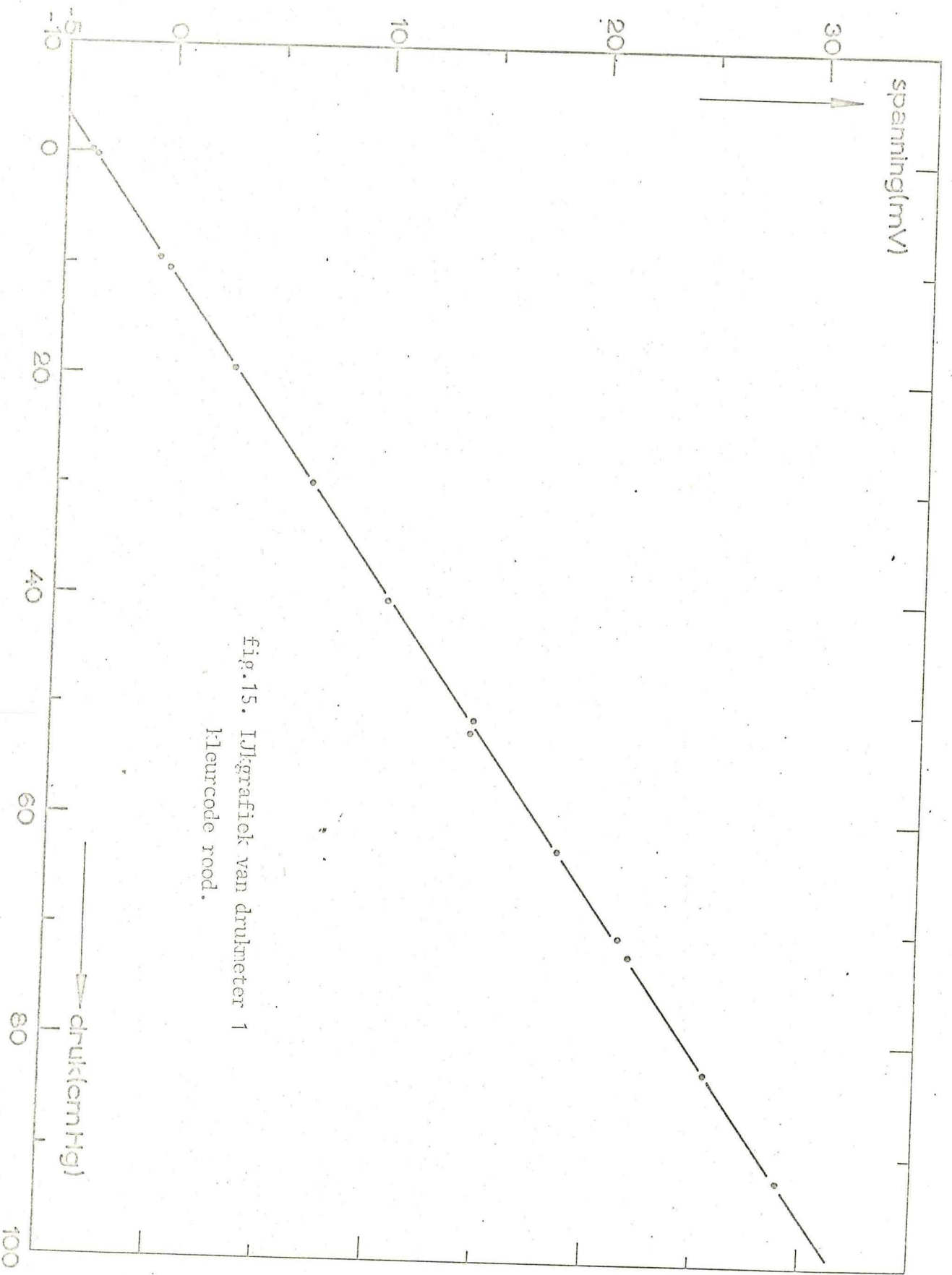


Fig. 15. IJkgraafiek van drulmeter 1  
 Kleurcode rood.



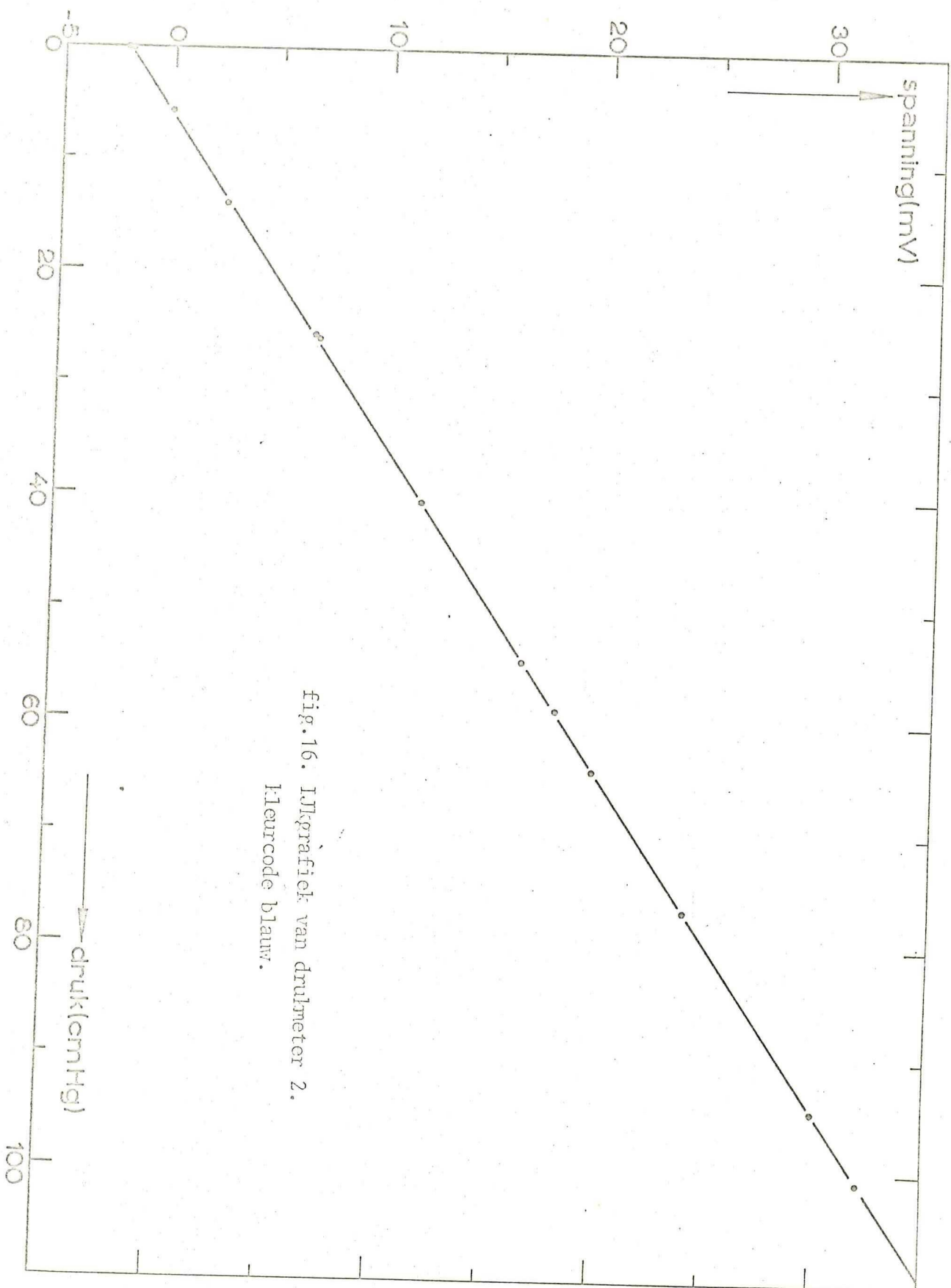


Fig. 16. Karakteristiek van drulmeter 2.  
 Kleurcode blauw.



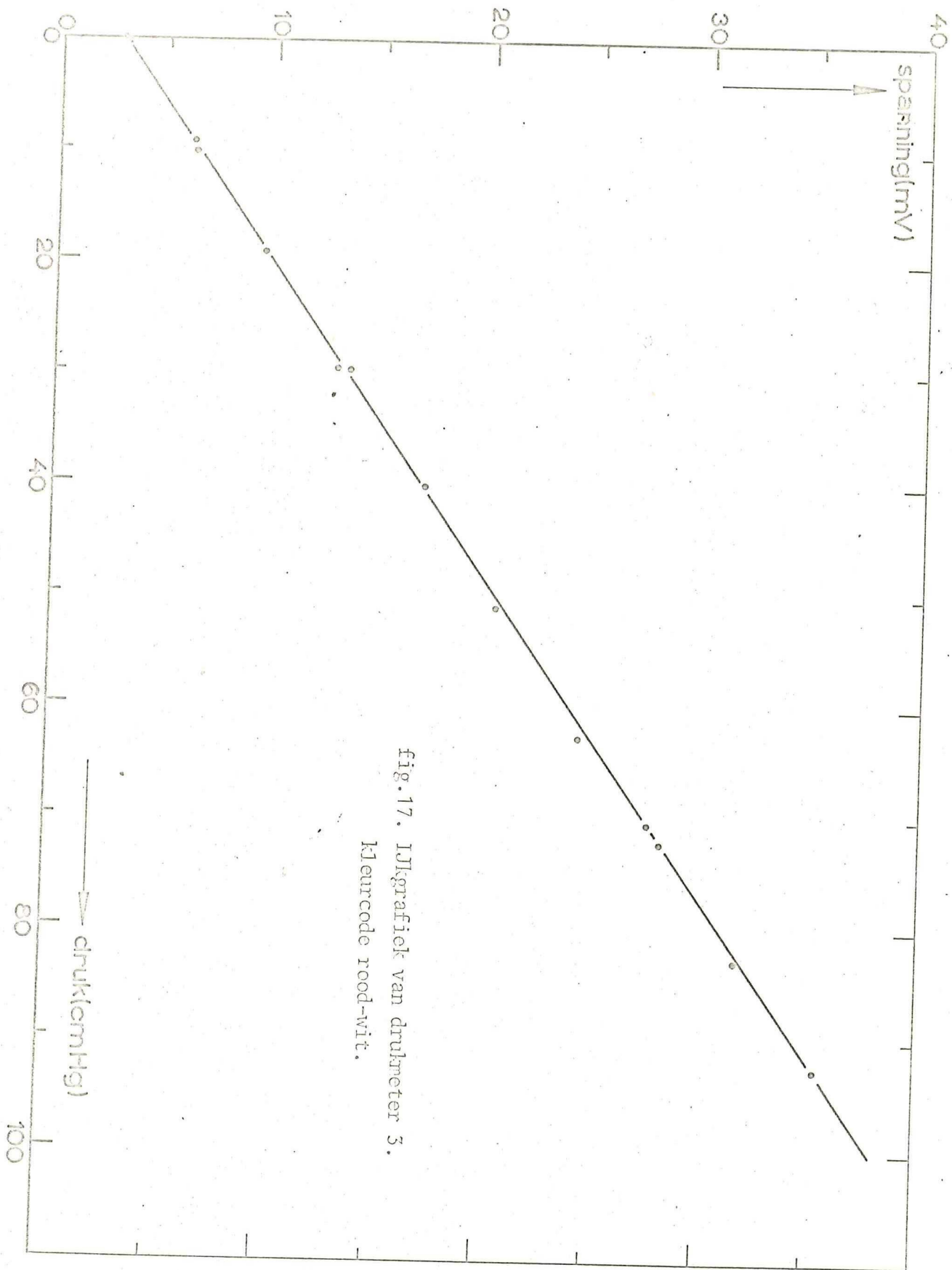


fig. 17. IJkgrafiek van drukmeter 5.  
 Kleurcode rood-wit.



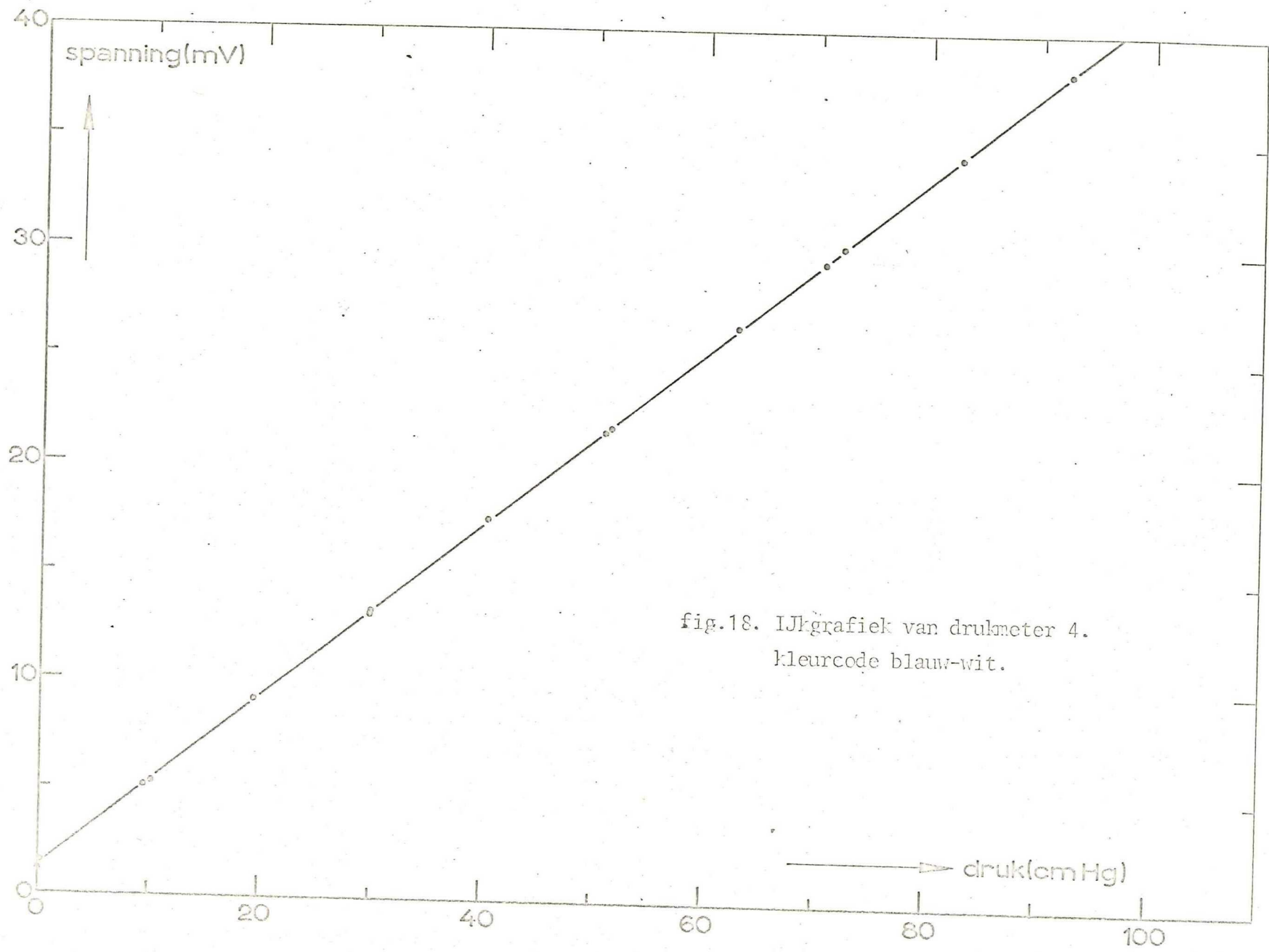
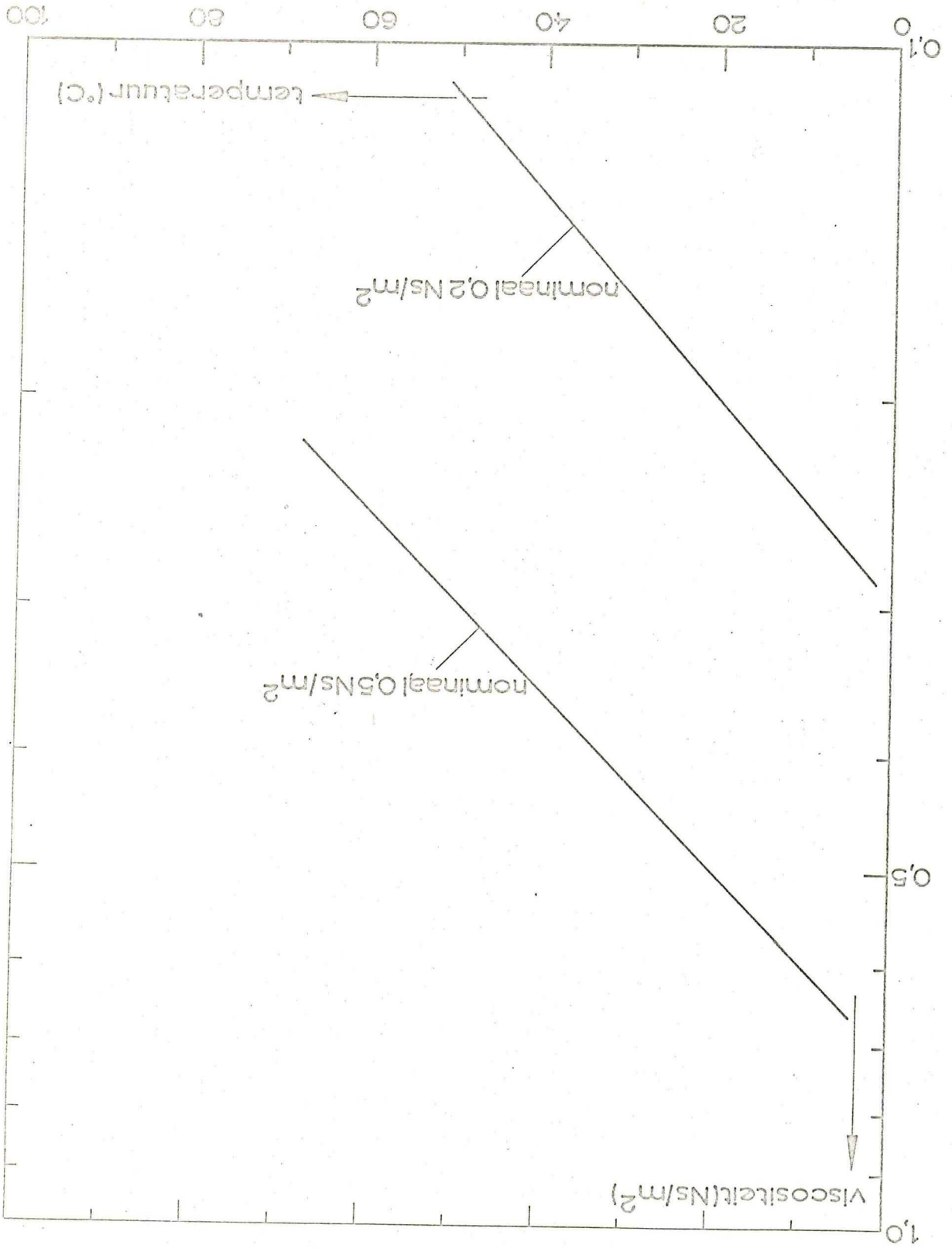


fig.18. IJkgrafiek van drukmeter 4.  
kleurcode blauw-wit.





Fig. 19. De temperatuurafhankelijkheid van de viscositeit van silicomenolie.



Tevens werd dan extra aandacht besteed aan het zo volledig mogelijk ledigen van de extruder (ook de drukmeterkamertjes), dit alles om de drie voorhanden viscositeiten zo volledig mogelijk gescheiden te houden.

Voor het zichtbaar maken van de stromingen, het bestuderen van de menging en het meten van verblijftijdspreidingen werd een onderzoek gedaan naar zodanig te reactiveren of te verwijderen tracers dat de kostbare maar overigens zeer geschikte siliconenolie ook voor deze experimenten gebruikt kon worden. De opbrengst van de extruder bedraagt ongeveer 20 gr/s, bij een gemiddelde verblijftijd van 30 s is voor een redelijke verblijftijdspreidingsmeting van 300 s ca. 6 kg vloeistof nodig. Zelfs met PVP-oplossing, die na gebruik weggegooid kan worden geeft het verrichten van een behoorlijk aantal metingen dan problemen zodat hergebruik van de vloeistof de aangewezen weg is. Appendix A beschrijft een groep geschikte tracers, door enkele tegenslagen konden zij nog niet in voldoende grote hoeveelheid gesynthetiseerd worden. Grondstoffen en bereidingsvoorschriften zijn in het laboratorium aanwezig.

Voor het door de olie mengen van de tracer werd een "Kenics" statische menger vervaardigd, eerst met 6, later met 9 elementen.

De menger werd getest met een PVP-oplossing met een viscositeit van  $0,2 \text{ Ns/m}^2$  waarin een oplossing van kristalviolet gemengd werd.

Ook bij de tracer voor siliconenolie moet een kleine hoeveelheid tracer door een grote hoeveelheid olie gemengd worden.

Na één doorgang door de menger is de kleurstof verdeeld in ongeveer 16 dunne, evenwijdige vlakken, die de hele pijp vullen. Wordt de vloeistof na wat schudden van het opvangreservoir nogmaals door de menger geleid dan is de kleurstof, voor zover met het oog waarneembaar, perfect gemengd.

Voor het meten van kleurstofconcentraties aan de vier in- en uitgangen van de extruder werd een apparaat gebouwd dat deze taak met behulp van light emitting diodes (led's) en fototransistors voldoende snel (tot 10 Hz) kan verrichten. Light emitting diodes en



fototransistors werden in messing tussenstukken gemonteerd die eenvoudig tussen reservoirs en extruder geschroefd kunnen worden.

