

## Visualisatie van een niet-Newtonse plunjerstroming door restricties

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

Oosterling, W. J. A. (1993). *Visualisatie van een niet-Newtonse plunjerstroming door restricties*. (DCT rapporten; Vol. 1993.094). Technische Universiteit Eindhoven.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/1993

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

**General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

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

**Take down policy**

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

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

providing details and we will investigate your claim.

Visualisatie van een niet-Newtonse  
plunjerstroming door restricties.

W.J.A. Oosterling

Stageverslag  
WFW nr. 93.094

Datum: 15 juli 1993

Begeleiding: Dr. ir. G.W.M. Peters  
Ir. W.F. Zoetelief

## Inhoudsopgave

Voorwoord	pag. 1
1. Inleiding	pag. 2
2. De stageopdracht	pag. 5
3. De opstellingen	pag. 7
3.1 De restrictie-opstelling	pag. 7
3.2 De matrijs-opstelling	pag. 11
4. Materialen	pag. 13
5. Experimenten, de algemene werkwijze	pag. 17
5.1 De restrictie-opstelling	pag. 17
5.2 De matrijs-opstelling	pag. 18
6. Uitvoering en resultaten	pag. 20
6.1 Het vervaardigen van fiches	pag. 20
6.2 Resultaten van proefexperimenten	pag. 20
6.3 Experimenten met één materiaal	pag. 22
6.4 Experimenten met combinaties van materialen	pag. 33
6.5 Variërende restricties	pag. 38
6.6 Experimenten met de matrijsopstelling	pag. 39
7. Conclusies en aanbevelingen	pag. 43
8. Literatuur	pag. 45

## Voorwoord

Eindhoven, 11 mei 1993.

Dit verslag is een verslag van mijn interne stage op de T.U. Ik heb de stage verricht bij de faculteit Werktuigbouwkunde, vakgroep W.F.W.

De stage, welke experimenteel van karakter was, is uitgevoerd binnen het kader van het ontwikkelen van een meerlaagsspuitgietsproces, waarbij een buffer wordt gebruikt om de polymere smelt op te slaan. De resultaten van de experimenten van deze stage kunnen worden gebruikt bij de ontwikkeling van dit proces. In de inleiding zal zeer beknopt een beeld worden geschetst van het meerlaagsspuitgietsproces.

Mijn stagebegeleiders waren ir. W.F. Zoetelief en dr. ir. G.W.M. Peters. Graag wil ik hen bedanken voor de geboden hulp en begeleiding. Tevens wil ik de technische dienst van de vakgroep bedanken voor hun hulp bij het maken van de benodigde onderdelen van de opstelling.

Wim Oosterling.

## 1. Inleiding

Spuitgieten is één van de meest toegepaste technieken bij het vervaardigen van kunststof produkten. Spuitgieten is een techniek, waarbij het basismateriaal wordt opgesmolten, waarna het onder druk in een matrijs wordt geïnjecteerd. Figuur 1.1 geeft schematisch dit proces weer.

De grote kracht van het spuitgietproces ligt in de grote diversiteit in geometrieën die met het proces op relatief eenvoudige wijze te realiseren is. Met het conventionele spuitgietproces kunnen alleen produkten uit één materiaal worden gemaakt. Om nu het spuitgietproces nog flexibeler te maken, wordt een uitbreiding gezocht in het aantal te spuiten componenten in één produkt: het meerlaagsspuitgieten.

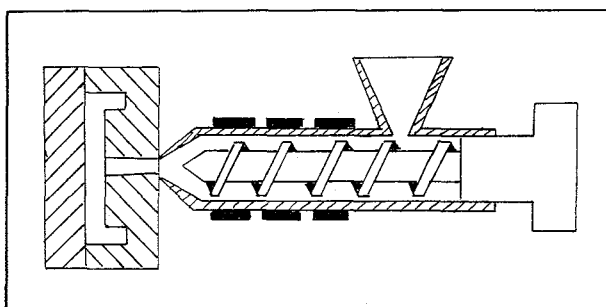


fig. 1.1 Schematische weergave spuitgieten

Het meerlaagsspuitgieten is een techniek, waarbij twee of meer materialen simultaan of sequentieel (of een combinatie daarvan) in de matrijs worden geïnjecteerd. Met dit proces is het mogelijk gelaagde structuren te bewerkstelligen in dunwandige produkten. Afhankelijk van een aantal parameters zoals de positie van de aanspuitopening, de geometrie van de aanspuitmond en de manier van injecteren (simultaan, sequentieel of gecombineerd) is de dikte en de positie van de lagen te regelen. Voorbeelden hiervan zijn te zien in figuur 1.2.

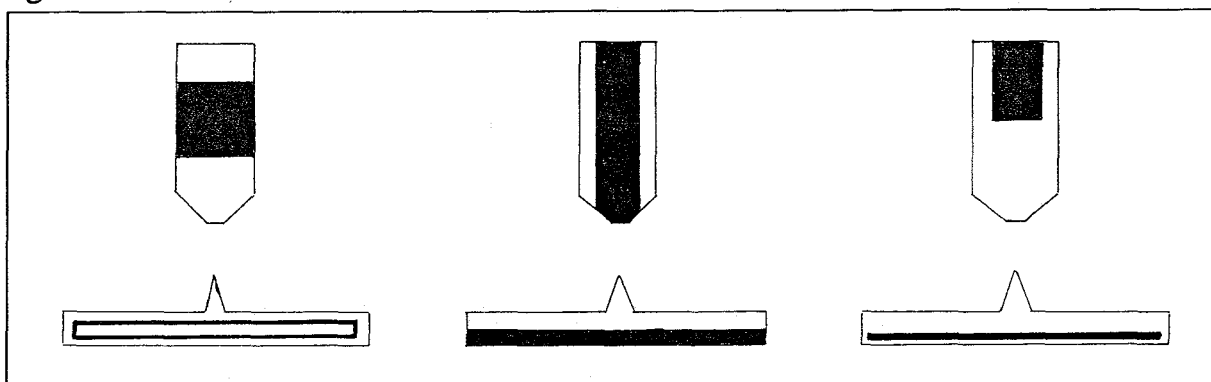


fig. 1.2 Mogelijkheden van gecombineerd injecteren

Deze techniek maakt het mogelijk verschillende materiaaleigenschappen van verschillende materialen te combineren in één produkt. Mogelijke toepassingen van met meerlaagsspuitgieten zijn het aanbrengen van niet-doorlaatbare lagen voor gassen en/of vloeistoffen in een produkt of bijvoorbeeld het aanbrengen van een elektrisch geleidende laag als bescherming tegen electro-magnetische velden (EMI-shielding).

Met de ontwikkeling van het meerlaagsspuitgietsproces is men begonnen in de jaren '70. Toepassingen bleven in de praktijk echter beperkt tot de sandwich-constructie, waarbij d.m.v. sequentiële injectie drie lagen van twee verschillende materialen in één product konden worden gerealiseerd. Deze drie lagen bestonden dan uit twee harde buitenlagen met daartussen een schuimkern. Voordelen van de sandwich-constructie (grote specifieke stijfheid, lagere dichtheid, en lagere sluitkrachten van de matrijs) bleken echter gering in relatie met de nadelen (lange koeltijden en de mogelijkheid om grote specifieke stijfheid te verkrijgen m.b.v. verribbing), waardoor het succes van de sandwich-constructie gering bleef. Het idee van het meerlaagsspuitgieten was echter ontstaan en de ontwikkeling van het proces heeft er toe geleid, dat deze techniek nu kan worden toegepast op dunwandige produkten.

De huidige technologie van het meerlaagsspuitgieten kent echter een paar belangrijke beperkingen.

De eerste beperking is dat men beperkt is tot het spuiten van slechts twee verschillende materialen. Gevolg hiervan is dat veel interessante materiaalcombinaties van polaire en apolaire polymeren niet kunnen worden gebruikt. Polaire en apolaire polymeren hechten niet aan elkaar, waardoor een derde polymeer dat functioneert als hechtlaag voor de beide andere componenten moet worden meegespoten. Voor dit soort materiaalcombinaties zijn dus minimaal drie componenten nodig.

Op de T.U. Eindhoven tracht men dit probleem te ondervangen door een 3-componenten spuitgietsysteem te ontwikkelen. In figuur 1.3 is deze techniek schematisch weergegeven.

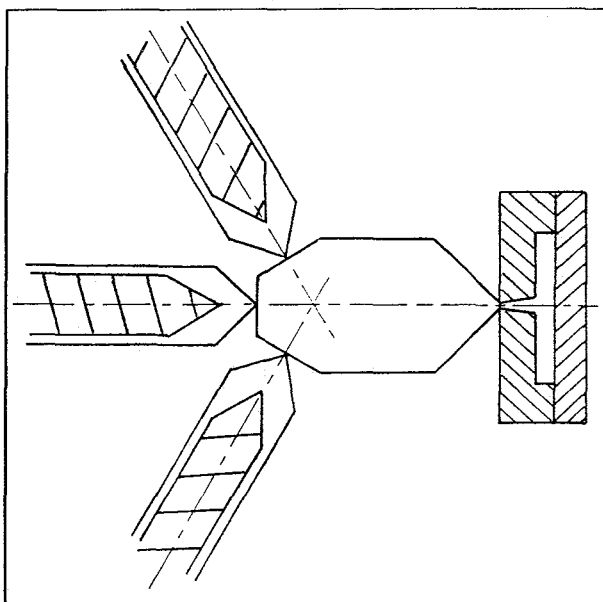


fig. 1.3. drie componenten spuitgieten

Verder is men bij het dunwandig meerlaagsspuitgieten beperkt tot eenvoudige geometrieën voor het behalen van goede resultaten (goed gepositioneerde lagen met een uniforme dikte). De grote kracht van het spuitgieten (op relatief eenvoudige wijze complexe geometrieën creëren) wordt op deze manier enorm ingeperkt.

Dit probleem tracht men te ondervangen door gebruik te maken van (computer) modellen. Met deze modellen moet het mogelijk zijn om precies de baan van een deeltje te beschrijven, het zogenaamde 'particle-tracking'. Mathematische modellen kunnen echter worden geïnverteerd. Het is dus met andere woorden mogelijk om, uitgaande van de eindpositie, de startpositie van een deeltje te berekenen. Op deze manier is de configuratie te bepalen die moet worden geïnjecteerd om de juiste eindconfiguratie te realiseren, zelfs bij complexe geometrieën.

De juiste configuratie injecteren in de matrijs is een bijkomend probleem. Wanneer weinig componenten worden gebruikt en de geometrieën eenvoudig zijn, dan kunnen de gewenste lagen in een dunwandig produkt toch worden gerealiseerd d.m.v. directe injectie vanuit de injectie-cilinders. Als echter meer dan twee componenten worden gebruikt en de geometrieën zijn complex, dan is het niet meer mogelijk om op eenvoudige wijze gedurende de korte injectietijd de gewenste configuratie in het produkt te realiseren. De injectietijden zijn namelijk te kort in verhouding met de relatief lange schakeltijden van het hydraulisch systeem van de machine.

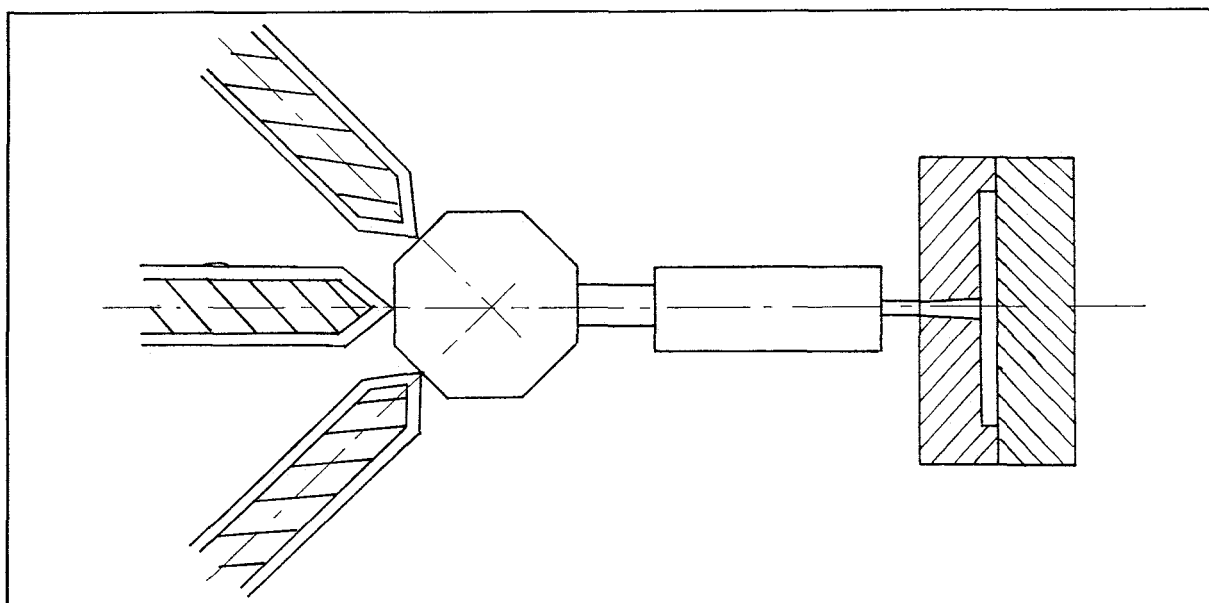


fig. 1.4 Meerlaagsspuitgieten m.b.v. een buffer

Daarom wordt momenteel een oplossing gezocht in een bufferopslag. De te injecteren beginconfiguratie wordt dan opgeslagen in een buffer. Deze injectie-configuratie kan dan gedurende de afkoeltijd van het vorig produkt in de buffer worden gerealiseerd. Zodoende is er meer tijd beschikbaar om het te injecteren materiaal op de juiste manier te rangschikken; de afkoeltijden zijn namelijk groter dan de injectietijden. Injectietijden vergen enkele seconden, terwijl het afkoelen in de orde van grootte van tien tot twintig seconden ligt. Figuur 1.4 geeft het meerlaagsspuitgieten met behulp van een buffer weer.

Als modellering van de buffer wordt momenteel gedacht aan een cilinder-plunjer systeem (zie figuur 1.5).

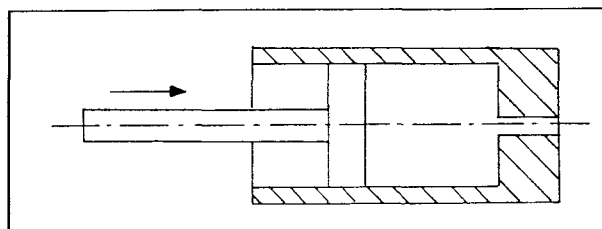


fig. 1.5 Modellering buffer

## 2. De stageopdracht

Om tot een succesvolle benutting te kunnen komen van het meerlaagsspuitspuitgieten bij dunwandige complexe produkten moet van te voren kunnen worden voorspeld wat de deformatiegeschiedenis van elk deeltje zal zijn bij het injecteren in de matrijs, het zogenaamde 'particle-tracking'. Met behulp van deze informatie is het dan mogelijk om te bepalen welk materiaal er waar, wanneer en hoeveel geïnjecteerd dient te worden, om de gewenste lagen in het eindprodukt te realiseren. Om nu de rekentechniek, die de particle-tracking mogelijk maakt, te verifiëren, dienen goed gedefinieerde experimenten te worden uitgevoerd. Resultaten van de experimenten kunnen dan worden vergeleken met de resultaten van de berekeningen.

Een goed experiment om de resultaten van de berekeningen te verifiëren is het visualiseren van deformatiepatronen m.b.v. een plunjerstroming. Een plunjerstroming is de stroming die ontstaat wanneer een vloeistof in een cilinder wordt voortgestuwd m.b.v. een plunjer. E. Vos (1991) [1] heeft deze experimenten uitgevoerd in zijn onderzoek naar de toepasbaarheid van een cilinder-plunjer systeem als buffer bij het meerlaagsspuitspuitgietproces.

Toekomstige experimenten met de meerlaagsspuitspuitgietmachine hebben eveneens als doel om een zogenaamde ontkoppelde rekenwijze te testen. Bij deze ontkoppelde rekenwijze wordt verondersteld, dat de visco-elasticiteit geen invloed heeft op de kinematica tijdens de stroming. Mogelijke experimenten om deze rekenwijze te toetsen zijn de deformatiepatronen van een (polymere) plunjerstroming door een restrictie, een vernauwing in de cilinder.

Spuitspuitgietmachine van het meerlaagsspuitspuitgieten gebeurt momenteel met het simulatiepakket VIp. Daar experimenten met de meerlaagsspuitspuitgietmachine nog even op zich laten wachten en het toch gewenst is om het simulatiepakket aan de hand van praktijkvoorbeelden te testen, dienen ook hiervoor experimenten te worden uitgevoerd. Hiervoor wordt een eenvoudig matrijsje gevuld d.m.v. een plunjerstroming. Deformatiepatronen binnen het produkt van dit eenvoudig matrijsje kunnen dan weer worden vergeleken met berekende patronen.

De opdracht van de stage kan dan in drie delen worden opgesplitst:

- Het opbouwen van de opstelling om de deformatiepatronen van een plunjerstroming te visualiseren zoals E. Vos deze heeft gebruikt.
  
- Het uitvoeren van de experimenten; het visualiseren van deformatiepatronen van een plunjerstroming door restricties. De proeven dienen te worden uitgevoerd met verschillende restricties (variërend in lengte etc.) en verschillende materialen (en combinaties van materialen).



→ Het opzetten van een opstelling voor het vullen van een eenvoudig matrijsje en het uitvoeren van het vullen van het matrijsje met een bepaalde configuratie bestaande uit één materiaal of verschillende materiaalcombinaties.

