

Validatie experimenten voor RTM simulaties met Vlp

Citation for published version (APA):

Moens, M. T. R. (1994). *Validatie experimenten voor RTM simulaties met Vlp*. (DCT rapporten; Vol. 1994.124). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1994

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

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

[Link to publication](#)

General rights

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

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

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

www.tue.nl/taverne

Take down policy

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

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Validatie experimenten voor RTM
simulaties met Vip

M.T.R. Moens

W.F.W. Report n° 94.124

Inhoudsopgave

1	Inleiding	2
2	De simulatie van het vulproces bij resin transfer moulding	3
	2.1 Het modelleren van het RTM proces	3
	2.1.1 Inleiding	3
	2.1.2 De basisvergelijkingen	4
	2.1.3 Dunne laag benadering	7
	2.1.4 Druk- en Temperatuurvergelijking	10
	2.1.5 Materiaaleigenschappen	13
	2.2 Het oplosproces	14
3	Experimenten	14
	3.1 Beschrijving van de opstelling	15
	3.2 Bepaling van porositeit en permeabiliteit	18
4	Resultaten	20
	4.1 Inleiding	20
	4.2 Geval 1: één-dimensionale stroming	21
	4.3 Geval 2: één-dimensionale stroming, 6 mm	25
	4.4 Geval 3: pijl	26
	4.5 Geval 4: plaat met gat	27
	4.6 Geval 5: plaat met weefsel	28
	4.7 Geval 6: twee continue glasmatten	29
	4.8 Geval 7: puntbron	30
	4.9 Geval 8: plaat met puntaanspuiting	33
	4.10 Geval 9: plaat met hoogteverschil	34
	4.11 Geval 10: plaat met hoogte- en porositeit-verschil	35
	4.12 Geval 11: plaat met puntaanspuiting, 6 mm	36
5	Conclusies en aanbevelingen	37
Bijlage A	De wet van Darcy	39
Bijlage B	Analytische oplossing van een één-dimensionale stroming	42
Bijlage C	Eén-dimensionale stroming tussen twee parallelle platen (smeerfilm theorie)	45
Literatuur	46

1 Inleiding

Resin Transfer Moulding (RTM) is een veelzijdige en wijd verspreide techniek om composieten te maken. Bij het RTM proces wordt een vloeibaar hars, b.v. onverzadigd polyester, geïnjecteerd in de caviteit van een gesloten matrijs waarin lagen vezelversterking zijn geplaatst. Vaak worden de vezelmatten eerst bij een temperatuur van ongeveer 70 °C in de vorm van de caviteit samengeperst. Hierbij smelt de binder van de vezelmatten, zodat na afkoelen de vezelmatten al de goede vorm hebben. Dit zgn. preformen is nodig om bij hogere vezelvolumefracties de matten in de matrijs te krijgen, en om de sluitkracht beperkt te houden. Bij kleine produkten wordt vaak gebruik gemaakt van een verwarmde matrijs, om de harding te versnellen. Ook is het gebruikelijk om vlak voor het inspuiten zgn. "cure promotors" aan het hars toe te voegen.

In de praktijk worden drie methoden gebruikt om hars te injecteren. Het hars kan geïnjecteerd worden door de hars onder druk in te spuiten. Ook kan de matrijs vacuüm gezogen worden, en tenslotte is een combinatie van beide mogelijk. Een voordeel van vacuüm injectie vergeleken met druk injectie is een betere microscopische impregnatie van de afzonderlijke vezelbundels van de versterking. In dit verslag zal echter alleen het vullen van de matrijs beschouwd worden, en hiervoor is alleen het drukverschil van belang.

Bij dit vulproces kunnen een aantal problemen ontstaan, zoals luchtinluitsels, vloeinaden (die ontstaan als twee vloeifronten bij elkaar komen), hoge drukken en lange vultijden. Het is tijdrovend en inefficiënt om door "trial and error" tot een goed matrijs ontwerp te komen. Om deze reden is er aan de TUE een simulatie-programma ontwikkeld, waarmee (onder andere) vloeifronten, drukken en vultijden voorspeld kunnen worden. Hiermee is het mogelijk om een matrijs te optimaliseren, voordat deze gemaakt wordt. Het simulatie-programma is een onderdeel van het pakket VIP (six p), wat staat voor : Polymer Product & Processing Properties Prediction Program.

Het doel van de stage was de validiteit van VIP voor RTM simulaties na te gaan. Hiertoe zijn resultaten van simulaties vergeleken met analytische oplossingen en experimenten. Wellicht geven deze resultaten meer inzicht in het vulproces bij RTM.

De indeling van dit verslag is als volgt. Eerst zal in hoofdstuk 2 de fysica waarop het simulatie pakket berust worden uiteengezet. Vervolgens zal zeer globaal de oplosmethode beschreven worden. In hoofdstuk 3 wordt vervolgens beschreven hoe de experimenten uitgevoerd zijn, en hoe de invoergegevens t.b.v. de simulatie verkregen zijn. In hoofdstuk 4 worden de resultaten gepresenteerd. En in hoofdstuk 5 tenslotte de conclusies en aanbevelingen.

2 De simulatie van het vulproces bij resin transfer moulding

2.1 Het modelleren van het RTM proces

2.1.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de vergelijkingen afgeleid waarmee het vulproces bij RTM gemodelleerd kan worden. Hierbij worden niet-isotherme en niet-Newtonse effecten in rekening gebracht. Ook wordt de reactie van het hars-systeem meegenomen. Verder mogen de vezelmatten anisotroop en inhomogeen zijn en de vloeistof compressibel. De stroming van het hars door de vezelmatten wordt macroscopisch beschreven, dat wil zeggen als een stroming door een poreus medium. Er wordt niet, zoals bij de microscopische benadering, naar de stroming tussen de afzonderlijke vezels gekeken, maar er wordt gewerkt met *volumegemiddelden*. Zo worden de vezelmatten beschreven met de begrippen permeabiliteit en vezelvolumefractie, en wordt o.a. gewerkt met de specifieke volumestroom i.p.v. de werkelijke vloeistofsnelheid. In [Whitaker] zijn de aannamen en beperkingen, die gemaakt worden bij het werken met volumegemiddelden om de beschrijvende vergelijkingen voor stroming door een poreus medium te verkrijgen, opgesomd :

- De poriën zijn lange smalle kanaaltjes en de lengte van de poriën is veel kleiner dan de matrijsholte;
- Het volume waarover gemiddeld wordt is constant en vast in de ruimte;
- De werkelijke snelheid is een unieke functie van de gemiddelde snelheid;
- Als de drukgradiënt nul is dan is ook de gemiddelde snelheid nul;
- Het anisotrope karakter van een poreus medium kan beschreven worden met een symmetrische permeabiliteitstensor.

Verder zijn de volgende algemene aannamen gemaakt :

- De zwaartekracht, de traagheidskrachten en de oppervlaktespanning en capillaire werking zijn te verwaarlozen t.o.v. de drukkrachten en visceuze krachten;
- De vezelmatten zijn star en blijven op hun plaats tijdens het vullen;
- De matrijs is star. Het meenemen van de matrijs-elasticiteit levert geen noemenswaardige problemen op. Bij RTM zijn de vloeistof-drukken echter zo laag, dat de matrijs tijdens het injecteren vrijwel niet vervormt. Wel kan de matrijs doorbuigen als gevolg van de veerkracht van het vezelpakket. Deze doorbuiging blijft tijdens het gehele vulproces hetzelfde, zodat deze gemodelleerd kan worden m.b.v. de

vorm van de matrijs, m.n. de hoogte van de matrijs als functie van de plaats.

2.1.2 De basisvergelijkingen

Achtereenvolgens zullen de volgende beschrijvende vergelijkingen, die in essentie de balansvergelijkingen zijn, gepresenteerd worden:

- a de wet van Darcy;
- b de continuïteitsvergelijking;
- c de energievergelijking, met een extra vergelijking die het verloop van de reactie van het hars-systeem beschrijft.

ad a De wet van Darcy beschrijft het verband tussen de drukgradiënt en de specifieke volumestroom van een vloeistof in een poreus medium, en kan afgeleid worden uit de lokale impulsbalans [Greenkorn].

De wet van Darcy gaat van zogenaamde "plug" stroming uit, en houdt daarom geen rekening met wrijvingskrachten van de wanden van de matrijs. Eckler en Rust [Eck-Rust] hebben gevonden dat in de meeste praktijkgevallen de stromingsweerstand van de wanden veel kleiner is dan die van het poreuze medium, en daarom verwaarloosd kan worden. Een uitzonderingsgeval hierop is wanneer de matrijsholte erg dun is en de porositeit van het versterkingsmateriaal (de vezelmatten) erg hoog. De wet van Darcy in drie dimensies voor anisotrope, inhomogene poreuze media luidt :

$$\underline{v} = -\frac{\mathbf{K}}{\eta} \nabla p \quad (1)$$

hierin is \underline{v} de specifieke volumestroom of filtersnelheid, η de viscositeit en p de druk van de vloeistof. Verder is \mathbf{K} de symmetrische permeabiliteitstensor die het poreuze medium beschrijft. In bijlage A wordt deze wet nader beschouwd.

Er dient opgemerkt te worden dat de wet van Darcy in deze vorm geldt voor een incompressibel fluïdum. De wet van Darcy voor een compressibel fluïdum bevat nog een extra term (de volumestroom hangt niet alleen af van het drukverschil, maar ook van de hoogte van de druk), bij stroming van een vloeistof echter is deze te verwaarlozen t.o.v. de andere termen. Hier wordt verder niet op ingegaan, de lezer zij verwezen naar [Greenkorn].

ad b De continuïteitsvergelijking kan afgeleid worden uit het massabehoud in een materieel volume-element, dit is een volume-element dat altijd dezelfde deeltjes bevat. Voor een vloeistof luidt de continuïteitsvergelijking (zie bijvoorbeeld [Kennedy]) :

$$\rho \nabla \cdot \underline{v} = - \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \underline{v} \cdot \nabla \rho \right) \quad (2)$$

hierin is \underline{v} de vloeistofsnelheid en ρ de dichtheid van de vloeistof, $\partial/\partial t$ staat voor de lokale of ruimtelijke tijdsafgeleide.

Bij stroming door een poreus medium zal een volume-element zowel vloeistof als vaste stof (van het poreuze medium) bevatten. Om een bruikbaar resultaat te verkrijgen wordt volume-gemiddeld. Dit leidt tot (zie [Greenkorn]) :

$$\nabla \cdot \underline{v} = - \frac{\phi}{\rho_r} \left(\frac{\partial \rho_r}{\partial t} + \underline{v}_r \cdot \nabla \rho_r \right) \quad (3)$$

hierin is \underline{v} de specifieke volumestroom, ϕ de porositeit, en \underline{v}_r de gemiddelde werkelijke vloeistofsnelheid, zie voor de definities van deze grootheden bijlage A. De index r wijst op een eigenschap van het hars.

Als aangenomen wordt dat het vulproces isotherm is, en niet beïnvloed wordt door de uitharding van het hars, dan kan met de vergelijkingen (1) en (3) het RTM proces beschreven worden.

ad c Als de harding van het hars tijdens het vullen wel wordt meegenomen, dan moeten de energievergelijking en een vergelijking die het verloop van de reactie van het hars-systeem beschrijft, toegevoegd worden. Deze vergelijkingen zijn gekoppeld via de reactie-warmte (de hardingsreactie is een exotherme reactie), die afhangt van de conversiesnelheid. Met de conversie wordt de relatieve graad van harding bedoeld, dus hoever de reactie gevorderd is (hoeveel dubbele bindingen er ontstaan zijn). Het verloop van de hardingsreactie bepaalt ook diverse materiaaleigenschappen, zoals de viscositeit van het hars η . Uit formule (1) blijkt dat hierdoor de stromingsweerstand zal toenemen naarmate het vulproces vordert.

De energievergelijking kan worden afgeleid door de eerste hoofdwet der thermodynamica toe te passen op een materieel volume van een poreus medium gevuld met vloeistof. De volgende aanvullende aannamen worden gemaakt :

- De inwendige energie wordt uitgedrukt in termen van temperatuur, dichtheid en thermodynamische druk;
- De warmtestroomdichtheidsvector wordt gerelateerd aan de temperatuur d.m.v. de wet van Fourier :
 $\underline{h} = \lambda \cdot \nabla T$;
- De vloeistof is incompressibel, hierdoor wordt er geen druk arbeid op het volume uitgevoerd. Net als bij de wet van Darcy zijn de termen waar de compressibiliteit in zit te verwaarlozen t.o.v. de andere, dit komt mede doordat de drukken bij RTM zo laag zijn;
- De temperatuur van het hars is gelijk aan die van de vezels;

- De visceuze dissipatietermen worden verwaarloosd;
- De warmtegeleidingscoëfficiënten van het composiet zijn de volumegemiddelden van de waarden van het hars en van de vezels.

De wet van behoud van energie voor het materieel volume kan in woorden als volgt geformuleerd worden :

De verandering van de inwendige energie van de vloeistof + de verandering van de inwendige energie van het poreuze medium = de warmte die langs de rand van het volume toegevoerd wordt + de warmte die van de reactie afkomstig is

Dit moet gelden voor elk materieel volume. Hieruit kan worden afgeleid (zie o.a. [Kennedy]) :

$$\phi \rho_r c_{pr} \dot{T} + (1-\phi) \rho_f c_{pf} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\bar{\lambda} \cdot \nabla T) + \phi \rho_r H \dot{\chi} \quad (4)$$

hierin is T de temperatuur, c_p de warmtecapaciteit bij constante druk, λ de warmtegeleidingstensor van het composiet, H de reactiewarmte, en χ de conversie . De index r wijst op een hars-eigenschap, de index f op een vezel-eigenschap en het streepje boven de warmtegeleidingstensor op een composiet-eigenschap, gedefinieerd als:

$(\bar{\lambda}) = \phi (\bar{\lambda})_r + (1-\phi) (\bar{\lambda})_f$. Een punt boven een grootheid staat voor de totale of materiële tijdsafgeleide, die zowel de lokale verandering als de verandering a.g.v. de stroming van de vloeistof omvat. Uiteraard is deze alleen te vinden bij de term die de verandering van de inwendige energie van de vloeistof weergeeft, het poreuze medium beweegt immers niet, zodat in de tweede term alleen de lokale afgeleide voorkomt.