## 2. 2. De meetresultaten.

De drukopbouw in de extruder werd gecontroleerd op symmetrie en lineariteit.

De symmetrie van linker- en rechterextruderhelft bleek zeer bevredigend, verschillen in de druk bleken minder dan 2% te zijn, gemeten bij de kleinste calanderspleet (0,20 mm) waar de verschillen het grootst zullen zijn. Het lineair toenemen van de druk bij verplaatsen in axiale richting was minder bevredigend. Hiervoor staan vier meetpunten ter beschikking; begin- en eindpunt vertoonden door in- en uitloopeffecten beide een te lage druk. De fout in de drukval per kamer was echter minder dan 7% vergeleken met de drukval per kamer berekend uit de op 1/3 en 2/3 van de schroeflengte gemeten drukken zodat de metingen met alleen drukmeters aan begin en eind van de extruder (zoals die aanvankelijk, toen nog maar twee drukmeters beschikbaar waren, werden uitgevoerd) toch een goede indruk van de vorm van de druk-debiet karakteristiek en van de invloed van de diverse variabelen geven. Het blijft natuurlijk gewenst extra meetpunten iets na het begin en iets voor het eind van de schroeven aan te brengen. De rugspleet werd gemeten met een voor dit doel door uitwalsen van messingplaat vervaardigde set voelermaten, in dikte oplopend met stappen van 0,01 mm. Er was enig verschil tussen de extruderhelften, maar beide rugspleten waren klein, nl. 0,10 en 0,13 mm. Een indruk van de grootte van de calanderspleet werd verkregen door na monteren van de extruder de tandwielkoppeling tussen de schroeven los te nemen, aan één schroef een arm met potlood te bevestigen en deze schroef linksom en rechtsom te draaien tot hij in beide standen juist de andere schroef raakte.





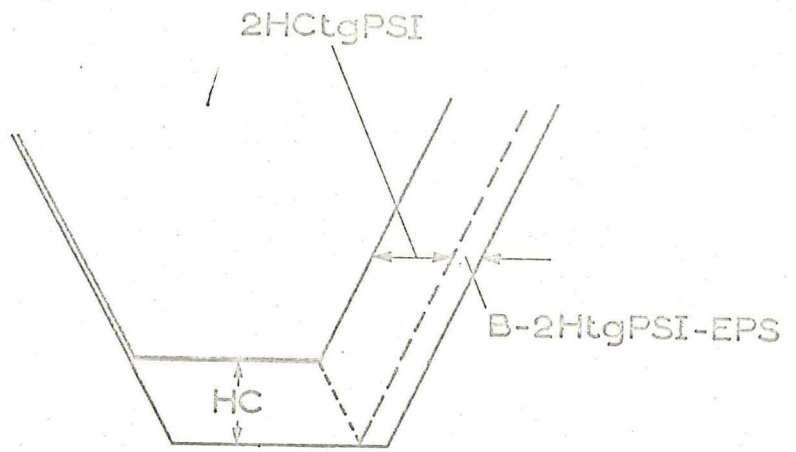


fig.20. Het meten van de calanderspleet.



Het potlood registreert de hoek  $\gamma$  waarover deze schroef verdraaid kan worden, waarna de calanderspleet HC berekend kan worden uit de betrekking

$$\frac{\gamma S}{2\pi} = 2 HC \operatorname{tg} \operatorname{PSI} + B - 2 H \operatorname{tg} \operatorname{PSI} - EPS \quad (2.1)$$

zie fig. 20.

Het is duidelijk dat deze methode redelijk werkte bij de gebruikte schroeven, waar  $\operatorname{PSI} = 14^\circ$ , maar faalt bij kleine PSI.

Bovendien geeft de uitkomst meer een ondergrens dan de echte waarde van HC aan. Uitkomsten van het programma tetrac tonen aan dat de kleinste axiale afstand tussen de flanken niet gevonden wordt in het vlak door de schroefassen, waar (2.1) op gebaseerd is, maar aan de uiteinden van de flanken iets boven het vlak door de schroefassen.

Dit is ook te zien in fig. 9 waar de tetraëderspleet het nauwste punt vertoont voor kleine f.

Voor een HC van 0,20 mm is deze afstand niet  $HC \operatorname{tg} \operatorname{PSI} = 0,050$  mm maar 0,027 mm op een hoogte 0,2 mm boven het vlak door de schroefassen. Dit zou HC op 0,29 mm doen uitkomen. Er dient echter te worden overwogen dat het punt met de kleinste axiale afstand tussen de flanken zeer dicht (minder dan 1 mm) bij het flankuiteinde ligt. De hoeken van de flanken zijn niet oneindig scherp maar iets afgerond hetgeen al snel het verschil van 0,02 mm kan overbruggen zodat het beter lijkt niet op onzekere raakpunten maar op de raaklijn in het vlak door de schroefassen te vertrouwen. Aangezien uit de metingen zal blijken dat een vergroting van de calanderspleet van 0,20 tot 0,34 mm nauwelijks verschil maakt en uit uitkomsten van tetrac blijkt dat deze fout zelfs absoluut en dus relatief zeer sterk afneemt bij grotere calanderspleeten kunnen de uitkomsten van (2.1) aangehouden worden. De resultaten zijn zeer goed (tot op 0,05 mm) in overeenstemming met direct aan de vulplaten gemeten waarden. De drukopbrengst karakteristieken werden gemeten voor de viscositeiten 0,1, 0,2 en 0,5 Ns/m<sup>2</sup>, bij extrudertoerentallen van 0,17 tot 0,84 Hz



en bij calanderspletten van 0,20 tot 1,70 mm.

Na bestudering van de eerste resultaten bleek dat een compacte presentatie van de resultaten mogelijk was door het invoeren van het dimensieloze debiet: het gemeten debiet  $Q$  gedeeld door het toerental van de extruder en gedeeld door tweemaal het kamervolume (per schroef wordt per omwenteling éénmaal het kamervolume verplaatst; het dimensieloze debiet is dus een percentage van het maximale debiet) en de dimensieloze druk, de drukval per kamer (kamers in beide schroeven meetellen) gedeeld door het toerental en gedeeld door de viscositeit. Deze methode sluit nauw aan bij de manier waarop Beek en Holmes (4) de pompkarakteristiek beschrijven. Deze dimensieloze kentallen werden door een klein C. P. S. programma wijz berekend uit de invoergegevens toerental, door de drukmeters afgegeven spanning en het gemeten debiet.

Fig. 21 en 22 tonen de resultaten verkregen met de drukmeters aan de extruderuiteinden, fig. 23 en 24 de resultaten verkregen met de drukmeters op  $1/3$  en  $2/3$  van de schroeflengte.

In het volgende hoofdstuk zal geprobeerd worden deze resultaten theoretisch te verklaren.





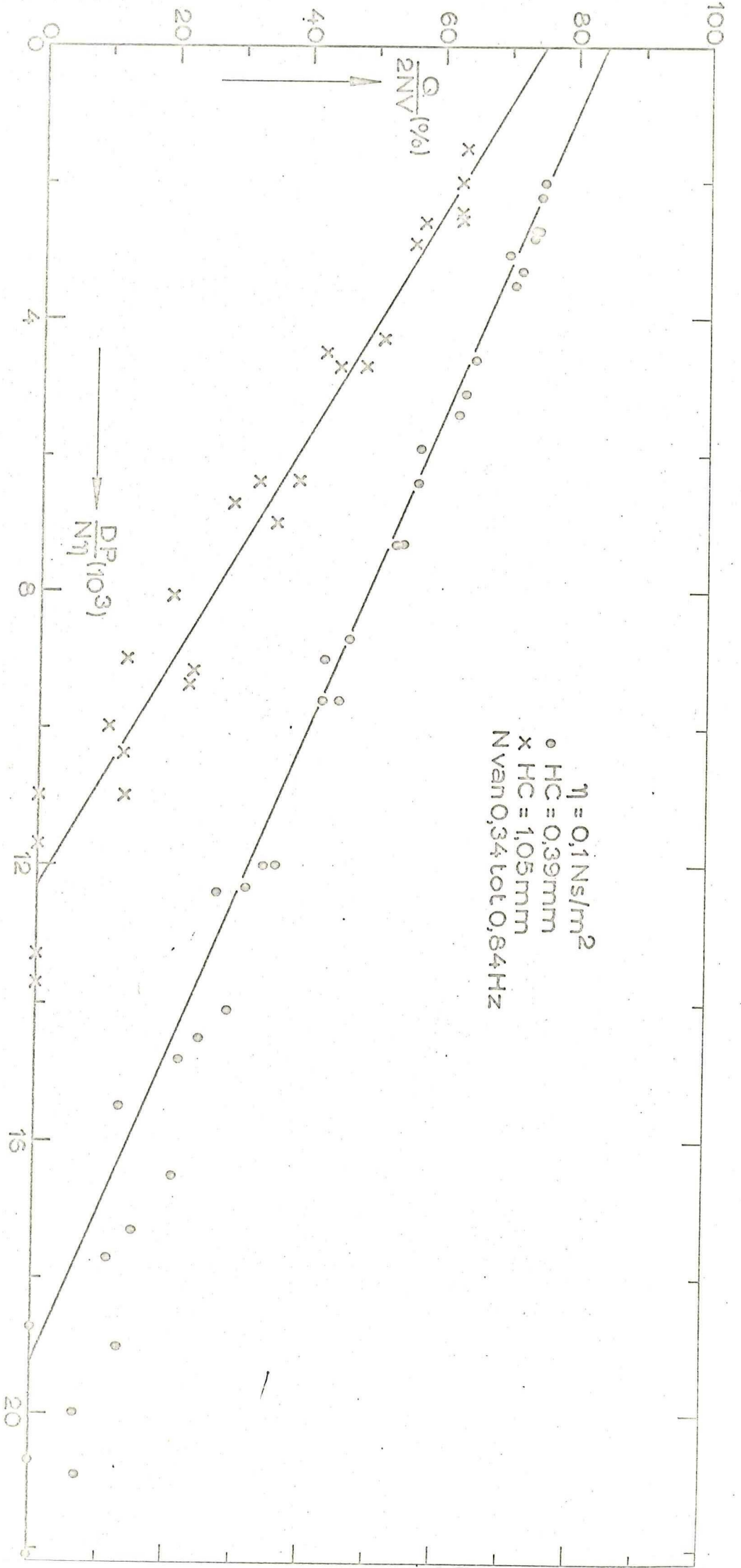


Fig. 21. Gevonden druk-dobietkarakteristieken, drukmeters aan schroefvuitrinden.



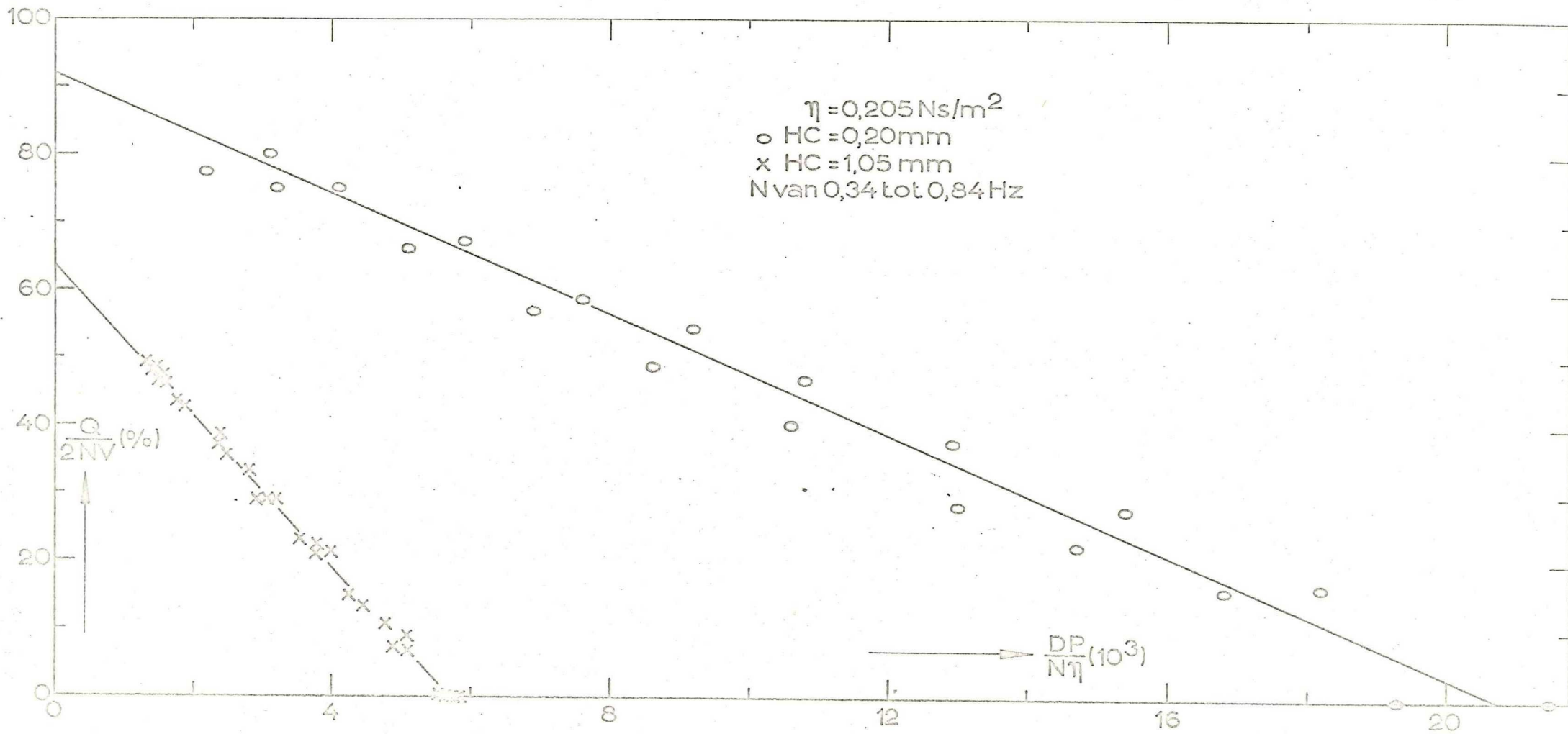


fig.22. Gemeten druk-debietkarakteristieken, drulmeters aan schroefuiteinden.





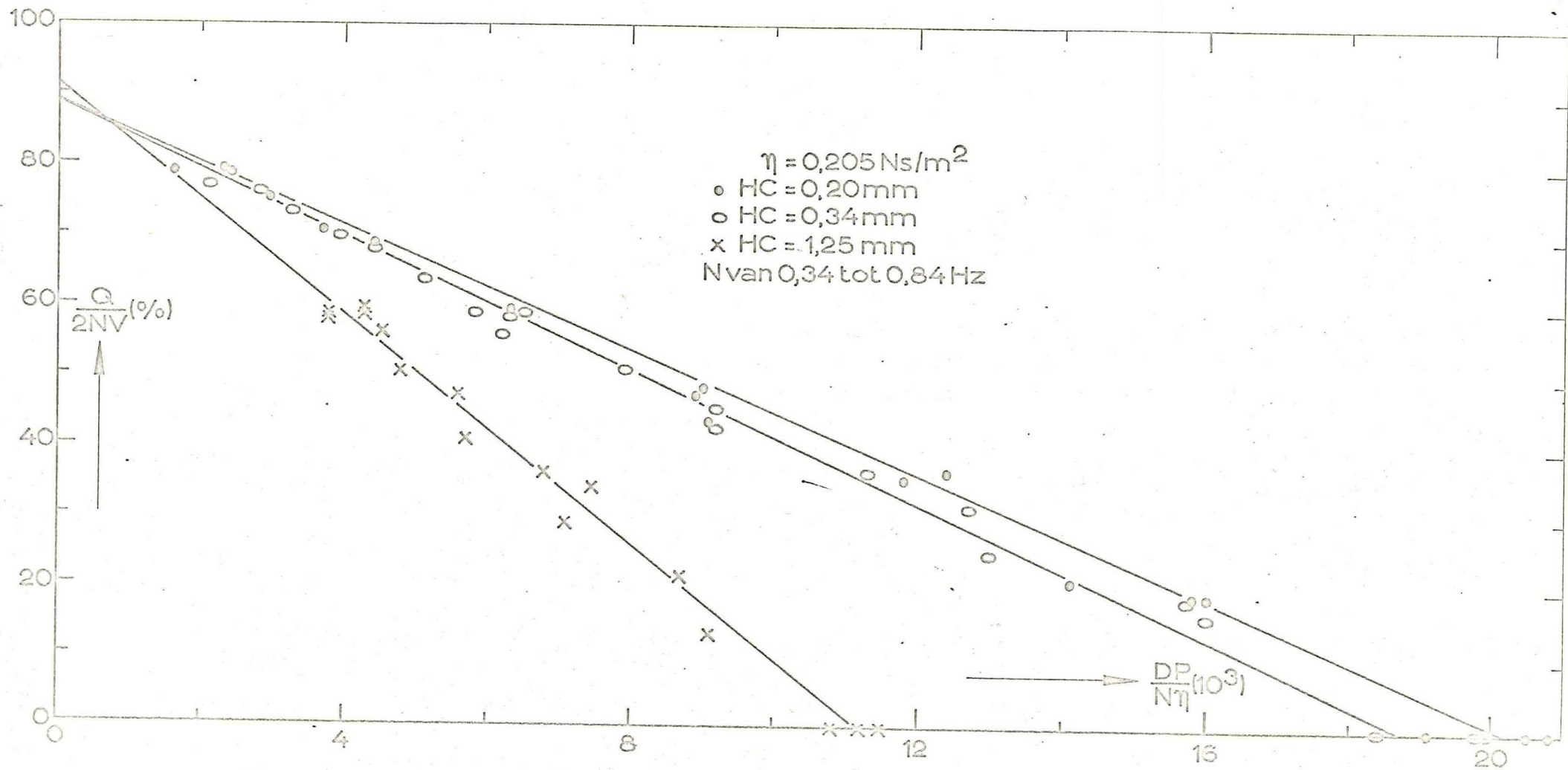


fig.25. Gemeten druk-debietkarakteristieken, drulmeters op 1/3 en 2/3 van de schroeflengte.



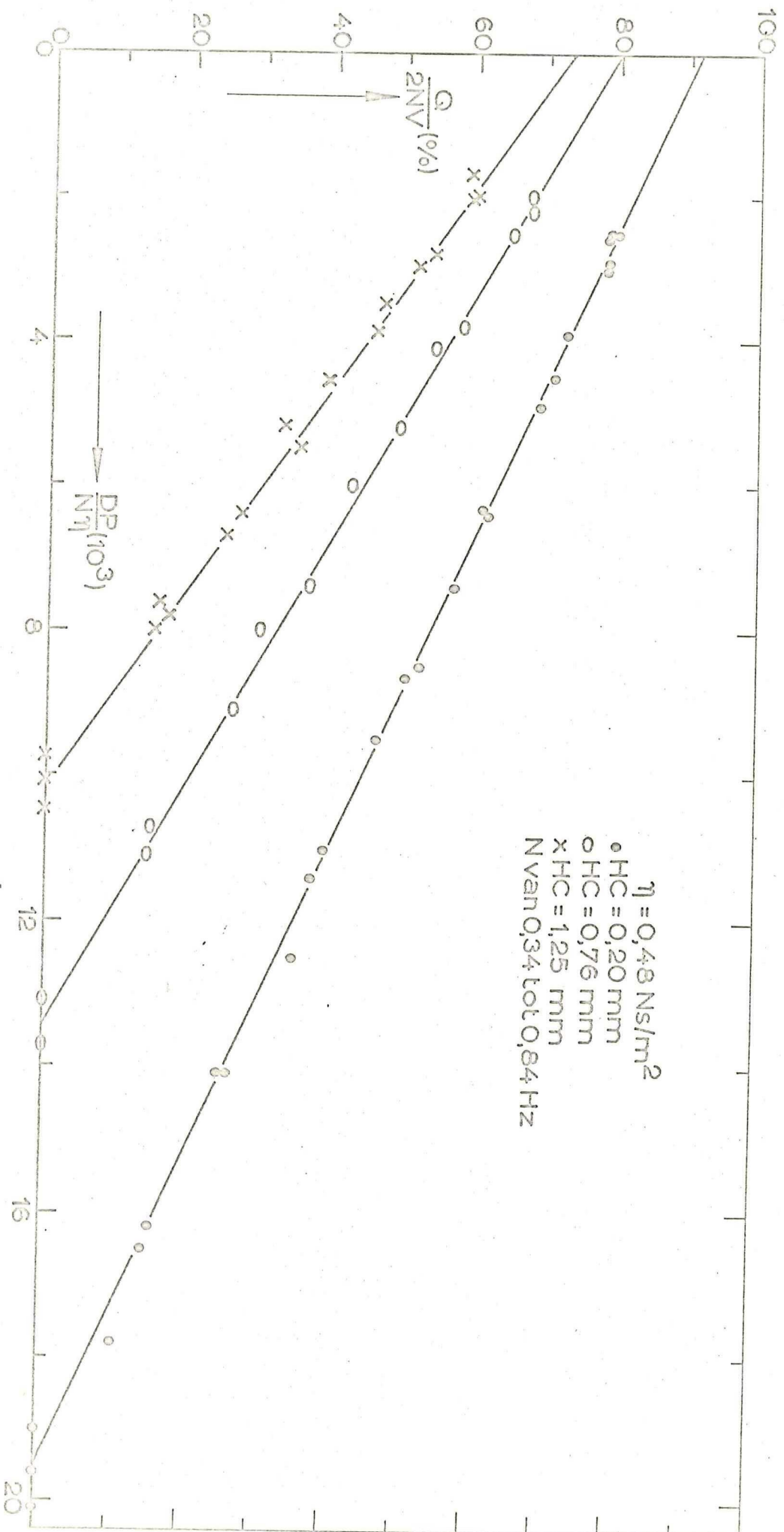


Fig. 24. Gemeten druk-debietkarakteristieken, drukmeters op 1/5 en 2/5 van de schroeflengte.



