

## Meerlagen spuitgieten, een voorstudie : de stroming tussen twee plunjers

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

Meijer, H. E. H. (1990). Meerlagen spuitgieten, een voorstudie : de stroming tussen twee plunjers. *Materialen*, (9), 32-38.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/1990

**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.

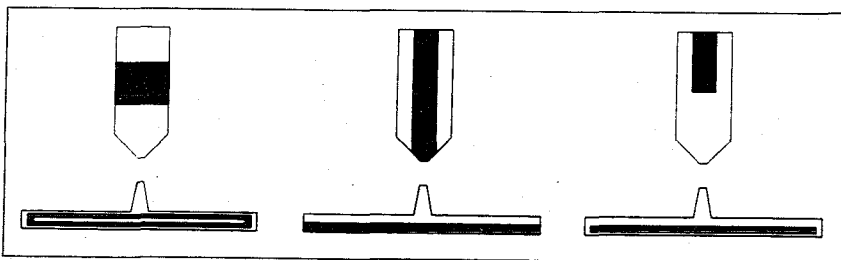
# Meerlagen spuitgieten, een voorstudie: de stroming tussen twee plunjers

Prof.dr.ir. H.E.H. Meijer, TU Eindhoven

Tekst van de voordracht gehouden op de bijeenkomst van de Sectie Reologie/NRV op 21 juni 1990 te Rhenen met als thema: "Reometrie; gangbare en bijzondere methoden".

Als onderdeel van de ontwikkeling van een meerlaagsspuitgiettechnologie, die ook in complexe producten centrische of excentrische dunne lagen gecontroleerd moet kunnen realiseren, is de stroming van een polymeersmelt in een cilinder tussen twee plunjers experimenteel en numeriek onderzocht. Schijfjes van, voorlopig, hetzelfde materiaal werden tussen de plunjers geplaatst, opgesmolten, gedeformeerd door de plunjers over verschillende afstanden en later ook bij verschillende temperaturen en snelheden te verplaatsen, vervolgens weer afgekoeld en doormidden gezaagd. De aldus gevisualiseerde deformatiegeschiedenissen werden ook numeriek berekend, gebruikmakend van een standaard eindige elementen programma. Uit een vergelijking van de berekende en gemeten deformatie blijkt dat kleine verschillen in reologisch gedrag, grote invloed hebben op het geïntegreerde snelheidsveld en dat aan de discontinuïteit tussen plunjer en cilinderwand relatief veel aandacht moet worden besteed.

Door middel van de meerlaagsspuitgiettechnologie kunnen gelaagde structuren van twee of meer materialen in een matrix worden gerealiseerd. Afhankelijk van de positie van de aanspuiting (meestal centraal), de geometrie van de aanspuitneus (meestal concentrisch) en de methode van injecteren (A,B; A,B,A; A,A/B,A; A,B/A,A; A,B/A/B,A enz.) kunnen dikke of dunne en centrische of excentrische lagen binnen een produkt worden aangebracht, zie figuur 1 voor een zeer schematische weergave.

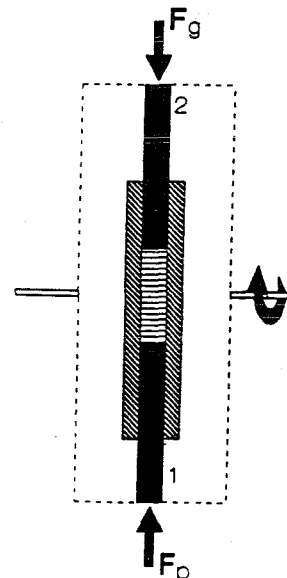


Figuur 1: Twee componenten spuitgieten (schematisch) met sequentiële, simultane en gecombineerde injectie.

Deze technologie verschilt van de meerkleuren-technologie (bijvoorbeeld gebruikt voor achterlichten van auto's en toetsen van een typemachine), waarin het eerste gedeelte van een produkt in een grotere matrix wordt geplaatst waarna het tweede materiaal er tegenop of omheen wordt gespoten. Nieuw is de meerlaagsspuitgiettechniek niet, immers al in 1967 werd hij geïntroduceerd door ICI en beloofde een doorbraak bij de fabricage van stijve grote en lichte vormdelen. In de praktijk bleef de toepassing echter beperkt tot sandwichconstructies in relatief dikwandige produkten, waarin via een sequentiële injectie (A,B of A,B,A) drie lagen in het produkt worden aangebracht. Het materiaal van de binnenlaag B bestaat typisch uit het A materiaal van de buitenlagen, voorzien van een chemisch of ook fysisch schuimmiddel. Sandwichprodukten met harde, vlakke en gladde buitenlagen en geschuimde kern leken veelbelovend in de automotive markt en die voor (computer)behuizingen, tuinmeubels, wastafels enz., voornamelijk doordat grote vormdelen kunnen worden gespoten op machines met een geringe sluitkracht, omdat de krimp van het materiaal eerder wordt gecompenseerd door het opschuimen van de kern dan door het navullen onder grote nadruk. De natuurlijke begrenzingen van het proces, zoals de minimum dichtheid van het schuim van ca.  $300 \text{ kg.m}^{-3}$  en de verhouding A:B van ongeveer 50:50, gecombineerd met een vrij slechte laagdikte-