Het stelsel vergelijkingen wordt gecompleteerd door een model van het verloop van de reactie van het hars-systeem. Deze reactie wordt beschreven d.m.v. de conversie χ , die waarden tussen nul en één kan aannemen. Deze beschrijving geldt voor alle harsdeeltjes, m.a.w. er wordt van uit gegaan dat de benodigde hoeveelheid hars vlak voor inspuiting gemengd wordt, zodat tijdens de inspuiting alle deeltjes dezelfde conversie hebben. Algemeen ziet het model er als volgt uit :

$$\dot{\chi} = f(\chi, T) \quad (5)$$

Een empirisch model dat vaak goed overeenkomt met experimenten is het zogenaamde Kamal-Sourour model [Kamal] :

$$\dot{\chi} = (K_1 + K_2 \chi^m) (1-\chi)^n \quad (6)$$

de som van de (temperatuur-onafhankelijke) constanten m en n hierin worden de orde van de reactie genoemd, en K_1 en K_2 zijn snelheidsconstanten die van de temperatuur afhangen middels een Arrhenius relatie :

hierin is ΔE_i de activeringsenergie en R de universele gasconstante. Er wordt

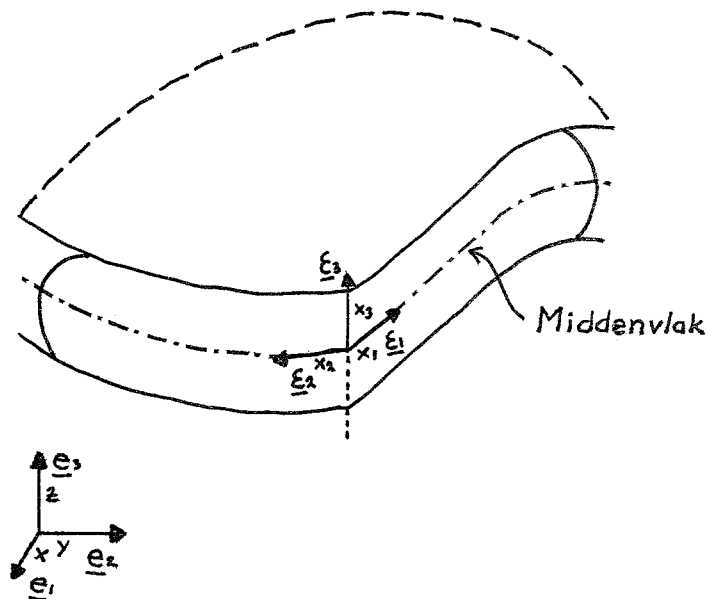
$$K_i = k_i e^{-\Delta E_i / RT} \quad i=1, 2 \quad (7)$$

vervolgens aangenomen dat de door de reactie opgewekte warmte evenredig is met het aantal dubbele bindingen dat ontstaat. Als gevolg hiervan kan de opgewekte warmte per tijdseenheid geschreven worden als

$$\dot{H}_X.$$

2.1.3 Dunne laag benadering

De basisvergelijkingen zullen nu vereenvoudigd worden op basis van geometrische overwegingen. In het algemeen worden met RTM dunne produkten gemaakt. De stroming in de matrijs kan daarom als stroming in een dunne spleet beschouwd worden. Het kenmerk van een dunne spleet is dat de afmetingen in één richting (de dikterichting) veel kleiner zijn dan in de andere twee richtingen. Er wordt een beperking gemaakt tot licht gebogen spleetvormige caviteiten, waarvan de dikte kan variëren, ook wel $2\frac{1}{2} D$ geometriën genoemd. Als gevolg hiervan wordt het extra drukverlies als gevolg van discontinuë veranderingen in de caviteit hoogte of van hoeken, niet meegenomen. In elk punt van het middenvlak wordt een lokale carthesische basis geïntroduceerd : $O_e: \{\underline{\varepsilon}_1, \underline{\varepsilon}_2, \underline{\varepsilon}_3\}$, met $\underline{\varepsilon}_2$ en $\underline{\varepsilon}_3$ in het middenvlak en $\underline{\varepsilon}_3$ loodrecht erop, zie figuur 1.



Figuur 1 : Lokale basis O_e

Elke willekeurige vector \underline{a} kan ontbonden worden in een vector \underline{a}^* parallel aan het middenvlak en een component in de richting van $\underline{\varepsilon}_3$:

$$\underline{a} = a_1 \underline{\varepsilon}_1 + a_2 \underline{\varepsilon}_2 + a_3 \underline{\varepsilon}_3$$

De basisvergelijkingen kunnen nu uitgeschreven worden t.o.v. deze basis, en de orden van grootte van de verschillende termen kunnen bepaald worden. Als voorbeeld zal dat hier voor de wet van Darcy uitgewerkt worden. Karakteristieke waarden die gebruikt worden zijn [Bos-Werf] :

Matrijs dikte,	$H=10^{-3}\text{m}$
Matrijs lengte,	$L=H/\delta$ met $\delta=H/L \ll 1$
Stroomsnelheid,	$V=10^{-1}\text{m/s}$
Druk,	$p_0=10^7\text{N/m}^2$
Viscositeit,	$\eta_0=10^4\text{Ns/m}^2$
Permeabiliteit,	$K_0=10^{-9}$

Met deze typische waarden kunnen de variabelen in de vergelijkingen als volgt in termen van dimensieloze variabelen geschreven worden :

x_1 -coördinaat:	$x_1 = Lx_1' = H/\delta x_1'$
x_2 -coördinaat:	$x_2 = Lx_2' = H/\delta x_2'$
x_3 -coördinaat:	$x_3 = Hx_3'$
eerste snelheidscomponent:	$v_1 = Vv_1'$
tweede snelheidscomponent:	$v_2 = Vv_2'$
derde snelheidscomponent:	$v_3 = \delta Vv_3'$
druk:	$p = p_0 p'$
viscositeit:	$\eta = \eta_0 \eta'$
permeabiliteit:	$K = K_0 K'$

hierin zijn de grootheden met een accent dimensieloos en van de orde één.

De dimensieloze variabelen worden ingevuld in de vergelijking. Ook de afgeleiden worden hiermee benaderd, bijvoorbeeld :

$O(\partial p / \partial x_1) = O(p_0/L)$; de druk verandert over een lengte L met een waarde p_0 .

De (gegeneraliseerde) wet van Darcy luidt :

$$\underline{v} = - \frac{K}{\eta} \nabla p \quad (1)$$

De derde component t.o.v. de lokale basis O_e hiervan is :

$$v_3 = - \frac{1}{\eta} (K_{31} \frac{\partial p}{\partial x_1} + K_{32} \frac{\partial p}{\partial x_2} + K_{33} \frac{\partial p}{\partial x_3}) \quad (9)$$

Invullen van de dimensieloze variabelen levert :

$$\delta v_{v_3'} = -\frac{1}{\eta_0 \eta'} \left(K_0 K_{31}' \frac{p_0}{L} \frac{\partial p'}{\partial x_1'} + K_0 K_{32}' \frac{p_0}{L} \frac{\partial p'}{\partial x_2'} + K_0 K_{33}' \frac{p_0}{H} \frac{\partial p'}{\partial x_3'} \right) \quad (10)$$

Invullen van de karakteristieke waarden levert de schattingen van de orden van grootte van de verschillende termen :

$$10^{-1} \delta : 10^{-3} \delta : 10^{-3} \delta : 10^{-3}$$

De eerste drie termen zijn dus te verwaarlozen, zodat van de derde component van de wet van Darcy overblijft :

$$\frac{\partial p}{\partial x_3} = 0 \quad (11)$$

De eerste component van de wet van Darcy t.o.v. de basis O_e is:

$$v_1 = -\frac{1}{\eta} \left(K_{11} \frac{\partial p}{\partial x_1} + K_{12} \frac{\partial p}{\partial x_2} + K_{13} \frac{\partial p}{\partial x_3} \right) \quad (12)$$

De laatste term is (bij benadering) gelijk aan nul, dus :

$$v_1 = -\frac{1}{\eta} \left(K_{11} \frac{\partial p}{\partial x_1} + K_{12} \frac{\partial p}{\partial x_2} \right) \quad (13)$$

Zo geldt ook voor de tweede component :

$$v_2 = -\frac{1}{\eta} \left(K_{21} \frac{\partial p}{\partial x_1} + K_{22} \frac{\partial p}{\partial x_2} \right) \quad (14)$$

Ook van de termen van de continuïteitsvergelijking en de energievergelijking kunnen op deze manier de orden van grootte bepaald worden. Door verwaarlozing van de termen die van veel kleinere orde zijn, ontstaat de *dunne laag benadering* (zie bijvoorbeeld [Bos-Werf] en [Douven]). De belangrijkste resultaten van deze benadering zijn :

- De druk is onafhankelijk van de $\underline{\epsilon}_3$ richting.
- Snelheidsgradiënten parallel aan het middenvlak zijn klein vergeleken met snelheidsgradiënten in de (loodrechte) $\underline{\epsilon}_3$ richting.
- Snelheidscomponenten in de $\underline{\epsilon}_3$ richting zijn klein vergeleken met die evenwijdig aan het middenvlak.
- Warmtegeleiding parallel aan het middenvlak is verwaarloosbaar t.o.v. geleiding in de $\underline{\epsilon}_3$ richting.

De benaming 2½ D benadering wordt hierdoor verduidelijkt : de druk kan slechts in twee dimensies variëren, en de snelheid in drie dimensies.

De vergelijkingen resulteren in het stelsel :

$$\underline{v}^* = -\frac{\kappa^*}{\eta} \nabla p, \quad \frac{\partial p}{\partial x_3} = 0 \quad (15)$$

$$\nabla^* \cdot \underline{v}^* = -\frac{\phi}{\rho_r} \left(\frac{\partial \rho_r}{\partial t} + \underline{v}_r^* \cdot \nabla^* \rho_r \right) \quad (16)$$

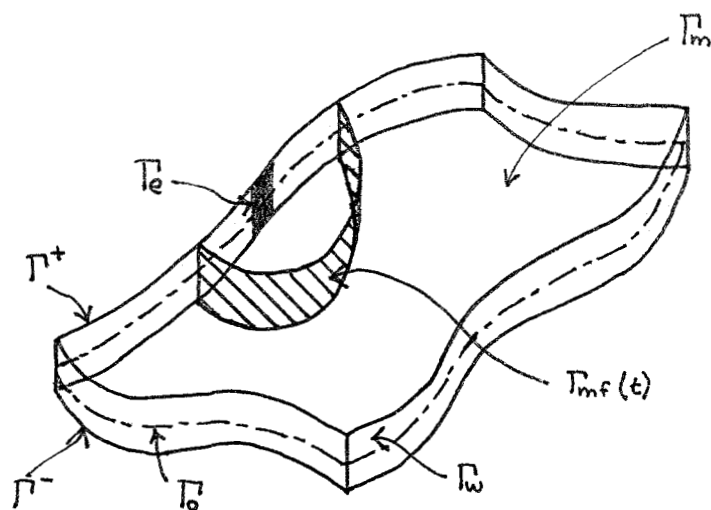
$$\phi \rho_r c_{pr} T + (1-\phi) \rho_f c_{pf} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) + \phi \rho_r H \dot{\alpha} \quad (17)$$

hierin zijn alle vectoren, tensoren en operatoren t.o.v. de lokale basis O_e geschreven.

2.1.4 Druk- en Temperatuurvergelijking

In deze paragraaf zullen de vergelijkingen verder vereenvoudigd worden door integratie van de wet van Darcy (15) en de continuïteitsvergelijking (16) over de dikte. Dit is mogelijk doordat de druk onafhankelijk van de x_3 richting is. Het resultaat zal een stelsel van twee niet-lineaire gekoppelde vergelijkingen zijn, de drukvergelijking en de temperatuurvergelijking.

Er wordt een dunne caviteit beschouwd die een domein Ω in de ruimte definieert, zie figuur 2. De boven- en onderoppervlakken van de caviteit worden met respectievelijk Γ^+ en Γ^- aangeduid. Deze randen zijn ondoordringbaar en parallel aan het middenvlak van de caviteit Γ_0 . Vervolgens worden de grensvlakken beschouwd die loodrecht op het



figuur 2: model van de matrijs caviteit en de randen

middenvlak staan. Het deel van deze rand dat ondoordringbaar is wordt met Γ_w aangeduid. Het vulproces start op $t=0$, als het hars in de matrijs begint te stromen. De plaatsen waar het hars de matrijs binnenkomt worden met Γ_e aangeduid. Op een later tijdstip is een bepaald gebied van de caviteit gevuld met hars : $\Omega_p(t)$. Dit gebied wordt begrensd door delen van Γ^+ , Γ^- , Γ_e , Γ_w en het vloeifront $\Gamma_{mf}(t)$. Het front is de bewegende grens tussen het hars en de lucht in de matrijs. Het gehele buitenoppervlak van de matrijs, waar de temperatuur voorgeschreven kan worden, wordt met Γ_m aangeduid.

Het tijdsinterval dat hier beschouwd wordt is $T_f = [0, t_{fin}]$. Aangenomen wordt dat gedurende dit tijdsinterval aan de matrijsingang ofwel de druk, ofwel de volumeflux voorgeschreven wordt.

Substitutie van vergelijking (15) in vergelijking (16) en achtereenvolgens integreren over de dikte levert :

$$\int_{-h/2}^{h/2} \nabla^* \cdot \frac{\mathbf{K}^*}{\eta} \cdot \nabla^* p d\zeta = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\phi}{\rho_r} \left(\frac{\partial \rho_r}{\partial t} + \mathbf{v}_r^* \cdot \nabla \rho_r^* \right) d\zeta \quad (18)$$

De snelheidscomponenten zijn dus geëlimineerd, en de druk is de onbekende in deze vergelijking. Dit is dus de drukvergelijking, waar de volgende randvoorwaarden bij horen :

- Aan de het toevoerkanaal :
als de volumeflux voorgeschreven wordt :

$$q = -h \frac{\mathbf{K}^*}{\eta} \cdot \nabla p \cdot \underline{n}^* \quad \text{op } \Gamma_e \quad (19)$$

of, als de druk voorgeschreven wordt :

$$p = p_{entry} \quad \text{op } \Gamma_e \quad (20)$$

Als in het eerste geval de benodigde druk een opgegeven waarde p_{max} overschrijdt, dan wordt een randvoorwaarde zoals het tweede geval gebruikt, met $p_{entry} = p_{max}$.