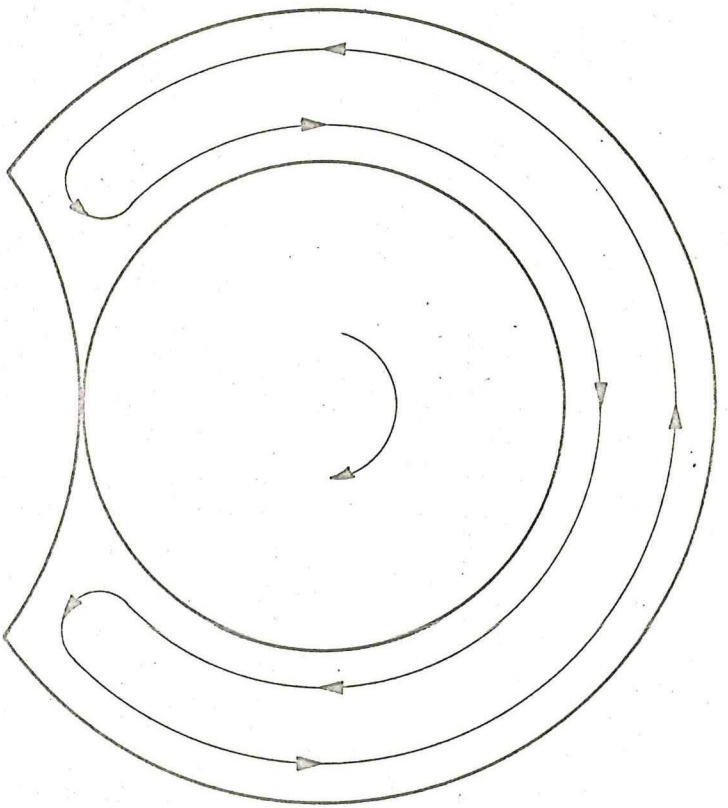
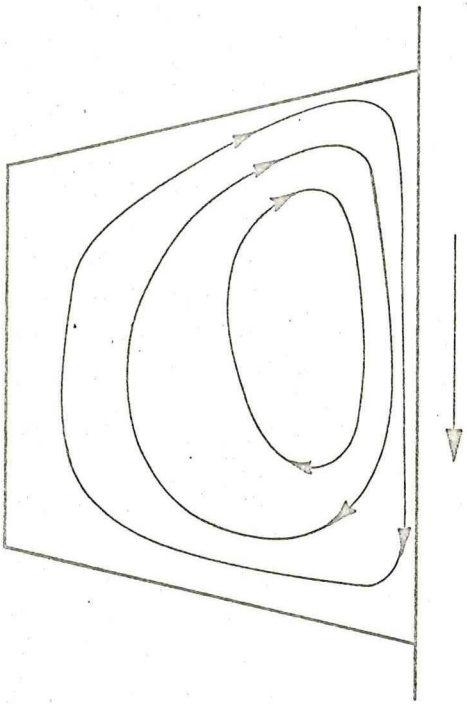


Fig. 25. Hoofdstromingen in een perfect sluitende kamer.

### 3. STROMINGEN EN BEREKENINGEN.

#### 3.1. Stromingen in de extruder.

Alle stromingen in dit verslag worden beschouwd en berekend ten opzichte van een met de kamers eenparig meebewegend assenstelsel, snelheid dus spoed maal toerental.

In een perfect afgesloten kamer kunnen stromingen als in fig. 25 verwacht worden. Daarnaast treden de voornaamste lekstromen op door de rugspleet, door de calanderspleet, door de tetraëderspletten in horizontale richting en door de "hals" van de tetraëderspletten in verticale richting. De stroming van newtonse fluïda wordt beheerst door de Navier-Stokes-vergelijking, welke voor de x-component van het coördinatenstelsel luidt, zie (2):

$$\rho \frac{dv_x}{dt} + \rho v_x \frac{dv_x}{dx} + \rho v_y \frac{dv_x}{dy} + \rho v_z \frac{dv_x}{dz} =$$

$$\eta \left\{ \frac{d^2 v_x}{dx^2} + \frac{d^2 v_x}{dy^2} + \frac{d^2 v_x}{dz^2} \right\} - \frac{dp}{dx} \quad (3.1)$$

Aangenomen wordt verder dat de stromingen isotherm, incompressibel, stationair en kruipend zijn, het laatste houdt in dat in (3.1) de termen in het rechterlid overheersen en de termen in het linkerlid verwaarloosd kunnen worden.

Merck (3) beredeneert dat hieraan in elk geval voldaan is als

$$\frac{\rho v H}{\eta} \ll 1$$

In het extrudermodel is dit kengetal van Reynolds,  $Re$ , ongeveer 1, in echte extruders zal het veel kleiner zijn.

Voor spletten is deze benadering al eerder toegestaan, namelijk wanneer







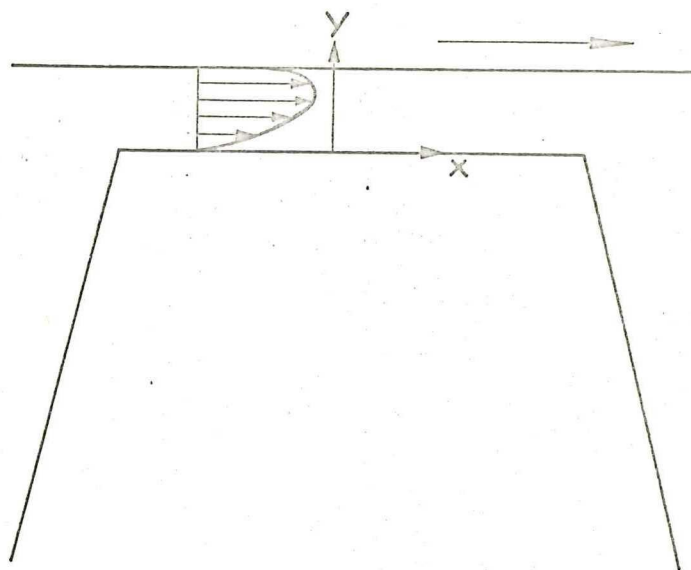


fig.26. De lek door de rugspleet, gezien vanuit het meebewegende coördinatenstelsel.

$$\text{Re} \left( \frac{\text{spleethoogte}}{\text{spleetdiepte}} \right)^2 \ll 1$$

Bij de berekening wordt slechts die snelheidscomponent berekend die van belang is voor het te berekenen debiet.

Van de drukgradiënten wordt in het algemeen aangenomen dat ze in de nauwe spleten geconcentreerd zijn en klein zijn in de relatief ruime kamer.

### 3. 2. De lek door de rugspleet.

Deze spleet is zo nauw dat hier hydrodynamische smeringstheorie toegepast mag worden.

Fig. 26 geeft een beeld van de lekstroming en van het toegepaste coördinatenstelsel. De doorsnijding geschiedt weer met een vlak door de schroefas, hoewel strict genomen een kortere weg mogelijk is door te snijden met een vlak loodrecht op de flank, dus door de schroefhoek PHI in rekening te brengen. Voor de gebruikte geometrie geldt echter  $\cos \text{PHI} = 0,996$  zodat de invloed, gelegen in vergroten van de drukgradiënt, gering is terwijl bovendien de spleet dan als boven- en ondergrenzen geen rechten meer heeft, maar ellipsgedeelten hetgeen de weglengte vergroot en dus de drukgradiënt weer verkleint.

De Navier-Stokesvergelijking reduceert tot

$$\frac{d^2 v_x}{dy^2} = \frac{1}{h} \frac{dp}{dx} \quad (3.2)$$

met randvoorwaarden  $v_x(0) = 0$

$$\text{en} \quad v_x(\text{delta}) = N \cdot S,$$

waarbij N het toerental van de schroeven is.

Integreren onder inachtneming van de randvoorwaarden levert voor de snelheidsverdeling op:



$$v_x = \frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dx} (y^2 - y \cdot \text{delta}) + \frac{\text{N.S.}}{\text{delta}} y \quad (3.3)$$

Het debiet per breedte-eenheid van de spleet wordt dan:

$$QR' = \int_0^{\text{delta}} v_x dy = - \frac{1}{12\eta} \frac{dp}{dx} \text{delta}^3 + \frac{1}{2} \text{N.S.} \cdot \text{delta} \quad (3.4)$$

Het totale debiet over de schroefruggen is dan:

$$QR = 2R (2\pi - \alpha) \frac{DP \text{delta}^3}{6 \text{EPS} \eta} + \frac{1}{2} \text{N.S.} \cdot \text{delta} \quad (3.5)$$

waarin DP de drukval per kamer, kamers in beide schroeven meegerekend, is. Het blijkt dat de drukdebietkarakteristiek een rechte is.

### 3.3. De lek door de calanderspleet.

Voor het bepalen van de drukdebietkarakteristiek van de calanderspleet zijn de gebruikelijke calandertheorieën, bijvoorbeeld die van Gaskell (5), niet zonder meer toepasbaar omdat daar geen netto drukval over de spleet optreedt en aan de achterzijde van de spleet loslaten van de vloeistof optreedt, terwijl in de extruder er wel drukval over de spleet optreedt en zowel vóór- als achterzijde van de spleet geheel met vloeistof gevuld zijn. Bij het aanpassen van de theorie aan deze toestand werd meteen van de gelegenheid gebruik gemaakt om ook de verschillende diameters en snelheden van de rollen in rekening te brengen. De snelheidsverdeling wordt weer voorgeschreven door (3.2), met dit verschil dat  $dp/dx$  nu afhankelijk van  $x$  is. Integreren van (3.2) op een willekeurige plaats  $x$  onder inachtneming van de randvoorwaarden (snelheid op linker- en rechtergrens gelijk aan de  $x$ -component van de snelheid van de rollen, zie fig. 6) en daarna  $v_x$  integreren van  $y_p$  tot  $y_m$  levert de volgende betrekking tussen  $dp/dx$  en het debiet per breedte-eenheid,  $QC'$ :



$$\begin{aligned}
 QC' = \frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dx} & \left( \frac{-y_p^3}{6} + \frac{y_m^3}{6} + \frac{y_m y_p^2}{2} - \frac{y_m^2 y_p}{2} \right) + \\
 & \frac{(v_{1x} - v_{2x})(y_p + y_m)}{2} - (v_{1x} y_m - v_{2x} y_p), \quad (3.6)
 \end{aligned}$$

waarin:

$$y_p = H_0 + R \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}} \right)$$

$$y_m = -H_0 - (R-H) \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{(R-H)^2}} \right)$$

$$v_{1x} = 2\pi NR \sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}}$$

$$v_{2x} = 2\pi N(R-H) \sqrt{1 - \frac{x^2}{(R-H)^2}}$$

(3.6) legt  $dp/dx$  vast als functie van  $x$ , want het debiet  $QC'$  is onafhankelijk van  $x$ .

$dp/dx$  integreren van  $x = -\infty$  tot  $x = +\infty$  levert de drukval DPC over de calanderspleet op.

Analytische integratie is wellicht mogelijk, maar zal zeer tijdrovend zijn. Er werd besloten tot numeriek integreren terwijl een van (3.6) afgeleide, vereenvoudigde uitdrukking voor  $dp/dx$  ter verkrijging van een beginschatting voor  $dp/dx$  wel analytisch geïntegreerd werd. De vereenvoudigde uitdrukking voor  $dp/dx$  werd uit (3.6) verkregen door waar mogelijk eerste ordebenaderingen in te voeren, zoals  $\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{1}{2}x$  en verwaarlozen van termen  $H_0$  ten opzichte van termen  $R$ .

Na enig uitwerken volgt er dan:





$$\frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dx} = \frac{\pi N(D-H)}{2H_0^2} + \frac{-\frac{3}{4} \frac{QC'}{H_0^3} + \frac{\pi N(D-H)}{H_0^2}}{1 + \frac{3(D-H)x^2}{4H_0R(R-H)}} \quad (3.7)$$

Bij integreren divergeert de eerste term terwijl de tweede term een arctangens oplevert met een, door de gegeven verhoudingen, noch groot, noch klein argument, zodat reeksontwikkelen niet helpt.

De knoop werd doorgehakt door het argument naar believen zowel als klein als als groot te beschouwen, zodanig gekozen dat de integraal convergeert. Het resultaat is dan:

$$QC' = -\frac{2 DPC}{\pi \eta} H_0^2 \sqrt{\frac{H_0(D-H)}{3D(D-2H)}} + 2\pi N H_0(D-H) \quad (3.8)$$

De eerste term is correct voor kleine  $H_0$  en de twee voor grote  $H_0$ . Deze formule werd als beginschatting gebruikt voor het programma CALAND, waarin DPC bepaald wordt door de exacte formule (3.6) in honderd stappen numeriek te integreren van  $x = -HG/2$  tot  $x = +HG/2$

Deze IDPDX wordt gebruikt om  $QC'$  in te schieten op een te kiezen DPC, zoals beschreven door Zaat (7).

Dit inschieten lukt reeds de eerste maal op meer dan 7 decimalen nauwkeurig, zoals ook te verwachten is bij een lineaire differentiaalvergelijking. De figuren 27 t/m 29 geven de resultaten van deze berekeningen weer voor een kleine en voor grote  $H_0$  en voor al of geen drukval over de calander-spleet. Er blijkt dat  $dp/dx$ , zoals gehoopt, in het nauwste gedeelte van de spleet geconcentreerd is zodat integratie tussen de grenzen  $-HG/2$  en  $+HG/2$  nauwkeurige resultaten oplevert.





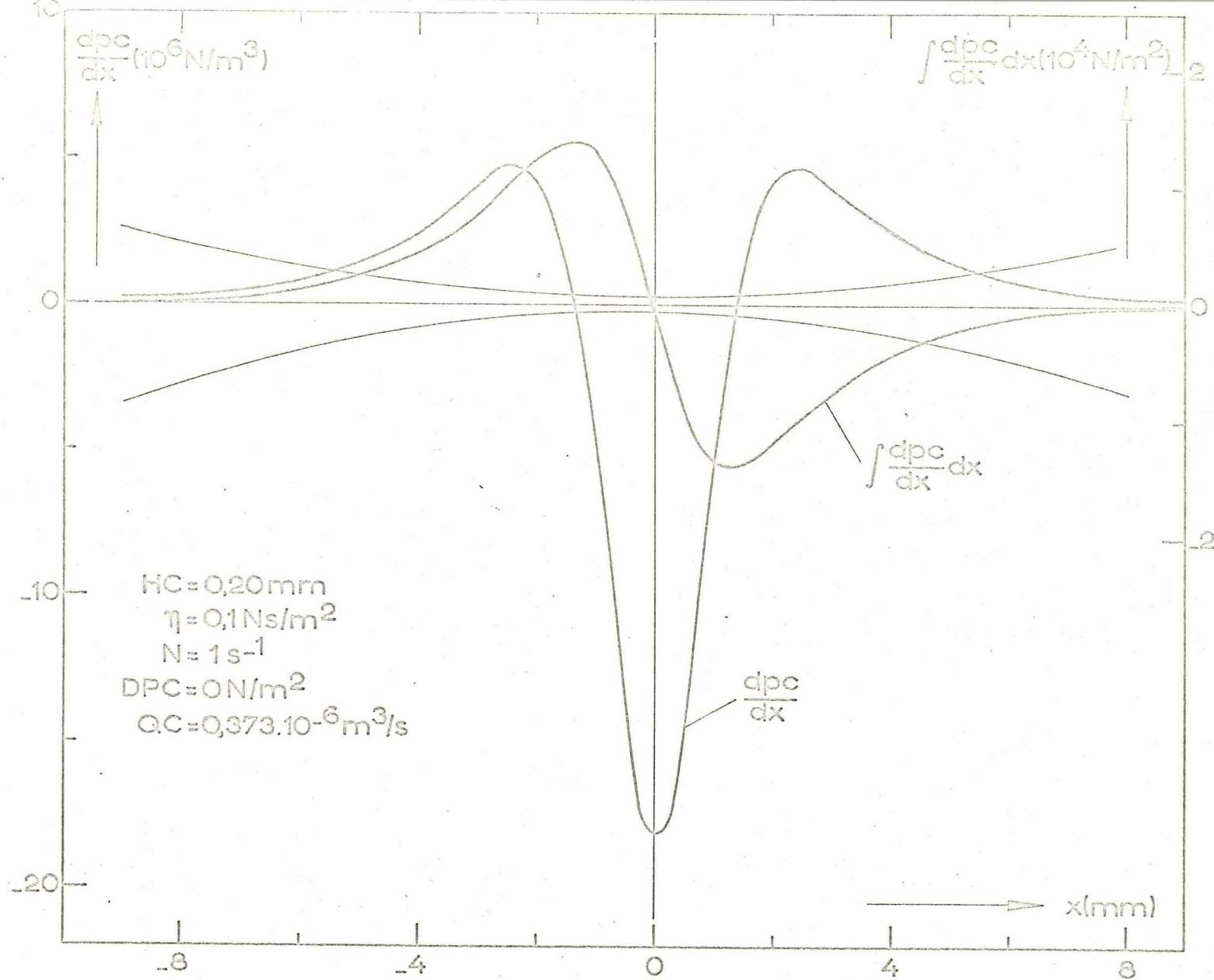


fig. 27. De berekende druk en drukgradiënt in de calanderspleet.  
 In dunne lijnen de calanderspleet in de juiste schaal.



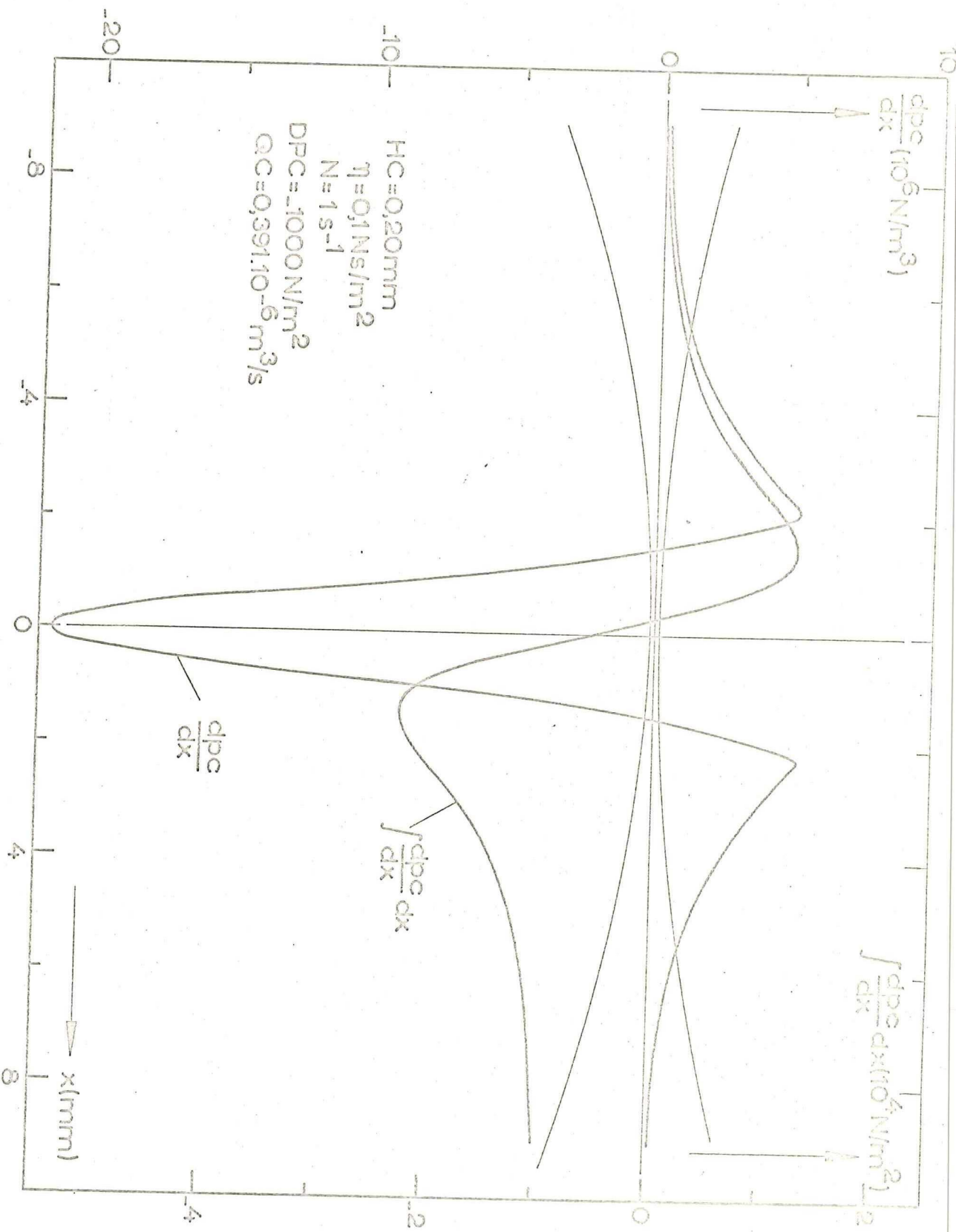


fig. 28. De berelende druk en drukgradiënt in de calanderspleet. In dunne lijnen de calanderspleet in de juiste schaal.