Opgemerkt dient nog wel te worden, dat er binnen deze stage geen sprake is van het visualiseren van een stroming, maar van de deformatiepatronen van de stroming. De resulterende proefstukken zijn dan ook slechts momentane stromingssituaties. Het resulterend deformatiepatroon is dus eigenlijk een integraal over de tijd van het snelheidsveld. Wordt er in het verslag toch gesproken over het visualiseren van een stroming, dan worden de momentane deformatiepatronen bedoeld. Dit om misverstanden uit de weg te ruimen.

### 3. De opstellingen

Zoals in het voorgaande staat vermeld, hebben de experimenten als doel het laten zien van de deformatiepatronen die ontstaan bij het stromen van een polymeer door een restrictie en bij het vullen van een matrijs. De experimentele resultaten worden vergeleken met de resultaten van de simulatieprogramma's. Daar er dus twee verschillende typen experimenten moeten worden uitgevoerd, ligt het voor de hand, dat er ook twee verschillende opstellingen zijn. Deze zullen in de volgende paragrafen aan de orde komen.

#### 3.1. De restrictie-opstelling

De opstelling die gebruikt is voor het visualiseren van de restrictie-deformatiepatronen is dezelfde als die E. Vos (in 1991) heeft gebruikt om een plunjerstroming te visualiseren. Redenen waarom toen is gekozen voor een stroming tussen plunjers als experiment zijn voor de hand liggend. Deze geometrie is praktisch handig in het gebruik en makkelijk te vervaardigen en deze geometrie levert eenvoudige (rotatiesymmetrische, isotherme) berekeningen, terwijl de stroming toch een aantal wezenlijke kenmerken van een stroming in een matrijs vertoont, zoals de fonteinstroming. Daarnaast deed E. Vos onderzoek naar de bruikbaarheid van een plunjer-cilinder systeem als buffer bij het meerlaagsspuitgieten. Vanuit kostenbesparend oogpunt is deze opstelling weer in elkaar gezet en aangepast waar nodig om de experimenten uit te voeren.

Voordat echter aan het opbouwen van een opstelling begonnen wordt dient goed gerealiseerd te worden, welke grootheden er gemeten dienen te worden (met een zekere nauwkeurigheid). Wordt er direct begonnen met bouwen en experimenteren, dan is het dikwijls zo dat er achteraf iets is vergeten te meten. Bij het uitvoeren van de experimenten met de plunjerstroming dienen snelheden, verplaatsingen en temperaturen te worden gemeten. Er dienen dus maatregelen te worden getroffen die dit mogelijk maken.

De gebruikte restrictie-opstelling is weergegeven in figuur 3.1.1. De belangrijkste onderdelen zijn weergegeven in de figuren 3.1.2. t/m 3.1.7. Figuur 3.1.7. toont een bovenaanzicht van de opstelling.

In de buitencilinder (zie figuur 3.1.2.) zijn twee cilindrische ruimten uitgespaard. In het nauwste gedeelte ( $\varnothing$  16 mm) beweegt de plunjer (zie figuur 3.1.6.) In deze ruimte zal ook de beginconfiguratie worden gepositioneerd. In de bredere uitsparing van de buitencilinder kan tegenaan de hals van het nauwe gedeelte één van de verschillende restricties (zie figuur 3.1.4.) worden gepositioneerd, met daar weer tegenaan een bijbehorende binnencilinder (zie figuur 3.1.3.). De bijbehorende binnencilinder heeft dezelfde doorsnede als het nauwe gedeelte van de buitencilinder zelf. De binnencilinder is er in twee verschillende lengten, evenals de restricties. Hierdoor is er altijd een combinatie binnencilinder/restrictie

te maken die precies past in het brede binnengedeelte van de buitencilinder. Tegenaan de buitencilinder wordt dan het sluitstuk geschroefd, zodat het geheel binnenin opgesloten zit. In het sluitstuk (zie figuur 3.1.5.) en onderin de buitencilinder zijn gaten aangebracht met daarin draad getapt. Hierdoor is het mogelijk om de plunjers met messing bouten vast te zetten, de opstelling om te draaien en het geheel terug te drukken. E. Vos gebruikte deze optie om te kijken hoe reversibel de plunjerstroming was. Deze optie is bij de hier uitgevoerde experimenten niet gebruikt.

De buitencilinder kan worden vastgezet in de ophangring m.b.v. 6 inbusbouten. Voor deze manier van ophangen is bij de constructie van de opstelling gekozen om de warmteverliezen naar het frame van de opstelling zo gering mogelijk te maken. In figuur 1.3.7. is een bovenaanzicht weergegeven, waarin is te zien hoe de buitencilinder in de ophangring is vastgezet. Bijkomend voordeel van deze ophangring is dat de buitencilinder, en daarmee ook de binnencilinder, nog ten opzichte van de plunjer kan worden gepositioneerd. Dit voordeel bleek bij de uitvoering van de experimenten nodig om schade door wrijving aan cilinders en plunjers te reduceren. Deze schade bleek namelijk hinderlijke gevolgen te hebben bij het uitvoeren van de proeven.

De ophangring zit m.b.v. twee aangelaste tapeinden vastgebout aan de twee steunen van het frame. Op deze manier is het mogelijk gemaakt om de buitencilinder te roteren rondom de as die door de tapeinden loopt. De steunen van het frame zitten op hun beurt weer vastgebout op het juk, waarin de hydraulische cilinder hangt. M.b.v. deze cilinder wordt de plunjer heen en weer bewogen. De plunjer van de opstelling zit m.b.v. een houder vastgeschroefd op de plunjer van de hydraulische cilinder. Op deze plaats is tevens een aanwijspijl bevestigd. Op het juk van de hydraulische cilinder is een liniaal bevestigd, zodat de verplaatsingen van de plunjer kunnen worden gemeten. Snelheden zijn gemeten door m.b.v. een stopwatch de tijdsduur te meten van de verplaatsingen.

Om de temperatuurhuishouding te regelen waren (ter plaatse van de gestippelde lijnen in figuur 3.1.1.) 4 verwarmingselementen aangebracht. Deze verwarmingselementen waren per twee gekoppeld (met bijbehorend thermokoppel) aan een kanaal van een voedingskast. De verwarmingselementen hadden elk een vermogen van 250 Watt (bij 220 Volt).

In de binnencilinder is bovenin eveneens een plunjer aangebracht. Bovenop deze cilinder is een gewicht geplaatst om zo druk in de polymere smelt te creëren en een vrij oppervlak in de bovenste cilinder te vermijden. In figuur 3.1.8. zijn schematisch de drukkrachten weergegeven die op de smelt in de cilinder werken.  $F_z$  is de gravitatiekracht, veroorzaakt door het gewicht boven op de bovenste plunjer.  $F_p$  is de drukkracht, veroorzaakt door het hydraulisch systeem die op de onderste plunjer werkt.

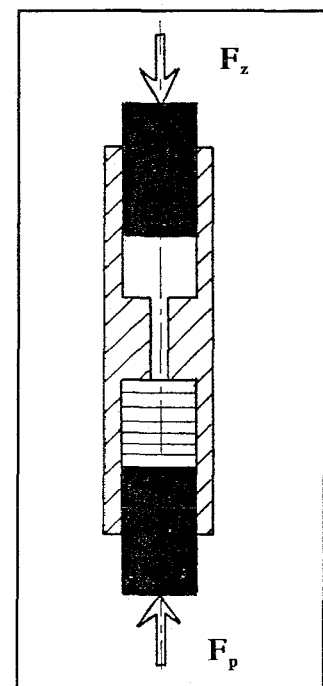


fig. 3.1.8 Plunjers met drukkrachten

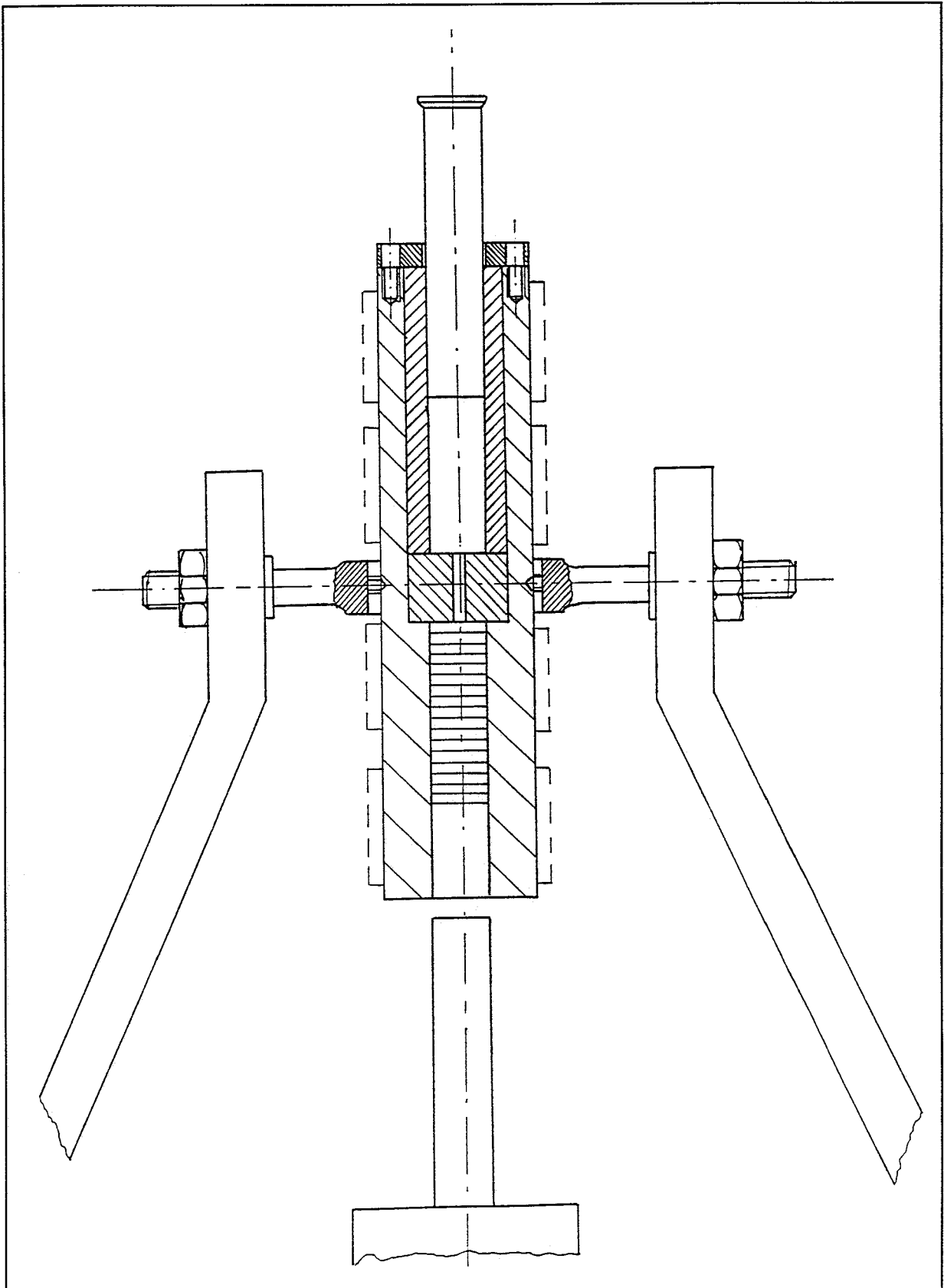


fig. 3.1.1 De restrictieopstelling

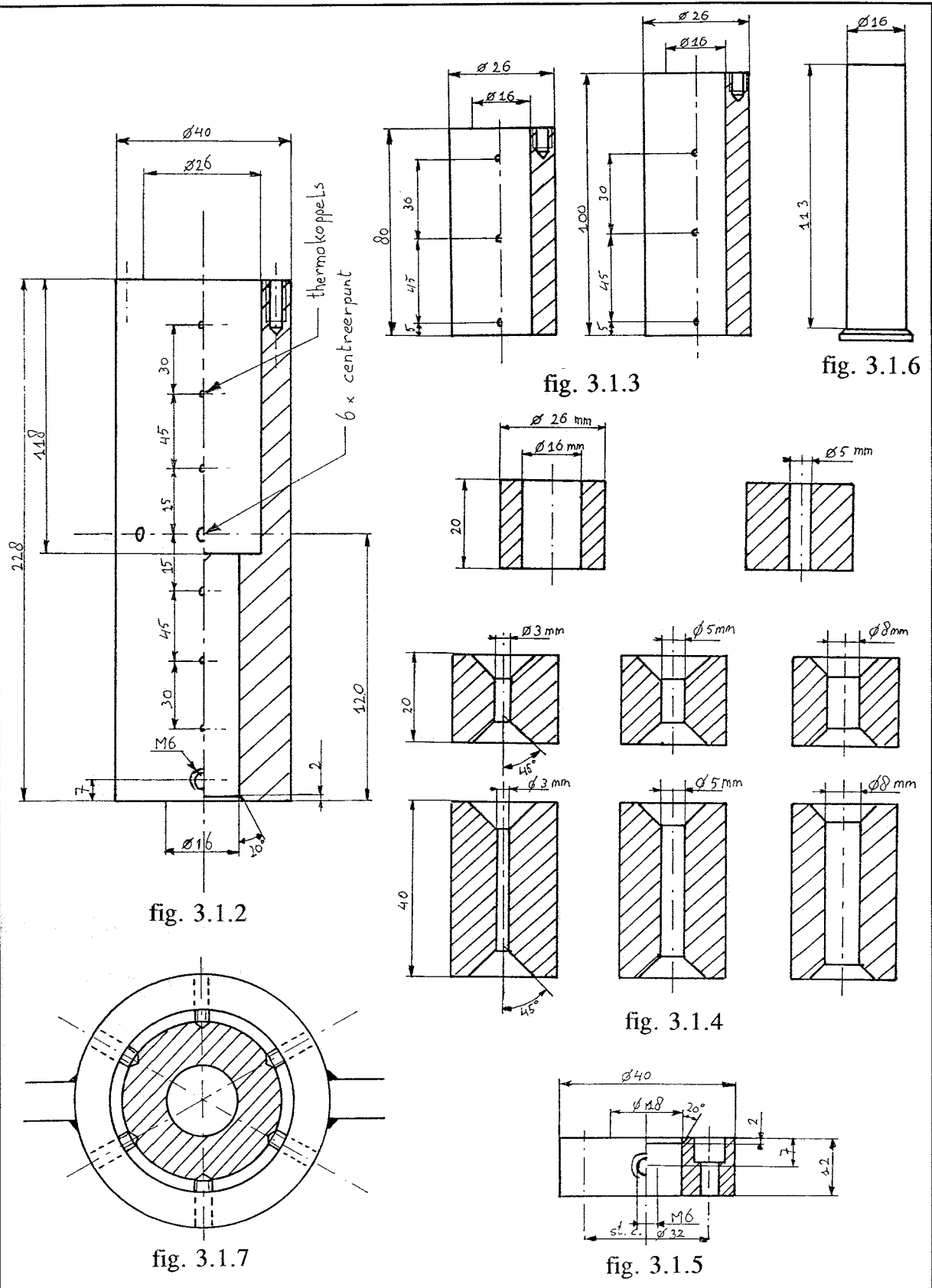


fig. 3.1.2 t/m 3.1.7

### 3.2. De matrijsopstelling

Om het spuitgietsimulatiepakket VIP te testen dienen experimenten te worden uitgevoerd, waarbij een matrijsje wordt gevuld m.b.v. een plunjerstroming. De opstelling die voor deze experimenten is gebruikt is te zien in figuur 3.2.1. Redenen waarom het matrijsje gevuld wordt met een plunjerstroming zijn identiek aan die bij de restrictie-stroming.

De matrijsholte is schijfvormig. Het produkt is dun en rotatiesymmetrisch (wat leidt tot vereenvoudigingen in de berekeningen). Het produkt is dun, omdat de diameter van het schijfje groot is in verhouding met het volume van de beginconfiguratie. Hierdoor is er alleen voldoende materiaal voor een dunne schijf. Tussen de matrijs en het frame van de opstelling is een isolerende laag aangebracht om warmteverliezen naar het frame te reduceren. Het aanspuitkanaal van de matrijs is in de bovenhelft aangebracht in de vorm van een inzetstukje. De cilinder waarin de beginconfiguratie wordt gepositioneerd en waarin de plunjer beweegt, is vastgebout op de bovenhelft, bovenop het inzetstuk. Ook hier wordt de plunjer weer hydraulisch verplaatst.

Om de warmte huishouding te regelen zijn om de cilinder twee verwarmingselementen aangebracht met een bijbehorend thermokoppel. De elementen zijn van hetzelfde type als bij de restrictie-opstelling. Ook rondom de matrijshelften is een verwarmingselement aangebracht (zie de stippellijnen in figuur 3.2.1.). Dit verwarmingselement had een vermogen van 1100 Watt (bij 220 Volt) en was ook weer tezamen met een thermokoppel aangesloten op de voedingskast.

Verplaatsingen werden bepaald door vooraf maatstrepen op de plunjer aan te brengen. Snelheden zijn bij deze experimenten ook weer bepaald door met behulp van een stopwatch de tijdsduur van de verplaatsingen te meten.