- Aan de wanden van de matrijs :

$$\left| \frac{\partial p}{\partial \underline{n}^*} \right| = 0 \quad \text{op } \Gamma_w \quad (21)$$

- Aan het front :

$$p = p_{atm} \quad \text{op } \Gamma_{mf} \quad (22)$$

De symbolen in deze vergelijkingen hebben de volgende betekenis :

∇^*	gradiënt operator gedefinieerd in het middenvlak
$p(\underline{x}^*, t)$	druk
$h(\underline{x}^*)$	spleethoogte van de matrijs

t	tijd
$\mathbf{K}^*(\underline{x}^*)$	permeabiliteitstensor van componenten in de richting van het middenvlak
$\eta(\underline{x}^*, x_3, t)$	visositeit
$\phi(\underline{x}^*)$	porositeit
$\rho(\underline{x}^*, x_3, t)$	dichtheid
$q(\underline{x}^*, t)$	voorgescreven volumeflux per eenheid van lengte
$\underline{n}^*(\underline{x}^*)$	buiten-normaal op de randen in het middenvlak
p_{entry}	voorgescreven inlaatdruk
p_{max}	maximale druk aan het toevoerkanaal (machine afhankelijk)
p_{atm}	druk in de matrijs

Integratie van de energievergelijking is niet mogelijk omdat het temperatuurverloop over de dikte niet bekend is, maar juist bepaald moet worden. Vergelijking (17) is de temperatuurvergelijking :

$$\phi \rho_f C_{pf} T + (1-\phi) \rho_f C_{pf} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) + \phi \rho_f H \dot{\chi} \quad (17)$$

Hierbij horen de randvoorwaarden :

- Aan het toevoerkanaal :

$$T = T_i \quad \text{op } \Gamma_e \quad (24)$$

- Aan de bovenste matrijswand :

$$T = T_{w1} \quad \text{of} \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x_3} = H_1 (T - T_{m1}) \quad \text{op } \Gamma^+ \quad (25)$$

- Aan de onderste matrijswand :

$$T = T_{w2} \quad \text{of} \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x_3} = H_2 (T - T_{m2}) \quad \text{op } \Gamma^- \quad (26)$$

- Koelen aan de lucht :

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x_3} = H_a (T - T_a) \quad \text{op } \Gamma_{mf} \quad (27)$$

De symbolen in deze vergelijkingen hebben de volgende betekenis :

$T_{w1}(\underline{x}^*, t)$	wandtemperatuur bovenste matrijshelft
$T_{w2}(\underline{x}^*, t)$	wandtemperatuur onderste matrijshelft
$T_{m1}(\underline{x}^*, t)$	temperatuur bovenste matrijshelft

$T_{m2}(\underline{x}^*, t)$	temperatuur onderste matrijshelft
$T_a(\underline{x}^*, t)$	luchttemperatuur
$H_1(\underline{x}^*, t)$	warmteoverdrachtscoëfficiënt bovenste matrijshelft
$H_2(\underline{x}^*, t)$	warmteoverdrachtscoëfficiënt onderste matrijshelft
$H_a(\underline{x}^*, t)$	warmteoverdrachtscoëfficiënt naar de lucht

2.1.5 Materiaaleigenschappen

In de hierboven afgeleide vergelijkingen komen een aantal materiaaleigenschappen voor, namelijk viscositeit, dichtheid (van vloeistof en vezels), soortelijke warmte (van vloeistof en vezels), warmtegeleidingscoëfficiënt en conversie. Deze eigenschappen kunnen afhangen van de druk, temperatuur, schuifspanning en conversie. In VIp zijn voor elke materiaaleigenschap een aantal functies geïmplementeerd, zie [Caspers et al.].

2.2 Het oplosproces

In deze paragraaf zal kort aangegeven worden hoe de afgeleide vergelijkingen opgelost worden binnen VIP. Voor een uitgebreidere beschrijving wordt verwezen naar [Caspers et al.]. De hierboven afgeleide vergelijkingen (druk- en temperatuurvergelijking) kunnen in de tijd worden gediscretiseerd. Bovendien wordt (het middenvlak van) de caviteit in eindige elementen verdeeld. In elk knooppunt wordt een 1D eindige elementen grid in de ϵ_3 richting geconstrueerd, opdat het temperatuurprofiel als een set van temperatuurwaarden gerepresenteerd kan worden. Elke tijdstap worden de vergelijkingen opgelost voor het gebied dat gevuld is op het betreffende tijdstip. De vergelijkingen worden per tijdstap na elkaar opgelost, waarbij de benodigde eigenschappen uit een vorige tijdstap genomen worden. De vergelijkingen worden dus ontkoppeld. De positie van het nieuwe front wordt berekend door eerst de drukgradiënt aan het front te bereken. Vervolgens wordt met vergelijking (15-1) de frontsnelheid bepaald, en met de gekozen tijdstap de plaats van het nieuwe front. Om de positie van het nieuwe front te laten samen vallen met de randen van nieuwe elementen, wordt local remeshing toegepast.

3 Experimenten

3.1 Beschrijving van de opstelling

Alle experimenten zijn uitgevoerd met een matrijs die opgebouwd is uit twee perspex platen (600 x 300 mm) van 10 mm dik, zodat het front gevolgd kan worden.

De randen van de caviteit (in hoofdstuk 2 als Γ_w aangeduid) worden gevormd door lagen terostat (één laag per mm caviteit dikte). Deze wijze van afdichten heeft als voordeel dat geen spleten ontstaan tussen het vezelpakket en de rand. Als gevolg van deze omstroomkanalen zou de hars langs de rand voorlopen. Door de hoge (visco-) elasticiteit van terostat worden deze spleten dichtgedrukt.

De caviteit dikte wordt vastgelegd door metalen plaatjes tussen de platen te leggen en vervolgens de platen met bouten tegen deze plaatjes te trekken. In de bovenste plaat zijn twee draadbussen getapt ($G 3/8$ "), waarvan er telkens één met een stop afgesloten wordt, en de andere als aanspuiting gebruikt wordt.

De ontluchting van de matrijs wordt bewerkstelligd door één of twee buisjes, waarbij op de te verwachten vorm van het front gelet moet worden. De buisjes moeten immers zitten op de plaats waar de matrijs het laatst gevuld wordt. Doordat de viscositeit van lucht twee orden kleiner is dan die van water (de vloeistof waarmee geïmpregneerd wordt), mag aangenomen worden dat overal waar de matrijs nog niet gevuld is, atmosferische druk heerst.

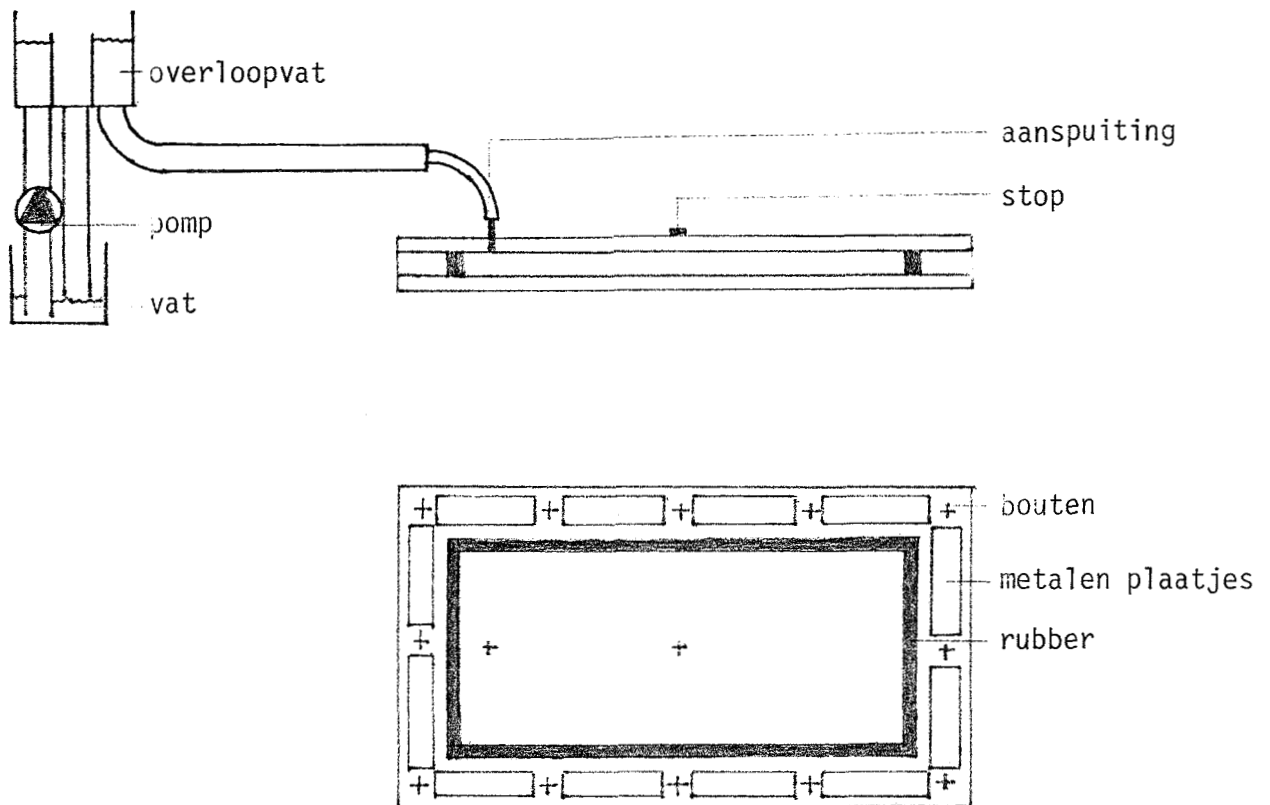
De vloeistof wordt onder constante druk geïnjecteerd. Dit wordt bewerkstelligd door een overloopvat (zie figuur 3).

De vloeistof die geïnjecteerd wordt bestaat uit water met 0.332 % ecoline en 0.04 % alcohol, waardoor het front beter te zien is.

Als het geval genomen wordt dat de hars pas uit hardt als de hele matrijs gevuld is (als deze reactie warmte-geactiveerd is kan dit bijvoorbeeld door warmte toe te voeren als de matrijs vol is), dan kan hars als Newtonse vloeistof beschreven worden. Door de experimenten met water en lage drukverschillen uit te voeren, blijven de afschattingen uit hoofdstuk 2 geldig, zodat de stroming door de afgeleide vergelijkingen beschreven wordt. Met andere woorden: de uitgevoerde experimenten zijn vergelijkbaar met werkelijke RTM experimenten.

De gebruikte glasmatten zijn:

- A: Unifilo 750 van Vetrotex. Dit is een continue glasmat, speciaal ontwikkeld voor RTM; de matten zijn opgebouwd uit continue strands die een ligging hebben zonder duidelijke oriëntatie, waardoor het uiteindelijke laminaat in zijn vlak isotroop is. De permeabiliteit als functie van de porositeit is bekend (zie tabel 1).
- B: Een continue glasmat, oorspronkelijk bedoeld voor hand-lay-up.
- C: Een glas weefsel.



figuur 3 : schematische weergave van de opstelling

Material	V_f	$k (10^{-9} \text{ m}^2)$	
		Injection mould	Permeameter
U816	0.09	16	15
	0.12	8.8	8.6
	0.15	5.0	5.1
U750	0.12	7.0	-
	0.18	2.4	-
	0.24	1.3	-
	0.30	0.31	-

Table 1 Permeability of Unifilo 816 continuous glass mat (450 g m^{-2}), measured in the injection mould and the TNO permeameter, and Unifilo 750 glass mat (450 g m^{-2}), measured in the TNO permeameter

Composites Manufacturing No. 1 1993

Er is bij elk experiment voor gezorgd dat het aantal lagen glasmat zodanig is, dat de matrijs met een matige sluitkracht gesloten moet worden. Hiermee wordt bereikt dat de matrijs goed gevuld is, zodat bij de uitgevoerde experimenten ook werkelijk stroming door de vezelmatten optreedt, en niet tussen de vezelmatten.

Het verloop van het vulproces wordt geregistreerd door een video camera die boven de matrijs bevestigd is, en een video recorder. Van de video opnamen zijn contour plots gemaakt m.b.v. een beeldscherm waar een transparant opgeplakt is: de videoband is stil gezet op de tijdstippen waarin men geïnteresseerd is, en het vloeifront is overgetrokken. Bij alle vloeifronten-plaatjes is het vloeifront op 1/10 van de vultijd getekend, vervolgens het vloeifront dezelfde tijdstap later, enz. Er zijn dus telkens 9 vloeifronten getekend.

3.2 Bepaling van porositeit en permeabiliteit

Om simulaties te kunnen uitvoeren van vulprocessen met de glasmatten B en C moet hiervan de porositeit en permeabiliteit bekend zijn. De porositeit (= 1 - vezelvolumefractie) wordt bepaald door de vezelmatten te wegen en het volume te bepalen dat ze in nemen in de matrijs. Van glasmat B zijn 6 lagen van 120 x 222 mm gebruikt. Deze gaan in een matrijs van 3 mm dik. De massa van dit vezelpakket is $m = 36.5$ g. De vezelvolumefractie is dus :

$V_f = \text{volume vezels} / \text{totaal volume}$

$$= 36.5 \cdot 10^{-3} / 2.55 \cdot 10^3 / 120 \cdot 222 \cdot 3 \cdot 10^{-9} \quad (\text{dichtheid } 2.55 \cdot 10^3)$$

$$= 0.18$$

dus de porositeit is :

$$\phi = 1 - V_f = 0.82$$

Van weefsel C zijn 9 lagen nodig om een matrijs met een dikte van 3 mm te vullen. Op dezelfde manier als bij glasmat B is voor de porositeit van weefsel C gevonden : $\phi = 0.57$. Met het weefsel zijn dus veel hogere vezelvolumefracties te bereiken.

Merk op dat hier als dichtheid de dichtheid van glas genomen is ($2,55 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$). Dit is strikt genomen niet juist. De glasmat bestaat naast glas namelijk ook uit binder. Omdat de percentages binder voor de matten B en C niet bekend is, maar waarschijnlijk wel klein, is dit hier verwaarloosd.

Om de permeabiliteit te bepalen wordt gebruik gemaakt van een één-dimensionale stroming. Voor een dergelijke stroming is het verloop van het front als functie van de tijd analytisch te bepalen. Dit is uitgewerkt in bijlage B. Uit formule (B11) volgt voor de permeabiliteit :

$$K = \frac{\eta L^2}{2 t \Delta p} \quad (29)$$

Bij controle van de waarde van de permeabiliteit van glasmat A werd een iets lagere waarde gevonden van uit tabel 1 volgt. De porositeit was 0.80, waarbij een permeabiliteit hoort van $2.0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ (zie tabel 1, hierbij is lineair geïnterpoleerd). De gevonden waarde is $1.5 \cdot 10^{-9}$.