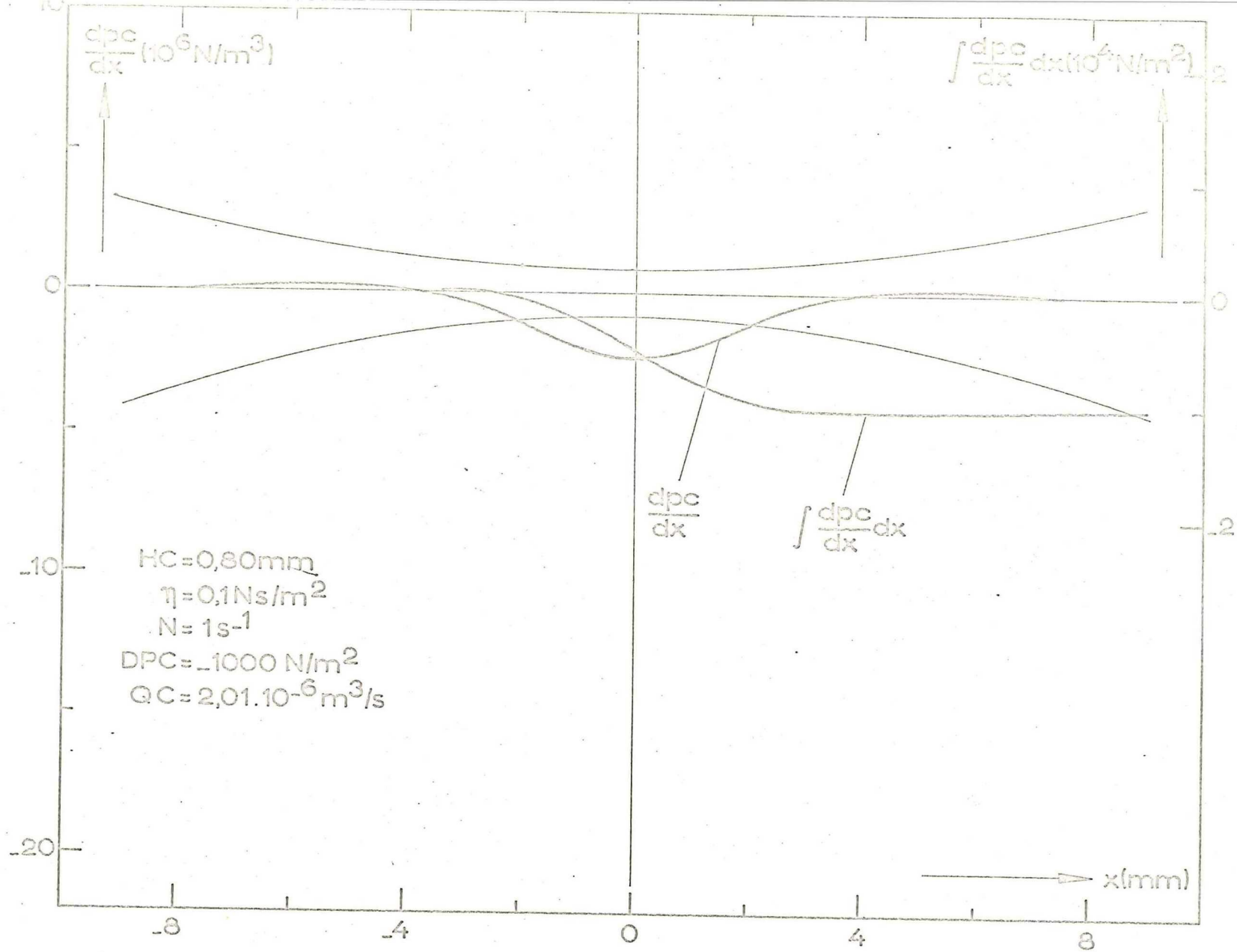


fig. 29. De berekende druk en drukgradiënt in de calanderspleet.  
 In dunne lijnen de calanderspleet in de juiste schaal.



Als deze grenzen gewijzigd worden in  $-HG/3$  en  $+HG/3$  dan verandert  $QC = EPS.QC'$  in het ongunstigste geval ( grote calanderspleet) slechts 2%. Het vergroten van het aantal integratiestappen van 100 tot 1000 verandert de resultaten slechts in de zesde decimaal. Ook hier is de drukdebietkarakteristiek een rechte.

Het grootste gedeelte van het debiet wordt geleverd door meesleuring, ook bij een HC van 0,76 mm, bij kleine calanderspletten is het debiet binnen het raam van de optredende drukken vrijwel drukonafhankelijk.

### 3.4. De stroming door een dwarsdoorsnede van de kamer.

In deze pragraaf wordt de stroming loodrecht op de trapeziumvormige doorsnede van een kamer (schroef snijden met vlak door schroefas, zie fig. 2) besproken. Als de stromingen zich in lengterichting door de kamer bewegen maken zij in werkelijkheid weer een hoek PHI met dit vlak, afhankelijk van r. Dit vergroot de snelheden en  $dp/dx$  maar verkleint de kamerbreedte, bovendien is de kleinst optredende  $\cos PHI$  0,992 zodat deze fout verwaarloosd mag worden.

Een rekentechnisch nare consequentie van het de doorsnede steeds loodrecht op de flank nemen is ook nog dat boven- en ondergrens van het trapezium dan van rechten overgaan in ellipsdelen.

De gereduceerde Navier-Stokesvergelijking, die voor dit geval de stroming met goede benadering beschrijft, luidt:

$$\eta \left( \frac{d^2 v_x}{dy^2} + \frac{d^2 v_x}{dz^2} \right) = \frac{dp}{dx} \quad (3.9)$$

waarin x de component loodrecht op en y en z de componenten in het vlak van de doorsnede zijn.

De randvoorwaarden luiden: snelheid op bovengrens is nul en op de andere grenzen  $v_x = 2\pi Nr$ .

Recentelijk werden door Rieger en Sestak (8) analytische oplossingen van (3.9) gepubliceerd voor rechthoekige draad, echter met bewegende



wand in plaats van schroef, terwijl bovendien zal blijken dat rechthoeken niet als goede benaderingen voor trapezia gelden. Voor het numeriek oplossen van (3.9) werd eerst het eenvoudiger geval van rechthoekige draad onderhanden genomen in het programma TESTCR. Hierin wordt een eenvoudig rechthoekig rooster over de doorsnede gelegd, randwaarden vastgelegd en worden de binnenpunten met het eenvoudigst denkbare 5-puntsrekenmolecuul, zoals bijvoorbeeld gegeven wordt door Abramowitz (6) gerelaxeerd. Het doorrekenen van het rooster geschiedt in de procedure CALCVX, waarbij het rooster in alle denkbare combinaties van richting en volgorde wordt doorlopen. Dit alterneren van de doorlooprichting bleek de convergentie te versnellen. In CALCVX wordt bovendien voor alle binnenpunten de som van de veranderingen (absoluut genomen) in de snelheid bij nogmaals doorlopen van het rooster berekend, deze grootte wordt ICHVX genoemd en wordt gebruikt als relaxatiecriterium, waar als eis gesteld wordt dat ICHVX gedeeld door het aantal binnenpunten en gedeeld door de representatieve snelheid  $\pi ND$  voldoende klein moet zijn.

Zodra hieraan voldaan is berekent de procedure INTVX het nettodebiet QCR door de doorsnede, waarbij de randpunten slechts voor het hun toekomstige deel van de oppervlakte meetellen. De procedure PICTURE drukt de berekende snelheden op hun juiste plaats in de doorsnede af. Er bleek dat bij relaxeren tot relaxatiecriterium kleiner dan  $10^{-7}$  het debiet minder dan 0,1% veranderde ten opzichte van relaxeren tot op  $10^{-6}$ , dit wordt iets ongunstiger bij fijnere roosters.

De roosterfijnheid werd gevarieerd van 10 bij 10 tot 40 bij 40 punten; er bleek dat een rooster van 20 bij 20 punten fijn genoeg was om het debiet tot op 1% van het maximale debiet te bepalen. Het debiet werd in een aantal stappen gevarieerd van nul tot het maximale debiet, waarbij  $dp/dx$  op het debiet wordt ingeschoten, hetgeen dank zij de lineariteit van de differentiaal vergelijking in één maal tot op 4 decimalen nauwkeurig lukte.



Het resultaat is weer een rechte drukdebietkarakteristiek. Voor een trapeziumvormige doorsnede werd het programma CROSS geschreven, waarin de naar beneden toelopende zijgrenzen in rekening werden gebracht. Toegevoegd werd de procedure BOUND die de randpunten zodanig berekent dat lineaire interpolatie tussen de twee aan weerszijden van de grens gelegen punten op de grens zelf precies de juiste randsnelheid  $2\pi Nr$  oplevert. Aanvankelijk gebeurde dit door extra-polatie van het binnenpunt en de grenswaarde, hierbij treden echter instabiliteiten op als het binnenpunt vlak bij de grens ligt, er is dan een grote hefboomwerking. Tijdens het relaxeren passen de binnenpunten zich aan bij de uit de koers geraakte buitenpunten die bij de volgende extra-polatie nog meer gaan afwijken, enzovoorts. Een mogelijke oplossing is er voor te zorgen dat de hefboom nooit groter dan één is; dat betekent zonnodig niet het eerste maar het tweede punt binnen het rooster voor de extrapolatie gebruiken. Deze werkwijze verkleint de nauwkeurigheid omdat op deze plaatsen dan in feite de roosterconstante verdubbeld wordt.

Een meer elegante oplossing werd gevonden door de twee aan weerszijden van de grens gelegen punten gelijktijdig aan te passen aan de lineaire interpolatie én aan het rekenmolecuul. Bij relaxeren zijn de binnenpunten dan al vrijwel op hun juiste waarde zodat de hefboomwerking geen kwaad kan aanrichten.

De procedure INTVX en PICTURE werden aan de gewijzigde grenzen aangepast, voor INTVX vereist dit veel programmeerwerk omdat de grens op drie verschillende manieren tussen twee punten door kan lopen. De resultaten van CROSS zijn vergelijkbaar met TESTCR, de drukdebietkarakteristiek is recht en de fouten zijn even groot. Het debiet is echter niet gelijk aan het debiet door een vergelijkbare (b.v. gelijke hoogte en oppervlakte) rechthoek want de grens met snelheid nul wordt langer en de grens met grote snelheid wordt korter: bij gelijke  $dp/dx$  is het debiet door een trapezium kleiner dan dat door een rechthoek.



Fig. 30 en 31 geven voorbeelden van berekende snelheidsvelden, respectievelijk bij netto debiet nul en bij  $dp/dx$  nul.

### 3.5. De lek door de tetraëderspleet.

De stroming door de tetraëderspleet is het moeilijkste probleem omdat dit een drie-dimensionale configuratie betreft. Er is getracht dit probleem tot twee-dimensionale en dus redelijk aan te pakken proporties terug te brengen door als oppervlakte de tetraëderspleetdoorsnede voor  $f = 0,5$  te beschouwen en dan als  $dp/dx$  op de verschillende hoogten in de spleet te nemen de drukval DPT over de spleet gedeeld door de diepte van de spleet ter plaatse. Het convergeren van de tetraëderspleet en de hoeken die de flanken met het vlak van doorsnede maken werden verwaarloosd. Het convergeren is gering zoals uit de uitkomsten van tetra $\epsilon$  blijkt en de cosinussen van bovengenoemde hoeken variëren van 0,97 tot 0,99 zodat ook hun invloed, die weer zou bestaan uit verkleinen van de kanaalbreedte en vergroten van de snelheden en van  $dp/dx$ , verwaarloosd kan worden. Op dezelfde manier als in CROSS berekent het programma TETRA de snelheden in de spleetdoorsnede.

De juiste grenzen en randvoorwaarden werden ingevuld en de procedures PICTURE, BOUND en INTVX werden aangepast. In BOUND zijn nu daar waar de grens vrij horizontaal verloopt extra randpunten nodig om het rekenmolecuul van de binnenpunten te kunnen bedienen; deze extra randpunten werden verkregen door verticale interpolatie. In INTVX werd de grens tussen twee roosterlijnen in steeds als recht beschouwd, terwijl hier verder de complicatie optreedt dat aan de onderkant van het rooster de grenzen elkaar dicht naderen zodat bij het aanvullen van het debiet met de bijdragen van de grenspunten bepaalde punten een dubbele bijdrage, namelijk bij linkergrens én bij rechtergrens dreigen te leveren. Dit werd opgelost door de werkzame oppervlakte van alle punten met een term A te verminderen, A is dan een halve roosterrechthoek als het punt binnen de invloedssfeer van twee grenzen ligt en elders is A nul.







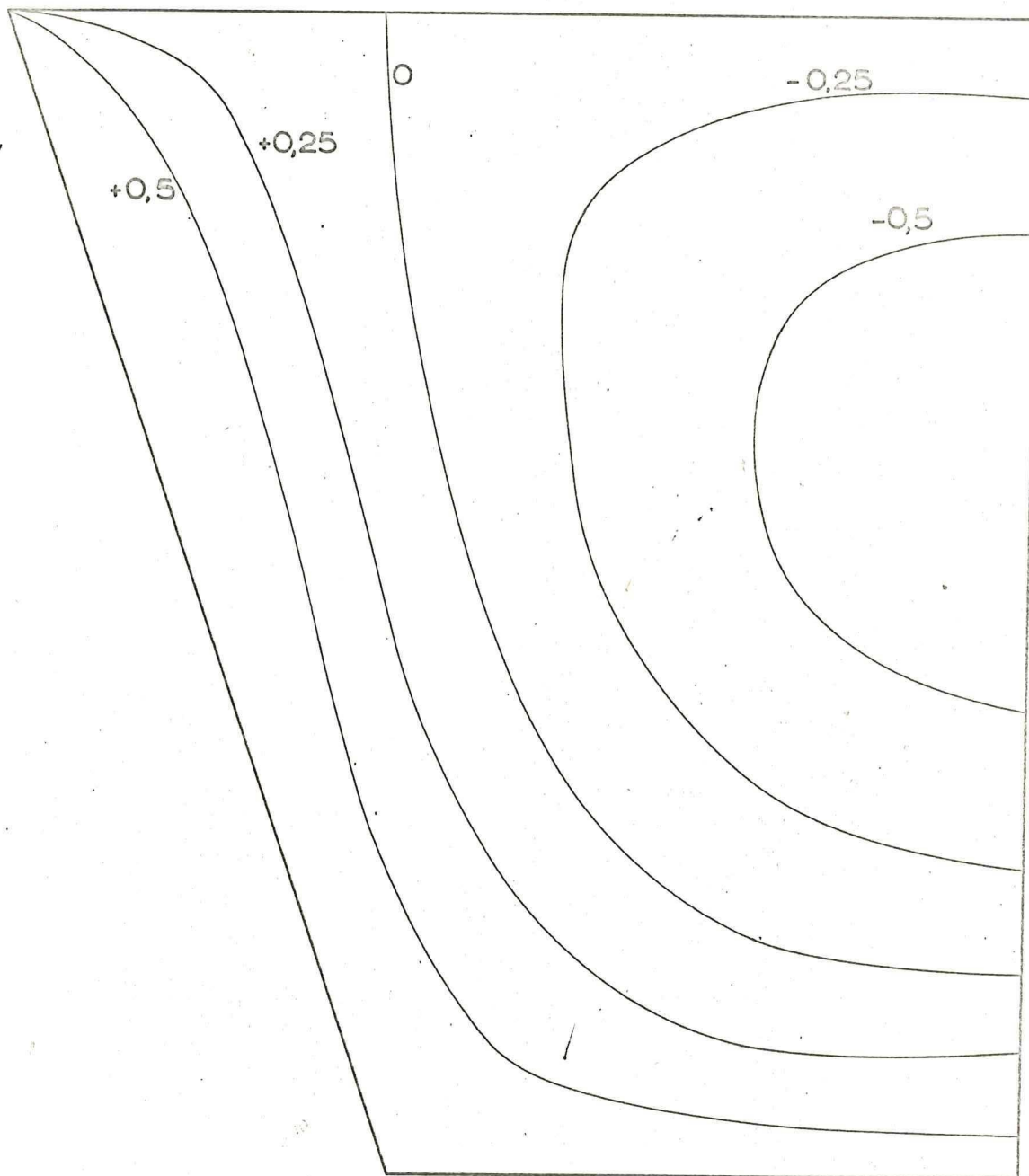
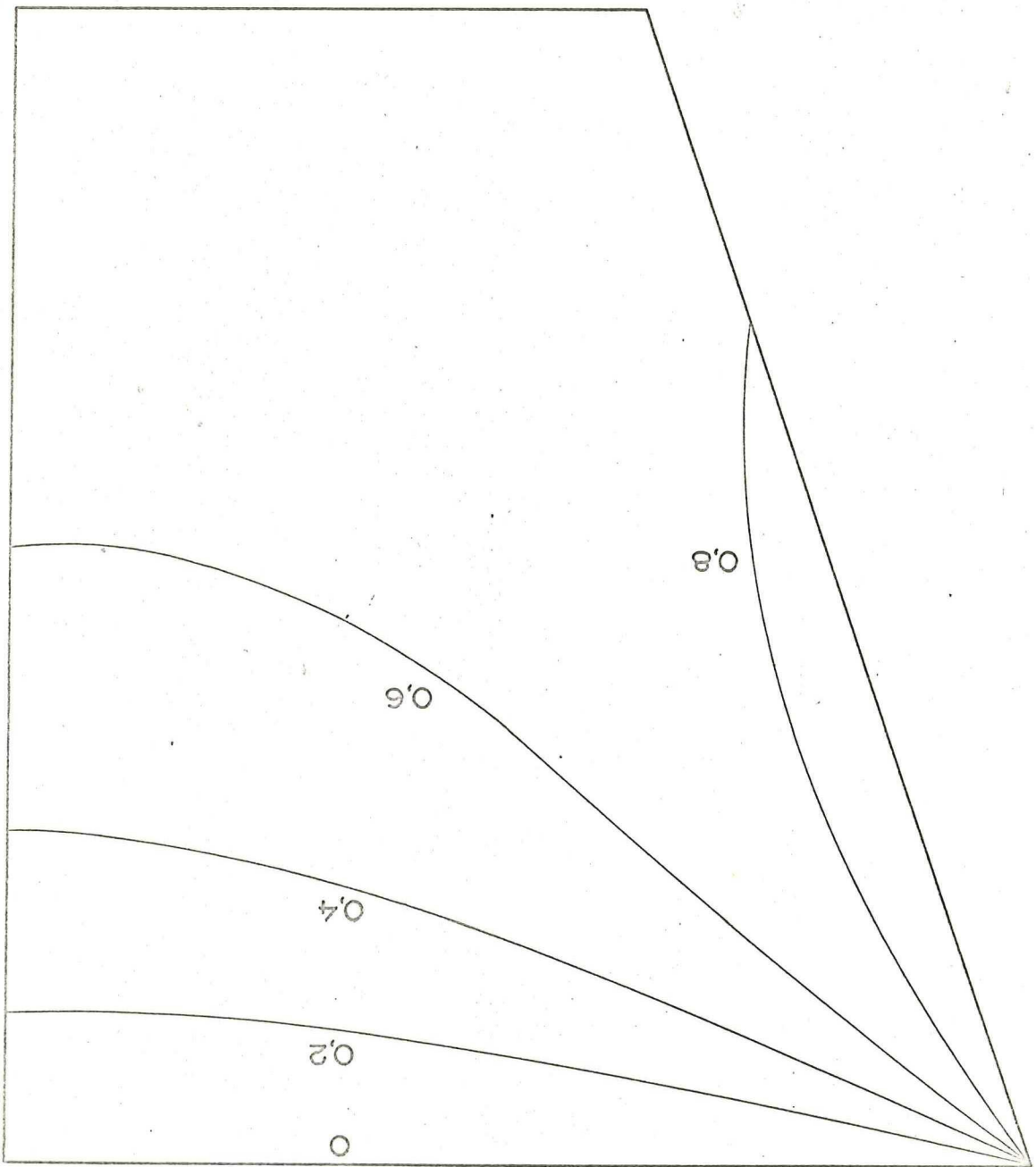


fig.30. Berekende isotachen in de dwarsdoorsnede bij nettodebiet nul.  
De getallen geven  $v_x/\tau ND$  aan.



Fig. 31. Berekende isotachen in de dwarsdoorsnede bij drukgradiënt nul. De getallen geven  $v^x/nND$  aan.



Omdat  $dp/dx$  bij verfijnen van het rooster boven in het rooster tot oneindig nadert en omdat juist bovenin de grootste bijdrage aan het debiet wordt geleverd, heeft de roosterfijnheid hier grote invloed op het debiet. Een goede waarde voor het debiet  $QT$  kon toch verkregen worden door het programma uit te voeren voor roosters van 10 bij 10 tot en met 50 bij 50 punten en de aldus verkregen reeks van  $QT$ 's te extrapoleren naar een zeer fijn rooster.

Uitkomsten van dit programma leveren weer een rechte drukdebiet-karakteristiek op, die vrijwel door de oorsprong gaat. Het debiet bij DPT is nul is zeer klein en bovendien in de twee boven- en onderhelften van de tetraëderspleten tegengesteld. De drukdebietkarakteristiek van de tetraëderspleet kan dus vastgesteld worden door bij slechts één DPT het programma te draaien voor verschillende roosterfijnheden. Fig. 32 en 33 geven voorbeelden van berekende snelheidsvelden voor DPT is nul en voor een representatieve DPT.

Het debiet  $QT$  neemt slechts weinig toe bij grotere HC, bijvoorbeeld slechts 6% als HC van 0,2 mm op 0,7 mm wordt gebracht.

Bij vergelijken met de metingen, waar HC een veel grotere invloed heeft, dient bedacht te worden dat de vulplaten aan de bovenzijde van de spleet recht afgewerkt zijn, zodat boven in de tetraëderspleet een "brievenbus" openblijft met diepte nul, het zijaanzicht van deze brievenbus is het kleine driehoekje in fig. 8.