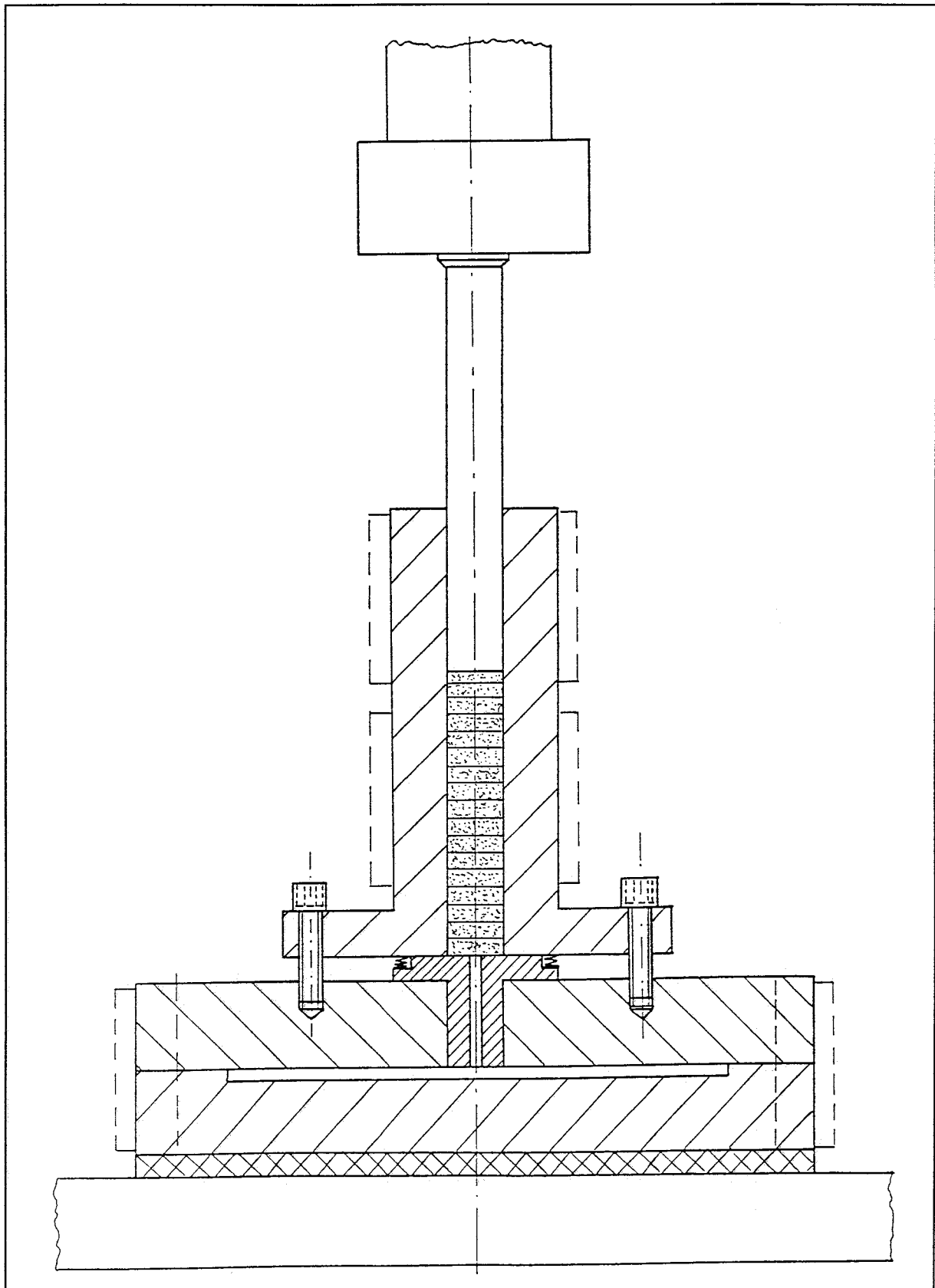


fig. 3.2.1 De matrijsopstelling

## 4. Materialen

Voor de uitvoering van de experimenten zijn een drietal verschillende materialen gebruikt, t.w. PE, PS en ABS. De reden voor het gebruik van PS en ABS is dat deze materialen in voldoende mate aanwezig waren, en dat deze materialen gekarakteriseerd zijn. PS en ABS zijn beiden materialen van spuitgietkwaliteit, PE een film blowing grade. De materialen zijn dus zeer geschikt voor het simuleren van in werkelijkheid optredende fenomenen.

PE is door E. Vos (1991) [1] gebruikt, maar het is destijds niet gelukt om proefstukken te maken zonder luchtbellens. De reden waarom PE is gebruikt, is dat dit materiaal een relatief kleine temperatuurafhankelijkheid bezit. Dit in tegenstelling tot beide andere materialen.

In tabel 4.1. staan materiaalparameters voor de materialen vermeld.

Tabel 4.1.

	E-modulus MPa	Treksterkte MPa	$\rho$ kg/dm <sup>3</sup>	$T_g$ °C	$\alpha$ 10 <sup>-5</sup> /K	$c_p$ kJ/kg·K	$\lambda$ W/m·K
PE	150-250	20	0.92	-120	23	2.4	0.35
PS	3000-3600	45-60	1.05	95	7	1.3	0.15
ABS	1600-3000	15-30	1.05	105	9	1.4	0.17

Voor alle drie de materialen zijn vloeicurves bepaald. Aan de hand van deze vloeicurves zijn constitutieve modellen gekozen, nodig voor berekeningen.

### - ABS -

Het ABS (acrylonitril-butadien-styreen) is van het type Ronfalin FX50 van DSM. In figuur 4.1. is de vloeicurve van dit materiaal weergegeven.

Op grond van deze vloeicurve is voor de berekeningen een Power-law - model gekozen. Dit constitutief model ziet er als volgt uit:

$$\eta = B_1 * e^{(A_1/T)} * \dot{\gamma}^{(n-1)}$$

De coëfficiënten in dit model hebben de volgende waarden:

- $n = 0.52$
- $A_1 = 6.57 * 10^2$
- $B_1 = 1.43 * 10^{-2}$



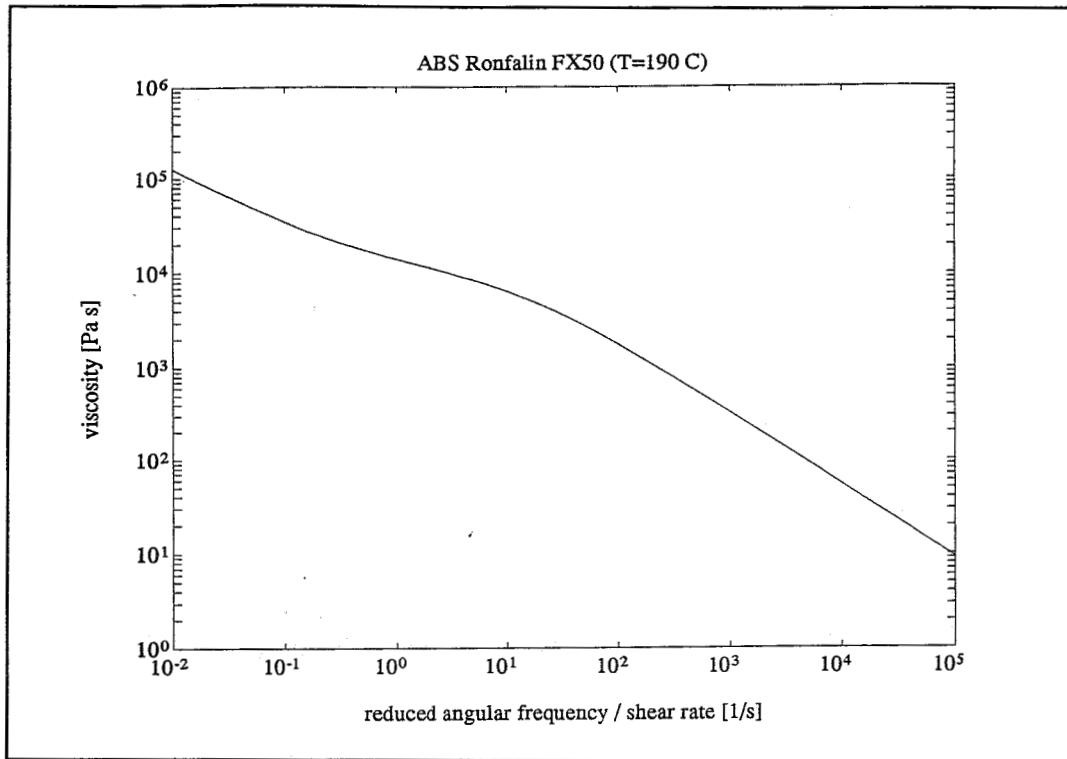


fig. 4.1. Vloeicurve ABS

- PS -

Het polystyreen is Styron 678E van DOW. Ook dit materiaal is gekarakteriseerd en de vloeicurve is weergegeven in figuur 4.2. Als constitutief model is voor het PS een 7 constant Cross-model (ook weer op basis van de vloeicurve). Dit model ziet er als volgt uit:

$$\eta(\dot{\gamma}, T, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + \left( \frac{\eta_0 * \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}}$$

met hierin

$$\eta_0(T, p) = D_1 * e^{\frac{-A_1 * (T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)}}$$

$$T^*(p) = D_2 + D_3 * p$$

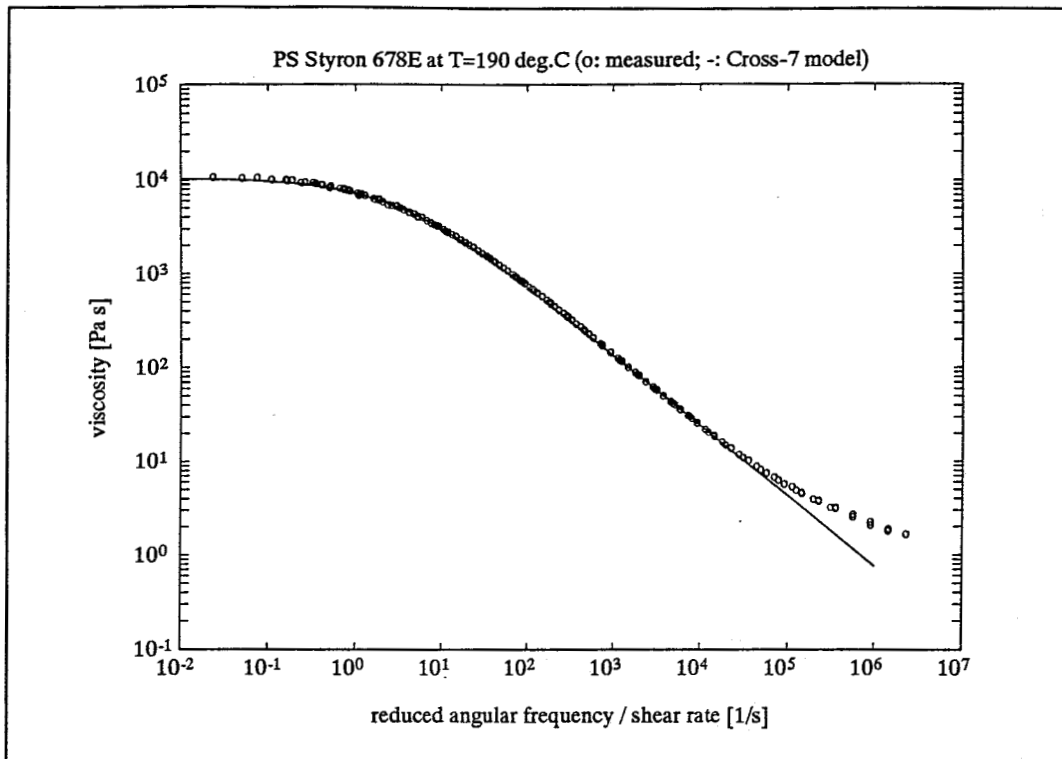


fig. 4.2 Vloeicurve PS

en:

$$A_2(p) = A_2 + D_3 * p$$

De constanten in deze formules hebben de volgende waarden:

- $\eta_0 = 1.04 \cdot 10^4 \text{ Pa s}$
- $A_1 = 25.742$
- $A_2 = 61.056$
- $n = 0.252$
- $D_1 = 4.76 \cdot 10^{10} \text{ Pa s}$
- $D_2 = 373 \text{ K}$
- $D_3 = 5.1 \cdot 10^{-7} \text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1}$
- $\tau^* = 3.08 \cdot 10^4 \text{ Pa}$

#### - LDPE -

Het (low-density) polyetheen is van het type 2101TN47. Ook van dit materiaal is weer een vloeicurve bepaald, die is weergegeven in figuur 4.3.

Als constitutief model voor dit materiaal is gekozen voor een Carreau-Yassuda model. Het gebruikte model heeft de volgende vorm:

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = a_T \cdot \eta_0 \cdot (1 + (\lambda \cdot a_T \cdot \dot{\gamma})^a)^{(n-1)/a}$$

De waarden van de coëfficiënten zien er als volgt uit:

- $\eta_0 = 3.4585 \cdot 10^4$
- $\lambda = 3.039$
- $a = 0.45836$
- $n = 0.32107$

$a_T$  is een functie van de temperatuur en heeft de volgende vorm:

$$a_T = e^{\frac{E_A}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)}$$

met:

- $T_{ref} = 190 \text{ } ^\circ\text{C}$
- $E_A = 66 \text{ kJ/mol}$
- $R = 8.314 \text{ (gasconstante)}$

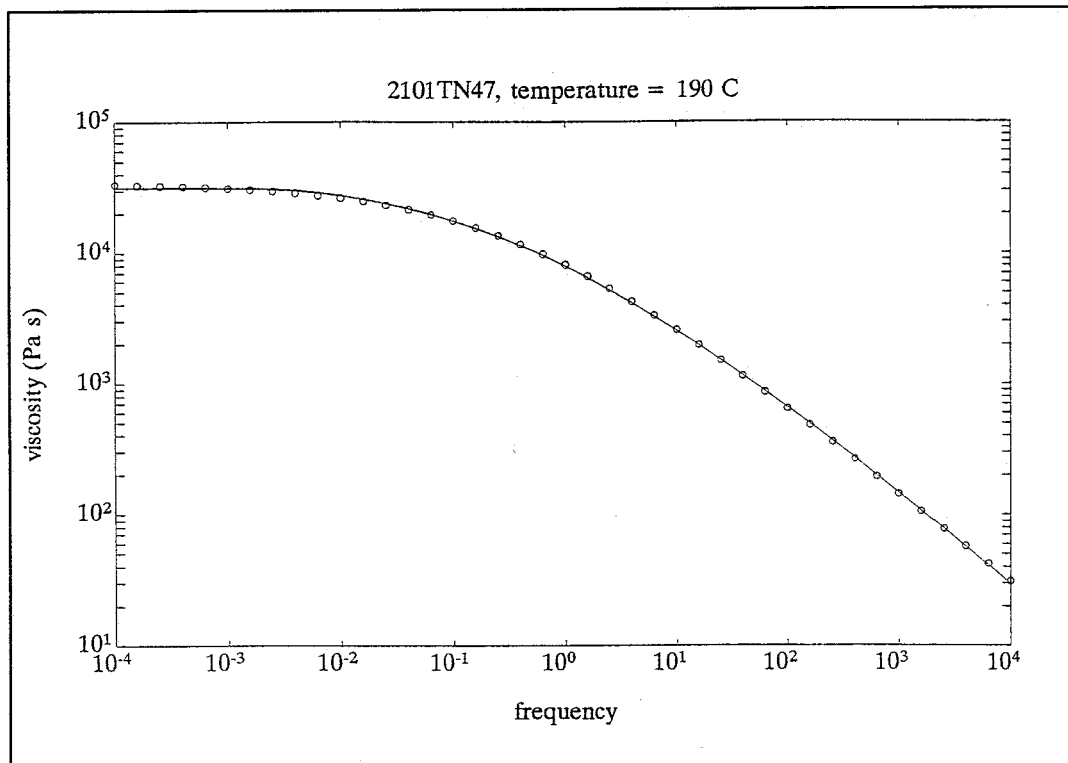


fig. 4.3 Vloeicurve PE

De bolletjes in de figuur zijn de gemeten waarden en de getrokken lijn is de fit op deze meetwaarden.

## 5. Experimenten, de algemene werkwijze

In dit deel zal de algemene werkwijze worden beschreven die gehanteerd is bij het uitvoeren van de experimenten. Doel hiervan is een globale indruk te geven van de algemene manier van uitvoeren van de experimenten. De werkelijke uitvoeringen en de veranderingen die daarop zijn aangebracht tijdens de experimenten zijn tezamen met de resultaten van de experimenten in het volgende hoofdstuk beschreven. De algemene manier van werken zal weer voor beide opstellingen apart worden besproken.

### 5.1. De restrictie-opstelling

Als de opstelling opgebouwd is, zoals beschreven in 3.1., dan kan met de experimenten worden begonnen. De algemene werkwijze voor de restrictie-opstelling ziet er als volgt uit:

- Reinig alle onderdelen goed. Het reinigen kan gebeuren met messing borstels en met wasbenzine of aceton. De opstelling mag niet met stalen borstels of schrapers worden gereinigd. De cilinders zijn gehard; met scherpe stalen voorwerpen zouden deze beschadigd kunnen worden.
- Na het reinigen van alle onderdelen dient de gewenste restrictie (schoongemaakt) met de bijpassende binnencilinder in de buitencilinder te worden geplaatst en te worden opgesloten met het sluitstuk.
- Vervolgens moet de plunjer enigszins worden uitgelijnd in de cilinder. Dit kan gebeuren door de ophangring te roteren in het frame en door de buitencilinder te positioneren in de ophangring m.b.v. de 6 inbusbouten. Het is belangrijk dat dit goed gebeurt; het voorkomt schade door wrijving aan plunjers en cilinder.
- Na het uitlijnen dient de positie van de plunjer t.o.v. de cilinder te worden geijkt op de liniaal. Bij de hier uitgevoerde proeven is de nulpositie gekozen bij het begin van de cilinder (zie figuur 5.1.1.). Hierdoor is precies bekend hoever de beginconfiguratie doorgedrukt kan worden voordat tegen de restrictie wordt aangedrukt. De lengte van de beginconfiguratie is immers van te voren bekend, evenals de afstand tot de restrictie in de cilinder. Het verschil is dan de te verplaatsen afstand om de beginconfiguratie tegen de restrictie aan te plaatsen.
- Als de plunjer is uitgelijnd en de liniaal is geijkt, dan moeten de fiches in de cilinder worden gepositioneerd. Alvorens de fiches in de cilinder te positioneren, dient de oppervlaktekwaliteit te worden bekeken. De fiches moeten mooi glad zijn, zodat geen luchtinsluitsels kunnen worden gevormd. De fiches zijn zonnodig met een zoetviltje bewerkt.