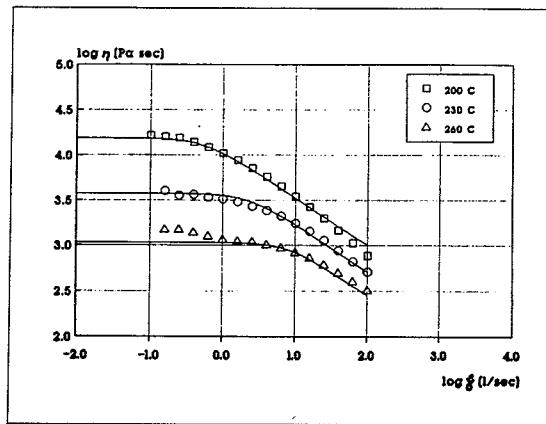
verdeling van aanspuiting tot rand, beperkten de toepassingen tot produkten die om andere dan mechanische redenen (bijvoorbeeld esthetische) dikwandig moesten zijn. Lichte stijve constructies konden economischer met behulp van verribbing worden gefabriceerd. Recent onderzoek toonde echter aan dat de techniek ook in dunwandige produkten toepasbaar is. Met een aangepaste injectievolgorde, bijvoorbeeld A,A/B,A of A,B/A,A, kunnen zeer dunne excentrische lagen met een relatief uniforme dikte binnen in een produkt worden aangebracht. Dit opent mogelijkheden voor andere toepassingen dan sterkte per gewicht of het wegstoppen van herverwerkt materiaal, zoals: elektromagnetische afscherming (EMI shielding), waarin een dunne laag van een geleidend polymeer wordt aangebracht (kooi van Faraday), of barrièreprodukten, waarin een dunne (polaire) laag met hoge weerstand tegen gastransport wordt gecombineerd met en beschermd door vochtafstotende (apolaire) buitenlagen. Voor succesvolle ontwikkelingen in dit soort toepassingen dienen echter een aantal beperkingen van de huidige technologie te worden weggenomen.

Allereerst de beperking tot slechts twee materialen. In analogie met wel doorgezette ontwikkelingen van de meerlaagstechnologie in buis-, profiel-, fles- en vooral filmtoeepassingen, dient deze restrictie te worden opgeheven om als derde component tussen polaire en apolair materialen een lijmlaag aan te kunnen brengen (typisch een met polaire groepen gemodificeerd apolair materiaal). De ontwikkelingsmachine die aanwezig is in het laboratorium van CPC Eindhoven (Centrum voor Polymeren en Composieten) is een 3C, dus drie componenten, machine met drie injectie-eenheden (A,B,C) die materiaalstromen in willekeurige, concentrische combinaties, sequentieel en simultaan kan injecteren. Vervolgens is de huidige beperking tot eenvoudige geometrieën in strijd met de principiële vrijheid van vormgeving van het spuitgietproces. Door toepassing van computermodellen kan deze hindernis worden genomen. Geavanceerde modellen kunnen de deformatiegeschiedenis van elk vloeistofelementje voorspellen, in de niet-isotherme, niet-stationaire stroming van niet-newtonse materialen

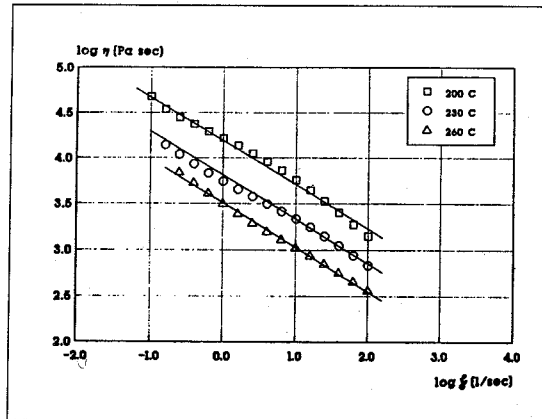


Figuur 2: Experimentele opstelling.

PS



ABS



Figuur 3: Vloeicurves voor PS en ABS, gemeten punten (symbolen) en modelbeschrijvingen (getrokken lijnen).

in complexe geometrieën, en zijn binnen grenzen inverteerbaar, zodat ook van elk deeltje in het product kan worden aangegeven wanneer en waar het is geïnjecteerd. Het doel van de modelmatige ontwikkeling is dan ook zelfs in complexe geometrieën te voorspellen wat, waar en hoe moet worden geïnjecteerd om bijvoorbeeld een gelijkmatige dunne excentrische laag binnen in een product te realiseren. Afgezien van deze praktische doelstellingen, levert de meerlaagsspuitgiettechniek een directe controle op de kwaliteit van de computermodellen, omdat de deformatiegeschiedenis direct zichtbaar wordt gemaakt. Bovendien kan de, bijvoorbeeld met een generaliseerd newtons vloeimodel berekende deformatiegeschiedenis worden gebruikt om, via een ontkoppelde methode, in een subroutine de deels relaxerende, deels ingevroren oriëntatie tengevolge van de injectie te berekenen door hem te substitueren in een visko-elastische constitutieve vergelijking. Eerste resultaten in een eenvoudige geometrie laten zien dat dit met een betrouwbaarheid van beter dan tien procent lukt, ten faveure van een enorme winst in rekentijd [1]. De ontwikkeling van bruikbare simulatieprogramma's voor het gehele spuitgietproces is daarmee mogelijk een stap dichterbij gekomen.