Ongeacht de dikte zijn de aanwezige vulplaten zodanig afgewerkt dat de hoogte van de tetraëderspleet tot 18,5 mm wordt uitgebreid. Pogingen om dit in rekening te brengen door de tetraëderspleet tot hier door te trekken en als  $dp/dx$  te nemen DPT gedeeld door een lengte van de orde van HC faalden omdat dit gebiedje dan zo'n overheersende bijdrage aan het debiet leverde dat  $QT$  bij grotere HC gaat afnemen, alleen omdat bovenin  $dp/dx$  afneemt. In het volgende hoofdstuk zal bij het vergelijken van theorie en metingen op mogelijke schattingen voor dit extra lekdebiet worden ingegaan.





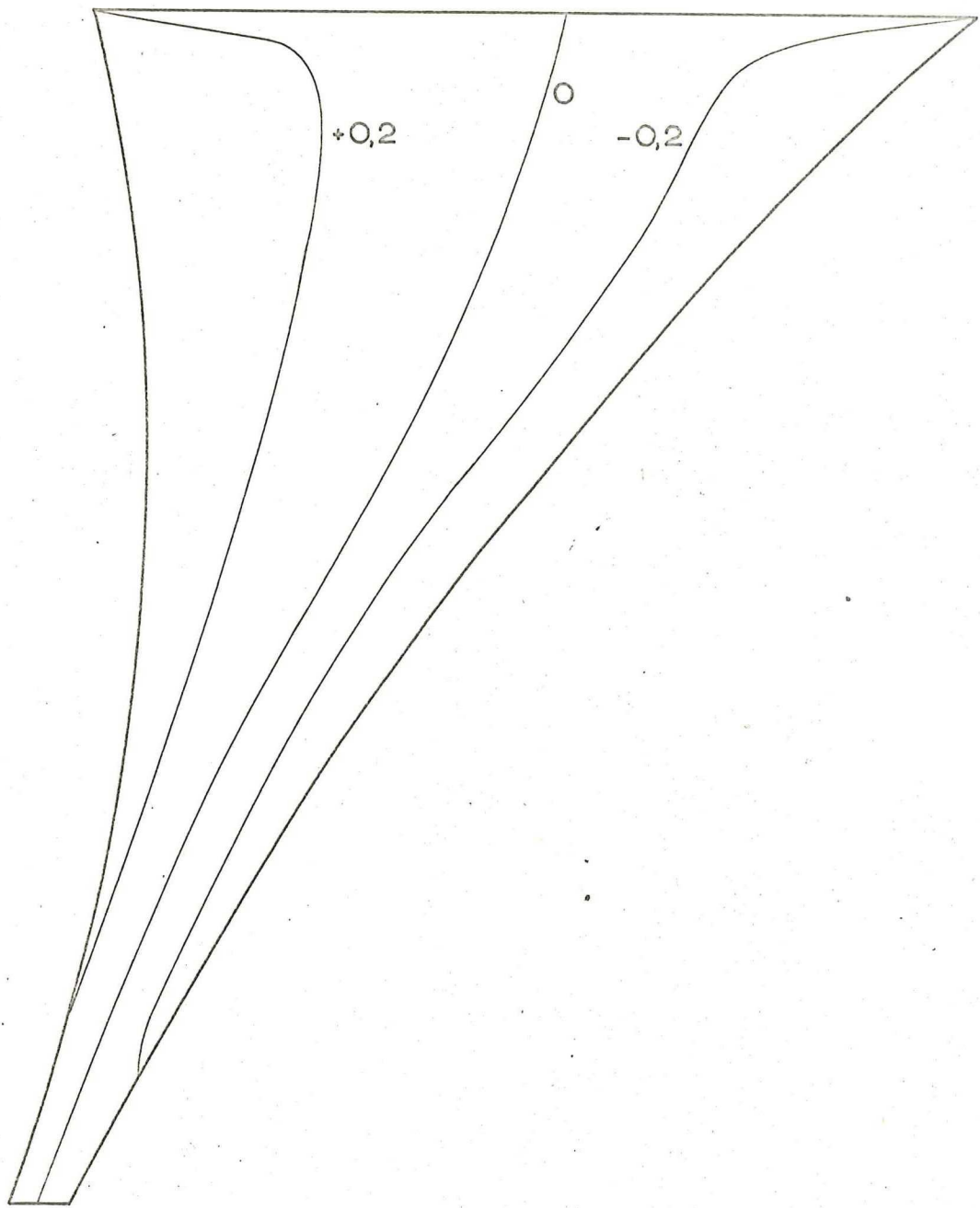


fig.32. Berekende isotachen in de tetraëderspleet bij drukgradiënt nul.





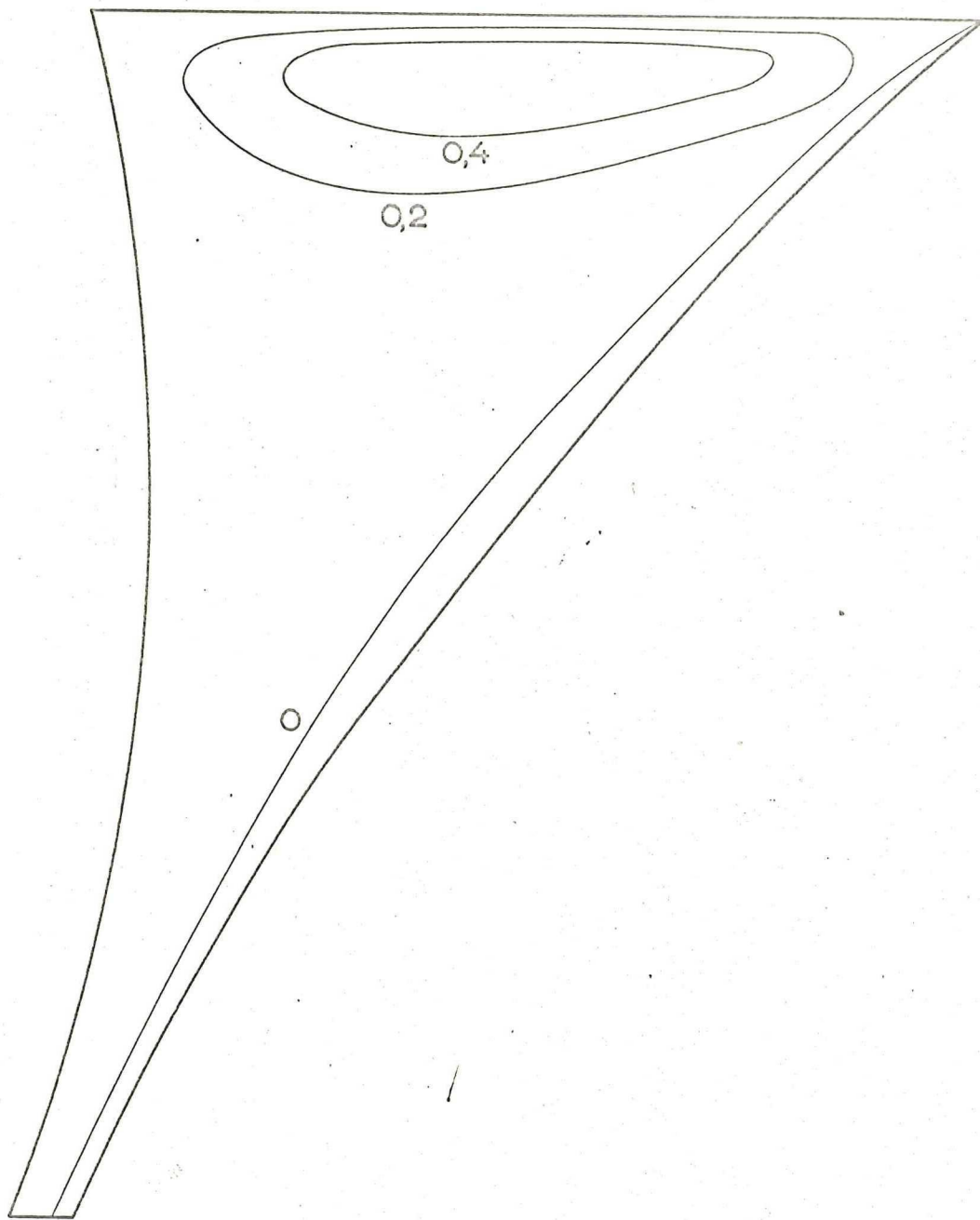


fig.33. Berekende isotachen in de teraëderspleet voor een representatieve drukgradiënt.

#### 4. CONCLUSIE EN SUGGESTIES.

##### 4.1. Vergelijking van theorie en metingen.

Bij het vergelijken van metingen en theorie wordt de aandacht gericht op de meest betrouwbare metingen, die weergegeven zijn in fig. 24. De per spleet gegeven formules of rekenwijzen worden nu omgerekend naar de dimensieloze kentallen, waarbij zonodig de gegevens van de gebruikte geometrie ingevuld worden. Zoals uit de meetgegevens blijkt bereikt  $DP/N\eta$  een maximale waarde van ongeveer  $2 \cdot 10^4$  (de sluitdruk bij de kleinste calander-spleet).

Voor de rugspleet levert invullen op:

$$\frac{QR}{2NV} = 0,385 \cdot 10^{-6} \frac{DPR}{N\eta} + 1,25 \cdot 10^{-2} \quad (4.1)$$

Er is een constante meesleurlek van 1,25% en een druklek van maximaal 0,8%.

De debieten door de calanderspleet, inclusief het calander-effect van de schroefflanken (dit laatste debiet  $QCF$  is een verticale meesleurstroming in de tetraëderspleetdoorsnede, en is vrijwel drukonafhankelijk) en door de dwarsdoorsnede zijn als volgt aan elkaar gerelateerd:

$$QCR = QC + QCF \quad (4.2)$$

$$DPC + DPCR = 2DP \quad / \quad (4.3)$$

terwijl aangenomen is dat

$$QCF = \frac{\pi N(D-H)H}{\cos \psi} H C \text{tg} \psi \quad (4.4)$$

Uit de berekeningen zijn verder de functies  $DPC(QC)$  en  $DPCR(QCR)$  bekend, deze vijf betrekkingen met zes variabelen leveren dan één drukdebiet-relatie op. De resultaten zijn:

$$HC = 0,20 \text{ mm: } \frac{QCR}{2NV} = 0,104 \cdot 10^{-6} \frac{DP}{N\eta} + 1,58 \cdot 10^{-2} \quad (4.5)$$

$$HC = 0,76 \text{ mm: } \frac{QCR}{2NV} = 2,60 \cdot 10^{-6} \frac{DP}{N\eta} + 9,16 \cdot 10^{-2} \quad (4.6)$$

Vergroten van de calanderspleet heeft tamelijk grote invloed op zowel meesleur- als druklek, hoewel de eerste overheerst.

Voor de tetraëderspleet hebben de berekeningen opgeleverd:

$$HC = 0,20 \text{ mm: } \frac{QT}{2NV} = 90,9 \cdot 10^{-6} \frac{DPT}{N\eta} \quad (4.7)$$

$$HC = 0,76 \text{ mm: } \frac{QT}{2NV} = 96,6 \cdot 10^{-6} \frac{DPT}{N\eta} \quad (4.8)$$

Er is (vrijwel) geen netto meesleurdebiet door de tetraëderspleet. Het tetraëderdebiet is onafhankelijk van  $QCR$  want aan boven- en onderzijde van de extruder komt het debiet van de tetraëderspleet aan de hoge druk zijde (gedeeltelijk) de kamer in terwijl er aan lage-druk zijde evenveel uitgaat. De drukopbouw in de kamer is in beide kamers aan weerszijden van een tetraëderspleet gelijk, zodat er geen extra druk over de tetraëderspleet staat. Bij meelopende schroeven verandert dit beeld volkomen omdat daar aan hogedrukzijde een grote spleet onder zit en aan lage-drukzijde boven, zodat er wel een groot netto tetraëderdebiet door de dwarsdoorsnede gaat. Bovendien is daar de drukopbouw in de kamers aan weerszijden verschillend.

De complete dimensieloze drukdebietkarakteristiek wordt nu verkregen door de drie lekdebieten bij elkaar op te tellen en het geheel af te trekken van de lijn van maximale opbrengst ( $Q/2NV = 1$ ).

Het resultaat is, indien voor DPR en DPT gewoon DP genomen wordt:

$$HC = 0,20 \text{ mm: } \frac{Q}{2NV} = - 0,91 \cdot 10^{-4} \frac{DP}{N\eta} + 0,97 \quad (4.9)$$

$$HC = 0,76 \text{ mm: } \frac{Q}{2NV} = - 1,00 \cdot 10^{-4} \frac{DP}{N\eta} + 0,90 \quad (4.10)$$

Wat betreft het drukaandeel in het lekdebiet overheerst de tetraëderspleet zeer sterk, het blijkt dat bij de kleinste calanderspleet dit lekdebiet een factor twee te groot uitvalt. Gedeeltelijk kan dit worden toegeschreven aan het feit dat de echte DPT kleiner dan DP zal zijn, zodat al met al de berekeningen voor kleine HC resultaten in de goede orde geven.

Metingen van R. Kalf c. s. (9) verricht aan een schijven-model van de tetraëderspleet, met  $HC = 0$  en waar bovendien de kamerbodems ontbraken, leverden voor de gegeven geometrie op:

$$\frac{QT}{2NV} = 73,5 \cdot 10^{-6} \frac{DPT}{N\eta} \quad , \quad (4.11)$$

hetgeen dus nog gunstiger uitkomt maar toch nog 50% te groot is en bovendien alleen geldt voor  $HC = 0$ .

Het meesleureffect van calanderspleetvergroting wordt door de gegeven theorie goed verklaard, hoewel de berekende lijnen alle iets te hoog liggen.

De helling van de berekende lijnen neemt bij calanderspleet vergroten veel te weinig af; waarschijnlijk moet dit aan het brievenbuseffect worden toegeschreven dat immers bij calanderspleetvergroten de tetraëderspleet buitensporig vergrootte.

Pogingen om dit in rekening te brengen door de vergrote tetraëderspleet door te rekenen met dan in de brievenbus als  $dp/dx$  DPT gedeeld door een lengte van de orde HC mislukten: het brievenbuseffect is dan zo groot dat bij grotere HC het lekdebiet afnam, enkel en alleen omdat in de uiterste bovenrand  $dp/dx$  kleiner werd.

#### 4. 2. Conclusie.

De geïntroduceerde dimensieloze kentallen zijn geschikt om de drukdebietkarakteristiek te beschrijven. De invloed van de variabelen viscositeit en toerental wordt door de theorie goed voorspeld, evenals de invloed van de calanderspleet op het meesleurgedeelte van de stroming.

De grote invloed van de calanderspleet op het drukgedeelte van de stroming is waarschijnlijk een gevolg van het brievenbuseffect en kan met de gegeven theorie niet bevredigend verklaard worden. De gedane poging om de lek door de tetraëderspleet te berekenen geeft slechts een goede grootte-orde die ook eenvoudig anders verkregen kan worden. Kennelijk kan deze stroming, met name in het zo belangrijke bovengedeelte van de spleet, niet als een ingestelde stroming beschouwd worden, terwijl bovendien voor de drukval over de spleet slechts een bovengrens beschikbaar is.

#### 4. 3. Suggesties voor voortzetting van het onderzoek.

Experimenteel kan wat betreft de drukdebietkarakteristiek geprobeerd worden het brievenbuseffect aanmerkelijk te verkleinen door zuiver om de schroeven passende vulplaten te frezen. Omdat het brievenbuseffect echter ook in echte extruders optreedt, is het toch interessant om ook hiervoor goede schattingen te verkrijgen.

Om de kwaliteit van de metingen te verbeteren moeten extra drukmetergaten aangebracht worden bij de schroefuiteinden waarna de lineariteit

van de drukopbouw (een der pijlers van de theorie) gecontroleerd kan worden, terwijl verder met een hogere viscositeit gewerkt kan worden, die bovendien door temperatuurbeheersing beter constant kan worden gehouden. Bij de geometrievariabelen komt als eerste de flankhoek PSI in aanmerking om onderzocht te worden. Door de grote PSI in de aanwezige schroeven wordt de invloed van de tetraëderspleet zeer groot; het is mogelijk dat de gegeven theorie voor kleinere, meer normale PSI betere resultaten geeft. De gegeven theorie voor de calanderspleet kan eventueel in een eenvoudige opstelling apart geverifieerd worden.

Als de tracers zoals beschreven in Appendix A vervaardigd zijn kunnen stroming en menging in de extruder bestudeerd worden en kunnen verblijftijdspreidingen gemeten worden, zodat wat dit betreft niet langer gegist hoeft te worden maar de berekende snelheidsverdelingen gecontroleerd kunnen worden.

Als het toerental van de extruder door toepassen van een thyristor-geregelde gelijkstroommotor en een nieuwe wormkast voldoende gestabiliseerd is kunnen met de snelle U. V. -recorder de drukval per kamer in dwarsrichting en de drukval over de schroefrug onderzocht worden.

Theoretisch is een eerste vereiste het vinden van een andere aanpak voor de tetraëderspleet, die wellicht gevonden kan worden in het beschouwen van de tetraëderspleet (met eventuele brievenbus) als een plotselinge vernauwing in het overigens wijde schroefkanaal, waarbij niet zozeer afgegaan wordt op de drukgradiënt in de spleet als wel op de drukval over de spleet. Toepassen van de drukdebietrelatie voor een spleet in een plaat; zoals gegeven door Beek en Holmes (4)

$$\Delta P = (8,8 + 12 \frac{L}{H}) \frac{\eta}{BH^2} Q \quad (4.12)$$

waarin H de spleethoogte, B de spleetbreedte en L de plaatdikte is, waarbij voor de hand liggende benaderingen voor de tetraëderspleet-geometrie worden ingevuld leidt al meteen tot dezelfde waarden als gemeten door Kalf c. s. (4.11) dus beter dan de theoretische voorspellingen. Omdat toepassing van (4.12) nog verfijnd kan worden door betere, "gewogen" lengtematen uit de tetraëdergeometrie af te leiden, of door de tetraëderspleet te vullen met aansluitende spleten, lijkt deze weg veelbelovend. De resultaten kunnen misschien ook nog flink verbeterd worden door een betere indruk van DPT te krijgen (wellicht door meten), hetgeen overigens ook de nu gegeven theorie kan verbeteren. Het voordeel van het volledig doorrekenen van de doorsnede ten opzichte van alleen netto-drukval en netto-debiet te beschouwen is dat het debiet in beide richtingen bekend is, hetgeen vooral bij lage drukken (free discharge, grote spuitopeningen) door de dan relatief belangrijk wordende meesleurstromingen bij de flanken grote invloed op de verblijftijdspreiding kan hebben. Dit bezwaar is overkomelijk omdat voor de meesleurstromingen eenvoudige en waarschijnlijk goede schattingen gemaakt kunnen worden (die ook experimenteel geverifiëerd kunnen worden).

Rekentechnisch kunnen de aanwezige programma's zó omgebouwd en aan elkaar gekoppeld worden dat zij na invoer van geometrie- en materiaalgegevens direct de dimensieloze drukdebietkarakteristiek geven. Door modulair te programmeren is dit al zo veel mogelijk voorbereid. In bepaalde gevallen, met name wanneer de kamer als geheel beschouwd wordt en in de tetraëderspleetberekeningen zal het zinvol zijn over te gaan op de finite element-methode.

Om meer inzicht in de menging te krijgen is het van belang ook de snelheden in het vlak van doorsnede van de kamer te berekenen.



De recente publicatie van Marshall (10) kan hierbij als leidraad dienen.

Een verbetering is nog de dwarsdoorsnede in cylindercoördinaten op te lossen, waarna, vooral voor kleine PSI wellicht zinvolle vergelijking met de door Rieger en Sestak (8) gegeven analytische oplossingen voor rechthoekige draad mogelijk is.

Hierna ligt het gebied van het aanpassen van het newtonse geval aan reëlere extruderomstandigheden open.

- - - - -

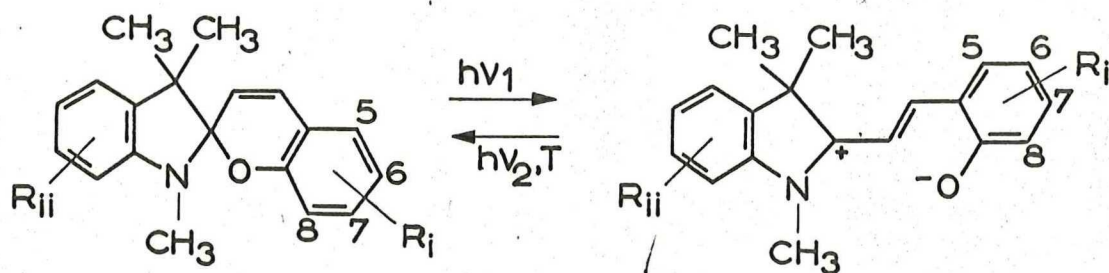
## APPENDIX A

Reactiveerbare tracers

Zoals reeds betoogd vereisen verblijftijdspreidingsmetingen grote hoeveelheden modelvloeistof van hoge viscositeit, terwijl de modelvloeistof met de gunstigste eigenschappen siliconenolie hetgeen per kg ongeveer f 15,-- kost.

Het was daarom de moeite waard een onderzoek te verrichten naar een zodanige tracer dat dezelfde olie steeds opnieuw gebruikt zou kunnen worden. De eerste poging met azo-kleurstoffen mislukte, weliswaar vertoonde de azo-kleurstof na oxideren een ander absorbtie-spectrum en was hij oplosbaar in siliconenolie, maar het oxideren moet geschieden onder doorleiden van stikstof en onder bestraling met u.v.-licht hetgeen tot een ingewikkelde proces-eenheid bij de extruder zou leiden en veel tijd zou vragen. Bovendien kan er dan slechts instrumenteel gemeten worden omdat de kleur voor, en na oxideren op het oog slechts weinig verschilt.