- Na positioneren van de fiches m.b.v. de onderste plunjer, moet de bovenste plunjer worden aangebracht, met daarbovenop een gewicht.

- De opstelling is nu gereed voor een experiment. Het opwarmen kan beginnen. Na voldoende lange opwarmtijd kan de smelt een verplaatsing worden opgelegd. De tijdsduur van de verplaatsing moet worden gemeten, ter bepaling van de snelheid van de plunjer. Als de verplaatsing is opgelegd, kan de verwarming worden uitgezet om het proefstuk te laten afkoelen.

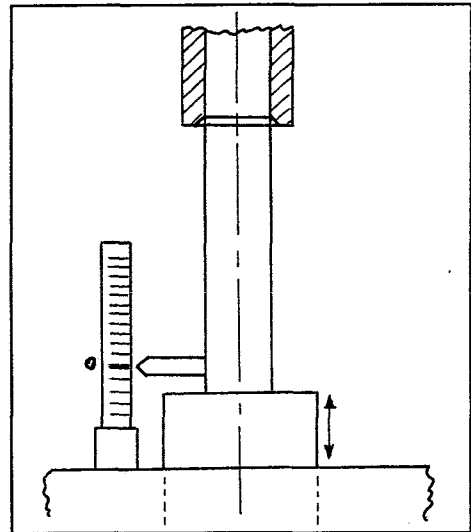


fig. 5.1.1. IJken van de liniaal

- Als het proefstuk is gestold, kan het worden verwijderd uit de opstelling door deze te demonteren. Ook bij het verwijderen van het proefstuk moet weer worden opgepast de opstelling niet te beschadigen.

- Het proefstuk moet vervolgens worden doorgezaagd, geschuurd en gepolijst, zodat de deformatie patronen goed zichtbaar worden. Na deze laatste stap begint de hele procedure weer opnieuw.

## 5.2. De matrijs-opstelling

De algemene werkwijze die gehanteerd is bij de experimenten met de matrijsopstelling ziet er als volgt uit:

- Ook hier geldt: alvorens te beginnen alle onderdelen reinigen met messing borstels en aceton of wasbenzine.

- Na het reinigen kunnen de matrijshelften op elkaar worden vastgeschroefd. De helften moeten goed stevig aan elkaar worden vastgeschroefd, zodat lek van de polymere smelt door de luchtspleten tot een minimum wordt beperkt.

- De matrijs kan dan onder de hydraulische perscilinder op het frame worden geplaatst, met een isolerende tussenlaag.

- Rondom de matrijs wordt het verwarmingselement van 1100 Watt aangebracht. De verwarming van de matrijs kan nu al worden aangezet, daar het veel meer tijd vergt om de matrijs op te warmen dan de cilinder met de fiches.

- Vervolgens moeten de fiches in de (nog niet gemonteerde) cilinder worden gepositioneerd. Ook hier geldt weer: letten op de oppervlaktekwaliteit en de fiches zonodig bijwerken met een zoetvieltje. Reden dat je eerst de fiches in de cilinder doet, voordat je de cilinder op de matrijs plaatst is, dat je luchtinsluiting tussen de fiches wilt voorkomen. De cilinder wordt langs de onderkant met fiches gevuld, terwijl de plunjer al in de cilinder is geplaatst. Voordat de plunjer in de cilinder wordt gezet moet eerst een maatstreep worden gezet tot waar je de plunjer moet doorpersen om precies de matrijs te vullen (zie figuur 5.2.1.).

- Wanneer de fiches in de cilinder zijn gebracht, kan deze op de matrijs worden vastgebout en kunnen de verwarmingselementen ( $2 \times 250$  Watt) om de cilinder worden aangebracht.

- Daarna moet de kop van de perscilinder tegen de kop van de plunjer worden gepositioneerd. Hierna kan ook de cilinder worden opgewarmd.

- Wanneer de gehele opstelling op dezelfde temperatuur (isotherm persen) is gebracht, kan de matrijs worden gevuld, d.w.z. de plunjer verplaatsen tot aan de maatstreep. Als de smelt later wat is afgekoeld, kan nog iets worden nageperst om eventuele holten te doen verdwijnen.

- Na het persen wordt het proefstuk afgekoeld en uit de matrijs gehaald. Vervolgens wordt het proefstuk doorgezaagd, geschuurd en gepolijst. De cyclus kan zich nu weer herhalen.

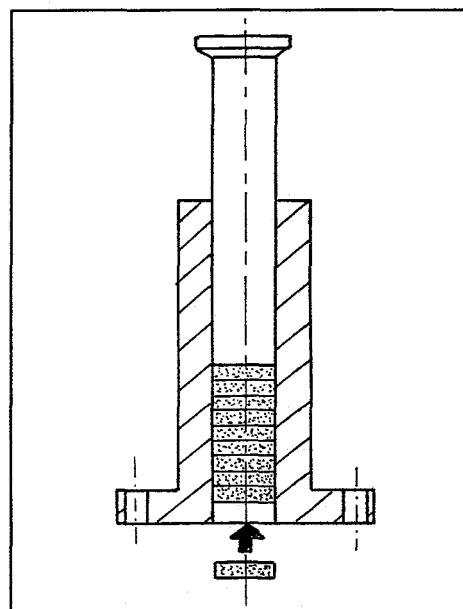


fig. 5.2.1. Vullen van de cilinder

## 6. Uitvoering en resultaten

In hoofdstuk 5 is de algemene werkwijze beschreven voor beide opstellingen. In dit hoofdstuk zal de praktische uitvoering daarvan worden beschreven met de bijbehorende resultaten. Voordat echter kon worden begonnen met het visualiseren van deformatiepatronen van de plunjerstroming moesten eerst fiches worden vervaardigd. Dit proces zal eerst kort worden beschreven.

### 6.1. Het vervaardigen van fiches

Om de deformatiepatronen te visualiseren is gekozen voor een systeem waarbij een goed gedefinieerde beginconfiguratie wordt opgebouwd uit fiches. Deze fiches worden opgestapeld in de cilinder, opgesmolten tot één geheel en door de restrictie geperst. Om de deformatiepatronen hierbij te visualiseren worden enkele fiches van een andere kleur, maar wel van hetzelfde materiaal, in de stapel gestopt (de zogenaamde tracers). Hierdoor worden patronen zichtbaar, maar de materiaaleigenschappen worden niet beïnvloed. De manier waarop de fiches gemaakt zijn is voor alle drie de materialen (zie voor de materialen hoofdstuk 4) hetzelfde.

Het basismateriaal zijn korrels ABS, PS en PE. ABS en PS zijn steeds voor gebruik gedroogd in de oven (2 uur lang op 80 °C). Ook de fiches zijn steeds voor gebruik gedroogd. Van deze korrels basismateriaal zijn platen geperst, van 100 mm breed, 230 mm lang en 3 mm dik. Op een onderplaat is hittebestendig papier gelegd; hier bovenop de mal met daarin de korrels basismateriaal (in kleine overmaat); vervolgens weer een laag hittebestendig papier met daar bovenop de stalen bovenplaat. Deze sandwich-constructie (zie figuur 6.1.1.) is tussen de warme pers gelegd, opgesmolten gedurende 5 minuten en geperst op 35 ton perskracht bij 180 °C. Uit de platen zijn fiches gestanst (PE en ABS) op doorsnede 16 mm en blokjes gezaagd (PS is namelijk te bros om te stansen) van 20\*20 mm. Vervolgens zijn de fiches en blokjes afgedraaid op een doorsnede van 16 mm. Met deze fiches zijn de proeven uitgevoerd.

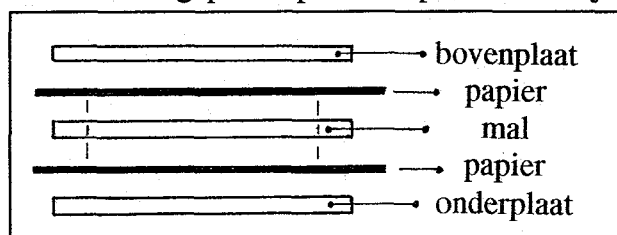


fig. 6.1.1. Het persen van platen

### 6.2. Resultaten van proefexperimenten

Om een idee te krijgen wat de resultaten zullen zijn, zijn een aantal proefexperimenten uitgevoerd. Met deze proefexperimenten is experimenteel de lengte van de beginconfiguratie

bepaald, het aantal tracers daarin en het gewicht boven op de bovenste plunjer. Verder is bepaald uit hoeveel stappen het volledig doordrukken van de polymere smelt kon worden opgebouwd.

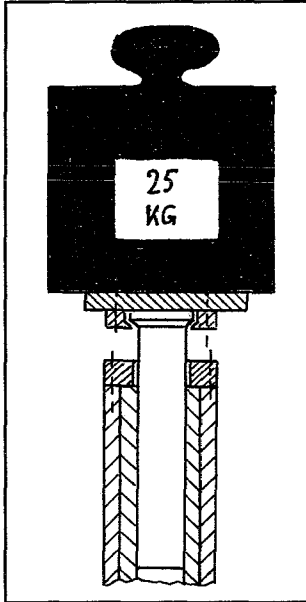


fig. 6.2.1. Gewicht op bovenste plunjer

Het gewicht dat boven op de bovenste plunjer is geplaatst (zie figuur 6.2.1.) is experimenteel vastgesteld op 25 kg. Bij dit gewicht bleken de proefstukken geen lucht bellen meer te bevatten. De druk die dan in de polymere smelt heerst volgt uit de volgende eenvoudige rekensom:

$$\text{Massa } m = 25 \text{ kg}$$

$$\text{Oppervlak } A = \pi/4 \cdot (16)^2 = 201 \text{ mm}^2$$

$$\text{Kracht op } A = F = m \cdot g = 25 \cdot 9.8 = 245 \text{ N}$$

$$\text{Druk } p = F/A = 1.22 \text{ N/mm}^2 = 12.2 \text{ bar}$$

De restrictie die gekozen is om de experimenten mee te beginnen is de rechte restrictie met een doorsnede van 20 mm (zie figuur 6.2.2.). Andere restricties zijn overigens niet meer gebruikt. Aan het eind van dit hoofdstuk worden toch nog een drietal experimenten getoond met verschillende schuine restricties, zodat toch een idee wordt verkregen hoe deze

deformatieprofielen er uitzien.

De keuze voor de rechte restrictie is mede bepaald door de proefexperimenten. Aanvankelijk was het de bedoeling om alleen de profielen te visualiseren die boven de restrictie ontstaan. Door echter de rechte restrictie te nemen is het mogelijk om de proefstukken langs de restrictie af te snijden, zodat boven- en onderhelft bewaard blijven. Er resulteert dan tweemaal zoveel informatie uit dezelfde proeven. Bij gebruik van de schuine restricties bleek het niet mogelijk om beide helften onbeschadigd van rond de restrictie te verwijderen. Verder is het interessant om te weten of er wervels zullen ontstaan in de viskeuze stroming. Deze zullen het snelst ontstaan bij een rechte restrictie. Schuine restricties hebben een meer geleidelijk verloop van dik naar dun, waardoor wervels minder snel optreden.

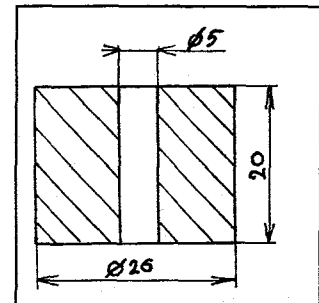


fig. 6.2.2. Gekozen restrictie

Het aantal tracers is m.b.v. de proefexperimenten vastgesteld op 7. Het totaal aantal fiches kwam op 21. De beginconfiguratie die steeds is gebruikt bij de experimenten, waarbij de proefstukken zijn opgebouwd uit één materiaal, is te zien in figuur 6.2.3. Deze stapeling gaf een mooi beeld van de deformatiepatronen.

De opwarmtijd die nodig is om een isotherme situatie te creëren in de cilinder met het opgesmolten materiaal is te bepalen uit de curves voor het instationair opwarmen van een oneindig lange cilinder. M.b.v. de materiaalparameters is dan een schatting voor de opwarmtijd te bepalen. Deze schatting ligt in de orde van grootte van 15 minuten. Uit



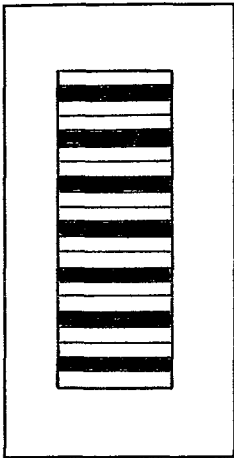


fig. 6.2.3.  
Beginconfiguratie

experimenten is gebleken, dat na zo'n 15 minuten de temperatuur inderdaad constant bleef op 200 °C. Daarom is gekozen voor een opwarmtijd van 20 minuten, zodat zeker een isotherme situatie was gecreëerd.

Met deze informatie, gevonden uit de proefexperimenten, zijn de experimenten uitgevoerd.

### 6.3. Experimenten met één materiaal

Eerst zijn alle experimenten op de restrictie-opstelling uitgevoerd. Met behulp van de informatie, verkregen uit de proefexperimenten, is aan de eerste serie begonnen.

Serie 1 (zie figuur 6.3.1.) is uitgevoerd met ABS. In de tabel, behorende bij serie 1, staat de informatie vermeld over temperatuur, druk, plunjersnelheid, opwarmtijd en beginlengte. De beginconfiguratie is reeds in het voorgaande beschreven en is identiek voor alle experimenten, waarbij de proefstukken uit één soort materiaal zijn opgebouwd. Alleen de beginlengte is verschillend en daarom in de tabel opgenomen.

De verplaatsingen waarover de plunjer is verplaatst staan onder de desbetreffende proefstukken vermeld. Op  $T = 200\text{ °C}$  is de plunjer over deze afstand verplaatst. Daarna is de plunjer stilgezet, de verwarmingselementen uitgezet en het proefstuk afgekoeld. Deze afgekoelde resultaten zijn te zien in figuur 6.3.1.

De stappen zijn niet gelijk verdeeld in stappen van 10 mm, wat eigenlijk wel de bedoeling was. De reden hiervoor is, dat het eerste proefstuk er al is doorgeperst. Daarom is gekozen voor een kortere verplaatsing, van 8 à 9 mm. Afwijkingen daarvan worden veroorzaakt doordat de plunjer net iets te vroeg of te laat is stilgezet. De echte verplaatsingen zijn uit de figuren op te meten. Zoals eerder vermeld staan ze ook onder de proefstukken vermeld.

Wat direct opvalt is dat bij een verplaatsing van 0 mm het materiaal toch al door de restrictie is geperst. Wat verder opvalt zijn de grote luchtballen in proefstuk nr. 1 en de ingedeukte buitencontouren van de onderhelften van proefstukken nr. 1, 3 en 5. Een ander opmerkelijk fenomeen is, dat rond de instroom-opening zich een cirkelvormig gebied vormt (zie figuur 6.3.1). In de beginconfiguratie echter, blijven de tracers (zwart) redelijk recht, wat doet vermoeden dat de ontstane profielen redelijk betrouwbaar zijn. De profielen van proefstuk nr. 2 t/m 7 worden verder in het geheel niet verstoord door luchtballen.

Op analoge wijze is serie 2 gemaakt. Serie 2 (zie figuur 6.3.2.) is uitgevoerd met PE, zwarte

en transparante fiches. De beginconfiguratie was weer zoals eerder beschreven en de andere relevante gegevens staan in de tabel bij serie 2 vermeld. De serie is begonnen met het proefstuk dat geheel is doorgedrukt; vervolgens is teruggewerkt in de reeks.

In deze serie zijn ook een aantal opvallende aspecten waar te nemen. Om te beginnen zijn in de onderste helften enorme luchtbellens te constateren, die de deformatieprofielen (voor zover zichtbaar) enorm verstoren. Wordt serie 2 met serie 1 vergeleken, dan kan verder worden geconstateerd, dat het buitenoppervlak van de PE-proefstukken gaaf is en niet ingedeukt. Voorts missen we de stukjes uit de restrictie zelf. Reden hiervoor is, dat de proefstukken bij zo'n 70 °C uit de opstelling zijn verwijderd. De dunne tussenstukjes waren nog te warm om te worden verwijderd en zijn verstrekt geworden. Werden de proefstukken afgekoeld tot kamertemperatuur dan kleefde het PE zo enorm sterk in de restrictie dat ook de stukjes zijn vernield bij het verwijderen.

Echter de allergrootste handicap van serie 2 is dat de deformatiepatronen in de verschillende stappen nauwelijks zichtbaar zijn. Wetende dat je bezig bent met visualiseren, kan je dus concluderen dat dit niet bruikbaar is. Dit is dan ook de reden, waarom na 4 proefstukken gestopt is met deze serie. Het transparante PE is te doorschijnend in combinatie met het zwarte PE, waardoor de profielen (en zeker de hele fijne) niet meer waar te nemen zijn. Daarom is toevlucht genomen tot het inkleuren van het transparante PE met een gele kleurstof (1% kleurstof ingemengd). Het inmengen is gebeurd op een extruder; hierna zijn plaatjes van het materiaal geperst.

Vervolgens is opnieuw een reeks experimenten uitgevoerd, nu met zwart/geel PE. De resultaten hiervan zijn te zien in serie 3 (zie figuur 6.3.3.).

Ook in deze figuur zijn een reeks interessante ontwikkelingen te zien. Wat het meest opvalt aan serie 3 zijn de enorme luchtbellens, die de deformatieprofielen verstoren. Voorts is er weer een cirkelvormig gebied te constateren rondom de instroomopening van de restrictie en wat ook opvalt is dat bij alleen opwarmen en afkoelen het materiaal weer door de restrictie heen is geperst. Bij proefstuk nr. 6 en 7 ontbreekt weer het gedeelte uit de restrictie. Verder is ook duidelijk te zien dat het inkleuren een gunstig effect heeft op het zichtbaar maken van de profielen. Weliswaar zijn er lichtere strepen in het geel te ontdekken (vooral in proefstuk nr.7), maar een goede visualisatie is in ieder geval bereikt. De kleurstof heeft geen invloed op het stromingsgedrag van het PE. Profielen van transparant/zwart-PE en geel/zwart-PE zijn gelijk. Dit is echter niet meer te zien in de kopieën van de proefstukken, maar hiertoe dienen de proefstukken zelf te worden bekeken.

