

TURBULENTE STROMING VAN  
NEWTONSE EN NIET-NEWTONSE  
VLOEISTOFFEN IN EEN  
GEROERD VAT

J.F. ZEVENBERGEN

SEPTEMBER 1994

TECHNISCHE UNIVERSITEIT DELFT  
KRAMERS LABORATORIUM VOOR FYSISCHE TECHNOLOGIE  
PRINS BERNHARDLAAN 6  
2628 BW DELFT

J.F. ZEVENBERGEN  
BOLWERK 43  
1383 EP WEESP  
TEL: 02940 - 19703

SUPERVISORS:

PROF. DR. IR. H.E.A. VAN DEN AKKER  
IR. B.C.H. VENNEKER





---

## SAMENVATTING

Door het maken van foto's en het bepalen van gemiddelden en RMS-waarden van de fluctuerende vloeistofsnelheden via de LDA-techniek, is de turbulente stroming van niet-Newtonse vloeistoffen in een geroerd vat onderzocht en vergeleken met dat van Newtonse vloeistoffen. Twee typen niet-Newtonse vloeistoffen zijn gebruikt, te weten het pseudoplastische type en het viscoelastische type.

De foto's zijn gemaakt via het principe van de zogenoemde strijklicht-fotografie. Met behulp van een lasersheet en kleine bolvormige polystyreendeeltjes is het verticale vlak voor een aangestroomd keerschot gefotografeerd.

Via de LDA-techniek zijn de gemiddelde waarden en RMS-waarden van de radiale en axiale vloeistofsnelheid bepaald in hetzelfde verticale vlak. Door het intekenen van de snelheidsvectoren, dimensieloos gemaakt met de tipsnelheid, zijn de zogenoemde vectorvelden verkregen. In het gebied tot 20 mm boven en onder de roerder zijn de radiale en axiale roerder-uitstroomprofielen gemaakt en is de invloed van het Reynolds-getal op de turbulente stroming bestudeerd.



---

## ABSTRACT

Turbulent flow of non-Newtonian fluids in an agitated vessel was visualized by making photographs. Mean and RMS values of the fluctuating fluid velocities were measured using the LDA-technique. In both cases Newtonian fluids were used as reference fluids. Two types of non-Newtonian fluids were used, e.g., pseudoplastic en viscoelastic fluids.

The photographs were made using streak photography. A sheet of laser light was used to illuminate the tank. In order to scatter the laser light, small polystyrene particles were used. All the photographs were taken in a vertical plane, midway between the vessel wall and the rotating shaft.

Using the LDA-technique the mean and RMS values of the radial and axial fluid velocities were determined in the same vertical plane as mentioned above. Fluid velocities were normalized using the impeller tip velocity. Through the use of velocity vectors, the so-called vector fields were obtained. At a given radial distance away from the impeller tip, at several axial positions in the range of 20 mm above and below the centre-line of the impeller, the fluid outlet velocity profiles were measured. The influence of the Reynolds number on the turbulent flow was examined.



---

## INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING .....	II
ABSTRACT .....	III
INHOUDSOPGAVE .....	IV
SYMBOLENLIJST .....	VI
1. INLEIDING .....	1
1.1. Stromingsprofielen in geroerde vaten .....	1
1.2. Doel en kader van het onderzoek .....	2
1.3. Opzet van het verslag .....	3
2. THEORIE EN ACHTERGRONDEN .....	4
2.1. Definitie van niet-Newtons gedrag .....	4
2.2. Classificatie van niet-Newtonse vloeistoffen .....	4
2.2.1. Tijdsonafhankelijke niet-Newtonse vloeistoffen .....	4
2.2.2. Tijdsafhankelijke niet-Newtonse vloeistoffen .....	6
2.2.3. Viscoelastische vloeistoffen .....	6
2.3. Karakteriseren van turbulente vloeistofstroming ...	6
2.4. De schijnbare viscositeit van niet-Newtonse vloeistoffen volgens de methode van Metzner en Otto ....	8
2.5. Het geroerde vat .....	10
3. BEKNOPT LITERATUURVERZICHT .....	11
3.1. Inleiding .....	11
3.2. Stromingsvisualisatie via foto's .....	11
3.3. Bepaling snelheidsveld met LDA .....	11
4. EXPERIMENTEEL .....	13
4.1. Het geroerde vat .....	13
4.2. Viscositeitsbepaling .....	13
4.2.1. Rheometers .....	13
4.2.2. Experimentele werkwijze .....	14
4.2.3. Gebruikte modelvloeistoffen .....	14
4.3. Stromingsvisualisatie .....	15
4.3.1. Gebruikte apparatuur en materialen .....	15
4.3.2. Experimentele werkwijze .....	15
4.4. Laser Doppler Anemometrie (LDA) .....	16
4.4.1. Apparatuur .....	17
4.4.2. Experimentele werkwijze .....	18
5. RESULTATEN .....	20
5.1. Stromingsvisualisatie via foto's .....	20
5.1.1. Inleiding .....	20
5.1.2. Turbulente Newtonse stroming .....	20



---

5.1.3.	Turbulente pseudoplastische stroming .....	21
5.1.4.	Turbulente viscoelastische stroming .....	23
5.1.5.	Algemeen stromingspatroon voor turbulente Newtonse en niet-Newtonse vloeistoffen in een geroerd vat .....	24
5.2.	Bepaling vectorvelden via LDA .....	25
5.2.1.	Inleiding .....	25
5.2.2.	Vectorvelden .....	25
5.3.	Bepaling roerderuitstroomprofiel via LDA .....	27
5.3.1.	Inleiding .....	27
5.3.2.	Outlet Velocity Profile (OVP) .....	27
5.3.3.	RMS Outlet Velocity Profile (OVP') .....	28
5.3.4.	Centre-line Velocity Profile (CVP) .....	28
5.3.5.	RMS Centre-line Velocity Profile (CVP') .....	29
5.3.6.	Axial Outlet Velocity Profile (AOVP) .....	29
5.3.7.	RMS Axial Outlet Velocity Profile (AOVP') .....	30
6.	DISCUSSIE EN AANBEVELINGEN .....	31
6.1.	Discussie .....	32
6.2.	Aanbevelingen voor verder onderzoek .....	36
7.	CONCLUSIES .....	38
	LITERATUUR .....	39
	NAWOORD .....	41
APPENDIX A :	De dimensieloze gemiddelde waarden van de fluctuerende radiale vloeistofsnelheden .....	A1
APPENDIX B :	De dimensieloze RMS-waarden van de fluctuerende radiale vloeistofsnelheden .....	B1
APPENDIX C :	De dimensieloze gemiddelde waarden van de fluctuerende axiale vloeistofsnelheden .....	C1
APPENDIX D :	De dimensieloze RMS-waarden van de fluctuerende axiale vloeistofsnelheden .....	D1
APPENDIX E :	Rheogram van 0.2 wt% Blanose oplossing .....	E1