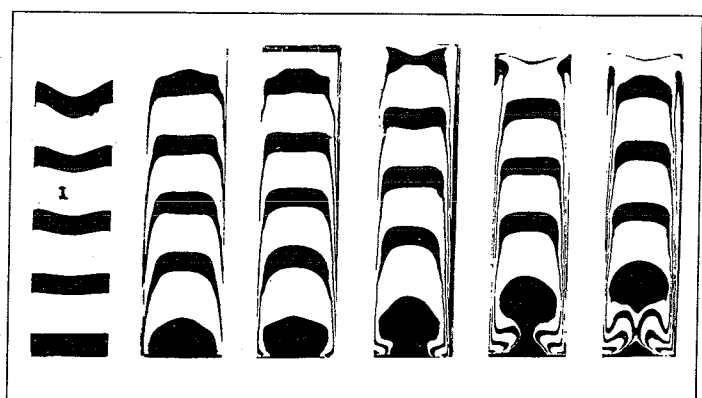
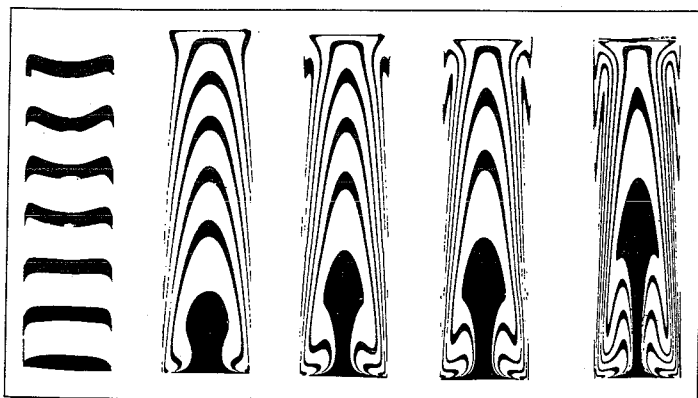
### Stroming tussen plunjers

Een meer gedetailleerde analyse van deformatiegeschiedenissen in stromende polymersmelten is uitgevoerd met een isotherme stroming van Polystyreen (PS) en ABS in een cilinder tussen twee plunjers. Deze geometrie is beter toegankelijk voor zowel eenvoudiger, immers rotatiesymmetrische isotherme, berekeningen als voor experimenten en vertoont toch een aantal wezenlijke kenmerken van de stroming in een matrijs, zoals bijvoorbeeld de fonteinstroming. Bovendien vindt een analyse van deze stroming mogelijk een latere toepassing in het meerlaagsspuitgietproces, waarin de gelaagde smeltstromen niet direct vanuit het geregelde kleppensysteem in de matrijs worden geïnjecteerd, maar via een verwarmde buffer. Een directe injectie vereist immers snelle sturing, vanwege de beperkte injectietijd (het materiaal zou anders stollen voordat de hele matrijs is gevuld) en beperkt hierdoor het aantal te formeren materiaalstromen. Bij een indirecte injectie kunnen deze worden samengesteld gedurende de veel langere koeltijd van het vorige ingespoten product. Na uitwerpen kan de uit meerdere materiaalcombinaties samengestelde inhoud van de buffer in een keer in de matrijs worden geïnjecteerd. De eisen te stellen aan het kleppensysteem, besturing en besturingssnelheid worden door zo'n oplossing beduidend minder, hetgeen de flexibiliteit, nodig voor complexe geometrieën, ten goede komt.

Het basisontwerp van een accumulator zou kunnen bestaan uit een tijdens vullen gedreven en tijdens legen drijvende plunjer in een cilinder. Het zou nu makkelijk zijn als vloeistofelementjes tijdens beide bewegingen een reversibele deformatie zouden ondergaan. Dit impliceert dat de aan de buffer aangeboden structuur tijdens het vullen weliswaar vervormt, maar weer terugkomt tijdens legen. Dit, en de principiële mogelijkheid deformatiegeschiedenissen te voorspellen, is onderzocht. Voor een literatuuronderzoek en verdere achtergronden wordt in dit kader verwezen naar ref. [2].

Teneinde de fonteinstroming te onderzoeken die optreedt bij de drijvende plunjer en de omgekeerde fonteinstroming bij de door de vloeistof gedreven plunjer, is een eenvoudig maar effectieve opstelling gebruikt die schematisch in figuur 2 is weergegeven.