N.B. Als de invloed van de binder wel meegenomen was, dan hadden de waarden dichter bij elkaar gelegen. Neem als voorbeeld een glas-volumepercentage van 87%, dan is de gemiddelde dichtheid $2.3 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. De vezelvolumefractie is dan 0.22, volgens tabel 1 hoort hier een permeabiliteit bij van $1.7 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$. Hier zal verderop nog op worden teruggekomen.

De gevonden waarden voor de matten B en C zijn waarschijnlijk ook te laag. Bij gebrek aan beter zijn echter deze waarden ingevoerd in VIp. De gevonden waarden zijn:

mat B : $K = 6.3 \cdot 10^{-10}$ bij $\phi = 0.82$

mat C : $K = 5.1 \cdot 10^{-10}$ bij $\phi = 0.57$

Deze waarde geldt voor beide hoofdrichtingen van het weefsel (dus zowel in de richting van de ketting- als van de inslagdraden). Hieruit volgt dat ook het weefsel isotroop is. Als x en y in de hoofdrichtingen gekozen worden, dan bevat de permeabiliteitsmatrix K alleen op de hoofddiagonaal waarden ongelijk aan nul (zie bijlage A). Voor een willekeurige richting geldt:

$$|q| = \sqrt{q_x^2 + q_y^2} \quad (30)$$

$$|q| = \sqrt{\left(\frac{K_x}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{K_y}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y}\right)^2} \quad (31)$$

en omdat $K_x = K_y = K$:

$$|q| = K \frac{1}{\eta} \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)^2} \quad (32)$$

$$|q| = \frac{K}{\eta} |\nabla p| \quad (33)$$

Dus in elke richting heeft de specifieke volumestroom dezelfde grootte bij het hetzelfde drukverschil, dus het weefsel is isotroop.

4 Resultaten

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden een aantal gevallen beschouwd, waarvan simulaties uitgevoerd zijn.

Alle simulaties zijn uitgevoerd voor vulprocessen die isotherm zijn. Verder is de vloeistof niet-reagerend, en wordt gemodelleerd als Newtons met een constante viscositeit.

De simulaties worden vergeleken met analytische oplossingen en/of met uitgevoerde experimenten.

Indien nodig wordt het verloop van het vulproces toegelicht.

Bovendien worden eventuele verschillen tussen simulatie en experiment zo mogelijk verklaard.

Een van de aannamen die gemaakt zijn bij de afleiding van de vergelijkingen waarmee het vulproces gemodelleerd wordt, is dat de invloed van de wanden te verwaarlozen is. Voor deze specifieke gevallen zal deze aanname gecontroleerd worden. De aanname impliceert dat de stromingsweerstand a.g.v. de wanden veel kleiner is dan de stromingsweerstand a.g.v. het vezelpakket. In bijlage C is afgeleid dat voor een één-dimensionale stroming tussen twee parallelle platen geldt:

$$q_x = -\frac{h^2}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (34)$$

Voor de stroming door het vezelpakket geldt de wet van Darcy:

$$v_x = -\frac{K}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (35)$$

Vergelijken van de stromingsweerstand a.g.v. de wanden en de stromingsweerstand a.g.v. het vezelpakket betekent dus vergelijken van de termen K en $h^2/12$. Bij de beschreven gevallen wordt dit :

$$2.1 \cdot 10^{-9} \ll (2 \cdot 10^{-3})^2 / 12$$

$$2.1 \cdot 10^{-9} \ll 3.3 \cdot 10^{-7}$$

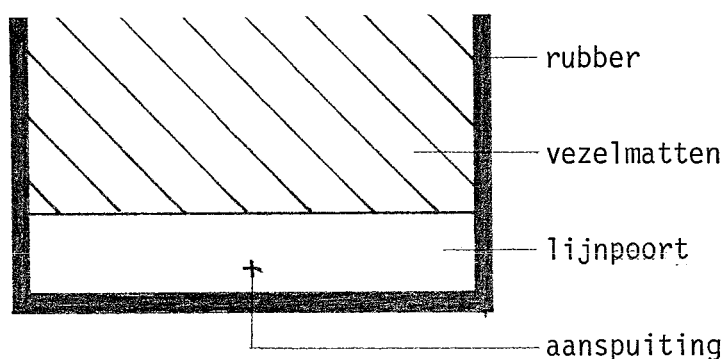
De weerstand a.g.v. de wanden is dus twee orden kleiner dan de weerstand a.g.v. het vezelpakket. De aanname is dus gerechtvaardigd.

4.2 Geval 1: één-dimensionale stroming

In deze paragraaf wordt de één-dimensionale stroming beschouwd zoals deze gebruikt is om de permeabiliteit te bepalen. In deze paragraaf wordt deze stroming echter als RTM-proces beschouwd, en voor de permeabiliteit wordt $2.0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ genomen.

De caviteit is rechthoekig met afmetingen 133 x 262 x 3 mm. De vezelmat is opgebouwd uit 3 lagen Unifilo 750. Het hoogteverschil tussen het wateroppervlak en het midden van de matrijs bedraagt 275.5 mm.

De lijnaanspuiting wordt gerealiseerd door de caviteit iets langer dan de vezelmatten te maken (zie figuur 4).

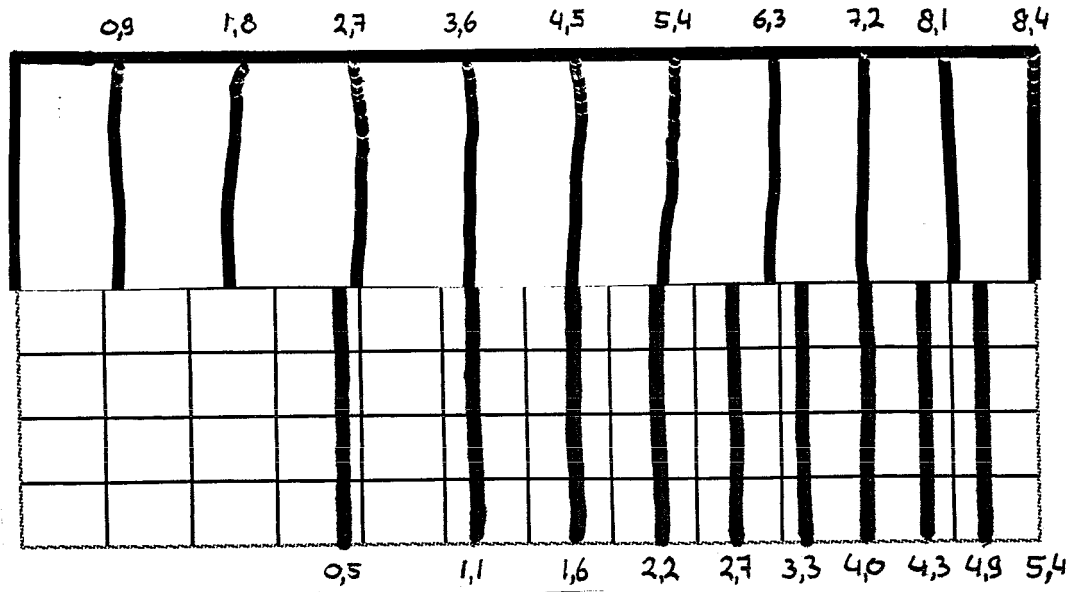


figuur 4: de lijnaanspuiting

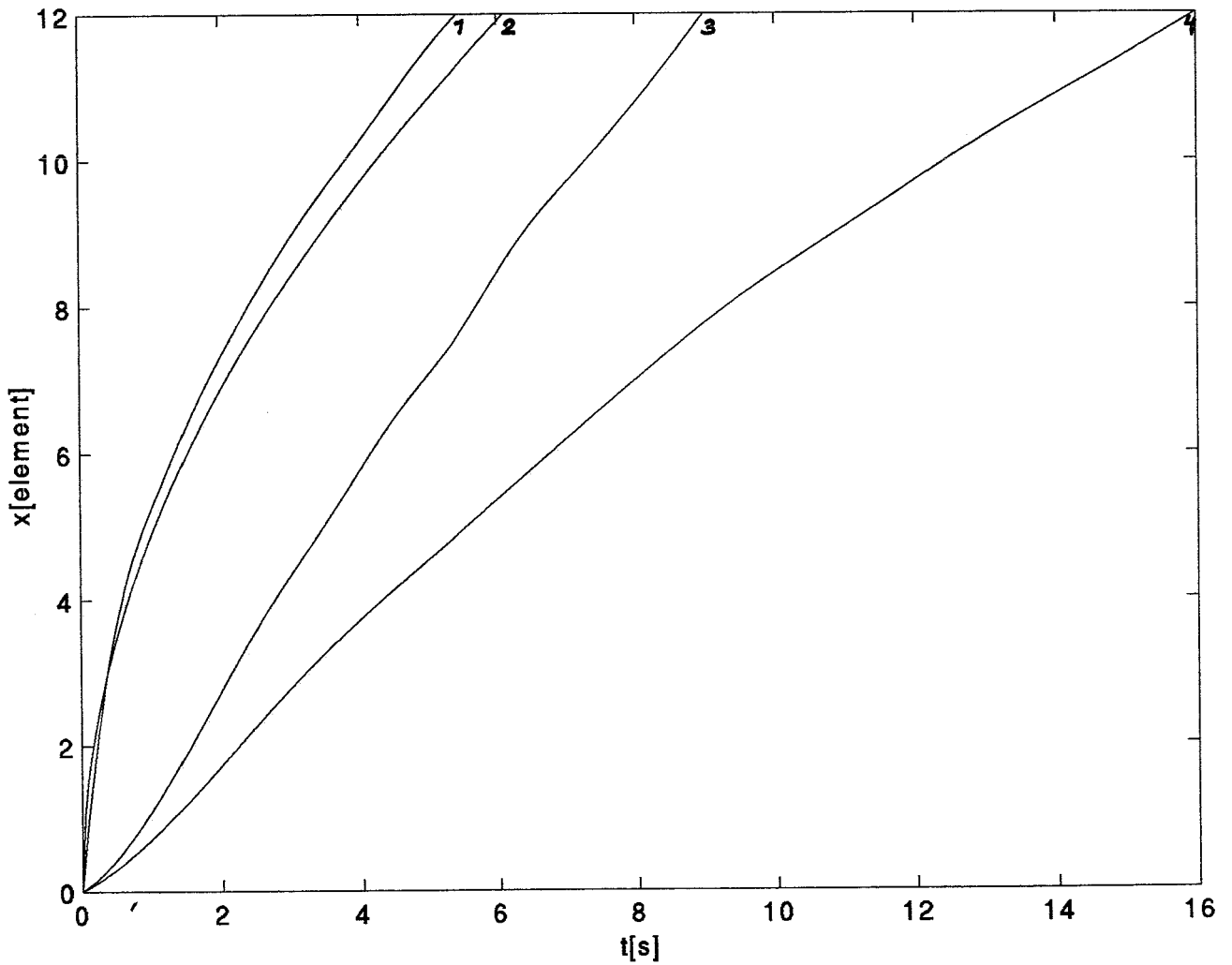
In dit "lege" stuk wordt de vloeistof langs een slang aangespoten. De vloeistof blijkt zich snel in het lege stuk (de lijn-poort) te verspreiden, zodat een benadering voor een lijnaanspuiting verkregen wordt. In het begin van het vulproces wordt een kleine fout gemaakt doordat dan op de plaats waar de slang het dichtst bij de matten zit, de vloeistof reeds in de vezelmat dringt terwijl de lijn-poort nog niet helemaal gevuld is. Dit verschijnsel is echter na 1 à 2 sec. al niet meer merkbaar, het front wordt dan zeer goed benaderd door een rechte lijn, zie figuur 5a. Dit geeft aan dat de weerstand a.g.v. de twee parallelle platen inderdaad kleiner is dan de weerstand van twee parallelle platen met de vezelmat erin.

N.B. Ook in de hierna volgende figuren is telkens het gedeelte met de mesh erin geplot het vloeifronten-plaatje van de simulatie, en het andere gedeelte van het experiment. De tijden die bij de vloeifronten staan zijn in seconden.

De resultaten zijn uitgezet in een grafiek van de verplaatsing (uitgedrukt in het element waar het front zich bevindt, de simulatie is uitgevoerd met 12 elementen in de lengterichting en 8 in de breedterichting) tegen de tijd, zie figuur 5b, lijn 3. Hierbij is door interpoleren een vloeiende lijn door de meetpunten berekend.



figuur 5a: vergelijking van de vloeifronten bij het experiment (boven) en bij de simulatie (onder) van één-dimensionale stroming



figuur 5b: verplaatsing bij één-dimensionale stroming;
 1: EEM Simulatie, 2: Analytische oplossing, 3: Experiment met $h=3\text{mm}$, 4: Experiment met $h=6\text{mm}$

De vultijd is bij het experiment 9 sec.

Bij de simulatie moet de vloeistofdruk aan de lijnpoort opgegeven worden. Het hoogteverschil is bij het experiment zoals vermeld 275.5 mm. Bij stilstaand water is het drukverschil dus :

$$\Delta p_p = \rho g h = 0.998 \cdot 10^3 * 9.8 * 275.5 \cdot 10^{-3} = 2695 \text{ Pa.}$$

Doordat het water stroomt treedt er echter drukverlies op in de slangen tussen het overloopvat en de aansluiting. Om hiermee rekening te kunnen houden met de invoer van het drukverschil in VIP is een schatting gemaakt van het drukverlies m.b.v. de wet van Hagen-Poiseuille (zie bijlage A, formule (A3)). Deze wet is om te schrijven tot:

$$\Delta p = \frac{8Q\eta L}{\pi R^4} \quad (36)$$

voor Q wordt de gemiddelde volumestroom genomen:

$$Q = \text{produktvolume} / \text{vultijd} = 1.05 \cdot 10^{-4} / 8.4 = 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

In het begin van het vulproces zal de werkelijke volumestroom groter zijn, en aan het eind kleiner; we nemen echter deze waarde als benadering.

Voor de viscositeit geldt:

$$\eta = 1.00 \cdot 10^{-3} \text{ Pa s}$$

L en R zijn de lengte en de straal van de betreffende buis.