SYMBOLENLIJST

Symbool	Omschrijving	SI-eenheid
A	Coëfficiënt	---
B	Coëfficiënt	---
C	Hellingscoëfficiënt	---
D	Diameter van de roerder	m
$d_m$	Diameter optische meetvolume	m
$k_s$	Constante van Metzner en Otto	---
K	Flow consistency index	$(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}) / \text{m}$
$l_m$	Lengte optisch meetvolume	m
m	Parameter Carreau model	---
n	Flow behaviour index	---
N	Rotatiesnelheid roerder	$\text{s}^{-1}$
p	Exponent	---
r	Cylindercoördinaat	m
R	Straal van de roerder	m
Re	Reynoldsgetal	---
s	Fringe spacing	m
t	tijd	s
T	Diameter geroerd vat	m
u	Snelheidscomponent	m/s
v	Snelheidscomponent	m/s
$\bar{v}_a$	Gemiddelde axiale snelheid	m/s
$\bar{v}_r$	Gemiddelde radiale snelheid	m/s
$v_a'$	RMS-waarde axiale snelheid	m/s
$v_r'$	RMS-waarde radiale snelheid	m/s
$v_{\text{tip}}$	Roerdertipsnelheid	m/s
x	Cartesiaanse coördinaat	m
$\dot{\gamma}$	Afschuifsnelheid	$\text{s}^{-1}$
$\dot{\gamma}_{\text{av}}$	Vat-gemiddelde afschuifsnelheid	$\text{s}^{-1}$



Symbool	Omschrijving	SI-eenheid
$\eta$	Viscositeit	kg/(m*s)
$\eta_s$	Schijnbare viscositeit	kg/(m*s)
$\eta_0$	Zero shear viscosity	kg/(m*s)
$\eta_\infty$	Infinite shear viscosity	kg/(m*s)
$\lambda$	Golflengte	m
$\lambda_c$	Parameter Carreau model	s
$\mu$	Viscositeit	kg/(m*s)
$\xi_m$	Van der Molen parameter	---
$\rho$	Dichtheid	kg/m <sup>3</sup>
$\tau$	Schuifspanning	kg/(m*s <sup>2</sup> )



## HOOFDSTUK 1

**INLEIDING****1.1. Stromingsprofielen in geroerde vaten.**

Het mengen van vloeistoffen via mechanische roerders is waarschijnlijk één van de meest toegepaste en meest belangrijke handelingen in de chemische en aanverwante industrie. De functie van het mengen is, het versnellen van de transportprocessen, die plaatshebben in het geroerde vat. Dit wordt bereikt, door het introduceren van energie in het vat aan de hand van de roterende roerder en het omzetten van deze energie in vloeistofbeweging. De transportprocessen worden zodoende bepaald door convectief transport (transport door vloeistofstroming). Convectief transport gaat aanzienlijk sneller dan diffusief transport (geen vloeistofstroming, transport door molecuulbeweging).

De meeste ontwerpstudies van het mengproces in het geroerde vat zijn gebaseerd op Newtonse vloeistofsystemen. Op basis van uitgebreide ervaringen met het mengen van laag viskeuze Newtonse vloeistoffen, heeft men een goed gedocumenteerd "standaard" geroerd vat ontwikkeld. Dit is op zich nogal vreemd, daar een groot deel van de vloeistoffen, die voorkomen in de chemische en aanverwante industrie, niet-Newton's zijn. Wanneer de standaard-apparatuur wordt gebruikt voor het mengen van niet-Newtonse vloeistoffen kunnen er dus veranderingen optreden in de stromingsprofielen en transportprocessen in het geroerde vat.

In de literatuur is veel bekend over de turbulente stroming van Newtonse vloeistoffen in geroerde vaten en het visualiseren daarvan. Gering is echter de hoeveelheid literatuur betreffende de turbulente stroming en aanverwante informatie van niet-Newtonse vloeistoffen in geroerde vaten. De meeste artikelen over niet-Newtonse vloeistoffen in geroerde vaten hebben betrekking op het bepalen van het benodigde roerdersvermogen voor het bereiken van een vooraf gestelde menggraad en het definiëren van een zodanig gegeneraliseerd niet-Newton's Reynoldsgetal, dat opschaling mogelijk is (*Wichterle en Wein [1], Nagata et al [2]*).

Kennis van de turbulente stroming van niet-Newtonse vloeistoffen in geroerde vaten is essentieel in onder meer de sterk gegroeide bioprocesindustrie en bij de productie van polymeren. Tijdens een typisch fermentatieproces kan de viscositeit een factor honderd of meer toenemen en kan het reologische karakter van de biomassa veranderen van Newton's naar niet-Newton's. Tweederde van alle polymeren worden gemaakt





door polymerisatie in een daarvoor geschikt oplosmiddel of door bulkpolymerisatie. Bij beide polymerisaties zijn snelheid en kwaliteit van menging bepalend voor de eigenschappen van het uiteindelijke polymeer.

## 1.2. Doel en kader van het onderzoek.

Bij turbulente stroming van Newtonse vloeistoffen is de viscositeit niet bepalend voor het stromingsveld. Daar de niet-Newtonse schijnbare viscositeit, in tegenstelling tot de Newtonse viscositeit, plaatsafhankelijk is, is de onafhankelijkheid van de turbulente niet-Newtonse vloeistofstroming van de niet-Newtonse viscositeit niet vanzelfsprekend.

Het doel van dit afstudeerproject is, het verwerven van kennis van en inzicht in de turbulente stroming van niet-Newtonse vloeistoffen in geroerde vaten. Hiervoor zijn twee middelen voorhanden:

- 1) Het globaal visualiseren van de turbulente stroming van verschillende niet-Newtonse vloeistoffen in een geroerd vat, door het maken van foto's daarvan en deze foto's onderling te vergelijken, alsmede te vergelijken met die van de Newtonse vloeistoffen in het geroerde vat.
- 2) Het bepalen van gedetailleerde profielen van de gemiddelde en de RMS-waarde van de vloeistofsnelheidsverdeling van verschillende niet-Newtonse vloeistoffen in het geroerde vat, via Laser Doppler Anemometrie (LDA). De verkregen profielen van de niet-Newtonse vloeistoffen worden onderling vergeleken en vergeleken met de profielen verkregen met de Newtonse vloeistoffen. Onderzocht wordt of de radiale en axiale profielen van de gemiddelde en de RMS-waarde van de vloeistofsnelheidsverdeling van zowel de niet-Newtonse vloeistoffen als Newtonse vloeistoffen kunnen worden beschreven met universele correlaties. Vanwege het 2-dimensionale karakter van de genomen foto's, zijn bij het meten van de vloeistofsnelheden via LDA, de tangentiële vloeistofsnelheden niet gemeten.