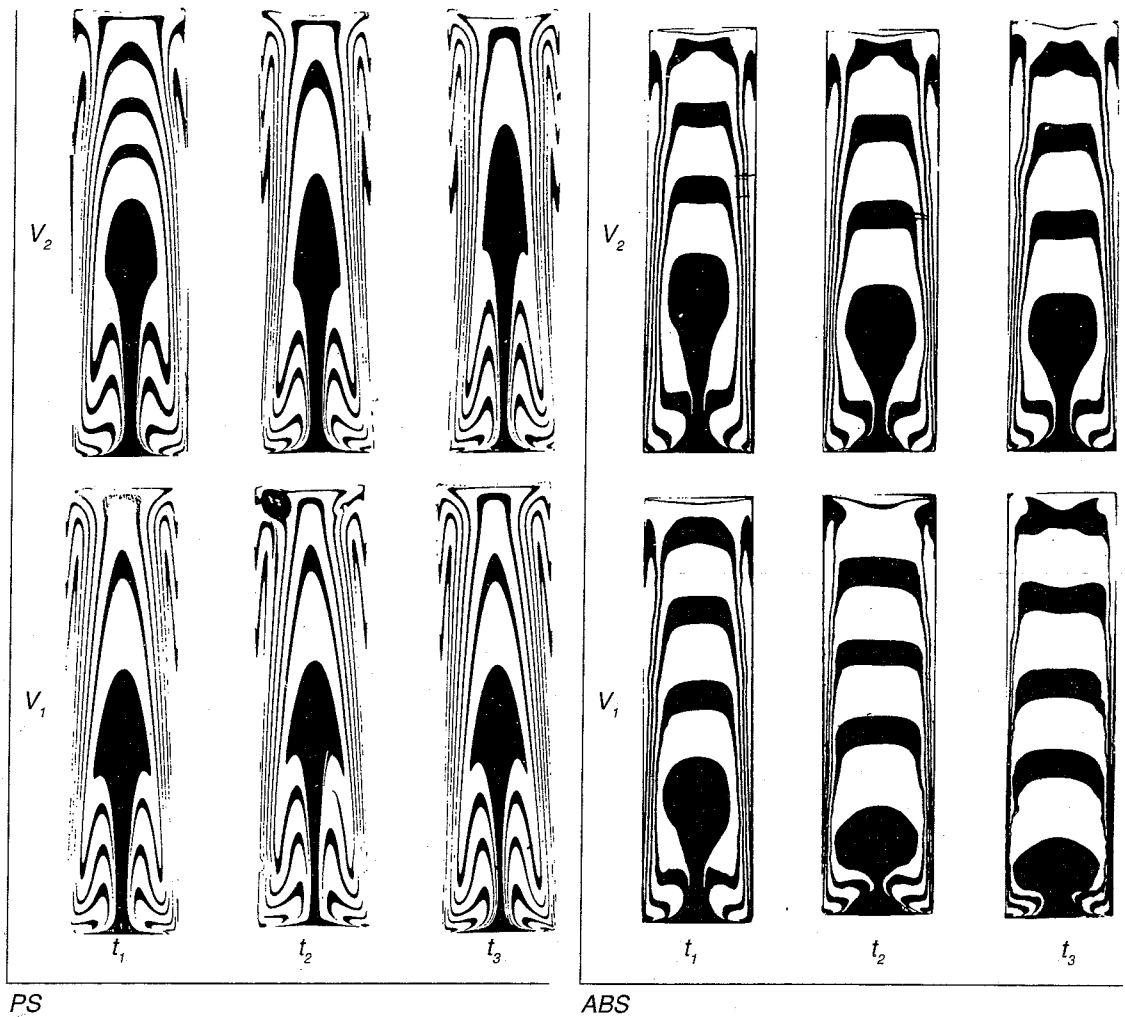
Een prop van  $\varnothing$  16 mm bij 55 mm uit een aantal verschillend gekleurde laagjes van overigens hetzelfde materiaal wordt in de cilinder tussen de twee plunjers geplaatst. Na opwarming en smelten, wordt de onderste plunjer met een constante snelheid naar boven bewogen. Om de studenten te sparen gebeurt dat hydraulisch (druk  $F_p$ ) met een aangedreven pomp. Op de bovenste plunjer wordt een gewicht geplaatst ( $F_g$ ) om er zeker van te zijn dat er geen slip optreedt tussen de bovenste plunjer en de smelt door de aanwe-



Figuur 4a: Gemeten deformatie voor PS (4a) en ABS (4b), bij plunjerplaatsingen van 0, 11, 22, 33, 44 en 55mm. Bij PS ontbreekt 11 mm.

Figuur 4b:

Figuur 5:  
Effect van temperatuur (200, 230 en 260 °C) en plunjer-snelheid (1.2 en 60 mm.s<sup>-1</sup>) op de deformatie bij een plunjer-verplaatsing van 55 mm, voor PS en ABS.