Hiermee worden de drukvallen berekend:

$$\text{slang (L=30cm, R=7.5mm)} : \Delta p = 2.9 \text{ Pa}$$

$$\text{slang (L=10cm, R=3.0mm)} : \Delta p = 37.7 \text{ Pa}$$

$$\text{bus (L=3cm, R=1.5mm)} : \Delta p = 181.1 \text{ Pa}$$

$$\text{totaal} \quad \overline{\Delta p_{\text{verlies}}} = 222 \text{ Pa}$$

Voor de injectiedruk is dan ook ingevoerd:

$$p_i = \Delta p_p - \Delta p_{\text{verlies}} = 2473 \text{ Pa.}$$

Hierbij zijn drukverliezen a.g.v. diameter-sprongen verwaarloosd, alsook het drukverlies a.g.v. de stroming in de lijnpoort.

In figuur 5b is te zien dat de simulatie (lijn 1) goed overeenkomt met de analytische oplossing (lijn 2), zoals afgeleid in bijlage B. De vultijd is bij de simulatie 5.4 sec. en bij de analytische oplossing 6.1 sec. Hieruit blijkt dat de resultaten die met VIP verkregen worden in ieder geval zinvol kunnen zijn. Hier wordt nog opgemerkt dat de gevonden numerieke oplossing niet noemenswaardig verandert als meshverfijning en/of verkleining van de tijdstappen toegepast wordt. De discretisatie fout is dus voldoende klein.

Een grotere afwijking is te zien tussen het experiment (lijn 3) en de simulatie. De vultijd is bij het experiment 3 sec. groter dan bij de simulatie. De grote afwijking in het begin (de helling, een maat voor de frontsnelheid, is veel lager bij het experiment) is te verklaren door de wijze van aanspuiten. Eerst moet immers de lijnpoort gevuld worden tot in de uiterste hoeken van de "lege ruimte", hierdoor vindt er aan het front slechts weinig drukopbouw plaats, wat resulteert in een lage frontsnelheid (zie de wet van Darcy). Dit "tijdverlies" in het begin wordt uiteraard voortgeplant gedurende het gehele vul-proces. Het betreft echter slechts 1 tot 2 sec.; het vulproces zelf gaat dus ook iets langzamer bij het experiment dan bij de simulatie.

Wellicht komt de vultijd van de simulatie beter overeen met die van het experiment als er rekening wordt gehouden met het volume van de binder. Er wordt dan een lagere waarde voor de permeabiliteit ingevoerd in VIp (zie paragraaf 3.2), wat een langere vultijd tot gevolg heeft. Als de invloed van de permeabiliteit op de vultijd bij de simulatie net zo groot is als bij de analytische oplossing (omgekeerd evenredig, zie formule B10 in bijlage B), dan kan het verschil in vultijd inderdaad hierdoor overbrugd worden. Dit is hier niet nagegaan.

4.3 Geval 2: één-dimensionale stroming, 6 mm

Er is een dergelijk experiment als geval 1 uitgevoerd (zelfde afmetingen en hoogteverschil), met een caviteit die 6 mm hoog is. Theoretisch maakt dit voor het vulproces niets uit, de stroming is immers volkomen één-dimensionaal. De simulatie gaf dan ook hetzelfde vloeifronten-plaatje, en dezelfde vultijd.

Bij het experiment werd het moeilijk om het vezelpakket netjes in de matrijs te krijgen. Daarom is het vezelpakket preformed. Dit is gebeurd door eerst het pakket 1 minuut met een kracht van 30 kN bij een temperatuur van 65 °C samen te persen, en vervolgens onder dezelfde druk in een pers bij kamertemperatuur af te laten koelen.

Het resultaat is ook in figuur 5b uitgezet (lijn 4).

De vultijd is duidelijk langer dan verwacht.

Bij dit geval is de benodigde volumestroom 2 maal zo groot dan bij geval 1 (als dezelfde vultijd bereikt zou worden). Hierdoor is ook het drukverlies in de slangen 2 maal zo groot. De druk in de lijnpoort verandert hierdoor echter ongeveer 10 %, wat volgens formule (B10) in bijlage B ook een verschil in vultijd van 10 % als gevolg heeft. Het verschil in vultijd is echter veel groter, namelijk 16 sec. min 8.4 sec., dus bijna 100 %.

Wellicht wordt door het preformen de structuur van het vezelpakket enigszins gewijzigd, waardoor de permeabiliteit afneemt.

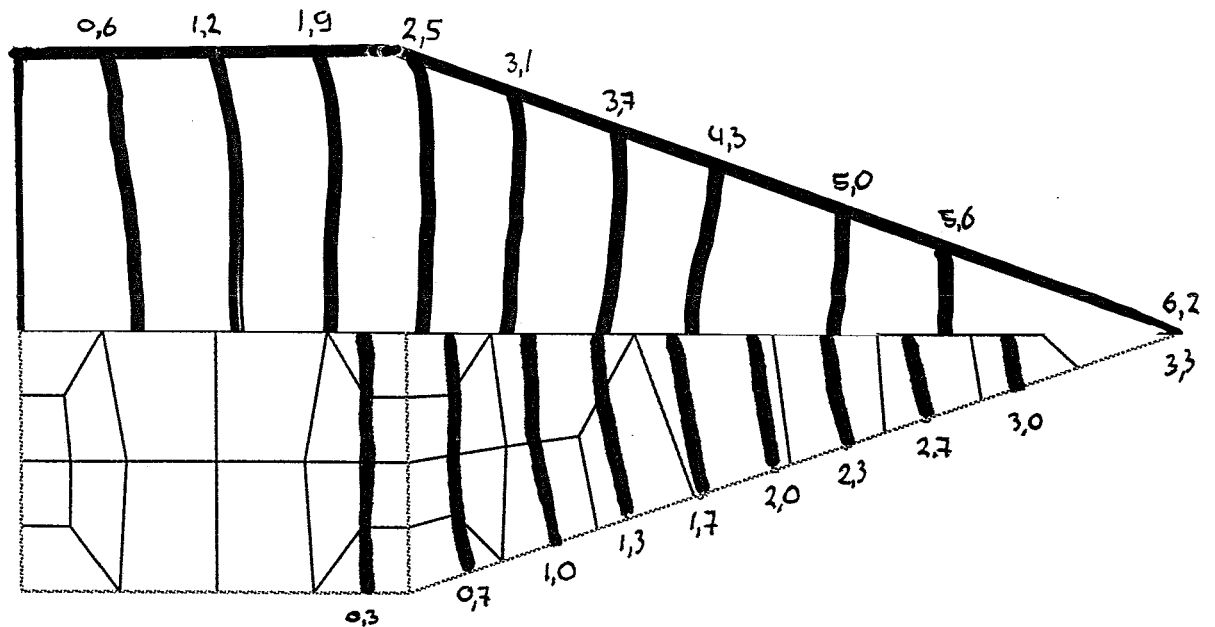
Opgemerkt wordt dat de dunne laag benadering nog steeds geldt. Dit is in te zien door in de afschattingen zoals in hoofdstuk 2 beschreven, als karakteristieke waarde voor de matrijsdikte $H=10^{-2}$ m i.p.v. $H=10^{-3}$ m in te voeren.

4.4 Geval 3: pijl

Vervolgens wordt een pijl-vormige caviteit beschouwd. Dit geval illustreert hoe het proces verloopt bij vernauwende kanalen.

De breedte is 110 mm, het rechthoekige deel is 82 mm lang, en het toelopende deel 162 mm, de dikte is overal 3mm. Het drukverschil tussen de vloeistof in de lijn poort en de atmosferische druk is 1540 Pa, waarbij al rekening gehouden is met de drukverliezen op de manier zoals in 4.3. Ook bij de drukverschillen die hierna genoemd worden zal het drukverlies al in rekening gebracht zijn. Er zijn 3 lagen Unifilo 750 (mat A) gebruikt. Ook bij de andere gevallen is dit zo, tenzij anders vermeld. In figuur 6 is te zien dat in het toelopende deel de verplaatsingen tussen twee even grote tijdstappen niet afnemen, zoals bij geval 1, maar ongeveer gelijk blijven.

In figuur 6 is ook te zien dat bij het experiment de frontsnelheid in het begin kleiner is dan bij de simulatie; het kost 3 tijdstappen om het rechthoekige deel te vullen bij het experiment en 1 bij de simulatie. Dit is weer te verklaren met de geringe drukopbouw aan het front als de lijn poort nog niet gevuld is gedurende 1 tot 2 sec. Ook is de werkelijke vultijd weer langer dan de vultijd bij de simulatie.

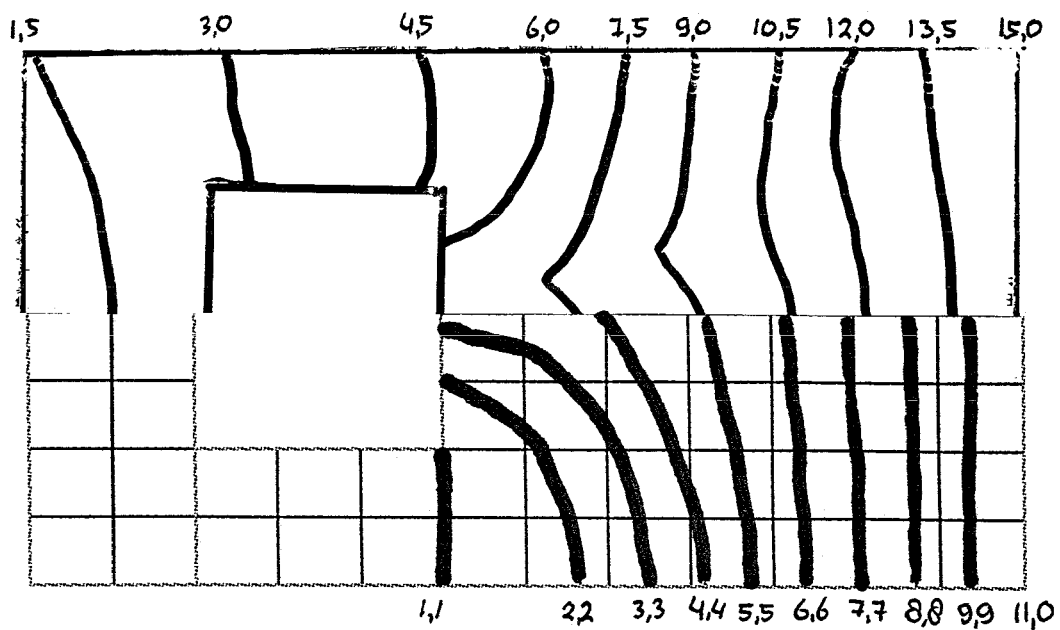


figuur 6: vloeifronten bij pijl

4.5 Geval 4: plaat met gat

Het volgende geval is een plaat (170 x 312 mm) met een ondoordringbaar gat erin. Het is een voorbeeld dat representatief is voor RTM processen waarbij ter versterking massieve voorwerpen in de matrijs aangebracht worden. Een voorbeeld hiervan is een auto-bumper waar een houten lat in verwerkt wordt. Deze voorwerpen beïnvloeden de stroming, waardoor vloeinaden of zelfs luchtinsluitels kunnen ontstaan. Dit geval toont aldus de mogelijkheid om deze verschijnselen te voorspellen.

Het drukverschil is 2400 Pa.

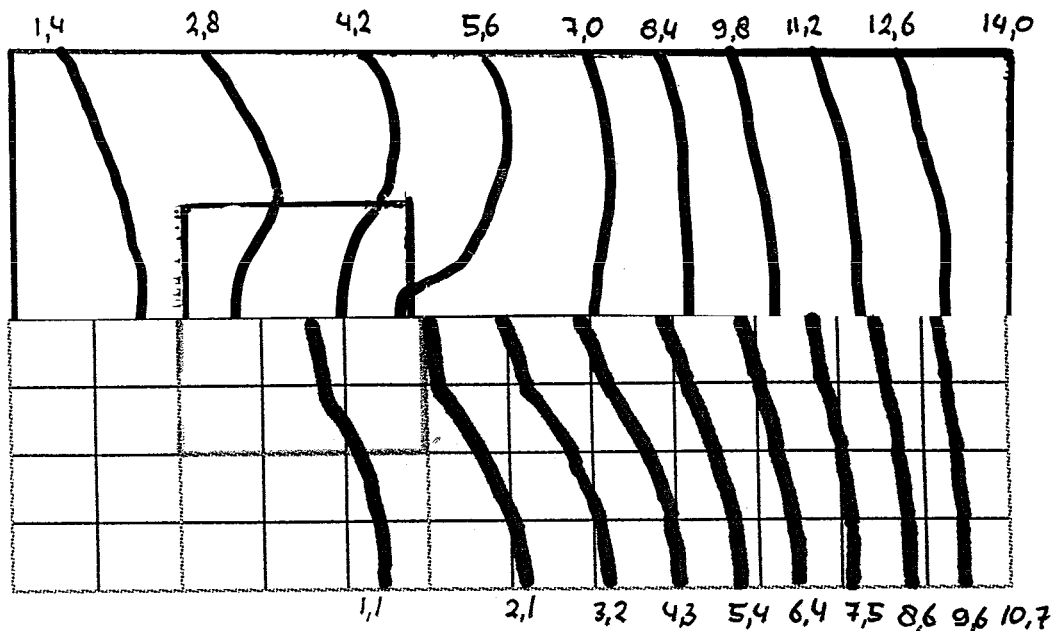


figuur 7: vloeifronten bij plaat met gat

In figuur 7 is te zien dat de simulatie een vloeinaad voorspelt in het midden van de matrijs achter het gat, en dat deze bij het experiment ook optreedt.

4.6 Geval 5: plaat met weefsel

In dit geval is i.p.v. het gat bij geval 4, nu het weefsel C geplaatst in een uitgeknipt vierkant in de continue glasmat. In de praktijk kunnen permeabiliteitsvariaties in het vlak worden aangebracht om extra sterkte te krijgen, bijvoorbeeld bij bevestigingspunten. Als niet genoeg sterkte kan worden verkregen door meer lagen van het zelfde type op de betreffende plaatsen te gebruiken, kan men een ander materiaal gebruiken, bijvoorbeeld een weefsel, waar grotere vezelvolumefracties mee te halen zijn dan met continue glasmat. Ook kunnen permeabiliteitsvariaties in het vlak veroorzaakt worden door inhomogeniteiten van de vezelmat (meer of minder vezels op een bepaalde plek). De afmetingen en het drukverschil zijn hetzelfde als bij geval 4.