Het doel van het promotie-onderzoek van mijn begeleider Ir. B.C.H. Venneker is, het onderzoeken van het gedrag van gasbellen in een turbulente niet-Newtonse vloeistof. Hiertoe dient te worden nagegaan, hoe de turbulente niet-Newtonse vloeistofstroming (zonder gasbellen) afwijkt van de turbulente Newtonse vloeistofstroming om zo eventueel te kunnen aangeven hoe bestaande (Newtonse) turbulentiemodellen kunnen worden aangepast voor het niet-Newtonse karakter van de vloeistof. De bijdrage van dit afstudeerproject ligt daarin, dat door het visualiseren van de turbulente stroming door middel van foto's en het bepalen van de gemiddelde en de RMS-waarde van de





vloeistofsnelheidsverdelingen het mogelijk is deze simulaties en dus het niet-Newtonse turbulentiemodel, te controleren en richting te geven.

### 1.3. Opzet van het verslag.

Hoofdstuk 2 geeft de theorie en achtergronden van de verschillende aspecten, die betrekking hebben op het bepalen en karakteriseren van stromingsprofielen van niet-Newtonse vloeistoffen.

In hoofdstuk 3 wordt de, in de literatuur gevonden, informatie over stromingsprofielen van niet-Newtonse vloeistoffen besproken.

Hoofdstuk 4 bevat een beschrijving van de proefopstelling en de daarbij gebruikte randapparatuur, alsmede een bespreking van de experimentele werkwijze.

In Hoofdstuk 5 worden de resultaten gepresenteerd, waarover in hoofdstuk 6 een discussie met aanbevelingen voor verder onderzoek volgt.

Hoofdstuk 7 bevat de conclusies, die getrokken zijn op basis van het verrichte werk.

Dit afstudeerproject is uitgevoerd als onderdeel van het studie-programma voor het behalen van de titel **Scheikundig ingenieur** aan de Technische Universiteit Delft.

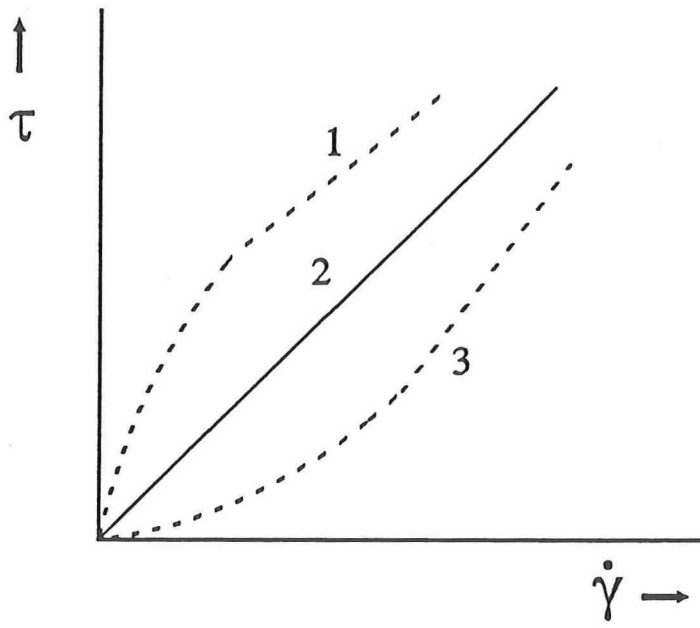


Fig 1. Verband tussen schuifspanning en afschuifsnelheid.  
(1) Pseudoplastisch, (2) Newtons, (3) dilatant.

## HOOFDSTUK 2

## THEORIE EN ACHTERGRONDEN

## 2.1. Definitie van niet-Newtons gedrag.

Voordat een definitie kan worden gegeven van het begrip *niet-Newtons gedrag*, dient eerst het begrip *Newtons gedrag* nader te worden uitgelegd. Volgens Newton's viscositeitswet uit 1687 is de schuifspanning, benodigd voor het verkrijgen van vloeistofbeweging, recht evenredig met de snelheidsgradiënt [3],

$$\tau = -\mu * \frac{du}{dx} \quad (1)$$

In reologische termen betekent dit, dat de schuifspanning recht evenredig is met de afschuifsnelheid,

$$\tau = -\mu * \dot{\gamma} \quad (2)$$

De evenredigheidsconstante  $\mu$  wordt de viscositeitscoëfficiënt genoemd, kortweg viscositeit. De viscositeit is geen functie van de afschuifsnelheid en derhalve, bij constante temperatuur en druk, een constante. Een vloeistof, welke ook maar enige afwijking vertoont van bovenstaand gedrag, is niet-Newtons.

## 2.2. Classificatie van niet-Newtonse vloeistoffen.

De niet-Newtonse vloeistoffen kunnen ruwweg in drie klassen worden ingedeeld, te weten de tijdsonafhankelijke, tijdsafhankelijke en viscoelastische vloeistoffen.

## 2.2.1. Tijdsonafhankelijke niet-Newtonse vloeistoffen.

Tijdsonafhankelijke niet-Newtonse vloeistoffen vertonen, in tegenstelling tot Newtonse vloeistoffen, een niet-lineair verband tussen de schuifspanning en afschuifsnelheid. De viscositeit is een functie van de momentaan opgelegde afschuifsnelheid, zie Figuur 1.

Bij de *pseudoplastische* vloeistoffen (b.v. verf) neemt de viscositeit af met toenemende afschuifsnelheid. Van alle niet-Newtonse vloeistoffen, komen die met pseudoplastisch gedrag het meest voor. Het verband tussen de schuifspanning en de afschuifsnelheid kan worden beschreven met een zogenoemde machtwet, beter bekend als het Ostwald-de Waele model,