Succesvoller waren de experimenten met fotochrome spiropyranen. Trimethyl-indolino-benzospiropyranen hebben de algemene vorm:



I

en vertonen, zoals geschetst, bij bestralen met licht van een geschikte golflengte (meestal u.v.) een kleuromslag door ringopenen van de zuurstofbinding. De omgekeerde reactie geschiedt thermisch met een snelheid die onder andere bepaald wordt door de aard van de substituenten en kan ook bevorderd worden door licht van een andere golflengte, meestal in het zichtbare gebied. Het oplosmiddel is van invloed op de kleuromslag en kan problemen geven zoals uitkristalliseren van de gekleurde vorm, kleurloos zijn van de vorm met open ring en verschuiven van het evenwicht. Bercovici et.al. <sup>12</sup> geven een lijst van de terugvaltijden bij verschillende substituenten, waaruit gekozen werd 5', 7' dichloor 6' nitro - 1, 3, 3 - trimethyl indolinobenzopyrylospiran dat langzaam genoeg terugvalt om bij verblijftijdspreidingsmetingen ook in spleten

/(12)

met eventueel door visceuse dissipatie verhoogde temperatuur niet merkbaar te 'verdwijnen' en dat bij temperatuurverhoging tot 50° C toch snel genoeg terugvalt om binnen een uur opnieuw bruikbaar te zijn.

De pogingen tot synthetiseren van deze verbinding (zij is niet verkrijgbaar) hebben tot op heden geen resultaat opgeleverd. Teleurstellend was de gang door de literatuur.

Bercovici (12) zegt de spiropyranen te hebben bereid door de corresponderende salicylaldehyden door condenseren te koppelen aan 1, 3, 3 trimethyl-2-methylen indoline (fischerse base) en geeft daarvoor als referenties: (13), (14) en (15).

Koelsch en Workman (13) geven algemene voorschriften voor het koppelen van salicylaldehyden aan fischerse bas, maar noemen niet de gezochte verbinding. Berman, Fox en Thomson (14) tonen aan dat de invloed van de substituenten op de snelheid van ringsluiten voldoet aan de Hammett-vergelijking en verwijzen voor de bereiding naar Koelsch et.al. (13). De gezochte verbinding behoort niet tot de door hen onderzochte reeks spiropyranen.

Heller, Fine en Henry (15) rapporteren alleen over 6-nitro-I en geven (14) als referentie zodat dit spoor doodloopt. Over het gewenste 3,5-dichloor 4 nitrosalicylaldehyde wordt in de gehele chemische literatuur (science citation index, chemical abstracts, Uhlmann) tot en met het eerste kwartaal van 1973 niets gevonden, terwijl ook erkende scheikundigen geen kans zagen deze stof te bereiden. De stof is evenmin in de handel verkrijgbaar. Dit spoor loopt dus dood (de vraag blijft open hoe Bercovici er aan gekomen is).

De naspeuringen in de literatuur brachten echter nieuwe publicaties over de gezochte spiropyran aan het licht, waarvan de belangrijkste die van Bach en Calvert (16). Zij hebben van de gezochte stof onderzocht hoe groot de opbrengst aan gekleurde vorm bij bestralen is en geven op de stof te hebben ontvangen van NCR, Dayton, Ohio en noemen als referentie voor de bereiding Bowman et. al. (17). Om zekerheid te krijgen werd deze publicatie langs twee verschillende wegen aangevraagd. Juist tijdens het schrijven van dit verslag werd dankzij bemiddeling van NCR een exemplaar ontvangen. De aanvraag via de centrale bibliotheek waarop nog niets was vernomen bleek bij navraag te zijn zoekgeraakt. Inmiddels werden enige andere spiropyranen gesynthetiseerd. De combinatie van 3,5 dinitrosalicylaldehyde en fischerse base bleek onoplosbaar in siliconenolie. Deze verbinding wordt door Koelsch et.al. (13) beschreven als thermochroom en vertoonde inderdaad, opgelost in alcohol de eigenschap dat de rode kleur met de temperatuur toeneemt en bij 0C vrijwel verdwenen. Deze stof is ook fotochroom: met een elektronenflitser wordt de op-

lossing ontkleurd waarna de kleur langzaam terugkeert.

6'-nitro 8' methoxy-spiropyran werd door F. Jongenelen bereid uit de fischerse base en uit het nitratie-produkt van o-vaniline, recepten en grondstoffen op het laboratorium aanwezig.

Deze stof lost goed op in siliconenolie er vertoont zich in geringe concentraties (0,03%) na bestralen met u.v. een diepblauwe kleur. Voor verblijftijd-spreidingsmetingen valt de gekleurde vorm iets te snel terug, hoewel met gekoelde olie wellicht goede mogelijkheden zijn. Voor het bestuderen van snelheidsvelden en menging in siliconenolie is de stof ideaal. De opstelling moet dan wel tegen zonlicht afgeschèrmd worden, terwijl het beter is de spiropyran in niet gekleurde vorm te bewaren (zwarte reservoirs).

## appendix B

### tetrac

```
10.      R=.035;
20.      H=.01;
30.      s=.02;
40.      psi=.24435;
50.      pi=4*atan(1);
60.      tgpsi=sin(psi)/cos(psi);
70.      im:  IMAGE;
-----
80.      AA:  IMAGE;
.....
90.      GET LIST(f,HC);
95.      HG=sqrt(R*R-(R-(H-HC)/2)**2);
100.     PUT LIST('');
110.     PUT LIST('');
120.     PUT LIST('  t      A      B      A+SA      B+SB');
130.     PUT LIST('');
140.     loop: DO t=-HG TO HG*1.001 BY HG/10;
150.         A=(sqrt(t*t+(R-f*(H-HC))*(R-f*(H-HC)))-(R-f*(H-HC))*tgpsi
+HC*tgpsi;
160.         B=-((sqrt(t*t+(R-(1-f)*(H-HC))*(R-(1-f)*(H-HC)))-(R-(1-f)*(
H-HC)))*tgpsi;
170.         SA=s*atan(t/(R-f*(H-HC)))/2/pi;
180.         SB=s*atan(t/(R-(H-HC)*(1-f)))/2/pi;
190.         PUT IMAGE(t,1000*A,1000*B,1000*(A+SA),1000*(B+SB))(im);
195.         GO TO L;
200.         hoekA=atan((R-f*(H-HC))/sqrt(t*t+(R-f*(H-HC))**2)*tgpsi-s/
2/pi*t/(t*t+(R-f*(H-HC))**2));
210.         hoekB=atan((R-(1-f)*(H-HC))/sqrt(t*t+(R-(1-f)*(H-HC))**2)*
tgpsi+s/2/pi*t/(t*t+(R-(1-f)*(H-HC))**2));
220.         PUT IMAGE(hoekA,hoekB,(hoekA+hoekB)/2,cos(hoekA),cos(hoekB
),cos((hoekA+hoekB)/2))(AA);
222.     L:  ;
230.     END loop;
```

/schroefgeometrie, maten in m/;

d=.07;

h=.01;

s=.02;

l=.35;

eps=.0075;

psi=.24435/radialen\*/;

/einde schroefgeometrie\*/;

pi=4\*atan(1);

/berekenen van het volume van een kamer\*/;

R=d/2;

Vvol=pi\*(R\*R-(R-h))\*(R-h)\*(eps-2\*(R-h)\*sin(psi))/cos(psi);

+4/3\*pi\*sin(psi)/cos(psi)\*(R\*R\*R-(R-h)\*\*3);

alfa=2\*atan(sqrt(2\*d\*h-h\*h))/(d-h));

PUT LIST('alfa=',alfa);

H=sqrt(2\*d\*h-h\*h);

PUT LIST('H=',H);

Awvol=R\*R\*(alfa-sin(alfa));

int=0;

IF psi=0 THEN GO TO psio;

DO 1=0 TO h\*sin(psi)/cos(psi) BY h\*sin(psi)/cos(psi)\*.01;

alfa1=2\*atan(sqrt((2\*r\*(2\*r-h)/(3\*R\*R+h\*h+r\*r-4\*R\*h))\*\*2-

1));

alfa2=2\*atan(sqrt(R\*R/(2\*R-h-(3\*R\*R+h\*h-4\*R\*h+r\*r)/(4\*R-2

\*h)\*\*2-1));

Aw=r\*r/2\*(alfa1-sin(alfa1))+R\*R/2\*(alfa2-sin(alfa2));

int=int+Aw\*h\*sin(psi)/cos(psi)\*.01;

END loop0;

int=int-Awvol\*eps-2\*int;

V=Vvol-Awvol\*eps-2\*int;

PUT LIST('V=',V);

/einde berekening kamervolume\*/;

300.

290.

280.

270.

260.

250.

240.

230.

220.

210.

200.

190.

180.

170.

160.

150.

140.

130.

120.

110.

100.

90.

80.

70.

60.

50.

40.

30.

20.

10.

wiwi

```
10.          V=.000033578;  
20.          num=11;  
30.          eta=.48;  
40.    im:    IMAGE;  
.....  
50.    1:     GET LIST(n,urw,ubw,phiv);  
60.          pw=6333+3333*ubw-3781*urw;  
70.          PUT IMAGE(pw/(num*n*eta),phiv/(n*V))(im);  
80.          GO TO 1;
```

CALAND

```

0 BEGIN REAL L,C,S,H,EPS,R,RS,HG,HO,N,BTA,NU,V1,VIX,V2,VZX,FI,DPC,DPDX
2 IDPX,DPDX1,DPDX2,Q,Q1,Q2,X,YP,YM;
PROCEDURE BLANK(C,N); VALUE D,N; INTEGER D,N; CODE;
PROCEDURE FLU(D,M,N,X); VALUE D,M,N,X; INTEGER D,M,N; REAL X; CODE;
1 PROCEDURE LINE(D,N); VALUE D,N; INTEGER D,N; CODE;
PROCEDURE SETTING(D,P,Q); VALUE D,P,Q; INTEGER D,P,Q; CODE;
19 PROCEDURE PAGE(D); VALUE D; INTEGER D; CODE;
23 PROCEDURE INTCAL; BEGIN IDPX:=0;
FOR X:=-HG/2 STEP HG/200 UNTIL HG/2 DO BEGIN
YP:=HO+K*(I=SQRT(1-X*X/R)); YM:=-HO-RS*(1-SQRT(1-X*X/R));
VIX:=VI*SQRT(1-X*X/R); VZX:=VZ*SQRT(1-X*X/R);
DPDX:=4*ETA*(Q+(VZX-VIX)*(YP+YM)/2+VIX*YM=VZX*YP)/
(YM*YM/3=YP*YP/3+YM*YP-YM*YM*YP);
IDPX:=IDPX+DPDX*HG/200;
END;
IDPX:=IDPX-DPDX*HG/200;
END;
IDPX:=IDPX-DPDX*HG/200;
END INTCAL;
CVA:Q:=(Q2*(IDPX1-DPC)-Q1*(IDPX2-DPC))/(IDPX1-IDPX2);
INTCAL;
IF DPC>-6 THEN GOTO CAB ELSE CAB;
CAB: IF ABS((IDPX-DPC)/DPC)<-6 THEN GOTO CAD;
CAC: IF ABS(IDPX1-DPC)>ABS(IDPX2-DPC) THEN
BEGIN Q1:=Q; IDPX1:=IDPX; END ELSE
BEGIN Q2:=Q; IDPX2:=IDPX; GOTO CAA;
CAD: BLANK(1,4); GUTSTRING(1,4); FLO(1,6,2,EP*0); BLANK(1,4);
OUTSTKING(1,4); FLO(1,6,2,EPDX); LINE(1,1);
END;
END;
END;

```



# TESTCR

```

0 'BEGIN' 'INTEGER' 'NN;NN:=10;
3 'BEGIN' 'REAL' 'H,B,D,R,DPDX,DPDX1,DPDX2,NU,PI,ETA,V,
5     ICHVX,E,F,G,QC,QCR,QCR1,QCR2;
5     'REAL' 'ARRAY' 'VX(/O:NN,O:NN/);
6     'INTEGER' 'I,J,K,KK;
7 'PROCEDURE' 'BLANK(D,N);' 'VALUE' 'D,N;' 'INTEGER' 'D,N;' 'CODE' ';
1 'PROCEDURE' 'FLO(D,M,N,X);' 'VALUE' 'D,M,N,X;' 'INTEGER' 'D,M,N;' 'REAL' 'X;' 'CODE' ';
6 'PROCEDURE' 'FIX(D,M,N,X);' 'VALUE' 'D,M,N,X;' 'INTEGER' 'D,M,N;' 'REAL' 'X;' 'CODE' ';
21 'PROCEDURE' 'AFIX(D,M,N,X);' 'VALUE' 'D,M,N,X;' 'INTEGER' 'D,M,N;' 'REAL' 'X;' 'CODE' ';
26 'PROCEDURE' 'LINE(D,N);' 'VALUE' 'D,N;' 'INTEGER' 'D,N;' 'CODE' ';
30 'PROCEDURE' 'SETTING(D,P,Q);' 'VALUE' 'D,P,Q;' 'INTEGER' 'D,P,Q;' 'CODE' ';
34 'PROCEDURE' 'PAGE(D);' 'VALUE' 'D;' 'INTEGER' 'D;' 'CODE' ';
38 'PROCEDURE' 'CALCVX;' 'BEGIN'
40     'FOR' 'J:=1' 'STEP' '1' 'UNTIL' 'NN-1' 'DO'
41     'FOR' 'I:=1' 'STEP' '1' 'UNTIL' 'NN-1' 'DO' 'VX(/I,J/):=
43     E*(VX(/I,J-1/)+VX(/I,J+1/))+F*(VX(/I-1,J/)+VX(/I+1,J/))-G;
43     'FOR' 'J:=NN-1' 'STEP' '-1' 'UNTIL' '1' 'DO'
44     'FOR' 'I:=1' 'STEP' '1' 'UNTIL' 'NN-1' 'DO' 'VX(/I,J/):=
46     E*(VX(/I,J-1/)+VX(/I,J+1/))+F*(VX(/I-1,J/)+VX(/I+1,J/))-G;
46     'FOR' 'J:=1' 'STEP' '1' 'UNTIL' 'NN-1' 'DO'
47     'FOR' 'I:=NN-1' 'STEP' '-1' 'UNTIL' '1' 'DO' 'VX(/I,J/):=
49     E*(VX(/I,J-1/)+VX(/I,J+1/))+F*(VX(/I-1,J/)+VX(/I+1,J/))-G;
49     'FOR' 'J:=NN-1' 'STEP' '-1' 'UNTIL' '1' 'DO'
50     'FOR' 'I:=NN-1' 'STEP' '-1' 'UNTIL' '1' 'DO' 'VX(/I,J/):=
52     E*(VX(/I,J-1/)+VX(/I,J+1/))+F*(VX(/I-1,J/)+VX(/I+1,J/))-G;
52     'FOR' 'I:=1' 'STEP' '1' 'UNTIL' 'NN-1' 'DO'
53     'FOR' 'J:=1' 'STEP' '1' 'UNTIL' 'NN-1' 'DO' 'VX(/I,J/):=
55     E*(VX(/I,J-1/)+VX(/I,J+1/))+F*(VX(/I-1,J/)+VX(/I+1,J/))-G;
55     'FOR' 'I:=NN-1' 'STEP' '-1' 'UNTIL' '1' 'DO'
56     'FOR' 'J:=1' 'STEP' '1' 'UNTIL' 'NN-1' 'DO' 'VX(/I,J/):=
58     E*(VX(/I,J-1/)+VX(/I,J+1/))+F*(VX(/I-1,J/)+VX(/I+1,J/))-G;
58     'FOR' 'I:=1' 'STEP' '1' 'UNTIL' 'NN-1' 'DO'
59     'FOR' 'J:=NN-1' 'STEP' '-1' 'UNTIL' '1' 'DO' 'VX(/I,J/):=
61     E*(VX(/I,J-1/)+VX(/I,J+1/))+F*(VX(/I-1,J/)+VX(/I+1,J/))-G;
61     ICHVX:=0;
62     'FOR' 'I:=NN-1' 'STEP' '-1' 'UNTIL' '1' 'DO'
63     'FOR' 'J:=NN-1' 'STEP' '-1' 'UNTIL' '1' 'DO'
64     ICHVX:=ICHVX+ABS(E*(VX(/I,J-1/)+VX(/I,J+1/))+F*(VX(/I-1,J/)+
65     VX(/I+1,J/))-G-VX(/I,J/));
65     'FOR' 'I:=NN-1' 'STEP' '-1' 'UNTIL' '1' 'DO'
66     'FOR' 'J:=NN-1' 'STEP' '-1' 'UNTIL' '1' 'DO' 'VX(/I,J/):=
68     E*(VX(/I,J-1/)+VX(/I,J+1/))+F*(VX(/I-1,J/)+VX(/I+1,J/))-G;
68 'END' 'CALCVX;
69 'PROCEDURE' 'PICTURE;' 'BEGIN' 'BLANK(1,10);
72     'FOR' 'I:=NN-1' 'STEP' '-1' 'UNTIL' '1' 'DO'
73     FIX(1,3,0,1000*VX(/I,0/)/(PI*NU*D));LINE(1,2);
75     'FOR' 'J:=1' 'STEP' '1' 'UNTIL' 'NN-1' 'DO' 'BEGIN' 'BLANK(1,4);
78     'FOR' 'I:=NN' 'STEP' '-1' 'UNTIL' '0' 'DO'
79     FIX(1,3,0,1000*VX(/I,J/)/(PI*NU*D));LINE(1,2); 'END'; 'BLANK(1,10);
83     'FOR' 'I:=NN-1' 'STEP' '-1' 'UNTIL' '1' 'DO'
84     FIX(1,3,0,1000*VX(/I,NN/)/(PI*NU*D));LINE(1,3);
86 'END' 'PICTURE;
87 'PROCEDURE' 'INTVX;' 'BEGIN' 'QCR:=0;
90     'FOR' 'J:=1' 'STEP' '1' 'UNTIL' 'NN-1' 'DO' 'BEGIN'

```

# TESTCR

```

92   'FOR' I:=1 'STEP' 1 'UNTIL' NN-1 'DO'
93   QCR:=QCR+VX(/I,J/)*B*H;QCR:=QCR+VX(/O,J/)*B*H;'END';
96   QCR:=QCR+NN*VX(/NN/2,NN/)*B*H/2;
97   QCR:=QCR/NN/NN;
98   'END' INTVX;
99   SETTING(1,132,55);V:=33.57843-6;
101  H:=.01;B:=.01;D:=.07;NU:=.68;ETA:=.19;R:=D/2;PI:=4*ARCTAN(1);
108  E:=B*B/2/(B*B+H*H);F:=H*H/2/(B*B+H*H);
110   'COMMENT' FIXED BOUNDARY CONDITIONS;
110   'FOR' I:=1 'STEP' 1 'UNTIL' NN-1 'DO' 'BEGIN'
112   VX(/I,0/):=0;VX(/I,NN/):=2*PI*NU*(R-H);'END';
115   'FOR' J:=1 'STEP' 1 'UNTIL' NN-1 'DO' VX(/O,J/):=VX(/NN,J/):=2*PI*NU*(R-H*J/
117   NN);
117   'COMMENT' END FIXED BOUNDARY CONDITIONS;
117   'COMMENT' FIRST START VALUES;
117   DPDX1:=12*PI*NU*(R-H)*ETA/H/H;
118   'FOR' J:=1 'STEP' 1 'UNTIL' NN-1 'DO'
119   'FOR' I:=1 'STEP' 1 'UNTIL' NN-1 'DO'
120   VX(/I,J/):=2*PI*NU*(R-H)*(3*J/NN*J/NN-2*J/NN);
121   'COMMENT' END FIRST START VALUES;
121   DPDX:=DPDX1;G:=B*B*H*H*DPDX/ETA/2/NN/NN/(B*B+H*H);K:=0;
124   CRA:   CALC VX;K:=K+1;
127   'IF' ICHVX/(PI*NU*D*(NN-1)*(NN-1))>'-7' THEN 'GOTO' CRA;
129   INTVX;QCR1:=QCR;
131   OUTSTRING(1,('FIRST RELAXATION IN'));AFIX(1,3,0,K);
133   OUTSTRING(1,('PROCEDURES CALC VX'));BLANK(1,5);
135   OUTSTRING(1,('QCR1='));FLO(1,8,2,QCR1);BLANK(1,5);
138   OUTSTRING(1,('DPDX1='));FLO(1,8,2,DPDX1);LINE(1,8);
141   'COMMENT' SECOND START VALUES;
141   DPDX2:=12*PI*NU*D*ETA/B/B;
142   'FOR' J:=1 'STEP' 1 'UNTIL' NN-1 'DO'
143   'FOR' I:=1 'STEP' 1 'UNTIL' NN-1 'DO'
144   VX(/I,J/):=DPDX2/2/ETA*(J*H/NN*(J*H/NN-H))+VX(/NN/2,NN/)*J/NN;
145   'COMMENT' END SECOND START VALUES;
145   DPDX:=DPDX2;G:=B*B*H*H*DPDX/ETA/2/NN/NN/(B*B+H*H);K:=0;
148   CRB:   CALC VX;K:=K+1;
151   'IF' ICHVX/(PI*NU*D*(NN-1)*(NN-1))>'-7' THEN 'GOTO' CRB;
153   INTVX;QCR2:=QCR;
155   OUTSTRING(1,('SECOND RELAXATION IN'));AFIX(1,3,0,K);
157   OUTSTRING(1,('PROCEDURES CALC VX'));BLANK(1,5);
159   OUTSTRING(1,('QCR2='));FLO(1,8,2,QCR2);BLANK(1,5);
162   OUTSTRING(1,('DPDX2='));FLO(1,8,2,DPDX2);LINE(1,8);
165
165   'FOR' QC:=0 'STEP' NU*V/10 'UNTIL' NU*V*1.01 'DO' 'BEGIN'
167
167   'COMMENT' SHOOTING ROUTINE STARTS HERE;KK:=0;
168   'COMMENT' KK IS NUMBER OF SHOOTING ROUTINES;
168   CRC:   DPDX:=(DPDX2*(QCR1-QC)-DPDX1*(QCR2-QC))/(QCR1-QCR2);KK:=KK+1;
171   G:=B*B*H*H*DPDX/ETA/2/NN/NN/(B*B+H*H);K:=0;
173   CRD:   CALC VX;K:=K+1;
176   'IF' ICHVX/(PI*NU*D*(NN-1)*(NN-1))>'-7' THEN 'GOTO' CRD;
178   INTVX;
179   OUTSTRING(1,('RELAXATION IN'));AFIX(1,3,0,K);
181   OUTSTRING(1,('PROCEDURES CALC VX'));BLANK(1,5);
183   OUTSTRING(1,('QCR='));FLO(1,8,2,QCR);BLANK(1,5);