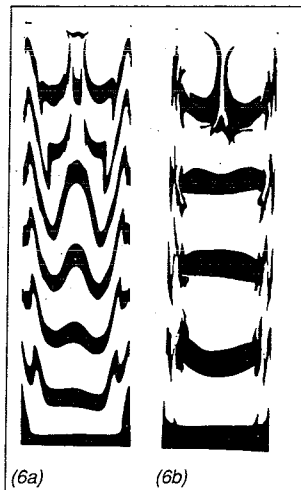


zigheid van een klein laagje lucht. (De plunjers pasten vrij nauw in de cilinder en met alleen lucht ertussen bewoog de bovenste ook mee met de onderste, zij het wat gedempt door de compressibiliteit van de lucht). De terugdeformatie wordt gerealiseerd door de cilinder 180° te draaien, zodat plunjer 2 de plaats van plunjer 1 inneemt en nu de aangedreven plunjer is. Het voordeel van deze opstelling is dat de lagen in de vaste fase exact gepositioneerd kunnen worden. De deformatiepatronen ten gevolge van de plunjer-verplaatsingen worden onderzocht door het geheel weer in te vriezen, de prop uit de cilinder te duwen en doormidden te zagen. De twee gebruikte materialen verschillen in vloeigedrag: PS (DOW PS634) vertoont een Newtons plateau bij lage afschuifsnelheden en kan goed worden beschreven met een Carreau model, terwijl ABS (DSM Ronfalin FX50) in het onderzochte afschuifsnelheidsgebied een powerlaw gedrag vertoont, zie figuur 3 voor metingen en modelbeschrijvingen.

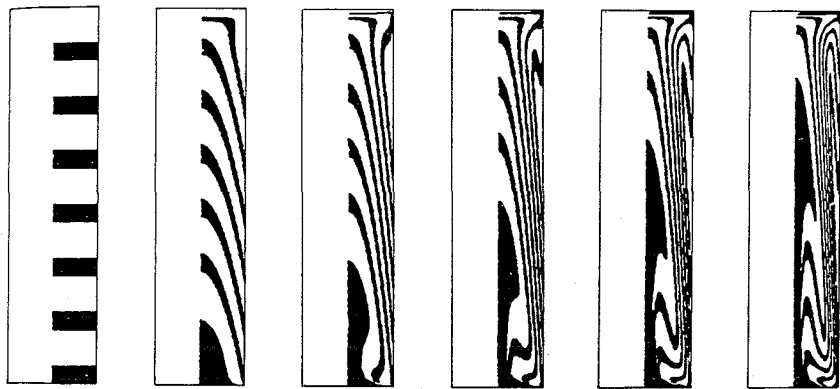
#### Experimentele resultaten

Figuur 4a vertoont de experimentele deformaties voor PS bij verschillende verplaatsing van plunjer 1. Figuur 4b vertoont hetzelfde voor ABS. Donkere plekken op de foto's die ogenschijnlijk niet bij de deformatie horen, zijn krimpholtes. Opvallend is het grote verschil in deformatiepatronen tussen de twee materialen, met een meer propstroomachtig gedrag voor ABS. Toch is dat niet echt verrassend, aangezien geprononceerd powerlaw gedrag tot vlakke snelheidsprofielen leidt met de gradiënten geconcentreerd in de lagen aan de wand. Om de invloed van de temperatuur en de afschuifsnelheid te onderzoeken, zijn de plunjers maximaal verplaatst, dat is gelijk aan de lengte van de oorspronkelijke prop, bij drie verschillende temperaturen en twee snelheden.

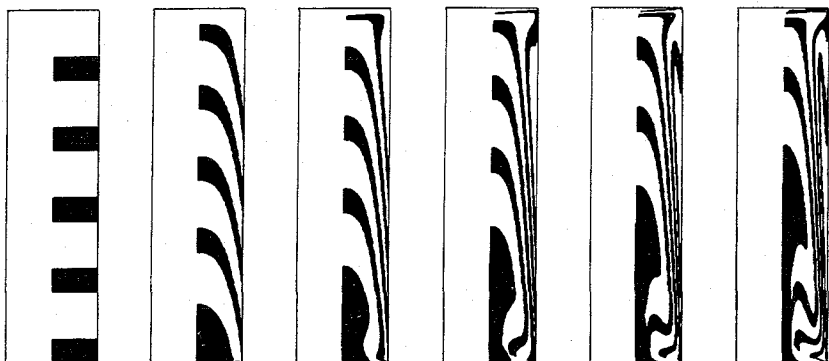
De resultaten voor beide materialen staan in figuur 5a en 5b. Bij PS vinden we bij lage snelheid geen invloed van de temperatuur, en bij hoge snelheid wel. Bij ABS zijn de resultaten omgekeerd: een grote temperatuursinvloed bij lage snelheid en een veel geringere bij hoge snelheid. Op het eerste gezicht zijn het eerste en het laatste resultaat direct in te zien op basis van het verloop van de gemeten vloeicurves. Immers in het lage afschuifsnelheidsgebied voor PS (Newtons plateau) is de viscositeit wel verschillend bij verschillende temperaturen maar voor het overige constant, dus niet afhankelijk van de afschuifsnelheid. Dit leidt tot exact dezelfde deformatiepatronen, slechts de kracht waarmee de plunjer moet worden bewogen neemt toe met afnemende temperatuur. Voor het (hoge) afschuifsnelheidsgebied voor ABS geldt een soortgelijke redenering, immers bij alle drie de temperaturen hangt de viscositeit op identieke wijze van de afschuifsnelheid



Figuur 6:  
Deformatie voor PS (6a) en ABS (6b), na een heen en terug verplaatsing van de plunjers over een afstand van 55 mm.