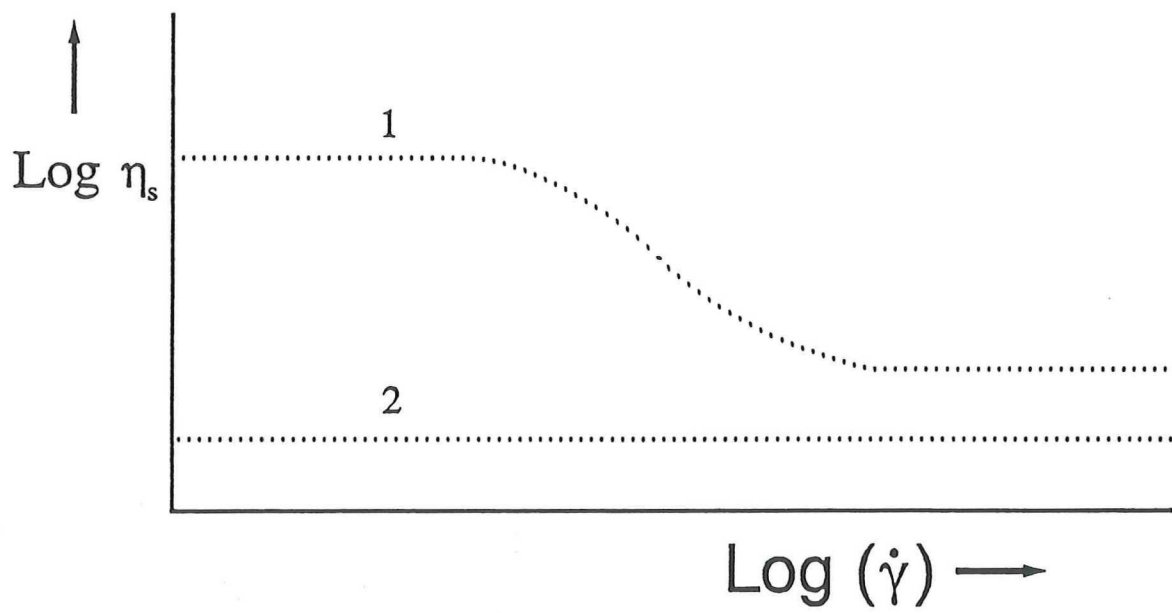


Fig 2. De viscositeit als functie van de afschuifsnelheid.  
 (1) Pseudoplastisch, (2) Newtons.

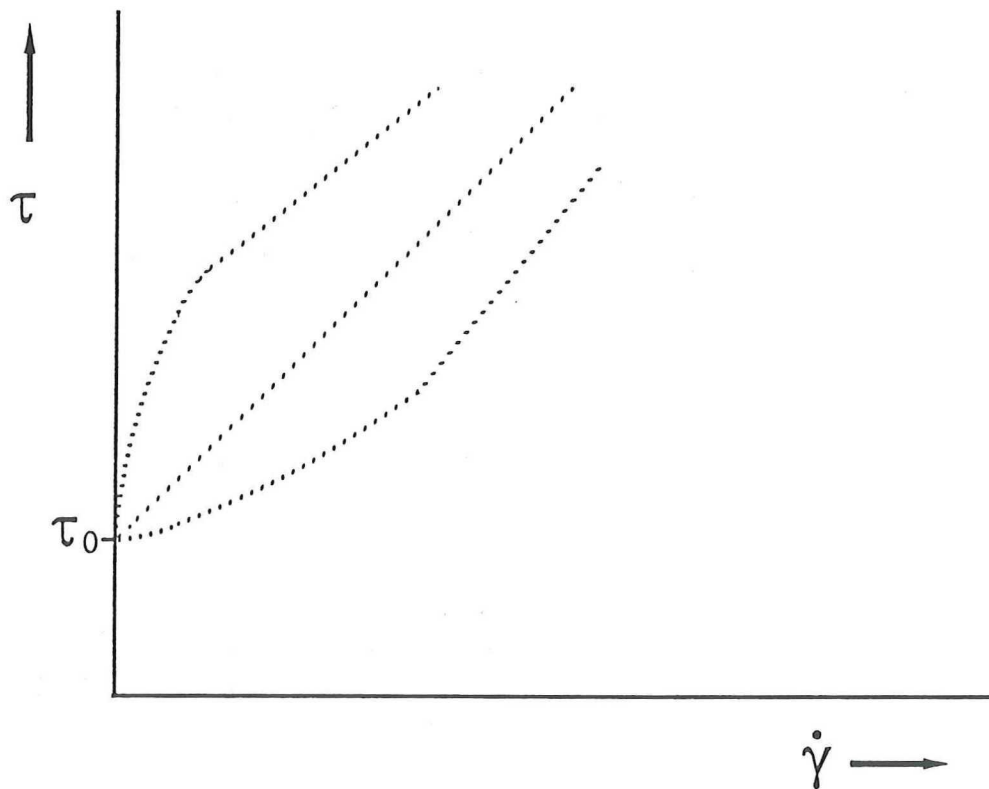


Fig 3. Vloeistoffen met een "yield stress".

$$\tau = -K * |\dot{\gamma}|^{n-1} * \dot{\gamma} \quad (3)$$

De exponent  $n$  en constante  $K$  worden respectievelijk de "flow behaviour index" en "flow consistency index" genoemd. Voor pseudoplastische vloeistoffen, varieert de waarde van de exponent  $n$  van 1 naar 0 met toenemende pseudoplastischeiteit. Beide parameters zijn een functie van de temperatuur. Voor  $n = 1$  reduceert de machtswet tot Newton's viscositeitswet met  $K = \mu$ . Op basis van de machtswet geldt voor de viscositeit:

$$\eta_s = K * |\dot{\gamma}|^{n-1} \quad (4)$$

Het Ostwald-de Waele model is een populair model, omdat het eenvoudig te gebruiken is. Men dient zich echter te realiseren dat de machtswet een empirisch model is, welke geen theoretische achtergrond heeft en uitsluitend als interpolatie-formule kan worden gebruikt in het afschuif-snelheidsinterval, waarin het is bepaald.

Het meer complexe Carreau model [6] stoelt daarentegen wel op theoretische, microreologische achtergronden,

$$\frac{\eta_s - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = [1 + (\lambda_c * \dot{\gamma})^2]^{\frac{(m-1)}{2}} \quad (5)$$

In Figuur 2 is de viscositeit logaritmisches uitgezet tegen de afschuifsnelheid. De curve wordt gekarakteriseerd door twee (Newtonse) "viscositeitsplateaus" bij zeer lage en zeer hoge afschuifsnelheden, zoals kan worden afgeleid uit het model van Carreau. Het viscositeitsplateau bij de zeer lage afschuifsnelheden staat bekend als de "zero shear viscosity ( $\eta_0$ )" en het viscositeitsplateau bij zeer hoge afschuifsnelheden als de "infinite shear viscosity ( $\eta_\infty$ )". Het tussengebied kan worden beschreven met een machtswet, zie formule (5).

Bij de *dilatante* vloeistoffen (b.v. nat cement) neemt de viscositeit toe met toenemende afschuifsnelheid, zie Figuur 1. Het reologisch karakter van dilatante vloeistoffen wordt meestal beschreven met het model van Ostwald-de Waele, waarbij de exponent  $n$  nu groter is dan 1.

Vloeistoffen met een "yield stress" (b.v. bloed, tandpasta) gaan pas stromen wanneer de schuifspanning een zekere grenswaarde, de "yield stress", overschrijdt. Na overschrijden van de "yield stress" is het stromingsgedrag Newtons, pseudoplastisch of dilatant van aard, zie Figuur 3.