```

TESTCR

```
OUTSTRING(1, ('DPDX='), ('); FLD(1, 8, 2, DPDX); LINE(1, 8);
IF ABS(QCR-QC)/(NU*V) > -4 THEN BEGIN
  IF ABS(QCR1-QC) > ABS(QCR2-QC) THEN BEGIN DPDX1:=DPDX; QCR1:=QCR; END
  ELSE BEGIN DPDX2:=DPDX; QCR2:=QCR; END; GOTD; CRC; END;
OUTSTRING(1, ('QC='), ('); FLD(1, 8, 2, QC);
PAGE(1); PICTURE; OUTSTRING(1, ('END OF ALL'), ('); BLANK(1, 5);
AFIX(1, 3, 0, KK); OUTSTRING(1, ('TIMES SHOT'), ('); PAGE(1);
END;
```

```
END OF BLOCK WHERE NN IS SET;
END; *****;
```

CROSS

```

0 BEGIN
1 PROCEDURE BLANK(D,N); VALUE,D,N; INTEGER,D,N; CODE;
2 PROCEDURE FLD(D,M,N,X); VALUE,D,M,N,X; INTEGER,D,M,N; REAL,X; CODE;
3 PROCEDURE FIX(D,M,N,X); VALUE,D,M,N,X; INTEGER,D,M,N; REAL,X; CODE;
4 PROCEDURE LINE(D,N); VALUE,D,N; INTEGER,D,N; CODE;
5 PROCEDURE SETTING(D,P,Q); VALUE,D,P,Q; INTEGER,D,P,Q; CODE;
6 PROCEDURE PAGE(D); VALUE,D; INTEGER,D; CODE;
7 REAL,H,B,PSI,TGSI,D,R,DPDX,DPDX1,DPDX2,NU,PI,ETA,V,ICHVX,E,F,G,Q,QCR,
8 QCR1,QCR2,QC;
9 INTEGER,I,J,K,KN;
4 NN:=16;
5 BEGIN,REAL,ARRAY,VX(D:NN,D:NN);
7 INTEGER,ARRAY,IB(O:NN/);
8 PROCEDURE BOUND; BEGIN
0 FOR J:=NN-1,STEP-1,UNTIL,1,DO, BEGIN
1 I:=IB(J/)+1;
2 VX(I-1,J/):=(E*(VX(I,J-1/)+VX(I,J+1/))+F*VX(I+1,J/))-G-B/
3 (J*H*TGSI-B*IB(J/))*2*PI*NU*(R-J/NN*H)/
4 (1-F-B/(J*H*TGSI-B*IB(J/))); VX(I,J/):=
5 E*(VX(I,J-1/)+VX(I,J+1/))+F*(VX(I-1,J/)+VX(I+1,J/))-G;
6 I:=NN-1-IB(J/);
7 VX(I+1,J/):=(E*(VX(I,J-1/)+VX(I,J+1/))+F*VX(I-1,J/))-G-B/
8 (J*H*TGSI-B*IB(J/))*2*PI*NU*(R-J/NN*H)/
9 (1-F-B/(J*H*TGSI-B*IB(J/))); VX(I,J/):=
0 E*(VX(I,J-1/)+VX(I,J+1/))+F*(VX(I-1,J/)+VX(I+1,J/))-G;
1 END;
2 FOR J:=1,STEP,1,UNTIL,NN-1,DO, BEGIN
3 I:=IB(J/)+1;
4 VX(I-1,J/):=(E*(VX(I,J-1/)+VX(I,J+1/))+F*VX(I+1,J/))-G-B/
5 (J*H*TGSI-B*IB(J/))*2*PI*NU*(R-J/NN*H)/
6 (1-F-B/(J*H*TGSI-B*IB(J/))); VX(I,J/):=
7 E*(VX(I,J-1/)+VX(I,J+1/))+F*(VX(I-1,J/)+VX(I+1,J/))-G;
8 I:=NN-1-IB(J/);
9 VX(I+1,J/):=(E*(VX(I,J-1/)+VX(I,J+1/))+F*VX(I-1,J/))-G-B/
0 (J*H*TGSI-B*IB(J/))*2*PI*NU*(R-J/NN*H)/
1 (1-F-B/(J*H*TGSI-B*IB(J/))); VX(I,J/):=
2 E*(VX(I,J-1/)+VX(I,J+1/))+F*(VX(I-1,J/)+VX(I+1,J/))-G;
3 END;
4 END,BOUND;
5 PROCEDURE CALCUX; BEGIN,BOUND;
6 FOR J:=1,STEP,1,UNTIL,NN-1,DO,
7 FOR I:=1-IB(J/),STEP-1,UNTIL,1,DO,
8 VX(I-1,J-1/)+VX(I,J+1/))+F*(VX(I-1,J/)+VX(I+1,J/))-G; BOUND;
9 FOR I:=1-IB(J/),STEP-1,UNTIL,1,DO,
0 VX(I-1,J-1/)+VX(I,J+1/))+F*(VX(I-1,J/)+VX(I+1,J/))-G;
1 FOR J:=1,STEP,1,UNTIL,NN-1,DO,
2 FOR I:=1-IB(J/),STEP-1,UNTIL,1,DO,
3 VX(I-1,J-1/)+VX(I,J+1/))+F*(VX(I-1,J/)+VX(I+1,J/))-G; BOUND;
4 FOR J:=1,STEP,1,UNTIL,NN-1,DO,
5 FOR I:=1-IB(J/),STEP-1,UNTIL,1,DO,
6 VX(I-1,J-1/)+VX(I,J+1/))+F*(VX(I-1,J/)+VX(I+1,J/))-G; BOUND;
7 FOR I:=1,STEP,1,UNTIL,NN-1,DO,
8 VX(I-1,J-1/)+VX(I,J+1/))+F*(VX(I-1,J/)+VX(I+1,J/))-G; BOUND;
9 END,BOUND;

```

# CROSS

```

77 'FOR' J:=1 'STEP' 1 'UNTIL' NN-1 'DO'
78 'IF' I>IB(/J/)+.5&I<NN-IB(/J/)-.5 'THEN' VX(/I,J/):=
80 E*(VX(/I,J-1/)+VX(/I,J+1/))+F*(VX(/I-1,J/)+VX(/I+1,J/))-G;
80 'FOR' I:=NN-1 'STEP' -1 'UNTIL' 1 'DO'
81 'FOR' J:=1 'STEP' 1 'UNTIL' NN-1 'DO'
82 'IF' I>IB(/J/)+.5&I<NN-IB(/J/)-.5 'THEN' VX(/I,J/):=
84 E*(VX(/I,J-1/)+VX(/I,J+1/))+F*(VX(/I-1,J/)+VX(/I+1,J/))-G;BOUND;
85 'FOR' I:=1 'STEP' 1 'UNTIL' NN-1 'DO'
86 'FOR' J:=NN-1 'STEP' -1 'UNTIL' 1 'DO'
87 'IF' I>IB(/J/)+.5&I<NN-IB(/J/)-.5 'THEN' VX(/I,J/):=
89 E*(VX(/I,J-1/)+VX(/I,J+1/))+F*(VX(/I-1,J/)+VX(/I+1,J/))-G;BOUND;
90 ICHVX:=0;
91 'FOR' I:=NN-1 'STEP' -1 'UNTIL' 1 'DO'
92 'FOR' J:=NN-1 'STEP' -1 'UNTIL' 1 'DO'
92 'IF' I>IB(/J/)+.5&I<NN-IB(/J/)-.5 'THEN'
94 ICHVX:=ICHVX+ABS(E*(VX(/I,J-1/)+VX(/I,J+1/))+F*(VX(/I-1,J/)+
95 VX(/I+1,J/))-G-VX(/I,J/));
95 'FOR' I:=NN-1 'STEP' -1 'UNTIL' 1 'DO'
96 'FOR' J:=NN-1 'STEP' -1 'UNTIL' 1 'DO'
97 'IF' I>IB(/J/)+.5&I<NN-IB(/J/)-.5 'THEN' VX(/I,J/):=
99 E*(VX(/I,J-1/)+VX(/I,J+1/))+F*(VX(/I-1,J/)+VX(/I+1,J/))-G;
99 'END' CALC VX;
100 'PROCEDURE' PICTURE; 'BEGIN'
102 'FOR' J:=0 'STEP' 1 'UNTIL' NN-1 'DO' 'BEGIN'
104 BLANK(1,4+6*IB(/J/));
105 'FOR' I:=NN-IB(/J/)'STEP' -1 'UNTIL' IB(/J/)'DO'
106 FIX(1,3,0,1000*VX(/I,J/)/(PI*NU*D));LINE(1,2); 'END';
109 BLANK(1,4+6*(IB(/NN/)+1));
110 'FOR' I:=NN-1-IB(/NN/)'STEP' -1 'UNTIL' IB(/NN/)+1 'DO'
111
111 FIX(1,3,0,1000*VX(/I,NN/)/(PI*NU*D));LINE(1,3);
113 'END' PICTURE;
114 'PROCEDURE' INTVX; 'BEGIN' QCR:=0;
117 'FOR' J:=1 'STEP' 1 'UNTIL' NN-1 'DO' 'BEGIN'
119 'FOR' I:=IB(/J/)+2 'STEP' 1 'UNTIL' NN-IB(/J/)-2 'DO'
120 QCR:=QCR+VX(/I,J/)*B*H;
121 'IF' (J+.5)*H*TGPSI<=(IB(/J/)+.5)*B 'THEN'
122 QCR:=QCR+(VX(/IB(/J/)+1,J/)+VX(/NN-IB(/J/)-1,J/))*B*H+
123 (VX(/IB(/J/),J/)+VX(/NN-IB(/J/),J/))*((IB(/J/)+.5)*B-J*H*TGPSI)*H;
123 'IF' (J+.5)*H*TGPSI>(IB(/J/)+.5)*B&(J-.5)*H*TGPSI<(IB(/J/)+.5)*B 'THEN'
124 QCR:=QCR+(VX(/IB(/J/)+1,J/)+VX(/NN-IB(/J/)-1,J/))* (B*H-((J+.5)*H*
125 TGPSI-(IB(/J/)+.5)*B)**2/2/TGPSI)+
125 (VX(/IB(/J/),J/)+VX(/NN-IB(/J/),J/))*((IB(/J/)+.5)*B-(J-.5)*H*TGPSI)
125 **2/2/TGPSI;
125 'IF' (J-.5)*H*TGPSI>=(IB(/J/)+.5)*B 'THEN'
126 QCR:=QCR+(VX(/IB(/J/)+1,J/)+VX(/NN-IB(/J/)-1,J/))* (J*H*TGPSI-(IB(/J/)+
127 +.5)*B)*H; 'END';
128 QCR:=QCR+(NN-2*IB(/NN/)-3)*VX(/NN/2,NN/)*B*H/2;
129 'IF' H*TGPSI<=(IB(/NN/)+.5)*B/NN 'THEN'
130 QCR:=QCR+VX(/NN/2,NN/)*B*H+(VX(/IB(/NN/),NN/)+VX(/NN-IB(/NN/),NN/))*
131 ((IB(/NN/)+.5)*B-(NN-.25)*H*TGPSI)*H/2;
131 'IF' H*TGPSI>(IB(/NN/)+.5)*B/NN&(NN-.5)*H*TGPSI<(IB(/NN/)+.5)*B 'THEN'
132 QCR:=QCR+VX(/NN/2,NN/)*(B*H-(NN*H*TGPSI-(IB(/NN/)+.5)*B)**2/2/TGPSI)+
133 (VX(/IB(/NN/),NN/)+VX(/NN-IB(/NN/),NN/))*((IB(/NN/)+.5)*B-(NN-.5)*H*
133 TGPSI)**2/2/TGPSI;

```

CROSS

```

33 IF (NN-5)*H*TPSI>=(IB/NN/)+.5)*B, THEN
34 QCR=QCR+VX/NN/2, NN/)*((IB/NN/)+1.5)*B-(NN-.25)*H*TPSI)*H;
35 QCR=QCR/NN/NN;
36 END, INTVX;
37 SETTING(1, 132, 55); V:=33.57843*-6;
39 H:=.01; B:=.0125; PSI:=.24435; D:=.07; NU:=.68; ETA:=.48;
45 R:=D/2; PI:=4*ARCTAN(1); TGPSSI:=SIN(PSI)/COS(PSI);
48 E:=B*B/2/(B*B+H*H); F:=H*H/2/(B*B+H*H);
50 COMMENT, SETTING BOUNDARY POINTS OF RASTER;
50 FOR, J:=0, STEP, 1, UNTIL, NN, DO, IB(/J/):=ENTIER(H/B*J*TPSI);
52 COMMENT, END SETTING BOUNDARY POINTS OF RASTER;
52 COMMENT, FIXED BOUNDARY CONDITIONS;
52 FOR, I:=0, STEP, 1, UNTIL, NN, DO, VX(/I, 0/):=0;
54 FOR, I:=IB(/NN/)+1, STEP, 1, UNTIL, NN-1-IB(/NN/), DO;
55 VX(/I, NN/):=2*PI*NU*(R-H);
56 COMMENT, END FIXED BOUNDARY CONDITIONS;
56 COMMENT, FIRST START VALUES;
56 DDPX1:=1.2*PI*NU*(R-H)*ETA/H/H;
57 FOR, J:=1, STEP, 1, UNTIL, NN-1, DO;
58 FOR, I:=IB(/NN/)+2, STEP, 1, UNTIL, NN-2-IB(/NN/), DO;
59 VX(/I, J/):=2*PI*NU*(R-H)*(3*J/NN*J/NN-2*J/NN);
60 FOR, J:=1, STEP, 1, UNTIL, NN-1, DO;
61 FOR, I:=IB(/NN/)+1, STEP, 1, UNTIL, IB(/J/)+1, DO;
62 VX(/I, J/):=VX(/NN-I, J/):=VX(/IB(/NN/)+2, J/)+(IB(/NN/)+2-I)/
63 (IB(/NN/)+1-IB(/J/))*(2*PI*NU*(R-H*J/NN)-VX(/IB(/NN/)+2, J/));
63 COMMENT, END FIRST START VALUES;
63 DDPX:=DDPX1; G:=B*B*H*H*DDPX/ETA/2/NN/NN/(B*B+H*H); K:=0;
66 CRA: CALCVX; K:=K+1;
69 IF, ICHVX/(PI*NU*D*(NN-1)*(NN-2*(IB(/NN/2/)+1)))>-.7, THEN, GOTO, CRA;
71 INTVX; QCR1:=QCR;
73 OUTSTRING(1, 1, 3, 0, K); AFIX(1, 3, 0, K);
75 OUTSTRING(1, 1, 1, 1, 5); BLANK(1, 5);
77 OUTSTRING(1, 1, 1, 1, 5); FLD(1, 8, 2, QCR1); BLANK(1, 5);
80 OUTSTRING(1, 1, 1, 1, 8); LINE(1, 8);
83 COMMENT, SECOND START VALUES;
83 DDPX2:=24*PI*NU*(R-H)*ETA*NN*NN/B/B/(NN-2*(IB(/NN/)+1))*2;
84 FOR, J:=1, STEP, 1, UNTIL, NN-1, DO;
85 FOR, I:=IB(/NN/)+2, STEP, 1, UNTIL, NN-2-IB(/NN/), DO;
86 VX(/I, J/):=DDPX2/2/ETA*(J*H/NN*(J*H/NN-H))+VX(/NN/2, NN/)*J/NN;
87 FOR, J:=1, STEP, 1, UNTIL, NN-1, DO;
88 FOR, I:=IB(/NN/)+1, STEP, 1, UNTIL, IB(/J/)+1, DO;
89 VX(/I, J/):=VX(/NN-I, J/):=VX(/IB(/NN/)+2, J/)+(IB(/NN/)+2-I)/
90 (IB(/NN/)+1-IB(/J/))*(2*PI*NU*(R-H*J/NN)-VX(/IB(/NN/)+2, J/));
90 COMMENT, END SECOND START VALUES;
90 DDPX:=DDPX2; G:=B*B*H*H*DDPX/ETA/2/NN/NN/(B*B+H*H); K:=0;
93 CRB: CALCVX; K:=K+1;
96 IF, ICHVX/(PI*NU*D*(NN-1)*(NN-2*(IB(/NN/2/)+1)))>-.7, THEN, GOTO, CRB;
98 INTVX; QCR2:=QCR;
100 OUTSTRING(1, 1, 1, 1, 5); AFIX(1, 3, 0, K);
102 OUTSTRING(1, 1, 1, 1, 5); BLANK(1, 5);
104 OUTSTRING(1, 1, 1, 1, 5); FLD(1, 8, 2, QCR2); BLANK(1, 5);
107 OUTSTRING(1, 1, 1, 1, 8); LINE(1, 8);
110 FOR, QC:=0, STEP, NU*V*.25, UNTIL, NU*V*.01, DO, BEGIN

```

12  
10  
10  
07  
04  
02  
00  
98  
96  
93  
90  
90  
90  
89  
88  
87  
86  
85  
84  
83  
83  
80  
77  
75  
73  
71  
69  
66  
63  
63  
63  
62  
61  
60  
59  
58  
57  
56  
56  
56  
55  
54  
52  
52  
52  
50  
50  
48  
45  
39  
37  
36  
35  
34

CROSS

```
212 COMMENT,SHOOTING ROUTINE STARTS HERE;KK:=0;
213 COMMENT, KK IS NUMBER OF SHOOTING ROUTINES;
214 CRC: DPDX:=(DPDX2*(QCR1-QC)-DPDX1*(QCR2-QC))/(QCR1-QCR2);KK:=KK+1;
215 G:=B*B*H*H*DPDX/ETA/2/NN/NN/(B*B+H*H);K:=0;
216 CRD: CALCX;K:=K+1;
217 IF ICHVX/(PI*NU*D*(NN-1)*(NN-2*(IB/NN/2)+1))>-7,THEN GOTO CRD;
218 INTVX;
219 OUTSTRING(1,('RELAXATION IN'),AFIX(1,3,0,K);
220 OUTSTRING(1,('PROCEDURES CALCX'),BLANK(1,5);
221 OUTSTRING(1,('QCR='),FLO(1,8,2,QCR);BLANK(1,5);
222 OUTSTRING(1,('DPDX='),FLO(1,8,2,DPDX);LINE(1,8);
223 IF ABS(QCR-QC)/(NU*V)>-4,THEN BEGIN
224 IF ABS(QCR1-QC)>ABS(QCR2-QC) THEN BEGIN DPDX1:=DPDX;QCR1:=QCR; END
225 ELSE BEGIN DPDX2:=DPDX;QCR2:=QCR; END; GOTO CRC; END;
226 OUTSTRING(1,('QC='),FLO(1,8,2,QC);PAGE(1);
227 PICTURE;OUTSTRING(1,('END OF ALL'),BLANK(1,5);
228 AFIX(1,3,0,KK);OUTSTRING(1,('TIMES SHOT'),PAGE(1));
229 END;
230 END OF BLOCK WHERE NN IS SET;
231 END;
232 END;33333333;
```