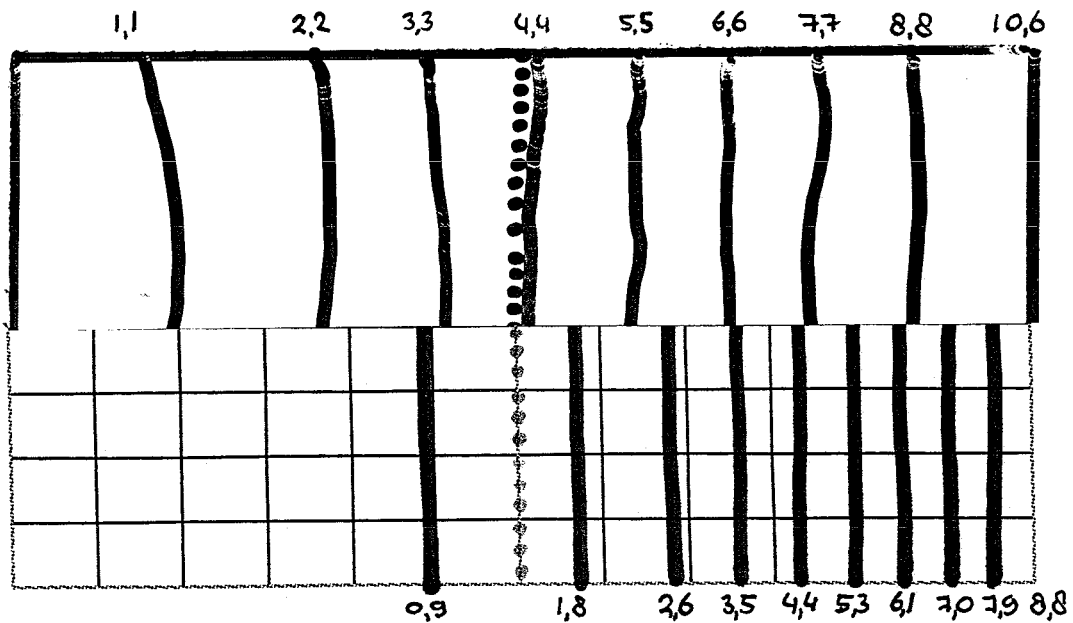
figuur 8: vloeifronten bij plaat met weefsel

Uit figuur 8 blijkt dat zowel bij het experiment als bij de simulatie het weefsel de stroming niet genoeg afremt om een luchtinluitsel te laten ontstaan.

4.7 Geval 6: twee continue glasmatten

In dit geval is de eerste helft van de matrijs (afmetingen en drukverschil zoals bij geval 1) gevuld met glasmatten A, en de tweede helft met glasmatten B.

De optredende verschijnselen zijn volgens verwachting: als de vloeistof in mat B aankomt, die een lagere permeabiliteit heeft, ondervindt deze een grotere weerstand dan wanneer de gehele matrijs met mat A gevuld zou zijn. Dit uit zich in vloeifronten die dichter bij elkaar lopen (dan het verloop volgens een wortelfunctie die bij mat A hoort), zie figuur 9 en vergelijk met figuur 5. Verder is er in het begin weer tijdverlies, en is de vultijd bij de simulatie iets kleiner dan bij het experiment.

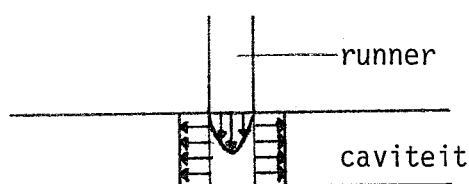


figuur 9: vloeifronten bij twee continue glasmatten

4.8 Geval 7: puntbron

Als grote produkten met RTM vervaardigd moeten worden, gebruikt men vaak een puntaanspuiting in het midden van de matrijs. Hierdoor worden de afstanden die de hars moet afleggen kleiner, en dus ook de benodigde drukken. Ook worden de krachten in de sluitpers beter gecentreerd.

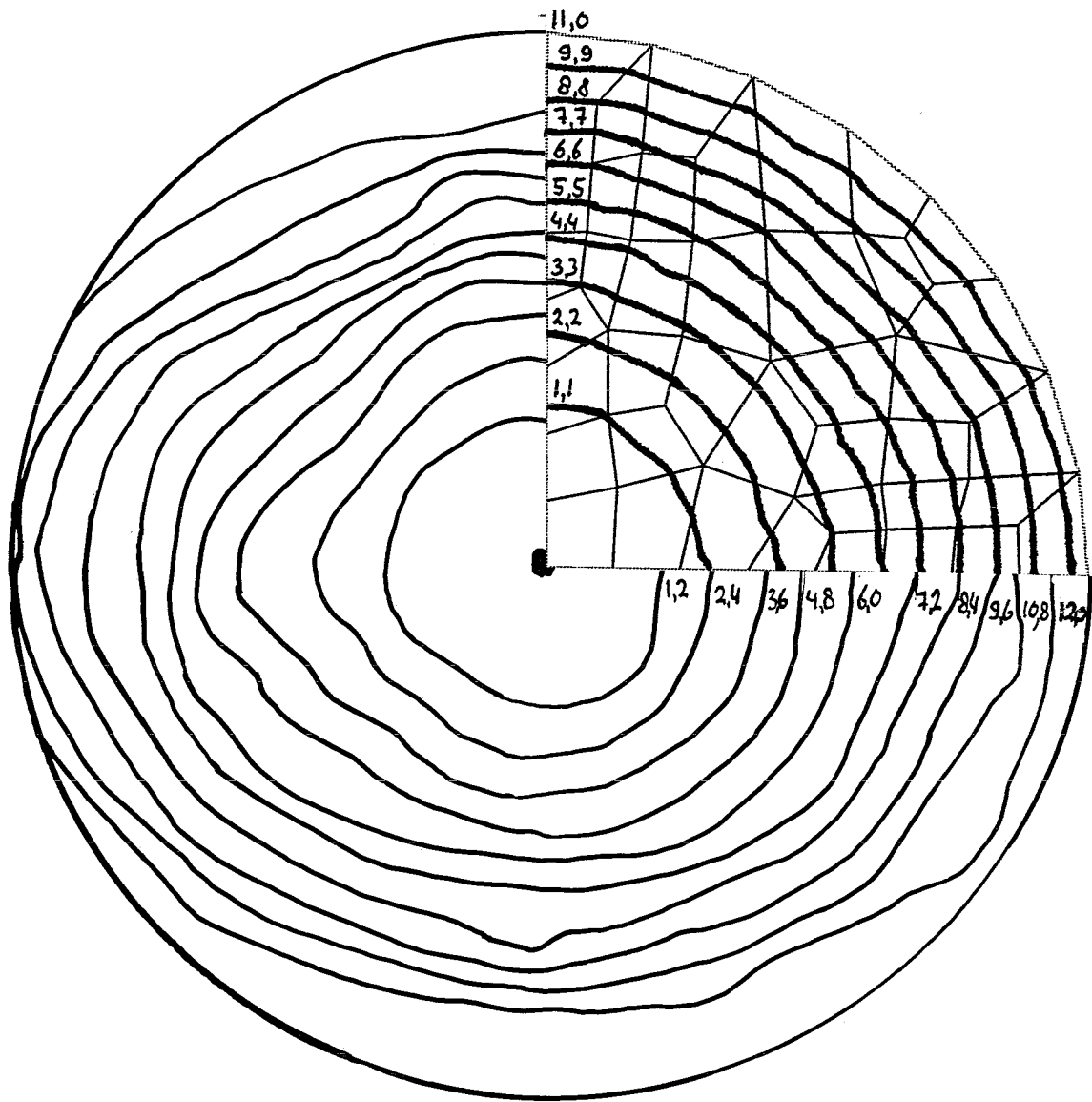
Bij het gebruik van een puntaanspuiting i.p.v. een lijnaanspuiting moet de hars echter niet alleen in het vlak stromen, maar ook loodrecht erop om door de matten te dringen en de matrijs te vullen. Dit kan opgevangen worden door onder de aanspuiting een gaatje in de vezelmat te knippen, zodat sprake is van een "cilinder-aanspuiting". De permeabiliteit loodrecht op het vlak van continue glasmat is echter veel groter dan die in het vlak. De weerstand die de vloeistof ondervindt bij stroming loodrecht op het vlak is daarom veel kleiner dan bij stroming in het vlak. Daarom hoeft geen gaatje onder de aanspuiting geknipt te worden, en kan de stroming nog steeds als 2 dimensionaal beschouwd worden. In VIp wordt dit overigens ook gedaan; de snelheden op het einde van de runner worden omgezet naar snelheden in het vlak, zie figuur 10. Hier wordt nog opgemerkt dat het voorgaande geldt voor continue glasmat, maar niet voor vezelmatten die opgebouwd zijn uit combinaties van continue glasmat en weefsels, hierbij speelt de weerstand loodrecht op het vlak wel degelijk een rol, zie [Young et al].



figuur 10: omzetting van snelheden bij bereiken caviteit in VIp

In dit geval wordt een matrijs vanuit het midden aangespoten met een runner. Verwacht wordt dat de vloeifronten concentrische cirkels om de puntbron zijn. Bij het experiment traden echter ellips-vormige vloeifronten op (zie het 3/4 deel van figuur 11, de cirkel heeft een straal van 12 cm en het drukverschil is 2400 Pa).

Het lijkt erop dat de glasmaten anisotroop zijn. Om dit te controleren zijn de matten voor een tweede experiment uit de andere richting (90° gedraaid) van de rol geknipt. Hierbij ontstond vrijwel hetzelfde beeld, waaruit geconcludeerd moet worden dat de matten wel isotroop zijn. De oorzaak van de ellips-vormige vloeifronten ligt dan ook niet bij de matten, maar bij de matrijs. Bij dit experiment is de matrijs namelijk



figuur 11: vloeifronten bij puntbron

alleen aan de lange zijden dichtgeklemd (bouten aan de korte zijden hebben weinig zin omdat de afstand van de vezelmatten, die in het midden van de matrijs liggen, tot de bouten vrij groot is). Hierdoor buigt de matrijs door langs een as in de lengterichting van de platen. Deze doorbuiging was ca. 2.5 mm bij een caviteit-hoogte aan de rand van 3 mm. Er is een simulatie uitgevoerd, waarbij voor de caviteit hoogte een parabolisch verloop aangenomen is:

$$h = -0.173611 \cdot x^2 + 5.5 \cdot 10^{-3}$$

de hoogte in het midden is dus 5.5 mm (de x-richting is de richting loodrecht op de zijden waar de matrijs dichtgeklemd is).

Deze simulatie geeft inderdaad elliptische vloeifronten te zien, zij het in mindere mate dan het experiment (zie het 1/4 deel van figuur 10).

De stroming in de y-richting zal lijken op de stroming in een caviteit met constante hoogte, terwijl de stroming in de x-richting zal lijken op een stroming in een caviteit waarvan de hoogte kwadratisch met de straal r afneemt, en de permeabiliteit ook zal afnemen bij toenemende r (zie de Kozeny-Carman relatie (A2a) in bijlage A; omdat de hoogte afneemt met r , en de hoeveelheid vezels in de matrijs gelijk blijft, neemt de porositeit ϕ af met r , dus ook de permeabiliteit). Om het verschijnsel van de elliptische vloeifronten duidelijker te maken zou men van deze twee stromingen de analytische oplossing kunnen bepalen. Voor de stroming met verlopende permeabiliteit is dit echter niet eenvoudig. Een meer kwalitatieve analyse is beter mogelijk. Beschouw een matrijs die vanuit een cirkelvormige opening met straal r_i geïnjecteerd wordt met een bepaalde hoeveelheid vloeistof per tijdseenheid. Diezelfde hoeveelheid vloeistof moet op een bepaald moment stromen door de cilinder aan het front met straal r_F . Voor een matrijs met constante hoogte geldt dus:

$$2\pi r_i v_i = 2\pi r_F v_F$$

$$v_F = r_i / r_F v_i$$

Voor een matrijs met verlopende hoogte (axisymmetrisch) geldt:

$$2\pi r_i h_i v_i = 2\pi r_F h_F v_F$$

$$v_F = r_i h_i / r_F h_F v_i$$

Als $h_F < h_i$ dan stroomt de vloeistof bij de verlopende matrijs aan het front dus sneller dan bij de matrijs met constante hoogte.

Er is ook een ander effect, a.g.v. de verlaagde permeabiliteit. De wet van Darcy ziet er voor axisymmetrische stroming als volgt uit:

$$v = - \frac{K}{\eta} \frac{dp}{dr} \quad (37)$$

Bij de matrijs met verlopende hoogte zijn de door een drukverschil geïnduceerde snelheden dus kleiner, dus ook de frontsnelheid.

Uit het experiment volgt dat het eerste effect het tweede overheerst.

In figuur 11 is te zien dat er bij dit geval geen tijdverlies in het begin optreedt. Dit is een argument, dat het genoemde tijdverlies een gevolg is van het vullen van de lijn poort, bij dit geval is er immers geen lijn poort.

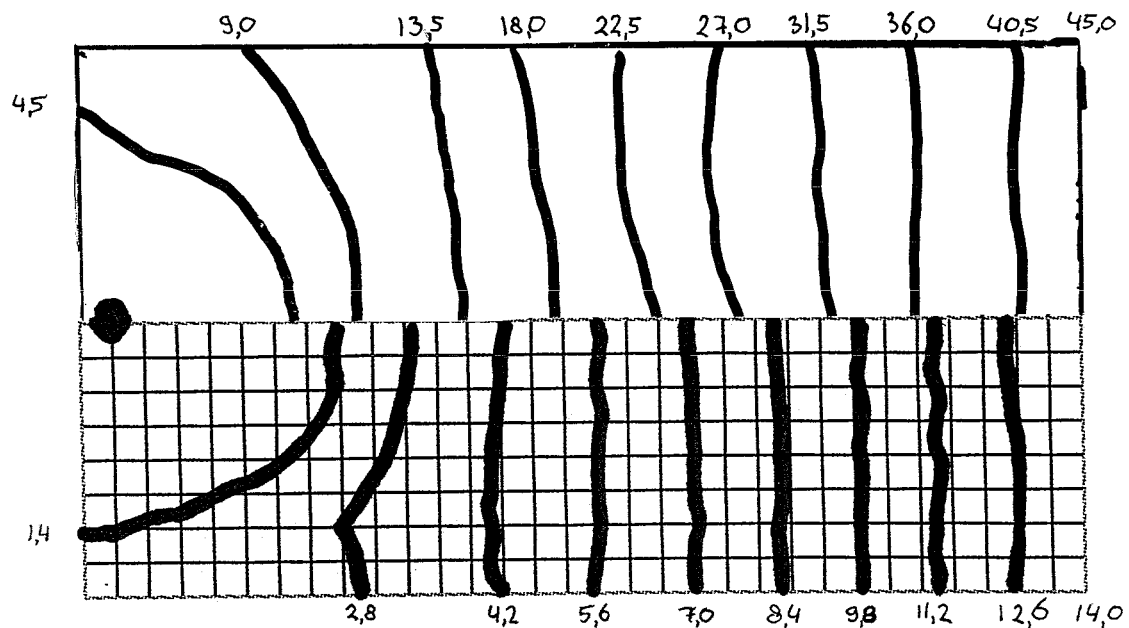
4.9 Geval 8: plaat met puntaanspuiting

Het verschil van dit geval met het vorige is, dat de vloeistof nu wordt gestopt op plaatsen waar het de wand tegenkomt.