### 2.2.2. Tijdsafhankelijke niet-Newtonse vloeistoffen.

De schuifspanning van tijdsafhankelijke niet-Newtonse vloeistoffen is een functie van zowel de afschuifsnelheid als de tijd, gedurende welke een bepaalde afschuifsnelheid wordt toegepast. Dit soort vloeistoffen worden in twee groepen ingedeeld, te weten de *thixotrope* en *rheopectische* vloeistoffen. Thixotrope vloeistoffen vertonen een geleidelijke afname in de schuifspanning bij een constante afschuifsnelheid en temperatuur. Bij rheopectische vloeistoffen neemt de schuifspanning geleidelijk toe. Wordt de afschuifsnelheid momentaan tot nul gereduceerd, dan zullen beide typen vloeistoffen geleidelijk hun oorspronkelijke viscositeit weer aannemen. Het tijdseffect is zodoende volledig reversibel.

### 2.2.3. Viscoelastische vloeistoffen.

Zoals de naam al aangeeft, gedragen viscoelastische vloeistoffen zich ten dele viskeus (als een vloeistof) en ten dele elastisch (als een vaste stof). Wanneer een schuifspanning wordt aangelegd, gaan deze vloeistoffen stromen. Wordt de schuifspanning opgeheven, dan veren deze vloeistoffen ten dele terug. Vanwege het elastische karakter van dit soort vloeistoffen worden ze soms ook wel omschreven als "geheugen-vloeistoffen".

Voor wat betreft het verband tussen de schuifspanning en de afschuifsnelheid (het "visco-gedeelte") van viscoelastische vloeistoffen, kan dit Newtons, pseudoplastisch of dilatant van aard zijn, eventueel in combinatie met een "yield stress" en/of in combinatie met tijdsafhankelijk gedrag (zie § 2.2.2).

De niet-Newtonse vloeistoffen, die gebruikt zijn tijdens het afstudeerproject, zijn pseudoplastisch en pseudoplastisch-viscoelastisch van aard.

### 2.3. Karakteriseren van turbulente vloeistofstroming.

Onder *turbulente vloeistofstroming* wordt verstaan, dat de snelheid van die vloeistofstroming in elk punt snel verandert van grootte en richting. Er is sprake van een willekeurige fluctuerende, chaotische vloeistofstroming. Dit in tegenstelling tot *laminaire vloeistofstroming*, waarbij er sprake is van een geordende vloeistofstroming. In een geroerd vat vindt de overgang van laminaire naar turbulente vloeistofstroming niet momentaan, maar geleidelijk plaats. Dit tussengebied wordt het *overgangsg gebied* genoemd.





Om te kunnen bepalen of het stromingskarakter van een vloeistof laminair, turbulent is, of daar tussenin ligt, wordt het Reynoldsgetal gebruikt:

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\eta} \quad (6)$$

Indien het Reynoldsgetal wordt betrokken op een geroerd vat, dan wordt de vloeistofsnelheid  $v$  betrokken op de tipsnelheid van de roerder. Dit is de snelheid, die de vloeistofelementjes hebben, op het moment dat deze de tippen van de roerderbladen verlaten. De tipsnelheid is recht evenredig met het product van rotatiesnelheid en diameter van de roerder,

$$v_{tip} \propto N * D \quad (7)$$

Invullen van formule (7) in formule (6) geeft formule (8). Formule (8) geeft de definitie van het Reynoldsgetal, zoals deze wordt gebruikt voor het karakteriseren van de vloeistofstroming in geroerde vaten.

$$Re = \frac{\rho * N * D^2}{\eta} \quad (8)$$

Hierin is  $\rho$  de dichtheid van de vloeistof,  $\eta$  de viscositeit van de vloeistof,  $D$  de diameter van de roerder en  $N$  de rotatiesnelheid van de roerder. Voor een geroerd vat geldt nu:

$Re < 10$  : laminaire vloeistofstroming  
 $10 < Re < 10^4$  : overgangsgebied  
 $Re > 10^4$  : turbulente vloeistofstroming

Turbulentie wordt gekenmerkt door chaotische wervelachtige structuren van uiteenlopende afmetingen. De wervelachtige structuren worden "eddies" genoemd. De turbulentie-structuur met de grootste afmeting wordt de macrostructuur genoemd. De macrostructuur kan zodoende worden beschreven met een lengteschaal  $l$  en een snelheidsschaal  $v$ . Deze schalen hangen direct samen met de geometrie van de stroming. In geval van turbulente vloeistofstroming in een geroerd vat, wordt als lengteschaal de diameter van de roerder ( $D$ ) genomen. Als snelheidsschaal wordt de tipsnelheid ( $v_{tip}$ ) genomen.

Voor  $Re > 10^4$  is de macrostructuur onafhankelijk van het Reynoldsgetal. Dit betekent, dat de turbulente vloeistofstroming onafhankelijk is van de viscositeit van de vloeistof, ofwel turbulentie is een eigenschap van de stroming en niet van het medium. Bij niet-Newtonse vloeistoffen is de onafhankelijkheid van de turbulente vloeistofstroming van de schijnbare viscositeit niet vanzelfsprekend, daar de schijnbare viscositeit plaatsafhankelijk is, zie § 2.4.



Bij een turbulente vloeistofstroming, gaat de interesse niet uit naar alle details van de vloeistofstroming, te meer turbulentie nog steeds een onopgelost probleem is en een exacte theorie ontbreekt. De aandacht gaat meer uit naar statistische grootheden, zoals het gemiddelde en de standaarddeviatie. In een turbulente vloeistofstroming kan een instantane variabele, zoals de vloeistofsnelheid, worden gesplitst in een gemiddelde en een fluctuatie,

$$v = \bar{v} + v' \quad (9)$$

De macrostructuur wordt gevoed met energie, onttrokken aan de gemiddelde vloeistofstroming. De gevormde, energie-rijke grote "eddies" zijn echter instabiel en vallen uiteen in kleinere "eddies". Het uiteenvallen in steeds kleinere "eddies" gaat net zolang door totdat de microstructuur bereikt is. Dit proces wordt het cascade proces genoemd. In de microstructuur wordt, door de viscositeit van de vloeistof, de (kinetische) energie omgezet in warmte. Dit omzetten van energie in warmte wordt dissipatie genoemd [7].

Het totale beeld is nu duidelijk. De macrostructuur, die zijn energie onttrekt aan de gemiddelde vloeistofstroming, verliest zijn energie, via de vorming van instabiele en steeds kleiner wordende "eddies". Uiteindelijk wordt de energie door de kleinste structuur, de microstructuur, omgezet in warmte. Een turbulente vloeistofstroming wordt zodoende gekenmerkt door het uitdempen van deze stroming.