TETRA

```

BEGIN
PROCEDURE BLANK(D,N); VALUE D,N; INTEGER D,N; CODE
PROCEDURE FLO(D,M,N,X); VALUE D,M,N,X; INTEGER D,M,N; REAL X; CODE
PROCEDURE AFIX(D,M,N,X); VALUE D,M,N,X; INTEGER D,M,N; REAL X; CODE
PROCEDURE FIX(D,M,N,X); VALUE D,M,N,X; INTEGER D,M,N; REAL X; CODE
PROCEDURE LINE(D,N); VALUE D,N; INTEGER D,N; CODE
PROCEDURE SETTING(D,P,Q); VALUE D,P,Q; INTEGER D,P,Q; CODE
PROCEDURE PAGE(D); VALUE D; INTEGER D; CODE
REAL H,B,S,D,R,PSI,TG,PSI,NU,ETA,V,HC,HG,ICHVX,E,F,G,T,Y,Z,A,DPT,QT,PI;
INTEGER I,J,K,NN;
NN:=30;
BEGIN REAL ARRAY VX(O:NN,O:NN)/DPDX, BR, BL, VHX(O:NN/);
INTEGER ARRAY IBR(O:NN/), IBL(O:NN/);
PROCEDURE BOUND; BEGIN
FOR J:=1 STEP 1 UNTIL NN-1 DO IF IBL(J)-IBR(J)>1.5 THEN BEGIN
I:=IBR(J)+1;
VX(I-1,J):=(-VXH(J)-IBR(J))*E*(VX(I,J-1)/+VX(I,J+1
/)+F*VX(I+1,J)-G*DPDX(J))/(1+(BR(J)-IBR(J))*(F-1));
VX(I,J):=E*(VX(I,J-1)/+VX(I,J+1/)+F*(VX(I-1,J)/+VX(I+1,J/))
-G*DPDX(J));
IF IBR(J+1/)>1+5 THEN BEGIN
T:=(IBR(J)+1-BR(J))/(BR(J+1/)-BR(J));
VX(I,J+1/):=(-VXH(J)+1-BR(J))/(BR(J+1/)-BR(J));
VX(I,J+1/):=E*(VX(I,J-1/)+F*(VX(I-1,J/)+VX(I+1,J/))
-G*DPDX(J));
IF IBR(J+1/)>1+5 THEN BEGIN
I:=IBR(J)+1;
VX(I-1,J):=(-VXH(J)-IBR(J))*E*(VX(I,J-1/)+VX(I,J+1
/)+F*VX(I+1,J)-G*DPDX(J))/(1+(BR(J)-IBR(J))*(F-1));
VX(I,J):=E*(VX(I,J-1/)+VX(I,J+1/)+F*(VX(I-1,J/)+VX(I+1,J/))
-G*DPDX(J));
FOR J:=NN-1 STEP -1 UNTIL 1 DO IF IBL(J)-IBR(J)>1.5 THEN BEGIN
I:=IBR(J)+1;
VX(I-1,J):=(-VXH(J)-IBR(J))*E*(VX(I,J-1/)+VX(I,J+1
/)+F*VX(I+1,J)-G*DPDX(J))/(1+(BR(J)-IBR(J))*(F-1));
VX(I,J):=E*(VX(I,J-1/)+VX(I,J+1/)+F*(VX(I-1,J/)+VX(I+1,J/))
-G*DPDX(J));
IF IBR(J+1/)>1+5 THEN BEGIN
T:=(IBR(J)+1-BR(J))/(BR(J+1/)-BR(J));
VX(I,J+1/):=(-VXH(J)+1-BR(J))/(BR(J+1/)-BR(J));
VX(I,J+1/):=E*(VX(I,J-1/)+F*(VX(I-1,J/)+VX(I+1,J/))
-G*DPDX(J));
IF IBR(J+1/)>1+5 THEN BEGIN
I:=IBR(J)+1;
VX(I-1,J):=(-VXH(J)-IBR(J))*E*(VX(I,J-1/)+VX(I,J+1
/)+F*VX(I+1,J)-G*DPDX(J))/(1+(BR(J)-IBR(J))*(F-1));
VX(I,J):=E*(VX(I,J-1/)+VX(I,J+1/)+F*(VX(I-1,J/)+VX(I+1,J/))
-G*DPDX(J));
FOR J:=1 STEP 1 UNTIL NN-1 DO
PROCEDURE BOUND; BEGIN
FOR J:=1 STEP 1 UNTIL NN-1 DO

```

0  
1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71  
72  
73  
74  
75





TETRA

QT:=QT+VX(I,J)/(1-A-Y)\*Z\*(1-Y)/Y/2;

IF BR(J-1)+.25\*(BR(J+1)-BR(J-1))>=I-.5 THEN

QT:=QT+VX(I,J)\*(I+.5-BR(J))-A);

I:=IBL(J)-1;

IF B(L(J-1))>=B(L(J+1)) THEN BEGIN

IF B(L(J-1))-.25\*(B(L(J+1))-B(L(J-1)))<=I+.5 THEN

QT:=QT+VX(I,J)\*(B(L(J))-I+.5-A);

IF B(L(J-1))-.75\*(B(L(J+1))-B(L(J-1)))<I+.5

B(L(J-1))-.25\*(B(L(J+1))-B(L(J-1)))>I+.5 THEN BEGIN

Y:=2\*(1+.5-B(L(J+1)))-B(L(J-1))-I+.5;

Z:=.75\*(B(L(J-1))-B(L(J+1)))-B(L(J-1))+I+.5;

QT:=QT+VX(I,J)\*(1-A-Y)\*Z\*(1-Y)/Y/2;

IF B(L(J-1))-.75\*(B(L(J+1))-B(L(J-1)))>=I+.5 THEN

QT:=QT+VX(I,J)/(1-A)+VX(I+1,J)\*(B(L(J))-I-.5);

END; ELSE BEGIN

IF B(L(J-1))+.75\*(B(L(J+1))-B(L(J-1)))<I+.5

IF B(L(J-1))+.25\*(B(L(J+1))-B(L(J-1)))>I+.5

B(L(J-1))-.25\*(B(L(J+1))-B(L(J-1)))>I+.5

Y:=2\*(B(L(J+1))-I-.5)-B(L(J-1))-I-.5;

Z:=.75\*(B(L(J+1))-B(L(J-1)))-B(L(J-1))+I+.5;

QT:=QT+VX(I,J)/(1-A)+VX(I+1,J)\*(1-Y)/Y/2;

END; BEGIN

IF B(L(J-1))+.25\*(B(L(J+1))-B(L(J-1)))>=I+.5 THEN

QT:=QT+VX(I,J)/(1-A)+VX(I+1,J)\*(B(L(J))-I-.5);

END; BEGIN

QT:=QT\*B/NN\*HG/NN;

END; INTX;

SETTING(1,132,55);V:=30.57843\*-6;

H:=.01;HC:=.0007;PSI:=.24435;D:=.07;NU:=.68;ETA:=.48;S:=.02;

R:=D/2;PI:=4\*ARCTAN(1);TGPSI:=SIN(PSI)/COS(PSI);

DPT:=-1.00;

HG:=SQRT(R\*R-(R-(H-HC)/2)\*\*2);

B:=S/2\*PI\*ARCTAN(HG/(R-(H-HC)/2))+TGPSI\*(HC+SQRT(HG\*HG+(R-(H-HC)/2)\*\*2)-

(R-(H-HC)/2));

E:=B\*B/2/(B\*B+HG\*HG);F:=HG\*HG/2/(B\*B+HG\*HG);

G:=B\*B\*HG\*HG/ETA/2/NN/NN/(B\*B+HG\*HG);

COMMENT;SETTING BOUNDARIES AND BOUNDARY POINTS OF RASTER;

FOR J:=0;STEP 1;UNTIL NN;DO

BR(J/):=(B-(S/2\*PI\*ARCTAN(HG\*(1-J/NN)/(R-(H-HC)/2))+TGPSI\*

(HC+SQRT((HG\*(1-J/NN)\*\*2+(R-(H-HC)/2)\*\*2)-R-(H-HC)/2)))\*NN/B;

IBR(J/):=ENTER(BR(J/));

BL(J/):=NN-(S/2\*PI\*ARCTAN(HG\*(1-J/NN)/(R-(H-HC)/2))-TGPSI\*

(SQRT((HG\*(1-J/NN)\*\*2+(R-(H-HC)/2)\*\*2)-R-(H-HC)/2)))\*NN/B;

IBL(J/):=NN-ENTER(NN-BL(J/));END;

COMMENT;END SETTING BOUNDARIES AND BOUNDARY POINTS OF RASTER;

FOR J:=0;STEP 1;UNTIL NN;DO

FOR I:=0;STEP 1;UNTIL NN;DO;VX(I,J/):=0;

COMMENT;BOUNDARY AND START VALUES;

FOR I:=IBR(0/);STEP 1;UNTIL IBL(0/);DO;VX(I,J/):=0;



Lijst van gebruikte symbolen

A	overlappingsoppervlakte	(m <sup>2</sup> )
b	kamerbreedte in axiale richting variabel	(m)
B	maximale kamerbreedte in axiale richting	(m)
BL	coördinaat van de linkergrens van de tetraëderspleetdoorsnede	(m)
BL'	coördinaat van de linkergrens van de flankdoorsnede	(m)
BR	coördinaat van de rechtergrens van de tetraëderspleetdoorsnede	(m)
BR'	coördinaat van de rechtergrens van de flankdoorsnede	(m)
C	index calanderconfiguratie	(-)
CR	index kamerdoorsnedeconfiguratie	(-)
delta	hoogte van de rugspleet	(m)
D	schroefdiameter	(m)
DP	drukverschil over één kamer	(N/m <sup>2</sup> )
DPC	drukverschil over de calanderspleet	(N/m <sup>2</sup> )
DPCR	drukverschil over de kamer, gemeten in de lengterichting van het kanaal	(N/m <sup>2</sup> )
DPT	drukverschil over de tetraëderspleet	(N/m <sup>2</sup> )
DPR	drukverschil over de schroefrug	(N/m <sup>2</sup> )
EPS	minimale breedte van de schroefrug in axiale richting	(m)
f	parameter die de plaats van het verticale doorsnijdingsvlak aangeeft	(-)
H	diepte van de schroefdraad	(m)
HC	calanderspleet	(m)
HG	hoogte van de tetraëderspleet	(m)
HO	halve calanderspleet	(m)
int	volume van een schijfdeel	(m <sup>3</sup> )
l	lengte in de kamer in axiale richting, zie fig. 4	(m)
N	toerental van de schroeven	(s <sup>-1</sup> )
P	druk	(N/m <sup>2</sup> )
PHI	schroef hoek	(-)
PSI	flank hoek	(-)
Q	debiet	(m <sup>3</sup> /s)
QC	debiet door de calanderspleet	(m <sup>3</sup> /s)
QC'	debiet per breedte-eenheid door de calanderspleet	(m <sup>2</sup> /s)
QCF	debiet door de tetraëderspleet in verticale richting	(m <sup>3</sup> /s)
QCR	debiet door de kamerdoorsnede	(m <sup>3</sup> /s)
QR	debiet door de rugspleet	(m <sup>3</sup> /s)

QR'	debiet per breedte-eenheid door de rugspleet	(m <sup>2</sup> /s)
QT	debiet door de tetraëderspleet	(m <sup>3</sup> /s)
r	variabele straal binnen de schroef	(m)
R	maximale straal van de schroef	(m)
R	index rugspleet	(-)
Re	ggetal van Reynolds	(-)
S	spoed van de schroef	(m)
t	hoogte in de tetraëderspleet	(m)
t'	coördinaat in de flankdoórsnede	(m)
T	index tetraëderspleet	(-)
v	representatieve snelheid	(m/s)
v <sub>x</sub>	snelheid in de x-richting	(m/s)
V	kamervolume	(m <sup>3</sup> )
x	coördinaat	(m)
y	coördinaat	(m)
y <sub>m</sub>	coördinaat in de calanderconfiguratie	(m)
y <sub>p</sub>	coördinaat in de calanderconfiguratie	(m)
z	coördinaat	(m)
α	maximale openingshoek van de kamers	(-)
α <sub>1</sub>	openingshoek van de rechterkamer	(-)
α <sub>2</sub>	openingshoek van de linkerkamer	(-)
β	beschrijvende hoek in de tetraëderconfiguratie	(-)
β <sub>1</sub>	beschrijvende hoek in de tetraëderconfiguratie	(-)
β <sub>r</sub>	beschrijvende hoek in de tetraëderconfiguratie	(-)
γ	hoek waarover schroeven ten opzichte van elkaar draaibaar zijn	(-)
η	viscositeit	(Ns/m <sup>2</sup> )
ρ	dichtheid	(kg/m <sup>3</sup> )

Literatuur

1. Schenkel, G. Schneckenpressen für Kunststoffe. München 1959
2. Beek, W.J. Fysische Transportverschijnselen I. Collegediktaat Delft 1968
3. Merk, H.J. Inleiding tot de stromingsleer voor fysici. Collegediktaat Delft, 1972
4. Beek, W.J. en Holmes, D.B. Fysische-technologische aspecten van de polymeerverwerking. Collegediktaat Delft, 1965
5. Gaskell, R.E. J.appl.mech. 17 (1950) 334
6. Abramowitz, M en Segun, I.A. Handbook of mathematical functions, New York 1968
7. Zaat, J.A. Numerieke Analyse A I Collegediktaat Delft 1970
8. Rieger, F. en Sesták. J. Appl. Sci. Res. 28 (1973) 89
9. Kalf, R., cs. Intern rapport laboratorium voor fysische technologie
10. Marshall, G. Computational methods in viscous flow problems. Proefschrift TH Delft, 1973
11. Dobóczy, Z. Plastverarbeiter 16 (1965) 395
12. Bercovici, T, Heiligman-Rim, R. en Fischer, E. Mol. photochem. 1 (1969) 23
13. Koelsch, C.F. en Workman, W.R. J. Am. Chem. Soc. 74 (1952) 6288
14. Berman, E., Fox, R.E. en Thomson, F.D. J. Am. chem. Soc. 81 (1959) 5605
15. Heller, C.A., Fine, D.A. en Henry, R.A. J. Phys. Chem. 65 (1961) 1908
16. Bach, H. en Calvert, J.G. J.Am.Chem.Soc. 92 (1970) 2608
17. Bowman, R.E., Fox, R.E., Kresch, A.J. en Taylor, J.E.G. American Document nr. 427601

## E R R A T A

In fig. 22 (na pag. 19) moet bij de kruisjes staan: HC = 1,70 mm

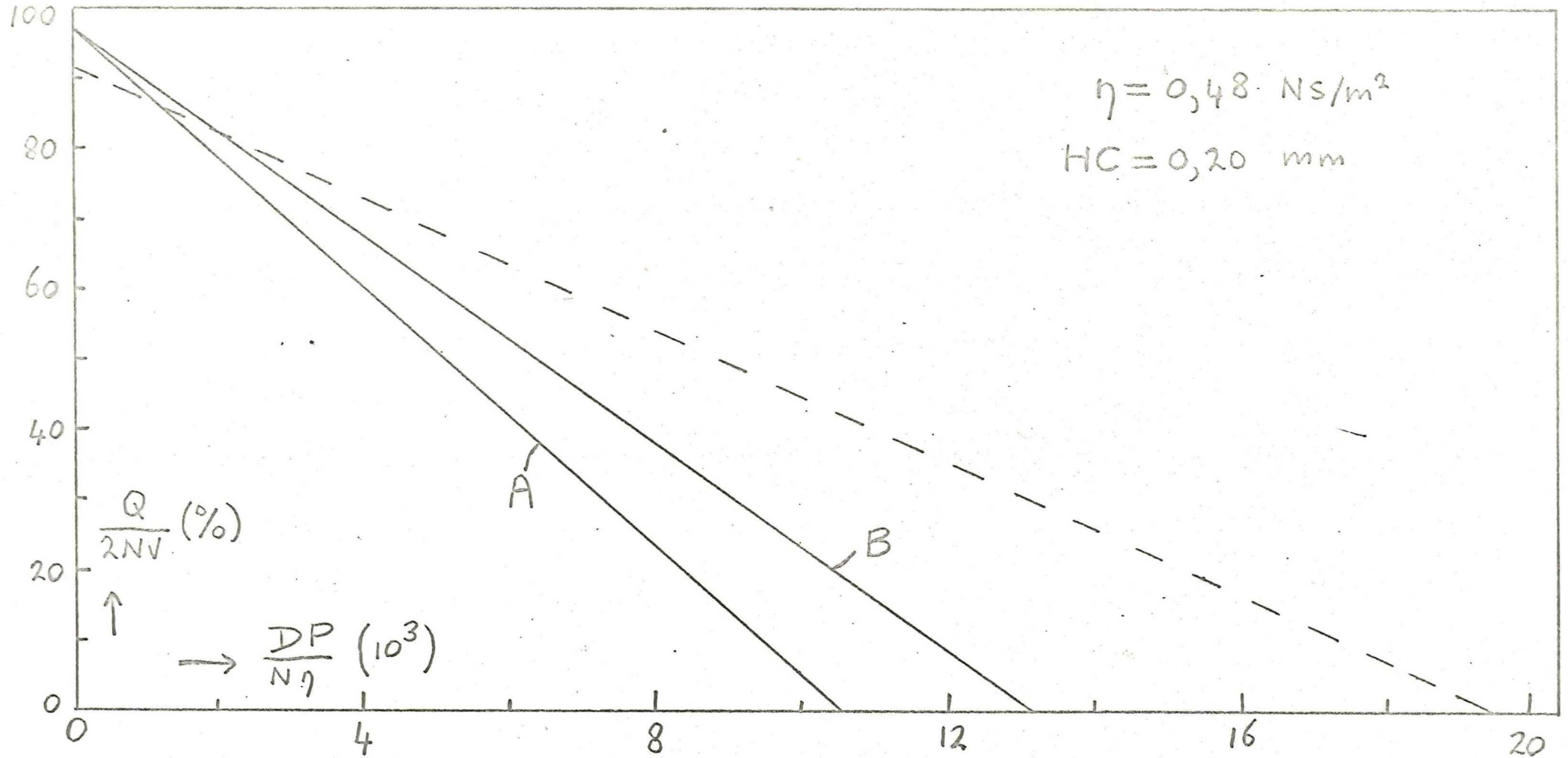
pagina regel	er staat	er moet staan
20 5 v.o.	Merck	Merk
38 11 v.b.	(13)	(13)
38 13 v.o.	(16).	(16) is.
38 1 v.o.	dwenen.	dwijnt.

In formule (3.5) moeten accoladen toegevoegd worden, waarna zij luidt:

$$QR = 2R(2\pi - \alpha) \left\{ \frac{DP \delta^3}{6 EPS \eta} + \frac{1}{2} N.S.\delta \right\} \quad (3.5)$$

De door Kalf c.s. afgeleide formule voor de drukdebietrelatie van een tetraëderspleet luidt:

$$QT = 0,004 \left(\frac{H}{D}\right)^{1,8} D^3 PSI^2 \frac{DPT}{\eta}$$



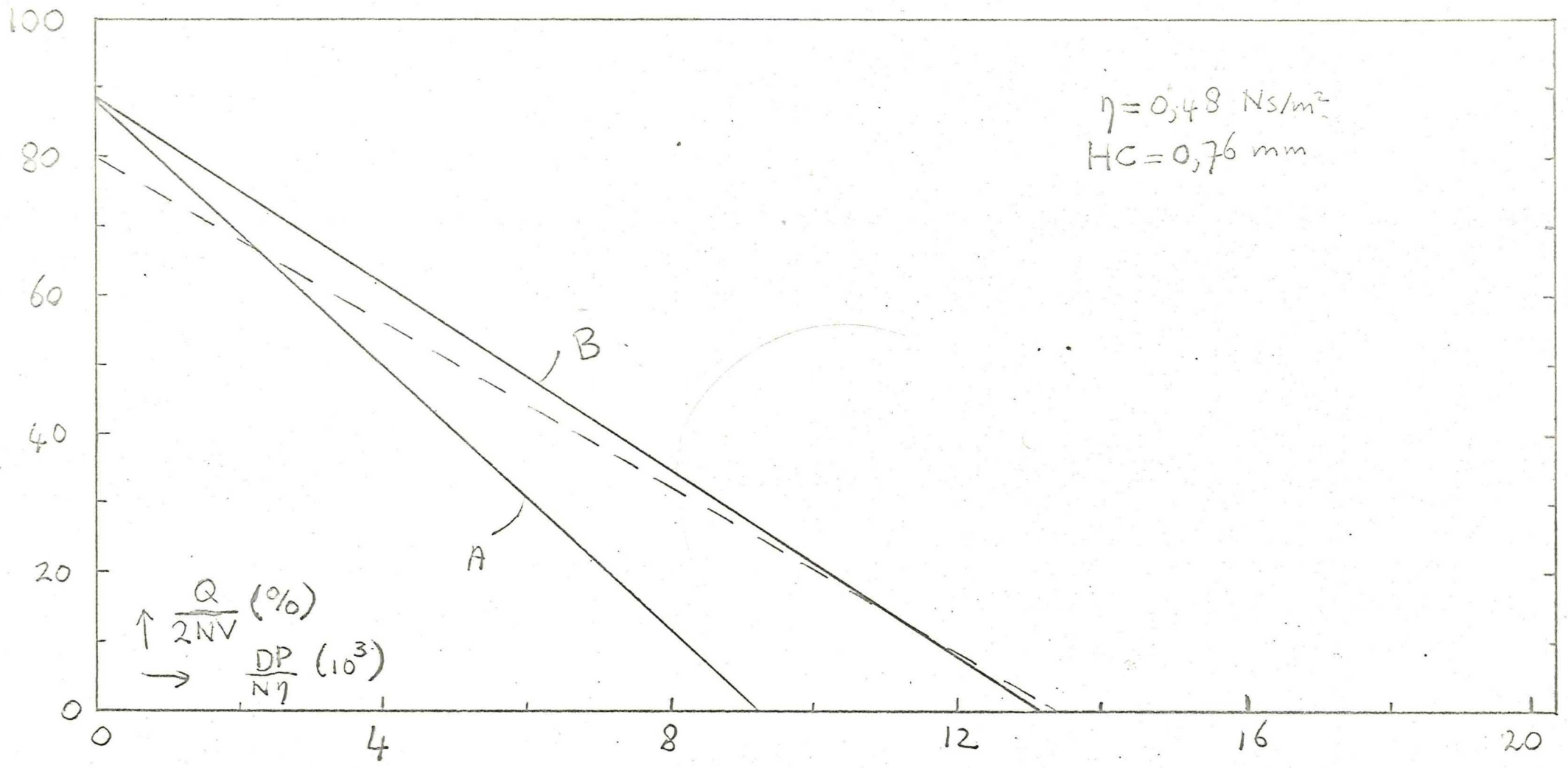
VERGELIJKING VAN THEORIE EN METINGEN.

De onderbroken lijn geeft de metingen weer.

A berekening met het programma TETRA

B berekening met de formule van Kalf c.s.





VERGELIJKING VAN THEORIE EN METINGEN.

Onderbroken lijn geeft de metingen weer

A berekening met het programma TETRA

B berekening met de formule van Kalf c.s.