Figuur 7a.

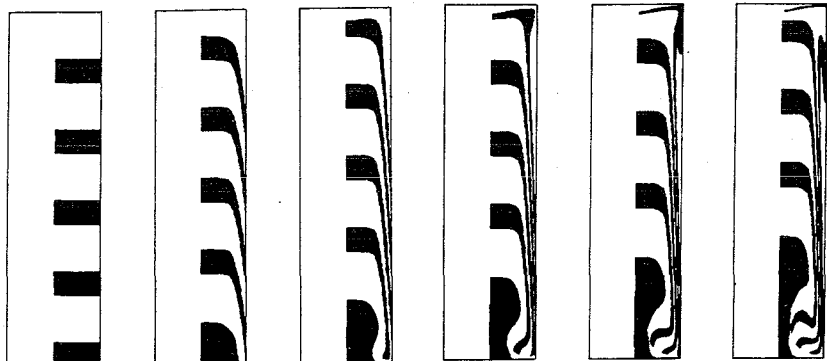


Figuur 7b:  
Berekende deformaties voor PS (7a) en ABS (7b), voor plunjerverplaatsingen als in figuur 4, gebruikmakend van het vloeigedrag volgens figuur 3.

af, hetgeen dus weer leidt tot identieke deformatiepatronen met alleen verschil in plunjerdrukken. Voor de temperatuursafhankelijkheid van PS bij hoge snelheden kunnen we op basis van het vloeigedrag verwachten dat die voortvloeit uit de temperatuursafhankelijkheid van het overgangspunt van Newtons plateau naar shear-thinning powerlaw gedrag, echter voor ABS tasten we vooralsnog volledig in het duister. Teneinde de omkeerbaarheid van de deformatie te onderzoeken, werden de proppen weer maximaal verplaatst en, na omdraaien van de cilinder, weer teruggeduwd. De resultaten voor beide materialen staan in figuur 6. De originele configuratie van nete lagen wordt niet geheel teruggevonden, hetgeen impliceert dat het complexe snelheidsveld bij de gedreven plunjer niet gelijk is aan dat bij de drijvende plunjer.

#### Numerieke simulaties

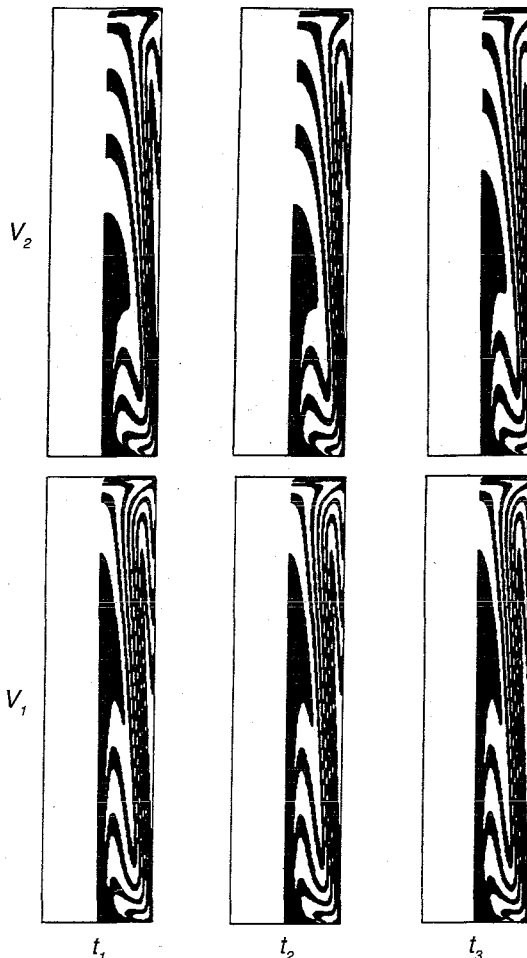
Gebruikmakend van een standaard eindige elementen programma (Septran) is de stroming tussen de plunjers gesimuleerd. Wegens symmetrie is natuurlijk slechts de helft van de stroming doorgerekend en veel aandacht is besteed aan de nauwkeurigheid en fijn-