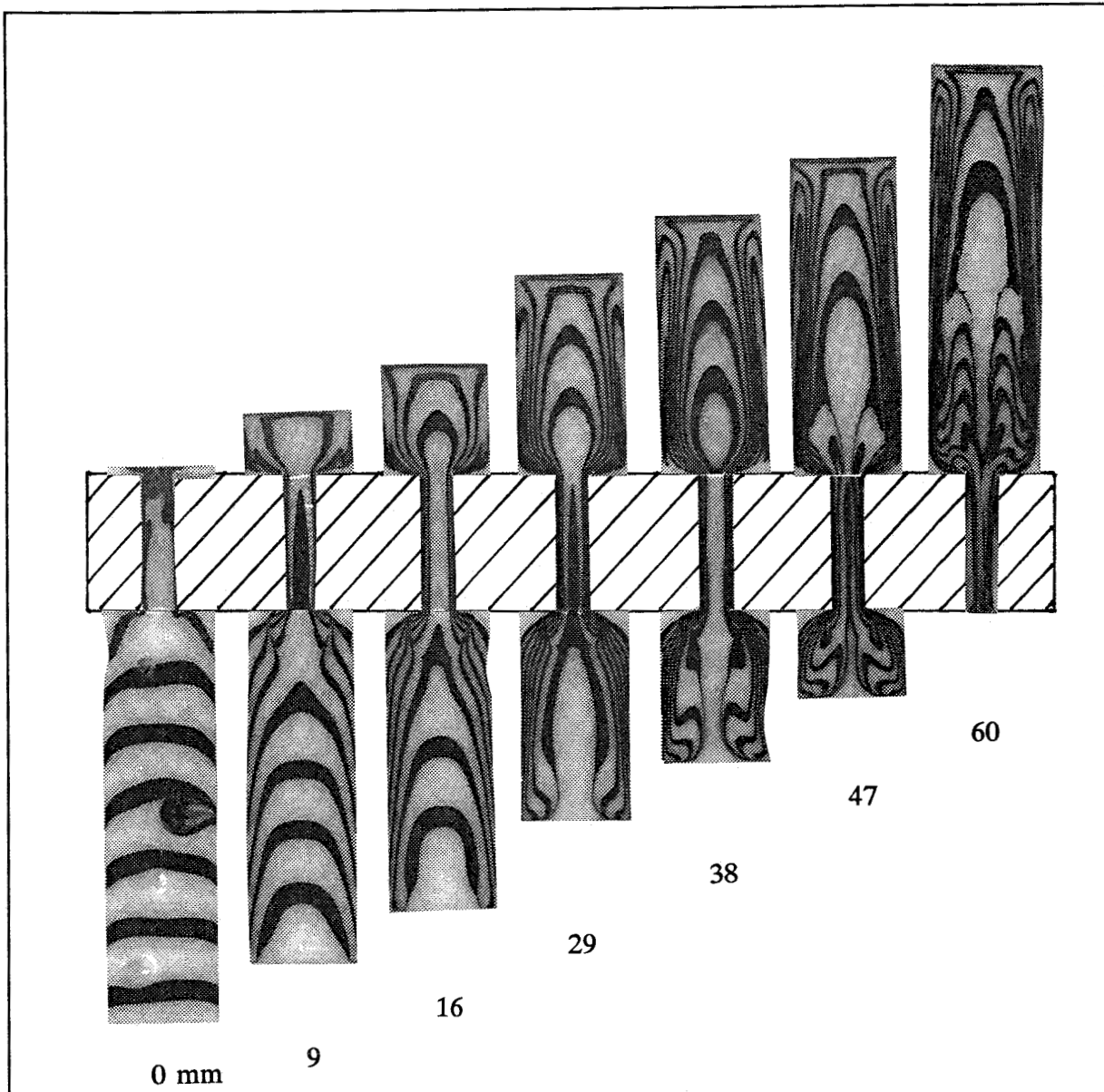


fig. 6.3.1. Serie 1: ABS

Tabel 6.3.1. Serie 1: ABS

Temperatuur	$T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$
Druk	$p = 12.2 \text{ bar}$
Plunjersnelheid	$V_p = 5 \text{ mm/sec}$
Opwarmtijd	$t = 20 \text{ min.}$
Beginlengte	$L = 60 \text{ mm.}$

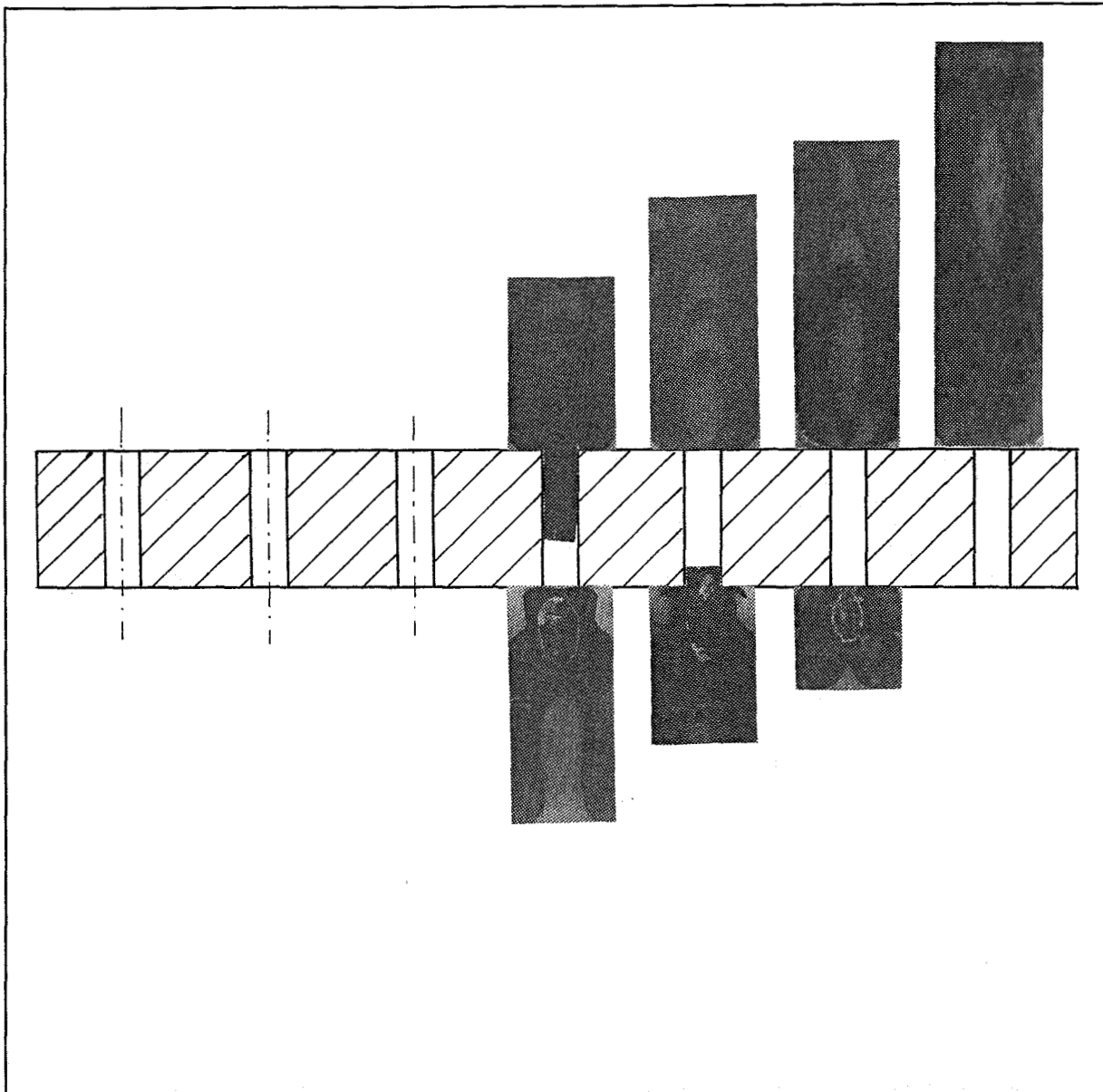


fig. 6.3.2. Serie 2: PE (transparant/zwart)

Tabel 6.3.2. Serie 2 PE (transparant/zwart)

Temperatuur	$T = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Druk	$p = 12.2 \text{ bar}$
Plunjersnelheid	$V_p = 5 \text{ mm/sec}$
Opwarmtijd	$t = 20 \text{ min.}$
Beginlengte	$L = 59 \text{ mm.}$

Na serie 3 is niet meer aan een serie begonnen met PS. De luchtbellen zijn niet meer acceptabel. Deze resultaten zijn niet nauwkeurig genoeg gedefinieerd meer om later nog als verificatie-middel van de computer-resultaten te gebruiken.

Zeer frappant is dat bij het opwarmen alleen al, in geval van PE, de bovenste plunjer met daarop het gewicht van 25 kg., wordt verplaatst over een afstand van  $\pm 7$  mm. Dit houdt in, dat de beginconfiguratie uitzet over een afstand van  $\pm 9$  mm. Het vullen van de restrictie met materiaal kost n.l. 2 mm. hoogte over een doorsnede van  $\varnothing 16$  mm; procentueel wordt de uitzetting van PE dan  $9/58 \cdot 100 = \pm 15\%$ . Zo'n hoge waarde voor de relatieve uitzetting was in het geheel niet verwacht. Om een idee te hebben van de orde grootte van de uitzetting is een eerste orde benadering van de uitzetting gemaakt.

Om een schatting van de uitzetting te krijgen is uitgegaan van de lineaire uitzettingscoëfficiënt van LDPE:  $\alpha = 230 \cdot 10^{-6}$  (1/K). Deze schatting is weliswaar alleen geldig in de vaste fase, maar er wordt toch een ondergrens van de uitzetting verkregen. Voor een betere schatting moet gebruikt gemaakt van de pvT-diagrammen van de materialen.

Bij benadering wordt de volumetrische uitzettingscoëfficiënt gesteld op 3<sup>de</sup> lineaire uitzettingscoëfficiënt:  $\Gamma = 3 \cdot \alpha$ . De volumeverandering wordt beschreven door:  $\delta V \equiv \Gamma \cdot V_0 \cdot \delta T$ . Het temperatuurverschil  $\delta T$  is  $200 - 20 = 180$ , het initieel volume  $V_0 = \pi/4 \cdot d^2 \cdot l$  en het verschilvolume  $\delta V = \pi/4 \cdot d^2 \cdot \delta l$ . De diameter blijft constant omdat het materiaal niet uitzet in de breedte (volumeverandering van de cilinder wordt verwaarloosd). De uitdrukking voor  $\delta l$  wordt dan:

$$\delta l = 3 \cdot \alpha \cdot l_0 \cdot \delta T.$$

Invullen van de waarden met voor de beginlengte  $l_0 = 58$  mm., dan wordt  $\delta l = 7.2$  mm. Procentueel wordt dit dan:  $7.2/58 \cdot 100 = 12.5\%$  uitzetting/krimp. Deze waarde zijn dus een onderschatting; de gemeten waarden zien er dus betrouwbaar uit. Wordt zo ook voor PS en ABS een schatting gemaakt, dan resulteert dit in de respectievelijke waarden van 4 en 5 %.

In de onderstaande tabel zijn de gemeten uitzettingen voor de drie materialen weergegeven.

	Beginlengte (mm)	Uitzetting (mm)	Uitzetting (%)
ABS	60	6	10
PE	59	10	16.9
PS	60	4	6.7

De beginlengte is bepaald bij 20 °C (kamertemperatuur) en de uitzetting is gemeten bij 200 °C. De gemeten uitzetting is bepaald door de verplaatsing van de bovenste plunjer te meten bij 200 °C (na 20 min. opwarmen). Het vullen van de restrictie kost 2 mm. materiaallengte bij de doorsnede van  $\varnothing 16$  mm. Deze 2 mm. is dus opgeteld bij de verplaatsing van de plunjer, waardoor de absolute uitzetting van het materiaal is verkregen. De waarden in de tabel zijn gemiddeld over alle experimenten (per materiaal natuurlijk).

Opwarmen heeft dus als effect, dat het materiaal zich door de restrictie heen perst. Dit is echter niet bezwaarlijk, omdat alles nog goed gedefinieerd is. Verplaatsingen zijn immers te

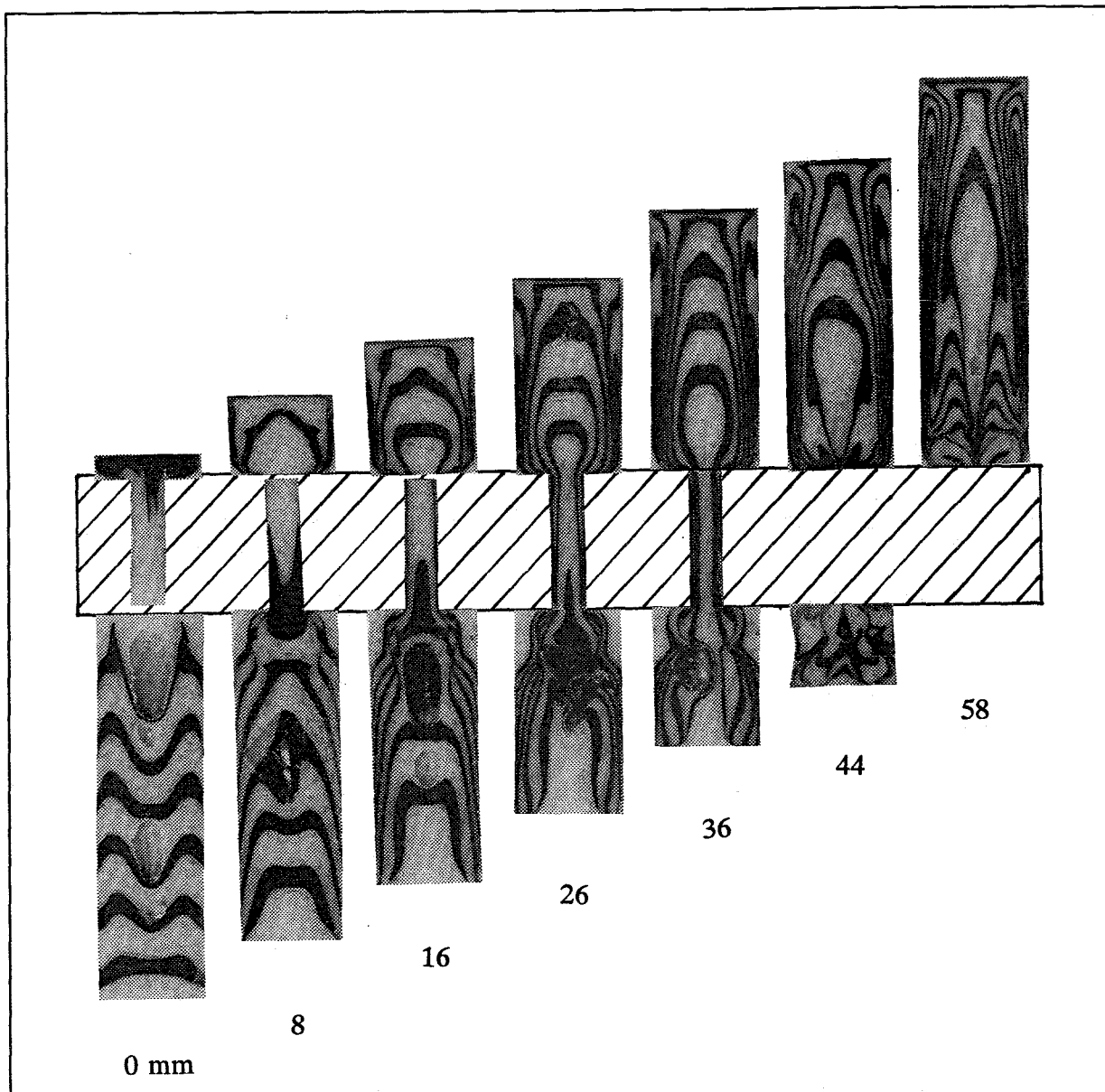


fig. 6.3.3 PE (ingekleurd)

Tabel 6.3.3. Serie 3: PE (ingekleurd)

Temperatuur	$T = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Druk	$p = 12.2 \text{ bar}$
Plunjersnelheid	$V_p = 5 \text{ mm/sec}$
Opwarmtijd	$t = 20 \text{ min.}$
Beginlengte	$L = 58 \text{ mm}$

Bekijken we de resultaten van de aangepaste methode dan kan geconcludeerd worden, dat het handhaven van een druk op de onderste plunjer gelijk aan de druk die wordt veroorzaakt door gravitatiekrachten op de bovenste plunjer, het gewenste resultaat oplevert. De proefstukken bevatten geen luchtinluitsels meer en ook de buitencontouren zijn vrij van ongecontroleerde krimpverschijnselen. Resultaten zijn nu goed gedefinieerd en kunnen dus worden gebruikt voor het verifiëren van rekenresultaten.

Een opmerkelijk verschil met de eerste resultaten (serie 1 t/m 3) is dat bij de nieuwe resultaten (serie 4 t/m 6) het cirkelvormig gebied rond de instroomopening van de restrictie is verdwenen.

Het cirkelvormig gebied is dus duidelijk geen effect dat veroorzaakt wordt door het constitutief gedrag van de materialen. Dit gebied wordt zuiver bepaald door het terugstromen van het materiaal bij het stollen. Bij de eerste manier van werken zet het materiaal uit t.o.v. de onderste plunjer, maar krimpt het ook weer t.o.v. de onderste plunjer. De terugstroming die dan bij het krimpen optreedt heeft dit cirkelvormig gebied als resultaat.