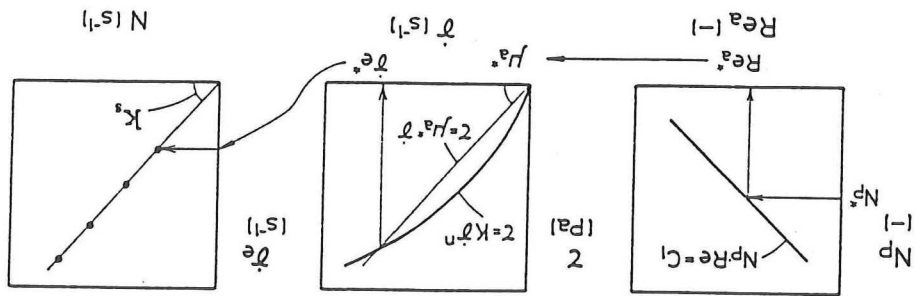
#### 2.4. De schijnbare viscositeit van niet-Newtonse vloeistoffen volgens de methode van Metzner en Otto.

Bij de complexe vloeistofstroming, zoals deze zich voordoet in het geroerd vat, zal de vloeistofsnelheid en dus ook de afschuifsnelheid op ieder punt in het vat een andere waarde hebben, symmetrie-overwegingen daargelaten. In de directe nabijheid van de roerder zal de afschuifsnelheid en vloeistofsnelheid het hoogst zijn. Langs de wanden, top en bodem van het geroerde vat zal de vloeistofsnelheid het laagst zijn.

Uitgaande van de reologische eigenschappen van een pseudo-plastische vloeistof, zal de viscositeit van de vloeistof moeten toenemen, naarmate de afstand tot de roerder groter wordt, tengevolge van de lagere afschuifsnelheden. Een klein vloeistofelementje, dat het gebied met hoge afschuifsnelheden in de directe nabijheid van de roerder verlaat, zal gestaag vorderend, een steeds hogere schijnbare viscositeit krijgen.

De niet-Newtonse viscositeit is zodoende een lokale grootheid, die afhankelijk is van de positie van het vloeistofelementje in het geroerde vat. In tegenstelling tot de Newtonse

Figuur 4. Bepaling van de afschuifsnijnelheidsconstante  $k_s$ .





viscositeit, is het niet mogelijk te spreken over de viscositeit van de vloeistof in het geroerde vat, maar wordt er gesproken over een schijnbare, over het vat gemiddelde, niet-Newtonse viscositeit. In formules (4) en (5) is dit aangegeven met het subscript "s". Wordt het Reynoldsgetal, zoals dit is gedefinieerd in formule (8), betrokken op een niet-Newtonse vloeistof, dan dient de Newtonse viscositeit,  $\mu$ , vervangen te worden door de schijnbare, niet-Newtonse viscositeit,  $\eta_s$ .

Het probleem in een geroerd vat is echter, dat de lokale afschuifsnelheden in en dus de lokale viscositeit van een niet-Newtonse vloeistof niet bekend zijn.

Een algemeen geaccepteerde methode voor het bepalen van de schijnbare viscositeit van een niet-Newtonse vloeistof is die volgens de methode van Metzner en Otto [6]. Teneinde de schijnbare viscositeit te kunnen definiëren gaan Metzner en Otto [6] uit van twee identiek geroerde vaten. Een daarvan bevat een Newtonse vloeistof en de andere een niet-Newtonse vloeistof. Indien in beide vloeistoffen, in het laminaire gebied, met dezelfde roerdersnelheid wordt geroerd en men de viscositeit van de Newtonse vloeistof varieert door deze te verdunnen of in te dikken, zodat het benodigde vermogen voor beide roerders hetzelfde is, mag men stellen - omdat alle variabelen identiek zijn - dat de viscositeit in beide vaten hetzelfde is. Door het bepalen van de viscositeit van de Newtonse vloeistof kent men nu de schijnbare viscositeit van de niet-Newtonse vloeistof onder de gegeven experimentele condities. Door de afschuifsnelheid te bepalen, via het model van Ostwald-de Waele (formule (4)), die overeenkomt met de bepaalde schijnbare viscositeit en deze uit te zetten tegen de roerdersnelheid, wordt een lineair verband verkregen. Bovenstaande procedure is grafisch weergegeven in Figuur 4 [5].

Via de methode van Metzner en Otto is het mogelijk een, over het vat gemiddelde, afschuifsnelheid te definiëren en zodoende een vat-gemiddelde, schijnbare viscositeit van de niet-Newtonse vloeistof en een eveneens vat-gemiddeld Reynoldsgetal te bepalen. De relatie van Metzner en Otto is gegeven in formule (10).

$$\dot{\gamma}_{av} = k_s * N \quad (10)$$

De evenredigheidsconstante  $k_s$  is hierbij een functie van het type roerder, de onderlinge verhouding van de diameters van de roerder en het vat (de zogenoemde D/T ratio) en de reologische karakteristieken van de niet-Newtonse vloeistof in het geroerde vat.