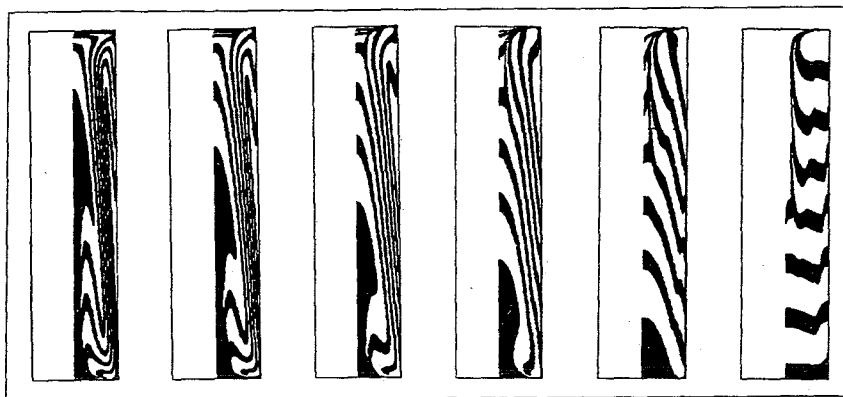
Figuur 8:  
Als figuur 7, voor ABS, met Binghammodel.

heid van de gebruikte mesh. Uiteindelijk bleek een aantal van 350 isoparametrische driehoeken, met een meshverfijning bij de hoekpunten waar de plunjer de cilinderwand raakt en waar dus ook problemen te verwachten zijn met de te gebruiken randvoorwaarden, voldoende. Toch vereiste de singulariteit op deze hoekpunten speciale aandacht en na een aantal simulaties is gekozen voor een zeer kleine lek langs de aandrijvende plunjer, gecombineerd met afwezigheid van lek bij de aangedreven plunjer. Dit lijkt fysisch reëel, echter de invloed hiervan op de totale deformatiegeschiedenis bleek veel groter, dan op grond van de nauwe spelingen tussen plunjer en cilinderwand werd verwacht. De belangrijkste reden hiervoor is dat niet het snelheidsveld of snelheidsgradiënten worden onderzocht, maar de totale deformatiegeschiedenis, dus het in de tijd geïntegreerde snelheidsveld.

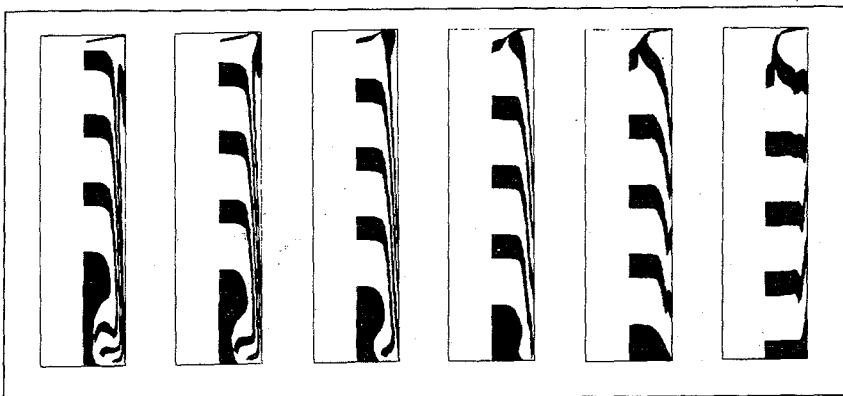
De resultaten van de berekeningen voor PS en ABS staan in respectievelijk figuur 7a en 7b. Vergelijking met de experimentele resultaten, figuur 4, leert dat voor PS een kwalitatief goede overeenkomst wordt gevonden. De kleine verschillen kunnen te wijten zijn aan verwaarlozing van de transiënte effecten van zowel de stroming als het (visko-elastische) materiaalgedrag. Voor ABS lijkt het er zelfs niet op. Er wordt in vergelijking tot PS wel een iets vlakker deformatiepatroon gevonden, zoals verwacht op basis van het niet-lineaire vloeigedrag, echter de experimenten vertonen een veel vlakker beeld. Naast het mogelijk optreden van wandslip (ABS bevat o.a. CaSt), hetgeen hier niet het geval is zoals uit simulaties bleek, kan het verschil worden toegeschreven aan viskeuze dissipatie, maar die trad nauwelijks op bij de lage snelheden die werden gebruikt, of aan het aanwezig zijn van een (kleine)



Figuur 9:  
Berekende deformaties bij verschillende snelheid en temperatuur voor PS, als in figuur 5.



Figuur 10a.



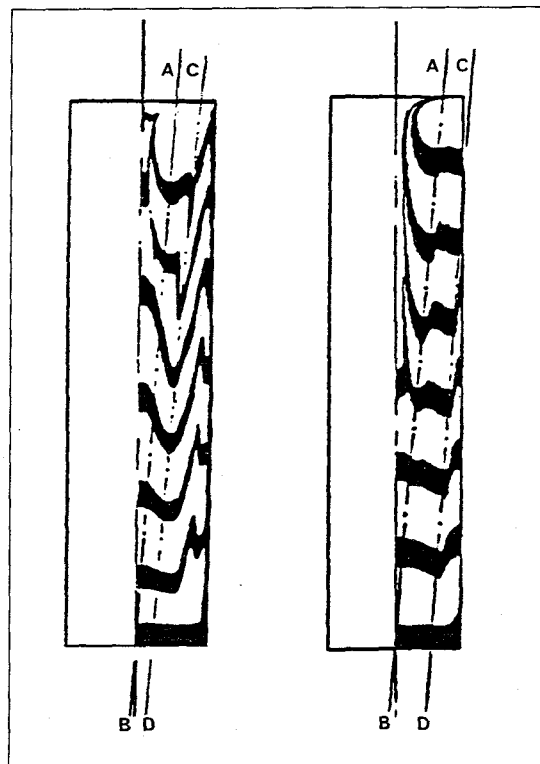
Figuur 10b:  
Berekening van de terugdeformatie voor PS (10a) en ABS (10b).  
Verplaatsing 55 - 0 mm.