De aanname dat bij de tweede methode het materiaal krimpt t.o.v. het centrum van de restrictie is dus blijkbaar redelijk. Zou het materiaal niet krimpen t.o.v. de restrictie dan zou er nog materiaal stromen, wat een cirkelvormig gebied zou moeten opleveren en dit is niet terug te vinden in de resultaten.

Een ander verschil met de series 1 t/m 3 is dat nu in de beginconfiguratie de tracers niet meer vlak blijven, maar reeds parabool-achtige profielen vertonen, welke groter worden naarmate de uitzetting van het materiaal groter wordt. Bij PE, wat de grootste uitzetting heeft, zijn de deformaties dus het grootst, wat ook te zien is in de resultaten.

Deze vervormde profielen konden ook worden verwacht. Bij krimpen moet het extra volume, dat door uitzetting is ontstaan, gecompenseerd worden door verplaatsing van beide plunjers. De absolute verplaatsing van een plunjer is afhankelijk van de absolute afstand waarover het materiaal krimpt, dus van de hoeveelheid materiaal dat in de holte boven (of onder) de plunjer aanwezig is. Als alleen wordt opgewarmd en afgekoeld bevindt het meeste materiaal zich onder de restrictie; de uitzetting zal daarom bijna helemaal door verplaatsing van de onderste plunjer moeten worden gecompenseerd. Dit resulteert in de verkregen profielen na alleen opwarmen en afkoelen.

In figuur 6.3.4. is de serie experimenten voor polystyreen weergegeven. De proefstukken 1 en 2 geven mooi de verschillende resultaten weer voor resp. de aanvankelijke manier van werken en voor het systeem met isobare afkoeling. Bij proefstuk nr. 1 is helaas het gedeelte uit de restrictie verloren gegaan bij verwijderen uit de restrictie.

Figuur 6.3.4. geeft de resultaten met PE weer. Nadeel van het polyetheen is dat de stukjes uit de restrictie bijna niet onbeschadigd uit de opstelling konden worden verwijderd. Waren de stukjes nog te warm, dan zijn ze sterk gedeformeerd geworden; waren de stukjes op kamertemperatuur gebracht, dan kleefden zij zo enorm sterk in de restrictie dat zij met geweld moesten worden verwijderd.

Figuur 6.3.6. geeft de resultaten met ABS. Proefstuk nr. 1, 2 en 5 laten luchtinluitsels zien, terwijl toch alle experimenten gedaan zijn met zowel boven als onder een druk van 12.2 bar

op het proefstuk tijdens afkoelen. Om toch goede proefstukken te maken moest een steeds hoger druk op het proefstuk worden uitgeoefend.

Oorzaak van de problemen was slijtage aan de plunjers. Zodra de rand van de kop van een plunjer niet scherp meer is, maar enigszins afgerond, dan kon er polymere smelt tussen plunjer en cilinder dringen. Bij afkoelen stolt ook dit materiaal, waardoor de plunjer klem in de cilinder komt te zitten. De druk op de plunjer van 12.2 bar is te laag om deze wrijving te overwinnen, zodat de plunjer 'blijft hangen' en het proefstuk krimpholten vormt.

Proefstuk nr. 7 laat ook een aantal verstoringen op de profielen zien. Mogelijke verklaring hiervoor is het geven van tikjes met een hamer op de bovenste plunjer. De plunjer vertoonde de neiging om te blijven hangen. Door een tikje met de hamer op het gewicht op de plunjer te geven is getracht om dit te voorkomen. Mogelijk is hierdoor de zaagtand-achtige verstoring ontstaan.



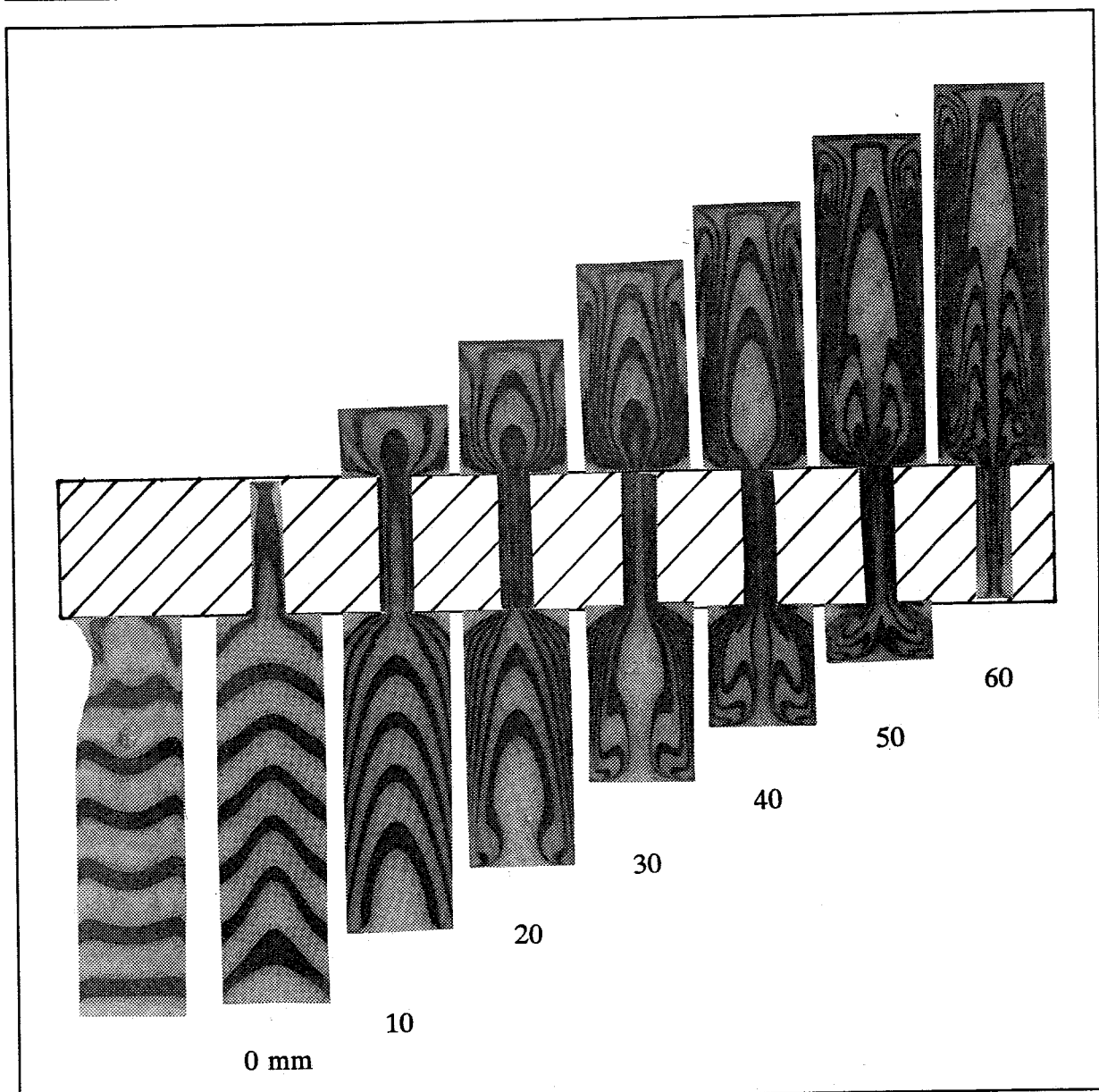


fig. 6.3.4. Serie 4: PS

Tabel 6.3.4. Serie 4: PS

Temperatuur	$T = 200 \text{ } ^\circ\text{C}$
Druk	$p = 12.2 \text{ bar}$
Plunjersnelheid	$V_p = 5 \text{ mm/sec}$
Opwarmtijd	$t = 20 \text{ min.}$
Beginlengte	$L = 60 \text{ mm.}$

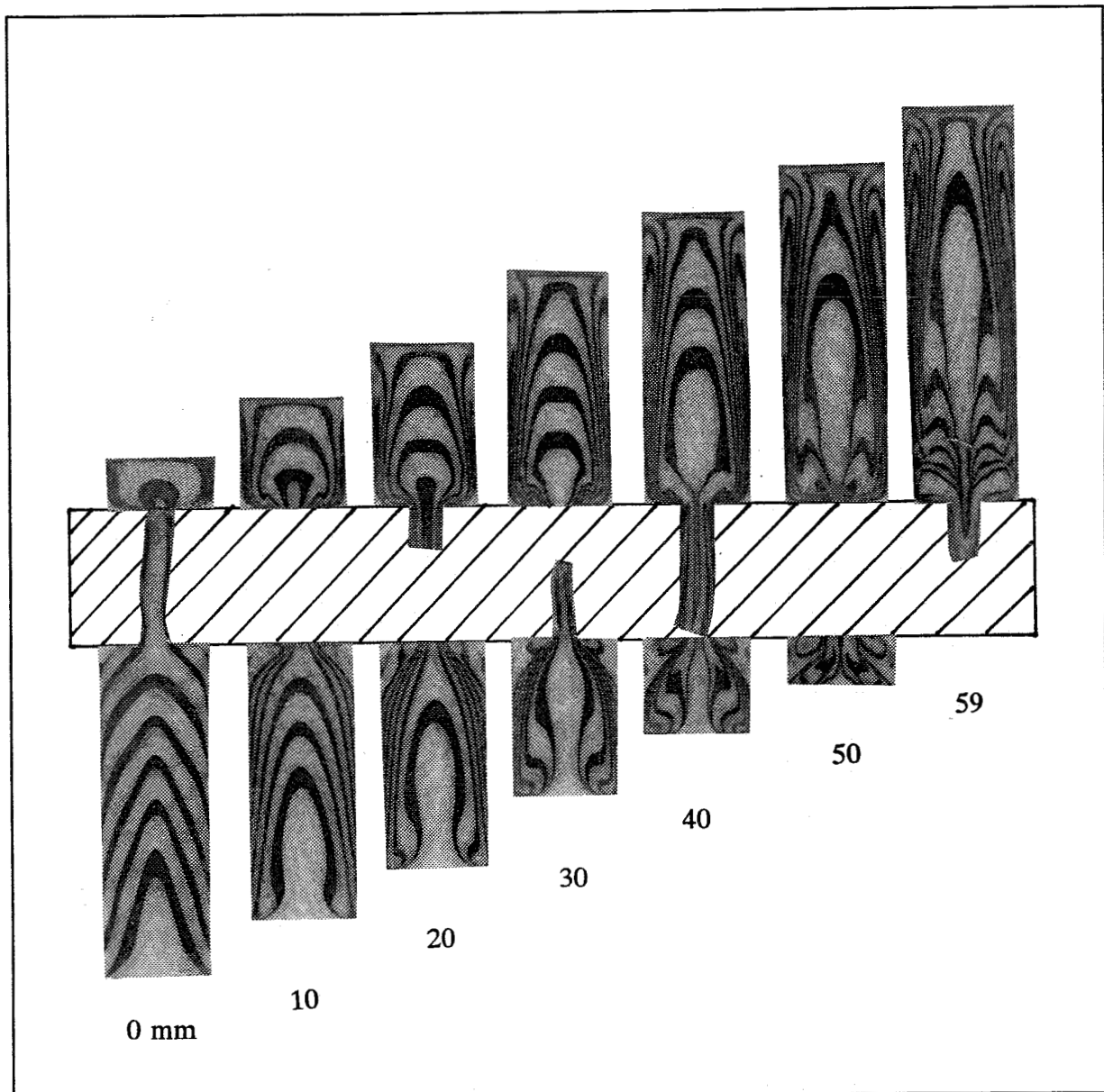


fig. 6.3.5. Serie 5: PE

Tabel 6.3.5. Serie 5: PE

Temperatuur	T = 200 °C
Druk	P = 12.2 bar
Plunjersnelheid	Vp = 5 mm/sec
Opwarmtijd	t = 20 min.
Beginlengte	L = 59 mm.

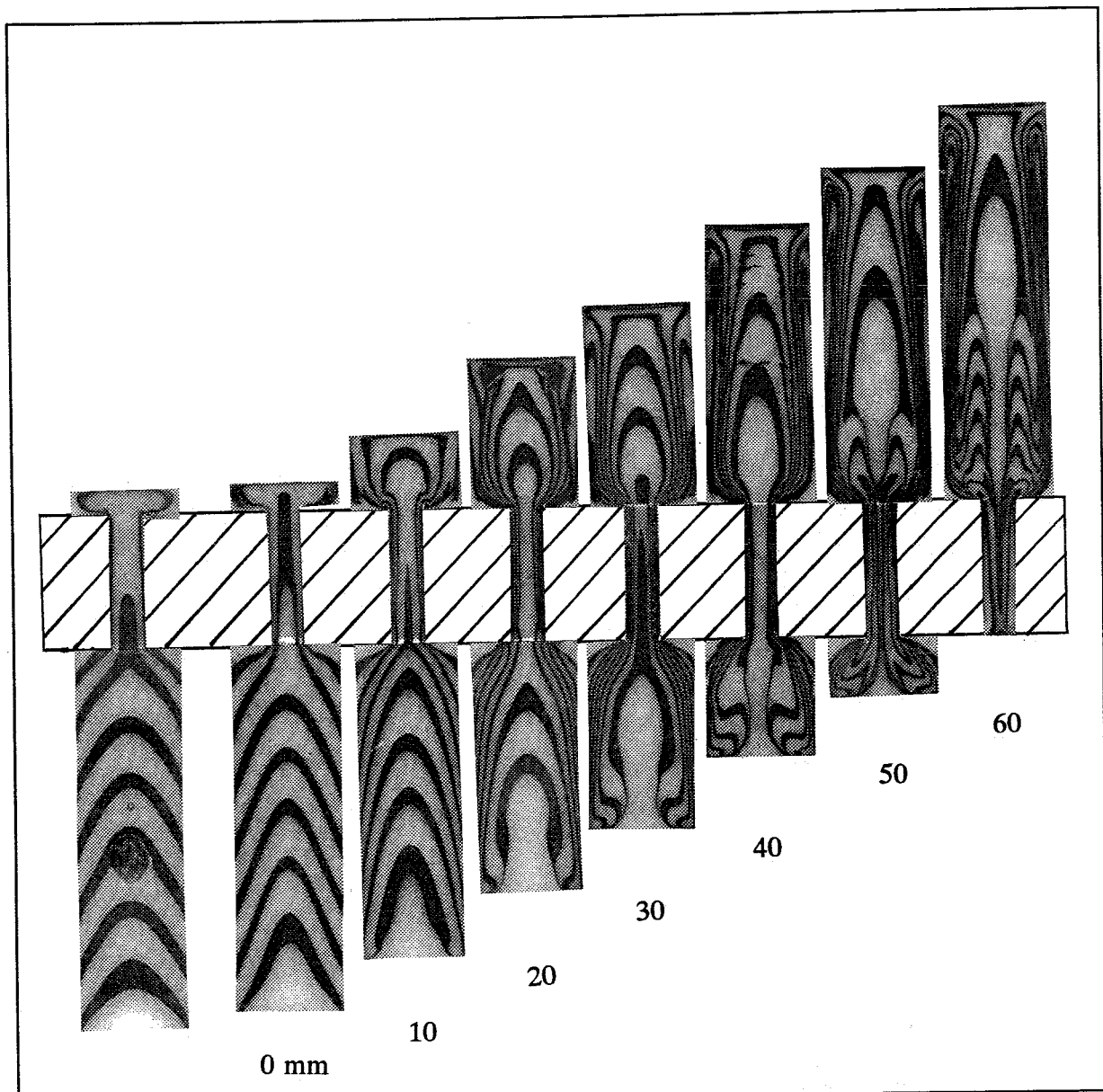


fig. 6.3.6. Serie 6: ABS

Tabel 6.3.6. Serie 6: ABS

Temperatuur	$T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$
Druk	$p = 12.2 \text{ bar}$
Plunjersnelheid	$V_p = 5 \text{ mm/sec}$
Opwarmtijd	$t = 20 \text{ min.}$
Beginlengte	$L = 60 \text{ mm.}$

#### 6.4. Experimenten met combinaties van materialen

Bij voorgaande experimenten bestonden alle proefstukken uit één materiaal. Echter, bij meerlaagsspuitgieten zullen zeker meerdere materiaalsoorten in één produkt worden gebruikt. Ook de stroming van meerdere materiaalsoorten willen we daarom kunnen voorspellen m.b.v. computer-modellen. Daarom zijn ook experimenten uitgevoerd met verschillende materiaalcombinaties.

De proeven zijn op analoge wijze uitgevoerd, als de proeven met één materiaalsoort (serie 4 t/m 6). De series zijn echter nu opgebouwd uit 4 experimenten i.p.v. 7. Reden hiervoor was materiaalbesparing. De fiches waren bijna op, maar d.m.v. materiaalbesparing konden toch de experimenten met materiaalcombinaties worden uitgevoerd. Een ander verschil is dat er bij deze proeven weer gebruikt gemaakt is van transparant PE. De reden hiervoor is ook weer materiaalbesparing. Het gele PE was op, daarom is toch gebruik gemaakt van het transparant PE.

De resultaten van de experimenten zijn weergegeven in figuur 6.4.1. t/m 6.4.3. Bij elk experiment is de materiaal-verdeling half om half; van iedere component evenveel fiches. De beginconfiguraties waren voor elke serie variërend. Daarom zijn deze weergegeven naast de resultaten. Tevens is de beginlengte vermeld. De overige procesparameters staan in tabel 6.4.1. vermeld en gelden voor ieder experiment.

Tabel 6.4.1. Procesparameters bij experimenten met materiaalcombinaties.

Temperatuur	T = 200 °C
Druk	p = 12.2 bar
Plunjersnelheid	V <sub>p</sub> = 5 mm/sec
Opwarmtijd	t = 20 min.

Verplaatsingen die zijn opgelegd na het opwarmen zijn bij de proefstukken vermeld.

Ook bij de experimenten met materiaalcombinaties zijn de uitzettingen gemeten. Ook dit proces verliep geheel analoog aan dat bij serie 4 t/m 6. De resultaten staan in tabel 6.4.2.