De plaat heeft de afmetingen 170 x 311 x 3 mm, en het drukverschil is 1695 Pa.

In figuur 12 is te zien dat er geen extra tijdverlies in het begin optreedt, maar bij alle vloeifronten zijn de bijbehorende tijden bij het experiment ongeveer 3 keer groter zijn dan bij de simulatie.

Het verschil in vultijd is veel groter dan bij voorgaande gevallen. Hier wordt bij geval 11 op terug gekomen.



figuur 12: vloeifronten bij plaat met puntaanspuiting

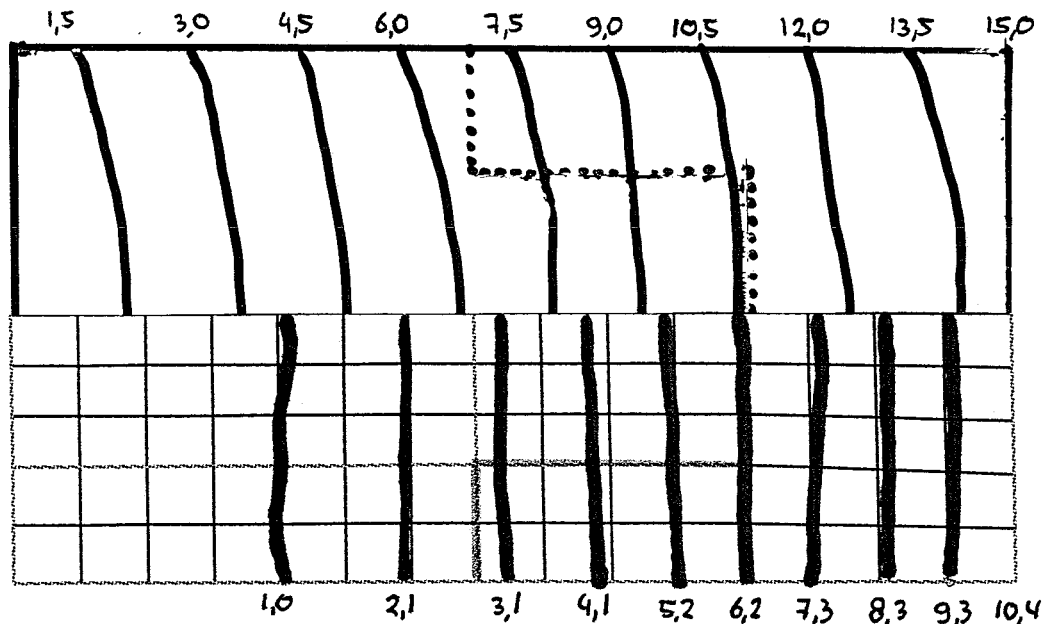
4.10 Geval 9: plaat met hoogteverschil

In de praktijk worden vaak producten gemaakt met verschillende wand dikte.

Dit geval is een plaat (189 x 354 mm, drukverschil 2405 Pa) die aan de bovenkant vlak is, en aan de onderkant een uitsparing van 1 mm heeft. Bij het experiment is dit bewerkstelligd door een plaatje in de matrijs te leggen. In figuur 12 is de overgang gestippeld, rechts hiervan is de caviteit 2 mm hoog, en links hiervan 3 mm. In het gebied van 2 mm zijn ook slechts 2 lagen vezels aangebracht, zodat de porositeit en de permeabiliteit in het gehele gebied gelijk zijn.

Zoals bij geval 7 is vermeld, zal als gevolg van de vernauwing de frontsnelheid moeten toenemen. Er is nu geen tegenwerkend effect van een hogere stromingsweerstand, de permeabiliteit is nu immers gelijk, en de wand heeft een verwaarloosbare invloed.

Zowel bij de simulatie als bij het experiment is slechts moeilijk te zien dat de frontsnelheid toe neemt: in het stuk waar alleen aan de randen de hoogte 2 mm is loopt het front iets voor t.o.v. het gebied waar de hoogte 3 mm is. In het stuk waar de hoogte over de gehele breedte 2 mm is, is de frontsnelheid iets hoger dan bij het geval dat de hele matrijs 3 mm is.

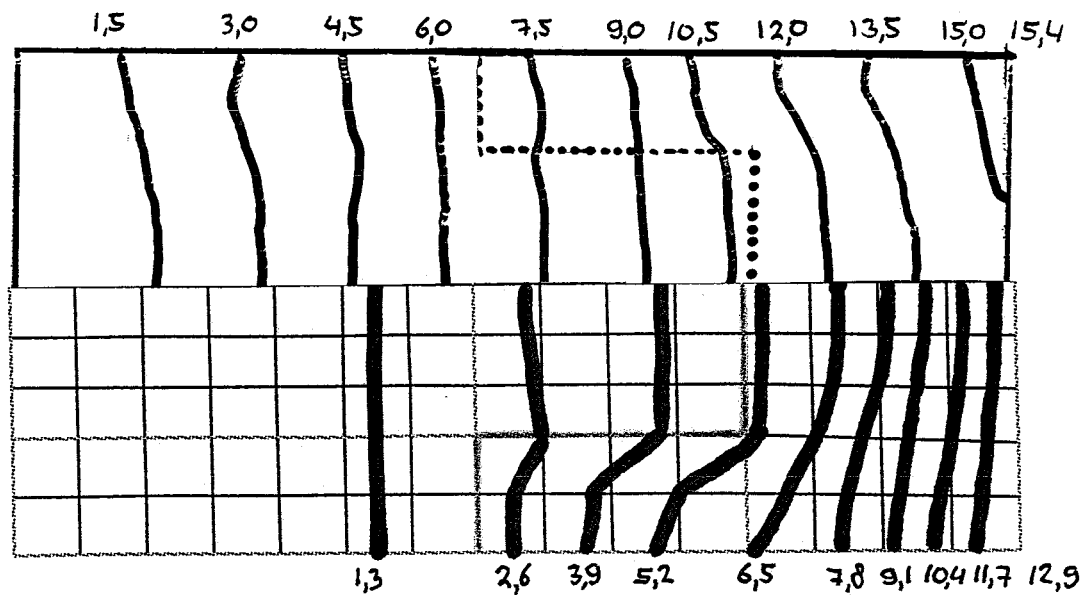


figuur 13: vloeifronten bij plaat met hoogteverschil

4.11 Geval 10: plaat met hoogte- en porositeit-verschil

Dit geval is zoals geval 9, met het verschil dat nu in het dunne stuk ook 3 lagen vezelmat zijn aangebracht. De vezelvolumefractie is in het dunne gebied nu dus 3/2 maal groter dan in het dikke gebied. Met behulp van tabel 1 is de permeabiliteit van de mat in het dunne gebied bepaald: $K = 0.31 \cdot 10^{-9}$. Bij dit geval neemt de stromingsweerstand in het dunne gebied dus toe.

Zowel bij de simulatie als bij het experiment is te zien dat de stroomsnelheid inderdaad afneemt, zij het bij het experiment minder duidelijk dan bij de simulatie, zie figuur 14.

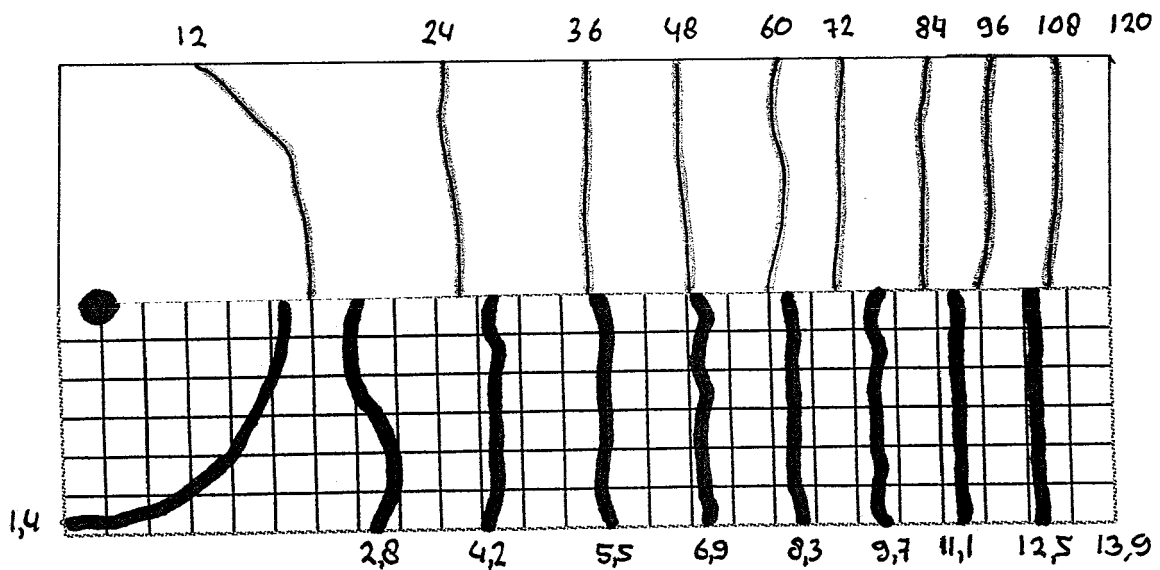


figuur 14: vloeifronten bij plaat met hoogte- en porositeit-verschil

4.12 Geval 11: plaat met puntaanspuiting, 6 mm

De matrijs is net zoals bij geval 8, alleen de hoogte is nu 6 mm. Het vezelpakket is, net zoals bij geval 2, preformed.

Nu is de vultijd bij het experiment wel extreem veel langer dan bij de simulatie: 120 sec. tegen 14 sec., zie figuur 15.



figuur 15: vloeifronten bij plaat met puntaanspuiting, 6mm

Dit grote verschil is niet goed te verklaren, het verschil is te groot om door het preformen veroorzaakt te kunnen worden. Bij het openen van de matrijs blijkt een andere mogelijke oorzaak: onder de runner hebben zich deeltjes (kleine stukjes glasvezel en niet opgeloste kleurstofdeeltjes) opgehoopt. Dit zorgt voor een extra weerstand voor de vloeistof. Mogelijk was dit ook de oorzaak voor de lange vultijd bij het experiment van geval 8. Bij geval 7 trad dit blijkbaar niet op. Dit kan verklaard worden met de grote doorbuiging van de matrijs ter plekke van de punt aanspuiting, hierdoor is de vezelmat op die plaats minder gepakt, waardoor de vloeistof makkelijker de matrijs binnen kan dringen.

5 Conclusies en aanbevelingen

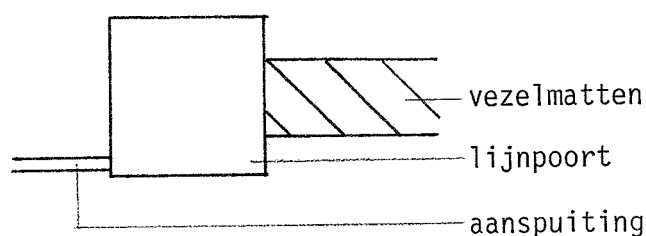
In deze stage is een globale validatie van VIP gemaakt.

De vloeifronten worden bij de beschouwde gevallen goed voorspeld door de numerieke simulaties met VIP. Vloeinaden en luchtinsluitsels kunnen hierdoor voorspeld worden. Het pakket kan dus gebruikt worden om de plaats van aanspuitingen en ontluchtingen te optimaliseren bij het matrijsontwerp in de praktijk.

Afgezien van gevallen waarbij een rechthoekige matrijs met een runner van de bovenkant van de matrijs aangespoten wordt, zijn de voorspellingen van de vultijden redelijk, al zijn ze (bij de beschouwde gevallen) kleiner dan de werkelijke vultijden.

Waarschijnlijk worden de verschillen tussen experiment en simulatie niet veroorzaakt doordat VIP geen goede resultaten geeft. De afwijkingen zullen een gevolg zijn van verschillen in proces condities.

Zo wordt een deel van het verschil in vultijd bij de gevallen met een lijnaanspuiting veroorzaakt door de uitvoeringsvorm van de lijnpoort (zie geval 1 t/m 6). Wellicht kan dit verholpen worden met een andere uitvoeringsvorm. In de literatuur vindt men wel het volgende concept (figuur 16):



figuur 16: andere uitvoeringsvorm lijnpoort

Verschillen kunnen echter ook veroorzaakt worden door onjuiste invoerparameters voor VIP. Zoals bij geval 1 reeds is opgemerkt zal de ingevoerde porositeit en permeabiliteit niet exact zijn vanwege de afwijkende dichtheid van de binder en daardoor ook een onjuiste vezelvolumefractie. Om dit te vermijden moet het percentage binder in de vezelmat en de dichtheid hiervan bekend zijn.

Een andere invoerparameter waarin onvolkomenheden zitten is de injectiedruk. Zoals bij geval 1 opgemerkt is, varieert deze tijdens het vulproces doordat het drukverlies niet constant is a.g.v. de variërende volumestroom door de slangen. Het juiste drukverloop zou verkregen kunnen worden door tijdens het experiment de druk bij de aanspuiting te meten. Hiervoor moet echter eerst het experiment gedaan worden alvorens de simulatie uitgevoerd kan worden. Bij het ontwerpen van een matrijs m.b.v. VIP is dit onuitvoerbaar.

Om de proces condities bij simulatie en experiment gelijk te maken kan wel gebruik gemaakt worden van constante-volume- stroom-aanspuiting.