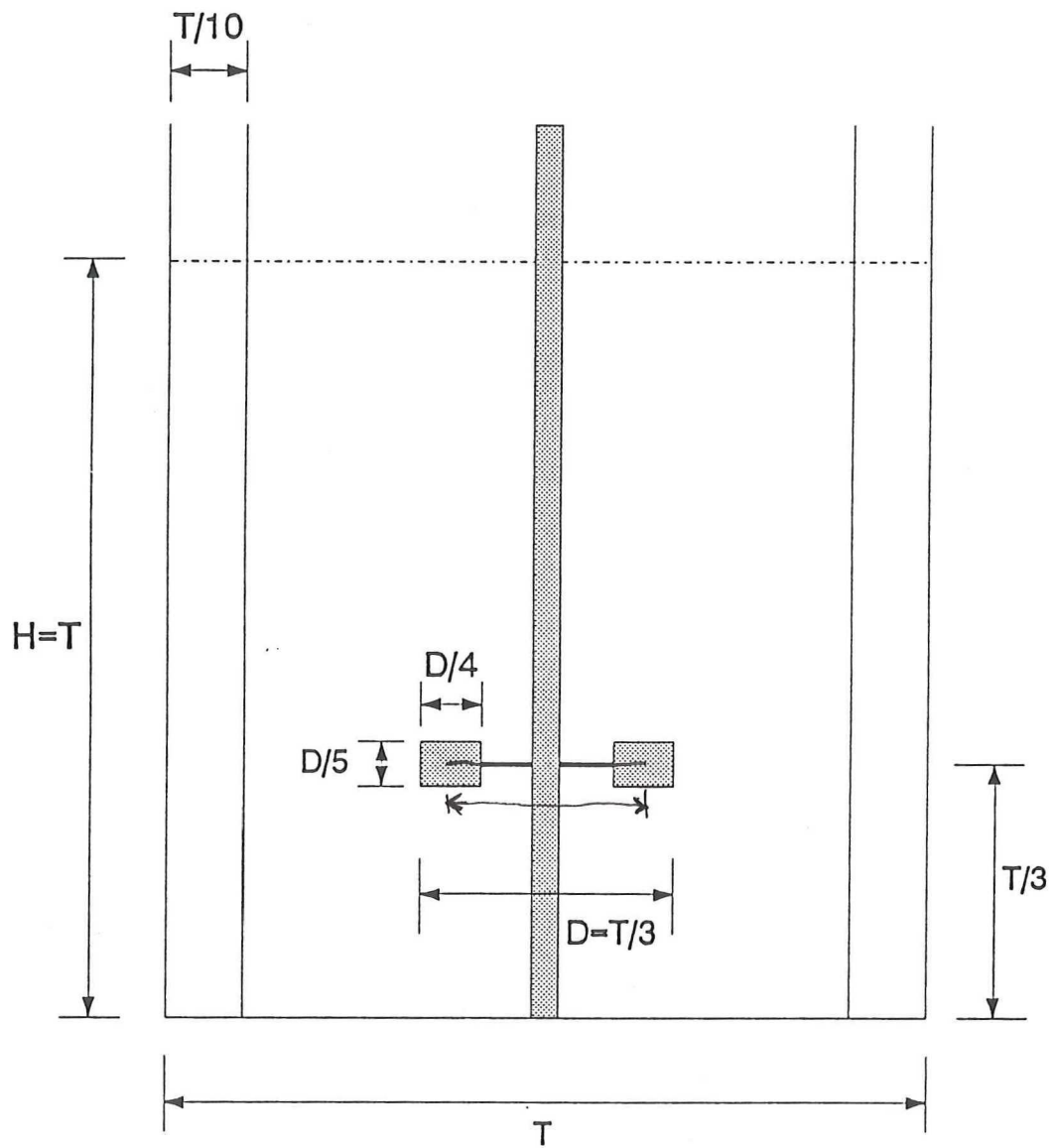


Fig 5. De dimensies van het "standaard" geroerde vat.

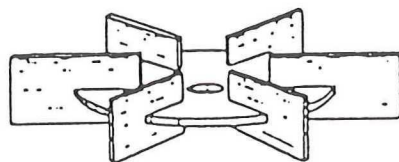


Fig 6. Een Rushton disc turbine.

De evenredigheidsconstante  $k_s$  wordt, zoals genoemd in bovenstaande procedure, bepaald in het laminaire gebied. Bij Reynoldsgetallen groter dan 10, treedt er een afwijking op van het lineaire verband tussen afschuifsnelheid en roerdersnelheid (zie Figuur 4), waardoor  $k_s$  geen constante meer is. De methode van Metzner en Otto is zodoende alleen bruikbaar in het laminaire gebied. Buiten het laminaire gebied neemt de betrouwbaarheid van de op deze manier bepaalde schijnbare viscositeit af.

Daar tot op heden geen betere methode voorhanden is voor het bepalen van de schijnbare viscositeit buiten het laminaire gebied, is bij het afstudeerproject de methode van Metzner en Otto gebruikt voor het bepalen van de schijnbare viscositeit. De schijnbare viscositeiten, berekend volgens de methode van Metzner en Otto en de daarmee bepaalde Reynoldsgetallen moeten met de nodige voorzichtigheid worden geïnterpreteerd, maar laten een eenvoudige indicatie van de grootte-orde van het Reynoldsgetal toe.

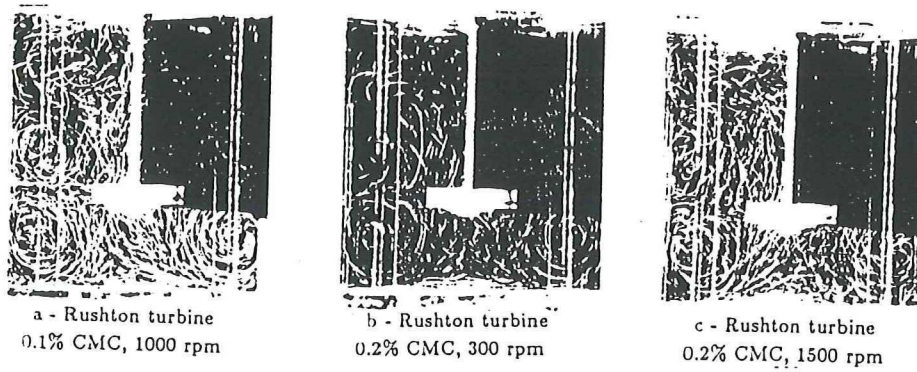
### 2.5. Het geroerde vat.

Tijdens het afstudeerproject is gebruik gemaakt van een "standaard" geroerd vat, zie ook Figuur 5. Onder "standaard" wordt verstaan, de vaste onderlinge geometrische verhoudingen van en onderlinge afstanden tussen de verschillende vatelementen. Op basis van uitgebreide ervaringen met het mengen van laag viskeuze Newtonse vloeistoffen, heeft men het goed gedocumenteerde "standaard" geroerd vat ontwikkeld. Daar het "standaard" geroerde vat in veel research-projecten wordt gebruikt is, omwille van een goede onderlinge vergelijking van de behaalde resultaten, gekozen voor het "standaard" geroerde vat.

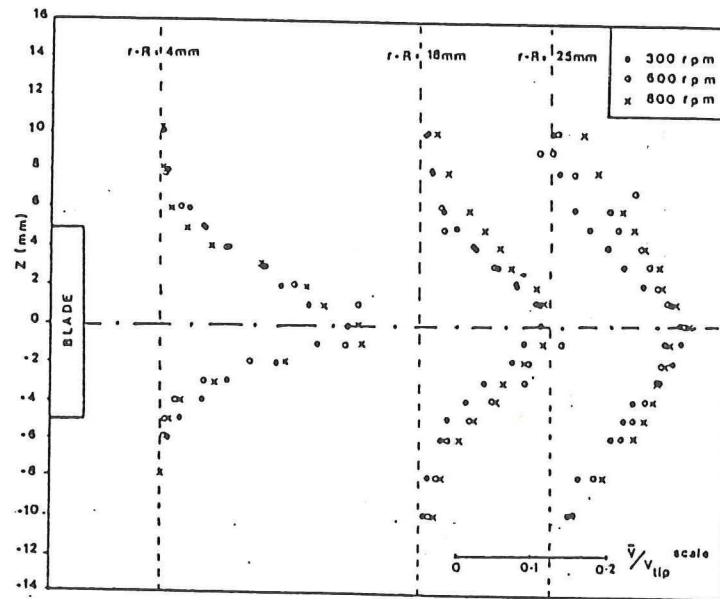
De vier keerschotten in het vat voorkomen, dat de vloeistof in het vat niet mee gaat roteren met de roerder, waardoor een slecht mengproces wordt verkregen. De roerder, een Rushton turbine, is grafisch weergegeven in Figuur 6.