Tabel 6.4.2. Uitzettingen bij materiaalcombinaties.

Materialen	Beginlengte mm	Uitzetting mm	Uitzetting %
ABS/PS	58	4.5	7.8
PS/PE	57	7	12.3
ABS/PE	57	7.5	13.2

De resultaten van de materiaalcombinaties geven dusdanig de verschillen in viscositeit tussen de materialen weer. Afhankelijk van welk materiaal er bovenin wordt gepositioneerd ontstaan er hele verschillende profielen.

Opgemerkt kan nog worden, dat op het grensvlak PE/PS geen transparant PE kon worden gebruikt, omdat de gele kleurstof van PS in het PE diffundeerde. Hierdoor werd het grensvlak een wazig geheel.

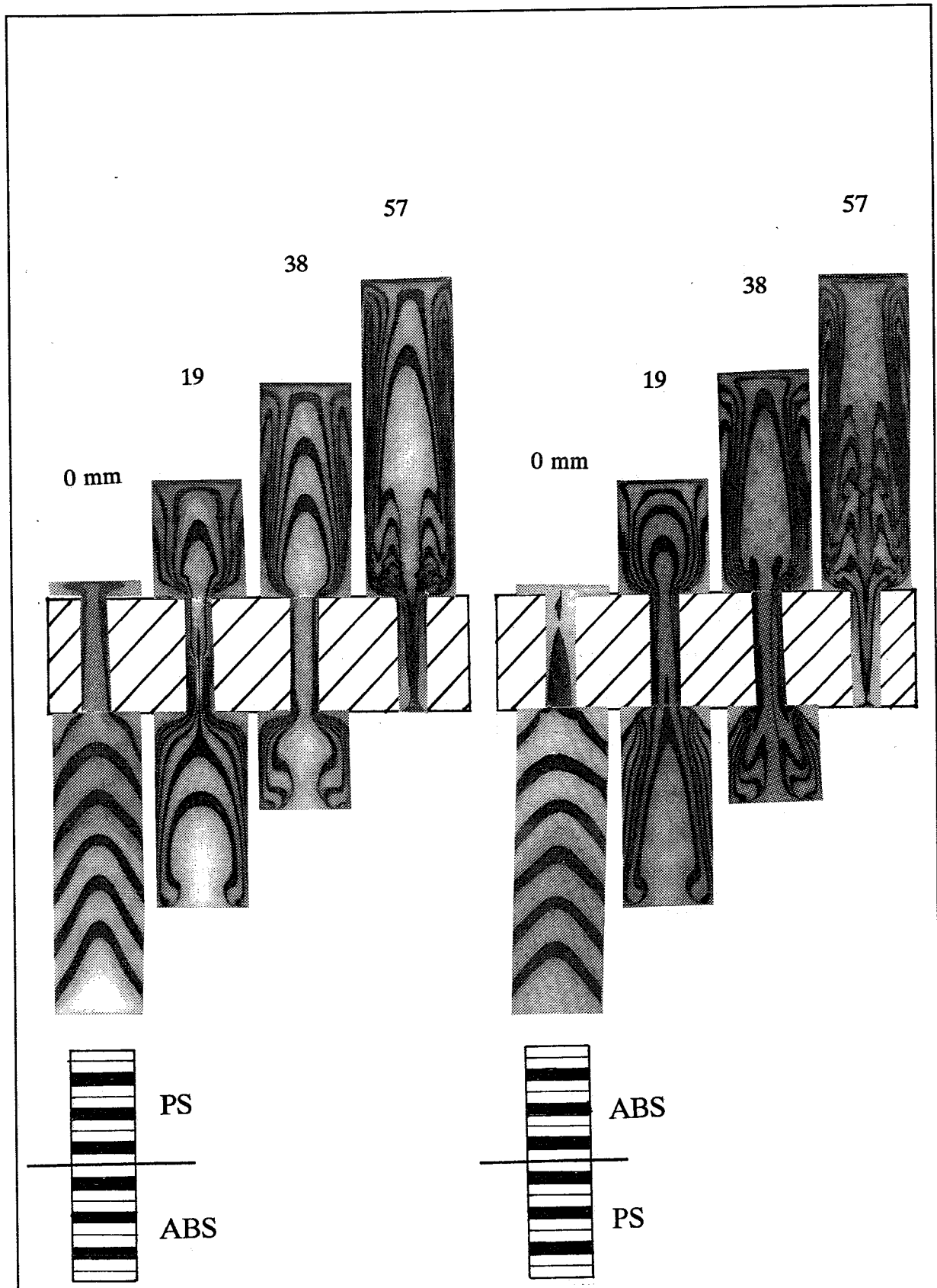


fig. 6.4.1. Experimenten met ABS/PS-combinaties

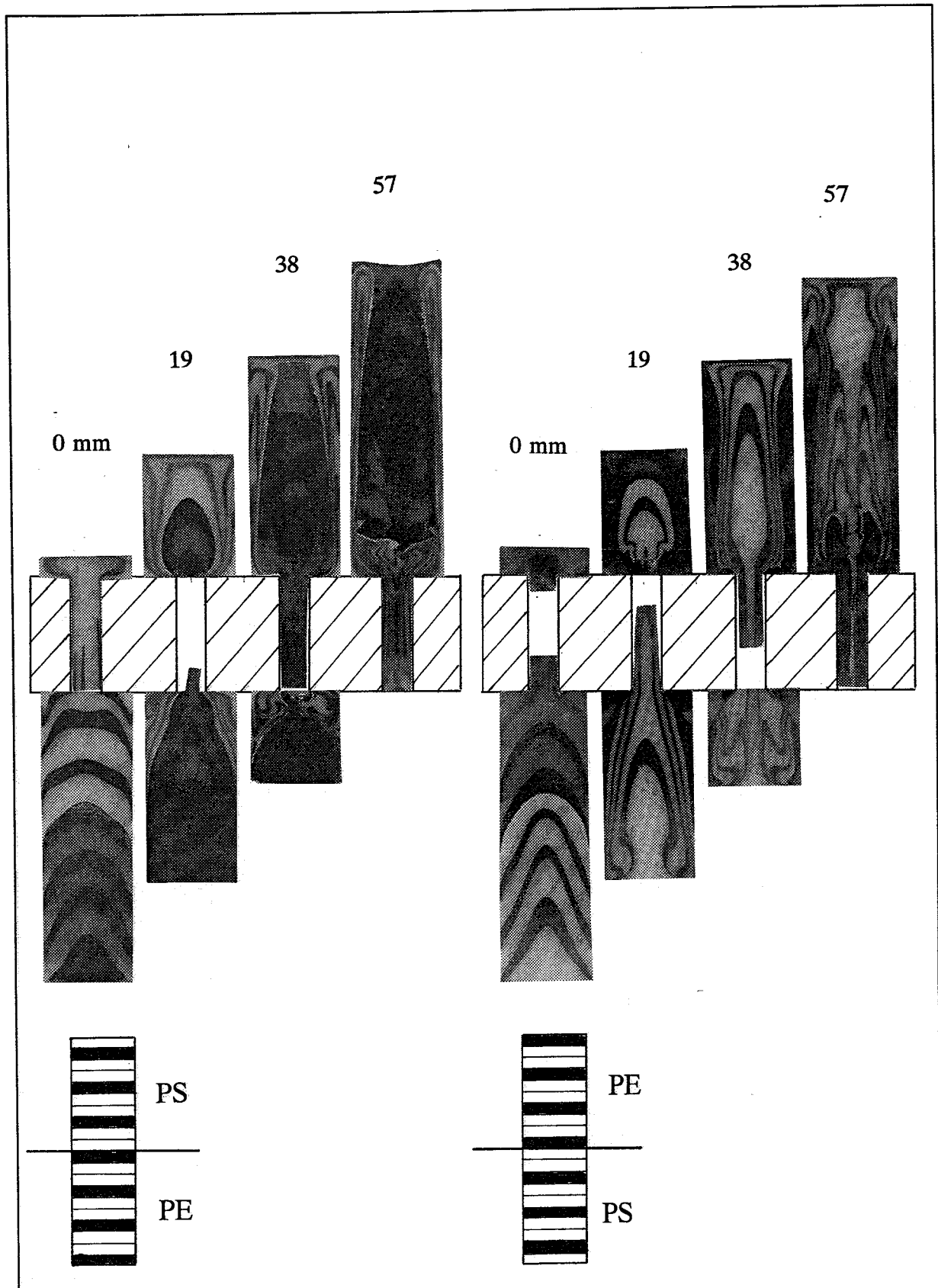


fig. 6.4.2. Experimenten met PS/PE-combinaties

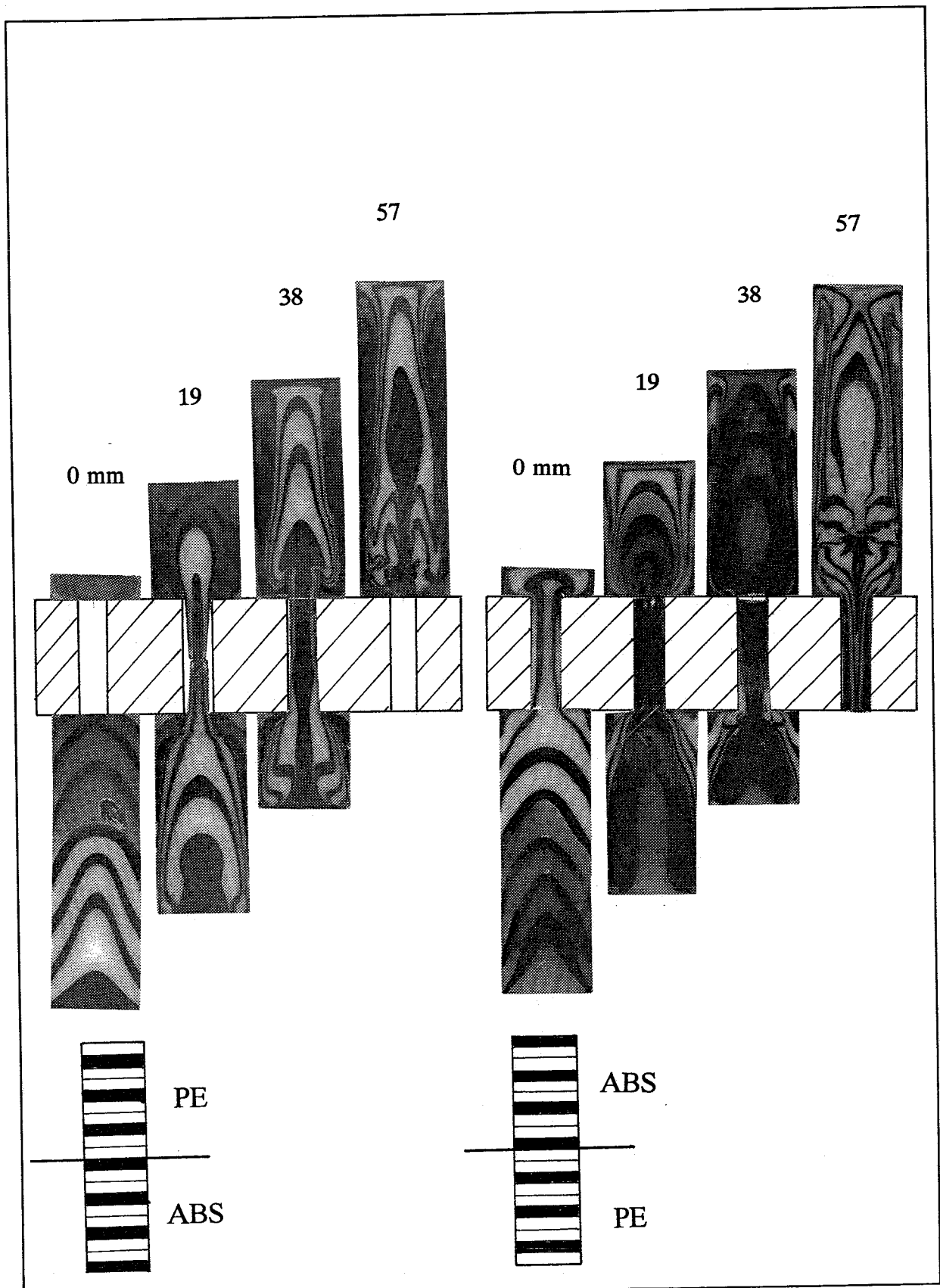


fig. 6.4.3. Experimenten met ABS/PE-combinaties



### 6.5. Variërende restricties

Bij de experimenten die in deze stage zijn gedaan is er voornamelijk gebruik gemaakt van een rechte restrictie met een doorsnede van  $\varnothing 5$  mm. Er zijn ook enkele experimenten met restricties met variërende lengte en een schuin verloop uitgevoerd.

Vanwege het oriënterende karakter van deze experimenten zijn de resultaten dan ook zuiver illustratief en hebben geen enkele waarde als middel ter verificatie van berekeningen. De resultaten zijn te zien in figuur 6.5.1. De proeven zijn uitgevoerd met ABS.

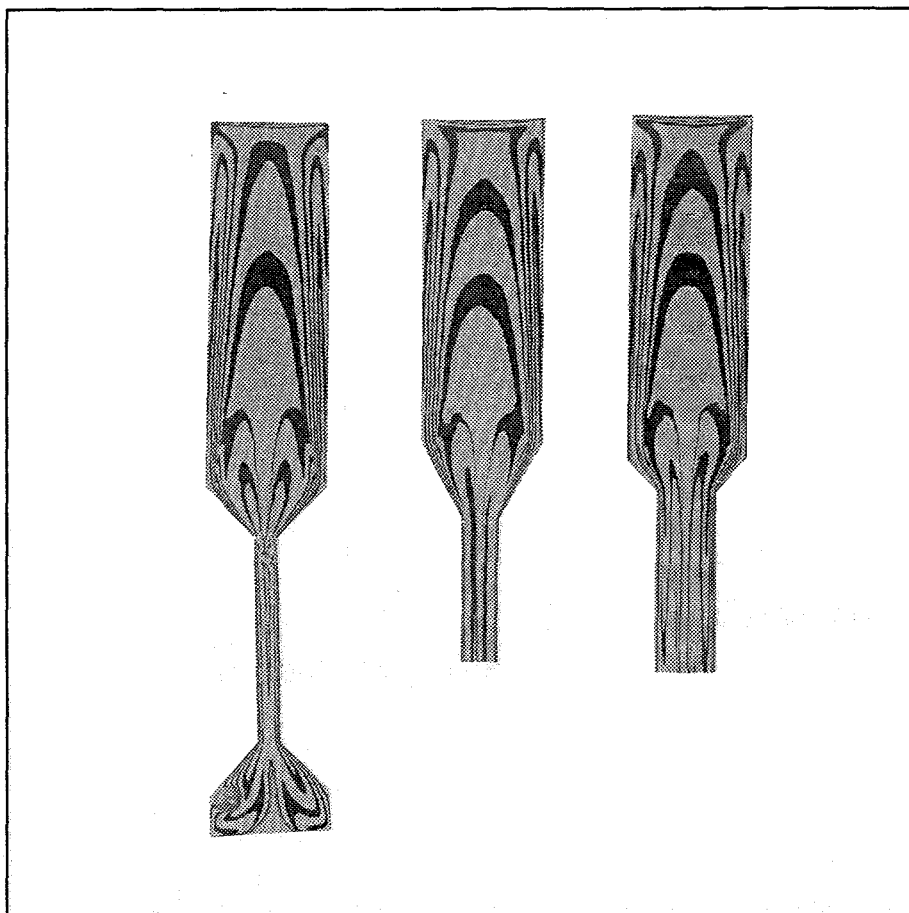


fig. 6.5.1. Experimenten met variërende restricties.

### 6.6. Experimenten met de matrijsopstelling.

De opzet van deze experimenten was het opbouwen van de opstelling en een geschikte werkwijze vinden om goed-gedefinieerde experimenten te doen. Als het eenmaal mogelijk is om goed gedefinieerde experimenten te doen, dan kunnen de resultaten hiervan vergeleken worden met de resultaten van het spuitgietsimulatie-pakket VIP.

Om de matrijs precies te vullen met materiaal is een stapel fiches nodig ( $\varnothing$  16 mm.) van 84.5 mm. Deze hoogte is eenvoudig te berekenen door het volume in de matrijs te delen door het doorsnede-oppervlak van de cilinder. Bij de experimenten is echter meer materiaal in de cilinder gedaan om voor verliezen door lek en vullen van de restrictie te compenseren.

De experimenten zijn isotherm uitgevoerd, op  $T = 200$  °C; zowel matrijs als cilinder waren op deze temperatuur gebracht. Om de matrijs op een temperatuur te brengen van 200 °C. was een tijd van 40 minuten benodigd; voor de cilinder met materiaal was een tijd van 20 minuten nodig. De verwarming van de matrijs werd dan ook eerst aangezet; was een temperatuur bereikt van zo'n 130 °C. dan werd de verwarming van de cilinder aangezet.

Nadeel van het isotherm uitvoeren van de experimenten was niet alleen de lange opwarmtijd, maar ook dat de polymere smelt door de luchtspleten van de matrijs heen wordt geperst. Om dit te voorkomen is een maatstreep op de plunjer geplaatst, tot waar moest worden doorgeperst om een volle matrijs te krijgen. Tevens zijn de bouten van de matrijs zeer sterk aangedraaid, om de luchtspleten zo klein mogelijk te houden.

Voordat het produkt geheel gestold was, is nog iets nagedrukt. Dit om de vorming van luchtinsluitels te voorkomen.

Er zijn enige proefexperimenten met ABS uitgevoerd, waarna de eigenlijke experimenten met PS zijn gedaan. Onderstaande tabel (tabel 6.6.1.) geeft de belangrijkste parameters van de experimenten weer. Deze zijn voor alle experimenten gelijk. De beginconfiguraties met afmetingen staan bij de resultaten vermeld.