Bij geval 2 leek de structuur en daarmee de permeabiliteit van het vezelpakket te veranderen door preformen. Deze hypothese kan getoetst worden door een experiment te doen met een één-dimensionale stroming met een matrijs dikte van 3 mm en de matten preformed. Het resultaat kan dan vergeleken worden met geval 1. Zonodig kan dan de permeabiliteit van het preformed vezelpakket bepaald worden t.b.v. invoer bij de simulatie.

Tot slot nog de aanbeveling te zorgen dat de te injecteren vloeistof een zuivere oplossing is.

Om een gedetailleerdere validatie mogelijk te maken moeten in ieder geval bovenstaande aanbevelingen opgevolgd worden.

Bijlage A

De wet van Darcy

De wet van Darcy is een empirische wet die het verband beschrijft tussen de volumestroom en het drukverschil bij een één-dimensionale stroming van een vloeistof door een poreus medium :

$$Q = CA \frac{\Delta P}{L} \quad (\text{A1})$$

hierin is Q de volumestroom, A de oppervlakte van de dwarsdoorsnede loodrecht op de stromingsrichting, Δp de drukval en L de lengte van het beschouwde poreuze medium. De constante C wordt de transportcoëfficiënt genoemd, en is afhankelijk van zowel het poreuze medium als van de vloeistof. De constante C kan geschreven worden als :

$$C = \frac{K}{\eta} \quad (\text{A2})$$

hierin is η de dynamische viscositeit van de vloeistof en K de permeabiliteit van het poreuze medium, die afhankelijk is van de structuur van de poriën in het medium. De Kozeny-Carman relatie geeft het verband tussen de permeabiliteit en de porositeit en het zgn. specifieke bevochtigde oppervlak per eenheid vast volume:

$$K = \frac{\phi^3}{k_c S^2 (1-\phi)^2} \quad (\text{A2a})$$

Hierin is k_c de zgn. Kozeny constante, ϕ de porositeit van het poreuze medium dit is de verhouding tussen poriën volume en totaal volume en S het specifieke bevochtigde oppervlak per eenheid vast volume.

Merk op dat de wet van Darcy in bovenstaande vorm analoog is aan de wet van Hagen-Poiseuille. Deze beschrijft het verband tussen de volumestroom door een cilindrische buis en het drukverschil over de lengte van de buis :

$$Q = \frac{R^2}{8\eta} A \frac{\Delta P}{L} \quad (\text{A3})$$

hierin is R de binnenstraal van de buis.

Vaak wordt de wet van Darcy in differentiaalvorm geschreven, deze geeft een meer gedetailleerde informatie over de stroming, in één dimensie wordt dit :

$$q = - \frac{K}{\eta} \frac{dp}{dx} \quad (\text{A4})$$

Het min-teken is een gevolg van de definitie van $\Delta p = p_2 - p_1$, wat een negatieve grootte is. De grootte $q = Q/A$ is de specifieke volumestroom. Deze heeft de dimensie van snelheid en wordt ook wel de filtersnelheid v genoemd, deze notatie zal in het vervolg gebruikt

worden. Deze is gekoppeld met de gemiddelde werkelijke vloeistofsnelheid v_r middels een massabalans :

$$vA_{tot}\rho = v_r A_{void}\rho$$

De porositeit ϕ is gedefinieerd als de volumefractie van het poreuze medium dat wordt ingenomen door poriën :

$$\phi = \frac{V_{void}}{V_{tot}} \quad (\text{A5})$$

Als aangenomen wordt dat de porositeit hetzelfde is in termen van de verhouding dan de oppervlakten, dan kan het verband tussen de filtersnelheid en de werkelijke vloeistofsnelheid als volgt geschreven worden :

$$v = \frac{A_{void}}{A_{tot}} v_r = \phi v_r \quad (\text{A6})$$

De wet van Darcy kan uitgebreid worden naar drie dimensies. Hiertoe wordt eerst een homogeen isotroop poreus medium beschouwd. Introduceer een willekeurige orthogonale carthesische basis van eenheidsvectoren \underline{e}_x , \underline{e}_y , \underline{e}_z . De filtersnelheid \underline{v} is een vectoriële grootheid met ontbondenen \underline{v}_x , \underline{v}_y en \underline{v}_z . De wet van Darcy geldt dan voor de ontbondenen van \underline{v} in de vorm :

$$\underline{v}_x = -\frac{K}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \underline{e}_x \quad (\text{A7})$$

$$\underline{v}_y = -\frac{K}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \underline{e}_y \quad (\text{A8})$$

$$\underline{v}_z = -\frac{K}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \underline{e}_z \quad (\text{A9})$$

Vanwege de isotropie wordt \underline{q}_x dus niet beïnvloedt door de drukgradiënten $\partial p/\partial y$ en $\partial p/\partial z$, enzovoort.

Bovenstaand stelsel vergelijkingen kan in vectornotatie gerepresenteerd worden :

$$\underline{v} = -\frac{K}{\eta} \nabla p \quad (\text{A10})$$

hierin is K de permeabiliteit, richtingsonafhankelijk verondersteld.

Voor homogene anisotrope poreuze media is de permeabiliteit richtingsafhankelijk. In dat geval is component \underline{v}_x van de filtersnelheid wel afhankelijk van de drukgradiënten $\partial p/\partial y$ en $\partial p/\partial z$, enzovoort. Gewoonlijk wordt aangenomen dat de permeabiliteit een tweede-orde tensor is en \underline{v} beschreven wordt door :

$$\underline{v} = -\frac{\mathbf{K}}{\eta} \cdot \nabla p \quad (\text{A11})$$

De permeabiliteitstensor \mathbf{K} kan uitgeschreven worden t.o.v. de basis $\underline{e}_x, \underline{e}_y, \underline{e}_z$, zodat de permeabiliteitsmatrix wordt :

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix}$$

Men gaat er gewoonlijk van uit dat deze matrix symmetrisch is, d.w.z. $K_{yx}=K_{xy}$, $K_{zx}=K_{xz}$, $K_{zy}=K_{yz}$. Vezelmatten zijn vaak orthotroop, dat wil zeggen dat er materiaal symmetrie bestaat t.o.v. drie onderling loodrechte vlakken. De drie snijlijnen van de symmetrievlakken zijn de hoofdrichtingen van het materiaal. Als nu de eenheidsrichtingsvectoren in deze hoofdrichtingen gekozen worden, dan hangt \underline{v} niet af van $\partial p/\partial y$ en $\partial p/\partial z$, enzovoort, dus alle kruistermen zijn nul, zodat alleen de diagonaalelementen van \mathbf{K} ongelijk aan nul zijn. Als de eenheidsrichtingsvectoren niet in de hoofdrichtingen liggen, dan kan \mathbf{K} t.o.v. de hoofdrichtingen eenvoudig bepaald worden en vervolgens getransformeerd naar de eenheidsrichtingsvectoren. Voor inhomogene anisotrope poreuze media geldt ook de wet van Darcy in de vorm (A11), hierin is dan echter de permeabiliteit \mathbf{K} plaatsafhankelijk.

In [Greenkorn] is aangetoond dat de wet van Darcy het empirische equivalent is van de Navier-Stokes vergelijking (de lokale impulsbehoudwet). Hierbij worden de traagheidskrachten verwaarloosd, m.a.w. er wordt aangenomen dat het Reynolds getal, wat de verhouding van traagheidskrachten en visceuze krachten weergeeft, klein is. De wet van Darcy wordt dan ook geldig beschouwd voor stromingen door poreuze media met kleine Reynolds getallen, zgn. kruipstromingen, zoals de harsstroming bij RTM. Kruipstromingen worden gekenmerkt door lage snelheden en een hoge viscositeit.

Bijlage B

Analytische oplossing van een één-dimensionale stroming

Als aangenomen wordt dat het vulproces isotherm is en de vloeistof niet reageert tijdens de insputting, dan kan het vulproces beschreven worden met de continuïteitsvergelijking en de wet van Darcy. Als verder aangenomen wordt dat de matrijs star is, de vloeistof incompressibel, en de stroming één-dimensionaal is, dan is het probleem relatief eenvoudig analytisch op te lossen.

Beschouwd wordt een matrijs met een rechthoekige caviteit met lengte L en met constante hoogte. De injectie van de hars geschiedt vanuit een smalle zijde over de gehele breedte, met een injectiedruk p_i . In de nog niet met hars gevulde produktruimte heerst een atmosferische druk p_0 . De stroming zal zodanig verlopen, dat het front zich als een rechte lijn naar de tegenoverliggende zijde zal verplaatsen, zodat het stromingsprobleem als één-dimensionaal kan worden opgevat. Neem een x -as evenwijdig aan de lange zijde, met de oorsprong op de plaats van injectie.

De wet van Darcy kan voor dit geval geschreven worden als:

$$v = -\frac{K}{\eta} \frac{dp}{dx} \quad (\text{B1})$$

Omdat permeabiliteit K en viscositeit η constant zijn, en uit continuïteitsoverwegingen (er hoopt zich geen vloeistof op en er lekt geen vloeistof) evenzo de specifieke volumestroom, moet de drukgradiënt op een bepaald tijdstip voor alle waarden van x tussen 0 (injectiepunt) en coördinaat x_f van het front gelijk. Dit kan ook in formule vorm getoond worden: Er wordt gebruik gemaakt van de continuïteitsvergelijking voor een incompressibel medium en een stationaire stroming (hier wordt de aanname dat de matrijs star is gebruikt):

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (\text{B2})$$

De wet van Darcy (B1) wordt hierin gesubstitueerd. Voor 1D levert dit:

$$-\frac{K}{\eta} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{B3})$$

dus

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{B4})$$

één maal integreren levert:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = C \quad (\text{B5})$$

Dus :

$$\frac{dp}{dx} = \frac{p_0 - p_i}{x_F} = -\frac{\Delta p}{x_F} \quad (\text{B6})$$

De druk neemt dus lineair af van p_i tot p_0 over de afstand x_F . Substitutie van (B6) in (B1) geeft de harssnelheid, i.h.b. de frontnelheid v_F :

$$v_F = \frac{dx_F}{dt} = \frac{K \Delta p}{\eta x_F} \quad (\text{B7})$$

Het drukverschil blijft tijdens het vulproces constant, zodat de frontnelheid omgekeerd evenredig met x_F afneemt.

$$x_F dx_F = \frac{K}{\eta} \Delta p dt \quad (\text{B8})$$

$$\frac{1}{2} x_F^2 = \frac{K}{\eta} \Delta p t + C \quad (\text{B9})$$

Als tijdstip $t=0$ wordt gekozen op het moment dat de injectie begint, is integratieconstante $C=0$. Dan geldt voor de tijd t die nodig is geweest voor het front om te vorderen tot x_F :

$$t = \frac{\eta x_F^2}{2K \Delta p} \quad (\text{B10})$$

De tijd nodig om de matrix te vullen volgt uit (B10) door substitutie daarin van $x_F = L$.
Uit (B10) volgt voor de positie van het front als functie van de tijd:

$$x_F = \sqrt{2 \frac{K}{\eta} \Delta p t} \quad (\text{B11})$$

Bijlage C

Eén-dimensionale stroming tussen twee parallelle platen (smeerfilm theorie)

Er wordt uitgegaan van de x-component van de impuls-vergelijking:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (\text{C1})$$

De volgende aannamen worden gemaakt:

- De zwaartekracht wordt verwaarloosd;
- Er zijn geen warmtebronnen t.g.v. chemische reacties;
- De vloeistof is incompressibel;
- De druk is op een bepaald punt van het middenvlak onafhankelijk van de ϵ_3 richting.
- De traagheidskrachten zijn te verwaarlozen;

Merk op dat deze aannamen ook gemaakt worden bij de dunne film benadering indien het proces isotherm wordt aangenomen en niet beïnvloedt wordt door de reactie.

Verder wordt nog de aanname gemaakt:

- De vloeistof is Newtons

Toepassen van deze aannamen levert de volgende vergelijking:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (\text{C2})$$

Integreren van deze vergelijking over de hoogte van de caviteit, en invullen van de randvoorwaarden:

aan de wanden zijn alle snelheden gelijk aan 0

levert het snelheidsprofiel:

$$u = - \frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial x} [h(z+h_1) - (z+h_1)^2] \quad (\text{C3})$$

hierin is h_1 de afstand van het x-y vlak tot de bovenkant van de caviteit.

Met (C3) is de volumestroom per oppervlak te berekenen:

$$v_x = \frac{1}{h} \int_{-hl}^{h/2} u dz = -\frac{h^2}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (\text{C4})$$

Literatuur

- [Whitaker] Whitaker, S. : Advances in Theory of Fluid Motion in Porous Media, in Flow through Porous Media, Amer. Chem. Soc. , Washington, D.C., Chapter 2, p. 31 (1970).
- [Eck-Rust] Eckler, J.H. and Rust, D.A. : Proceedings of the ASM international/EDS Advanced Composites Conference, 109 (1987).
- [Kennedy] Kennedy, P. : Flow Analysis Reference Manual, Shortrun Books (1993).
- [Greenkorn] Greenkorn, R.A. : Flow Phenomena in Porous Media, Marcel Dekker, New York (1983).
- [Kama-Sour] Kamal, M.R. and Sourour, S. : Polymer Engineering and Science, vol. 13, pag. 61, and Thermoch. Acta, vol 14, pag. 41 (1976).
- [Bos-Werf] Boshouwers, A.H.M. and Werf, J.J. van de : Inject-3, a simulation code for the filling stage of the injection moulding process of thermoplastics, PhD. Thesis, Eindhoven University of Technology (1988).
- [Douven] Douven, L.F.A. : Towards the computation of properties of injection moulded products, PhD. Thesis, Eindhoven University of Technology (1991).
- [Verh-Pee] Verheus, A.S. and Peeters, J.H.A. : The role of reinforcement permeability in resin transfer moulding, Composites Manufacturing, vol. 4, no. 2, pag.33 (1993).
- [Young et al.] Young, W. et al. : Analysis of resin injection molding in molds with preplaced fiber mats. II: Numerical simulation and experiments of mold filling, Polymer Composites, vol 12, no. 1, pag. 30 (1991).
- [Caspers et al.] Caspers, L.W., Douven, L.F.A., Vosse, F.N. van de, and Zoetelief, W.F. : Vip manual, internal report, Department of Mechanical Engineering, Eindhoven University of Technology (February 3, 1994).
- [Har-Nij] Harten, K. van and Nijhof, A.H.J. : Resin Transfer Moulding, Eindrapport IOP-PCBP project nr. 5.1, Technische Universiteit Delft (1991).