zwichtsparing in het materiaal. In de literatuur is het ontstaan van een zwichtsparing met toenemend rubbergehalte in ABS gerapporteerd, zie ref. 3. Ook in soortgelijke materialen als ASA zijn zwichtsparingen gevonden. Er moeten dan wel andere reologische metingen worden uitgevoerd dan de dynamische metingen waarmee wij ons materiaal hebben gekarakteriseerd. Gebruikmakend van de waarden voor de zwichtsparing van ref. 3 zijn nieuwe berekeningen uitgevoerd (met een Bingham-beschrijvingswijze, omdat een zwichtsparing gecombineerd met powerlawgedrag, volgens het zogenaamde Herschel en Bulkey model, niet in het Sepran pakket voorradig is), met verbluffend resultaat, zie figuur 8.

Ook de experimenten met drie verschillende temperaturen bij twee verschillende snelheden zijn gesimuleerd. De resultaten voor PS staan in figuur 9 en vertonen het verwachte gedrag, zodat de verklaring, dat de invloed van de temperatuur op het overgangspunt van Newtons plateau naar powerlaw gedrag, de juiste is. Het gedrag van ABS kan nu ook worden verklaard door de invloed van de temperatuur op de zwichtsparing.

De resultaten van de berekening van de omgekeerde deformatie staan in figuur 10a voor PS en 10b voor ABS. Inderdaad zorgt de onomkeerbaarheid van de geringe lekstroom voor de onomkeerbaarheid van de deformatie.

Een nauwkeurige vergelijking van theorie en experiment (zie figuur 11) voor PS, toont dat de onomkeerbaarheid gelokaliseerd is in die gebieden van de stroming die tijdens deformatie in de buurt van de singuliere punten aan beide plunjers zijn geweest. Door de bewuste keuze van de uitgangskonfiguratie, zijn deze effecten in extreme mate duidelijk geworden. Hadden we gekozen voor concentrische cilinders met beperkte lengte van verschillende kleuren, dan had de tracercilinder zich keurig binnenste buiten gevouwen en weer terug, zonder in de buurt van de singuliere



Figuur 11:  
Vergelijking tussen experimentele (11a) en berekende (11b) totale deformaties van PS.

punten, waar de plunjer de cilinderwand raakt, te zijn geweest.

### Conclusies

In samenhang met het onderzoek naar de mogelijkheid een accumulator toe te passen bij de ontwikkeling van een bruikbare meerlaagsspuitgiettechnologie, is de stroming tussen twee plunjers in een cilinder onderzocht. De nadruk lag op de experimentele en numerieke bepaling van de deformatiegeschiedenis van elk vloeistofelementje in die stroming. Een exact kwantitatieve overeenkomst werd niet gevonden, waarschijnlijk door het verwaarlozen van de transiënte, dus ook visko-elastische effecten in deze opstartstroming. Toch komen uit deze studie een aantal interessante aspecten naar voren. Zo blijken kleine effecten, zoals het optreden van kleine zwichtsparingen in het materiaal of zeer kleine lekstromingen, een grote invloed te hebben op berekende en gemeten deformatiegeschiedenissen. Het in de tijd geïntegreerde snelheidsveld is voor dit soort effecten een veel gevoeliger maat dan het snelheidsveld zelf of, nog erger, de afgeleide van het snelheidsveld, de afschuif-snelheid, vermenigvuldigd met de viscositeit: de afschuifspanning, die via een meting van drukval of koppel in feite altijd wordt gebruikt in standaard-reologische metingen. Dat is leerzaam, niet alleen bij de ontwikkeling van een volwassen meerlaagsspuitgiettechnologie, maar ook bij het onderzoek naar het preciese materiaalgedrag en bij de berekening van transiënte spanningen in visko-elastische materialen, die immers tot stand komen via de gehele deformatiegeschiedenis van elk vloeistofelementje.

### Referenties

- [1] Baayens, F.P.T., Douven, L.F.A., Determination of Flow induced Stresses in Injection Moulded Products, in Proceedings First Dutch National Mechanics Conference, ed. Dijkman, J.F., Kluwer (1990).
- [2] Vos, E., Meijer, H.E.H., Peters, G.W.M., Multilayer Injection Moulding, Part 1: The Piston driven Flow, Int. Pol. Proc. (accepted).
- [3] Munstedt, H., Pol. Eng. Sci., Vol 21, 259 (1981).