Het reproduceren van de resultaten voor de verwerking in dit verslag was een groot probleem. Vanwege de geringe dikte van de proefstukken konden deze niet duidelijk zichtbaar worden gekopieerd. Daarom is toevlucht genomen tot het natekenen van de resultaten. De nagetekende resultaten zijn te zien in figuur 6.6.1. t/m 6.6.4. Het spreekt voor zich dat deze figuren niet exact zijn; ze geven alleen een indruk van de profielen die zijn ontstaan uit de verschillende beginconfiguraties.

Tabel 6.6.1. Parameters bij de matrijsopstelling.

Temperatuur	$T = 200$ °C.
Materiaal	PS
Plunjersnelheid	$V_p = 20$ mm/sec.

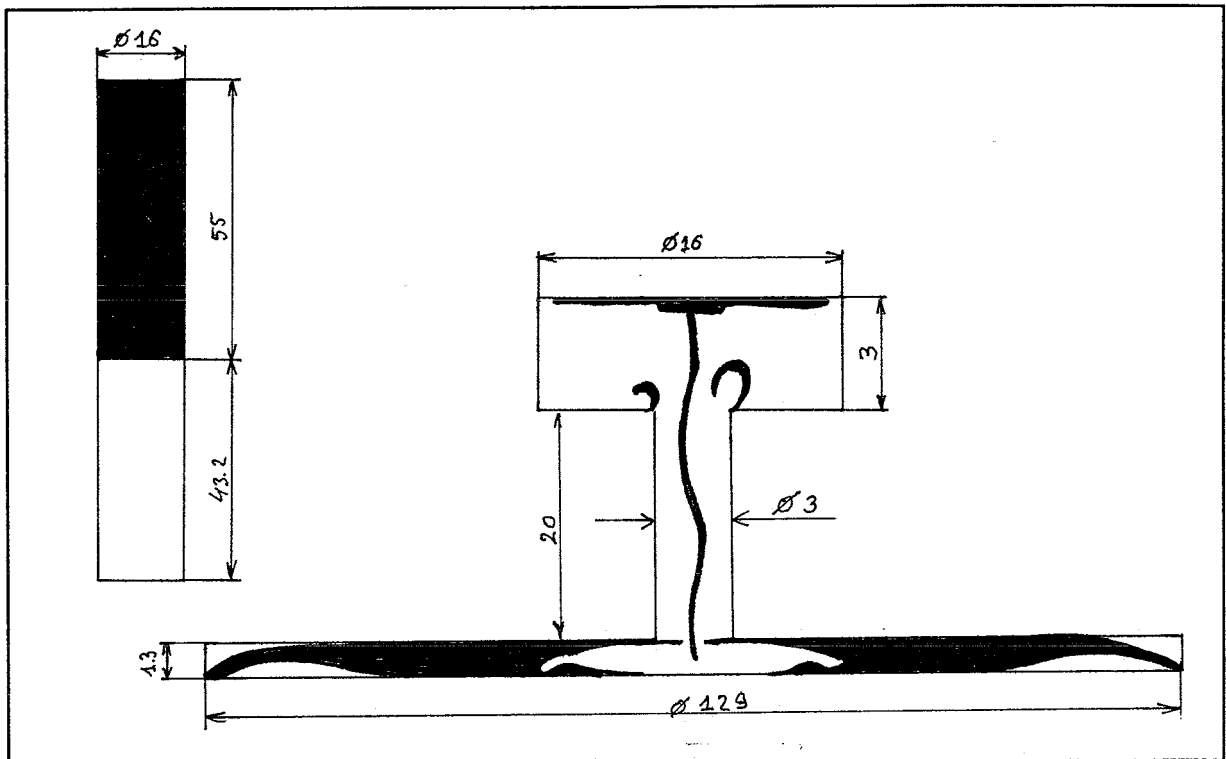


fig. 6.6.1. Experiment 1.

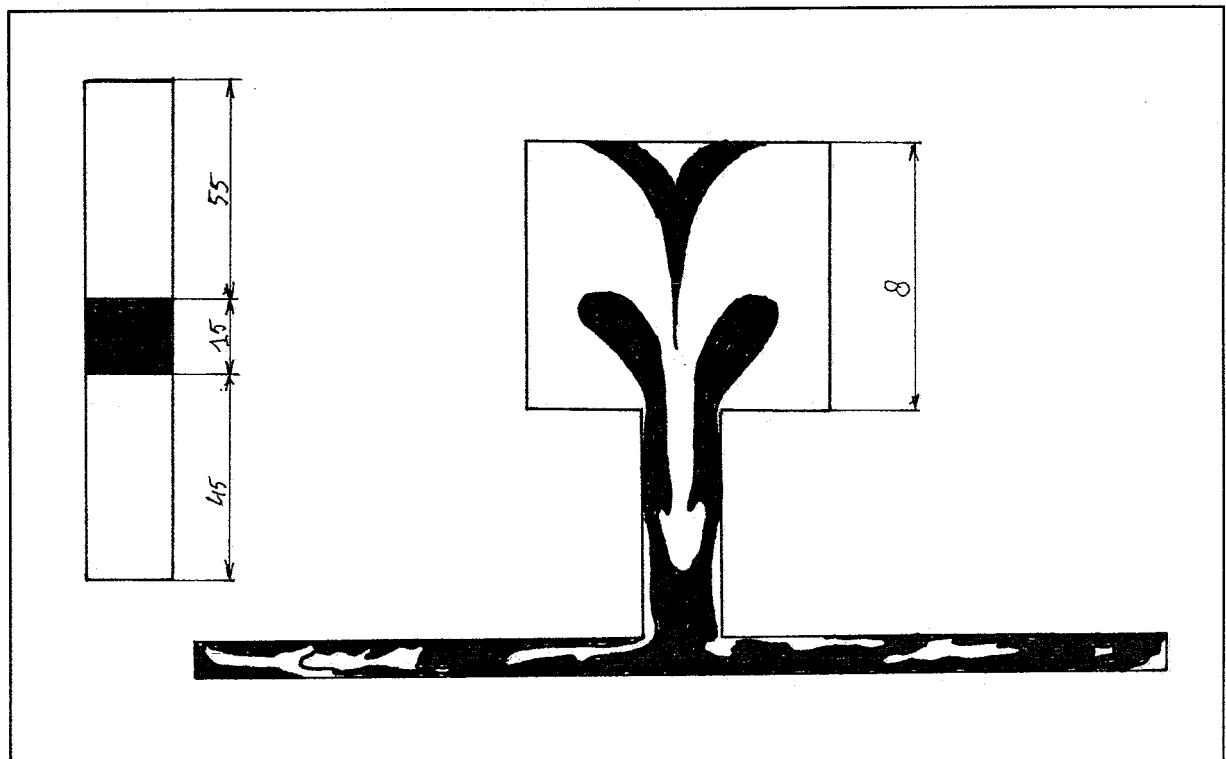


fig. 6.6.2. Experiment 2.

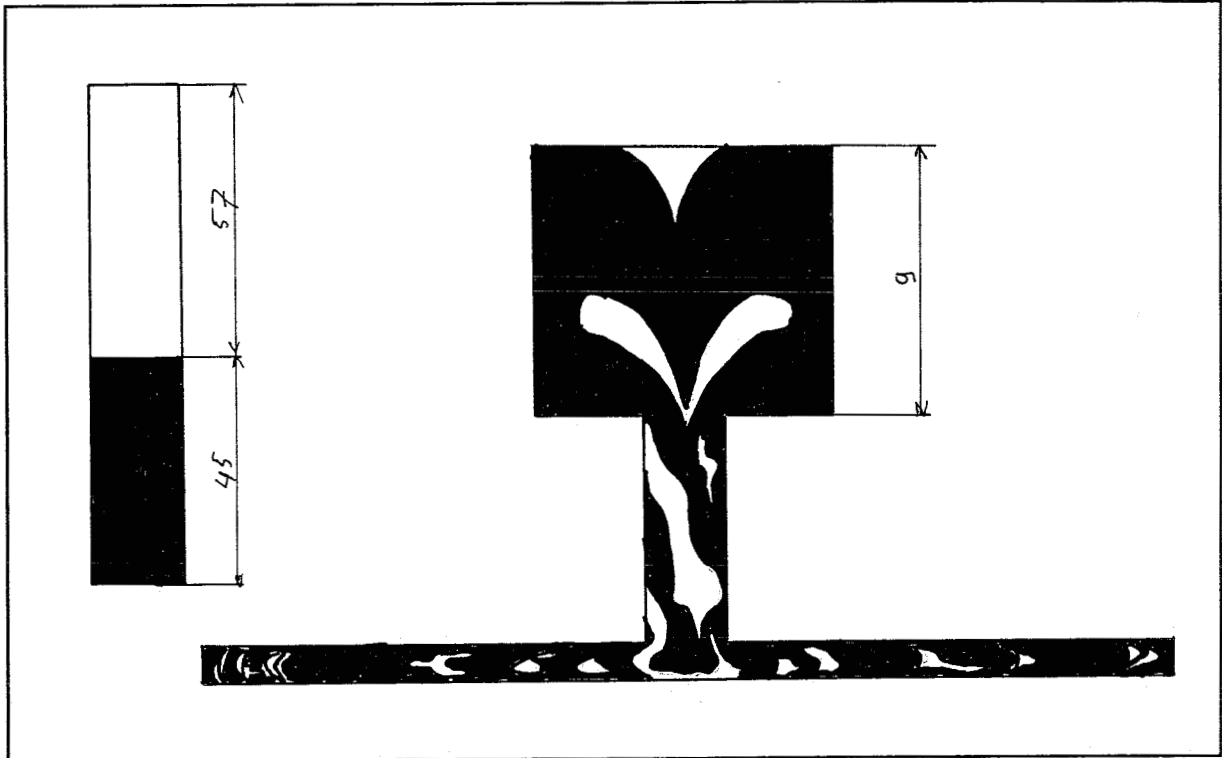


fig. 6.6.3. Experiment 3.

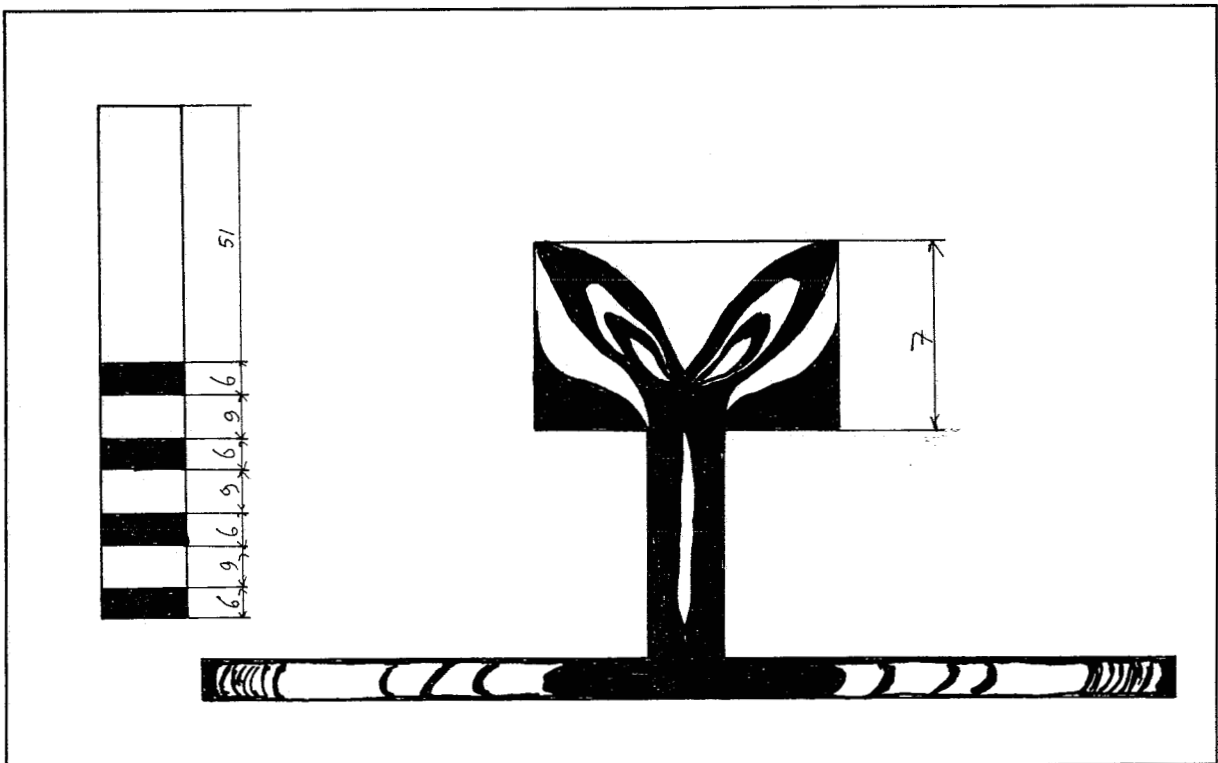


fig. 6.6.4. Experiment 4.

Worden de resultaten van de matrijsopstelling bekeken, dan valt het op dat er geen rechte lagen zijn ontstaan in het produkt. Dit komt doordat de resulterende profielen het resultaat zijn van de configuratie in de cilinder. Tijdens het doorpersen ontstaan ook hier profielen waardoor er afwisselend licht/donker de matrijs in wordt geperst.

Tijdens het opwarmen loopt er reeds polymere smelt de matrijs in. Dit komt enerzijds door de uitzetting van het materiaal en anderzijds door de druk die door de plunjer op de smelt wordt uitgeoefend.

In werkelijkheid gebeurt spuitgieten niet isotherm, maar is de matrijs veel kouder (zo'n 70 °C., afhankelijk van het materiaal en de matrijsgeometrie). Om dit te simuleren is ook een experiment gedaan, waarbij de matrijs 60 °C. was. De polymere smelt was opgewarmd tot 230 °C.

Deze proef is echter mislukt. Oorzaak hiervan was dat het materiaal reeds bij opwarmen in de matrijs was gelopen. Daar de matrijs 60 °C. was, stolde het materiaal, waardoor het aanspuitkanaal dicht kwam te zitten. Verder doordrukken was niet mogelijk. De cilinder is bij het doordrukken dan ook geëxplodeerd, omdat de opgebouwde druk te hoog was geworden.

## 7. Conclusies en aanbevelingen

Uit experimenten kunnen conclusies worden getrokken. De belangrijkste punten die volgen uit de hier gedane experimenten zullen kort worden aangestipt. Tevens zullen enkele aanwijzingen worden gegeven voor het doen van eventuele verdere experimenten.

- Belangrijkste conclusie uit deze experimenten is dat het doen van proeven met het systeem, waarbij de plunjers de krimp van het materiaal kunnen volgen, goed gedefinieerde resultaten oplevert, wat uiteindelijk de bedoeling was.

Om de ongecontroleerde krimpverschijnselen tegen te gaan kunnen logischerwijze twee dingen worden gedaan. Dit zijn: a) zet krimp buitenspel door isochoor te werk te gaan en b) volg de krimp op een gecontroleerde manier. De eerste mogelijkheid is fysisch onmogelijk; uit pvT-diagrammen kan afgelezen worden dat er dan drukken ontstaan in de orde van grootte van 1000 bar. Daarom is gekozen voor de tweede oplossing, hetgeen goede resultaten opleverde.

- Ten aanzien van het transparant PE kan worden geconcludeerd, dat dit ongeschikt is voor visualisatie-doelinden. Het materiaal is te doorschijnend in combinatie met andere kleuren, zeker wanneer hele fijne verdelingen dienen te worden gevisualiseerd. Inkleuren van PE biedt uitkomst.

- De opstelling met de plunjers is erg gevoelig voor slijtage en voor tussendringend of achterblijvend vuil. Plunjers dienen daarom regelmatig te worden geslepen of te worden vervangen. Tevens dient de opstelling tussen de experimenten door goed te worden gereinigd. Wanneer er teveel smelt tussen de plunjers en de cilinder kan dringen blijven de plunjers klemmen bij stollen, waardoor (tijdrovende) experimenten mislukken.

- Voor het doen van verdere experimenten (vooral met de schuine restricties) kan het een goede uitkomst zijn, om de restricties deelbaar te maken. Hierdoor kunnen de gehele proefstukken bewaard blijven. Bovendien kan dan het PE gemakkelijker worden verwijderd uit de restrictie. Vanwege het enorm kleven van PE zijn veel proefstukken gesneuveld. In verband hiermee kan misschien het gebruik van lossingsmiddelen, die de stroming niet beïnvloeden, worden bekeken.

- Het zal eveneens handig zijn om de proefstukken te laten stollen bij een iets hogere druk. Kans op mislukken van experimenten zal dan kleiner zijn. De opstelling zal dan wel iets moeten worden gewijzigd, daar er geen al te grote krachten op het geheel kunnen worden uitgeoefend. Een betere regeling voor de in te stellen druk zal ook betere resultaten opleveren en heel wat minder handen-en-voeten werk.

- Om met de matrijsopstelling goed gedefinieerde proefstukken te maken zou een oplossing om de stroming van materiaal in de matrijs bij opwarmen tegen te gaan verstandig zijn. Misschien biedt het gebruik van een kleinere matrijs ook uitkomst. Het geheel vergt behoorlijke krachtsinspanning van de opstelling. Kans op falen van onderdelen is daardoor ook groot.

- Ook bij proeven met de matrijsopstelling is het interessant om de opbouw van de deformatieprofielen in verschillende stappen te laten zien. Probleem is dan dat in de matrijs altijd een vrij vloeifront zal zijn, waardoor stollen van materiaal niet gecontroleerd zal gebeuren. Mogelijke oplossing is het gebruik van een koude matrijs waarin snel wordt geïnjecteerd. Men komt dan ook dicht in de buurt van spuitgiet-simulatie.

## Literatuur

- [1] E. Vos, H.E.H. Meijer and G.W.M. Peters, Multilayer injection molding, *Int. Pol. Proc.*, p. 42-50 (1991).