Voor de gekozen geometrie en roerder geldt, dat de evenredigheidsconstante  $k_s$  in de Metzner en Otto relatie (formule (10)), gelijk is aan 11.5 [8].

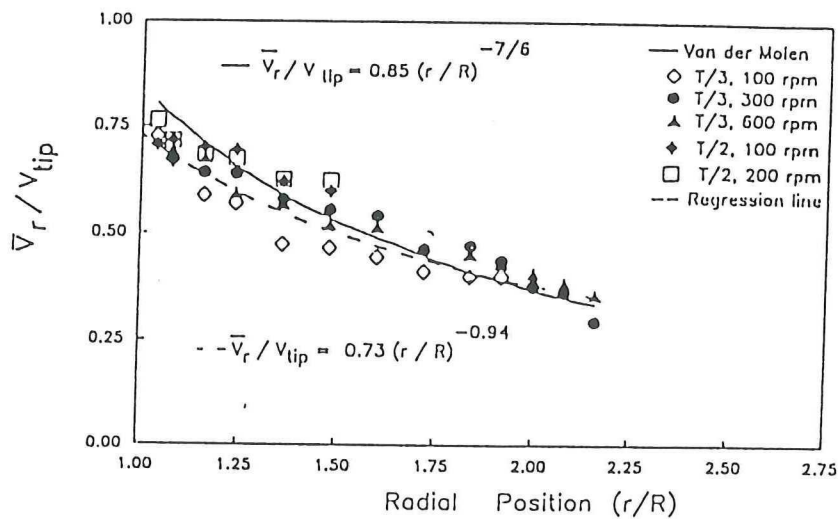




Figuur 7. Stromingspatronen van 0.1 wt% en 0.2 wt% Blanose oplossingen.



Figuur 8. OVP op verschillende radiale meetposities in een 0.28 wt% CMC oplossing.



Figuur 9. CVP in water voor twee D/T ratios.



## HOOFDSTUK 3

## BEKNOPT LITERATUUROVERZICHT

## 3.1. Inleiding.

In de literatuur is over stromingsprofielen van niet-Newtonse vloeistoffen weinig bekend. In de volgende paragrafen zal kort de in de literatuur gevonden informatie worden besproken. Voor gedetailleerde informatie wordt verwezen naar de literatuurscriptie [3].

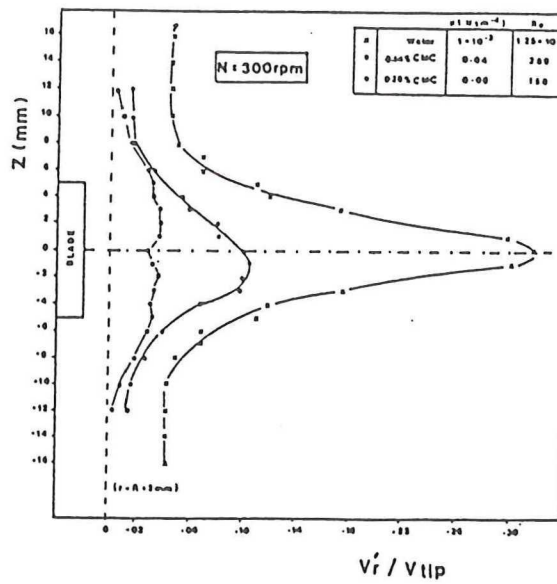
## 3.2. Stromingsvisualisatie via foto's.

*Hockey et al* [9] gebruikten als niet-Newtonse vloeistoffen oplossingen van carboxymethylcellulose (CMC type 7H4, pseudoplast) en water als Newtonse referentie-vloeistof, zie Figuur 7. *Hockey* concludeert uit de resultaten, dat de turbulente stroming in een geroerd vat van de Newtonse vloeistof (water) en van de niet-Newtonse CMC oplossingen gelijkvormig zijn. In beide typen vloeistoffen worden twee ring-vortices geïdentificeerd, één onder en één boven de Rushton turbine, zie ook Figuur 7.

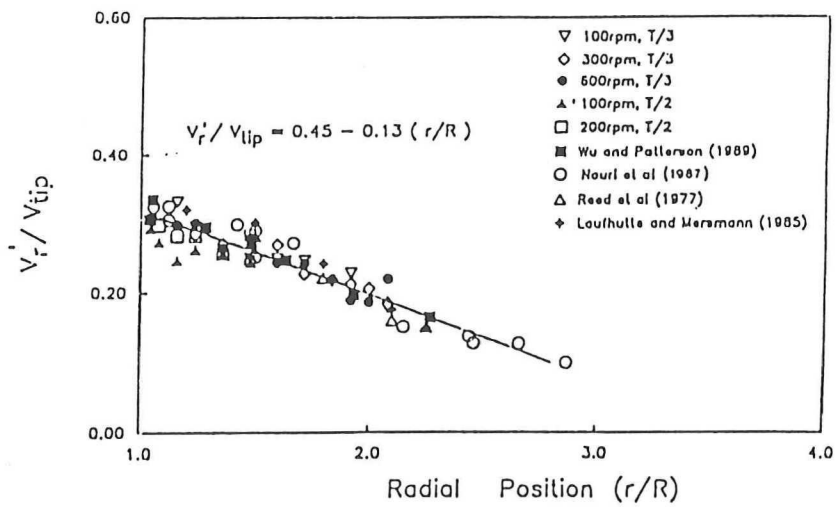
*Greene et al* [10] gebruikten oplossingen van het visco-elastische Separan, een hoog moleculair polyacrylamide-copolymeer. Door het stapsgewijs opvoeren van de Separan-concentratie werd de verandering in de uitstroomhoek - de hoek waaronder de vloeistof de roerder verlaat - als functie van de elasticiteit bestudeerd. In water bedroeg deze hoek 30°. Bij de Separan-oplossingen ging, met toenemende Separan concentratie, de uitstroomhoek van 30° naar 90°. *Greene* schrijft de verandering in de uitstroomhoek toe aan de toegenomen elasticiteit van de oplossing. *Greene* houdt echter geen rekening met veranderingen in de schijnbare viscositeit van de oplossingen, die mogelijk een invloed hebben op de veranderingen in de uitstroomhoek.

## 3.3. Bepaling snelheidsveld met LDA.

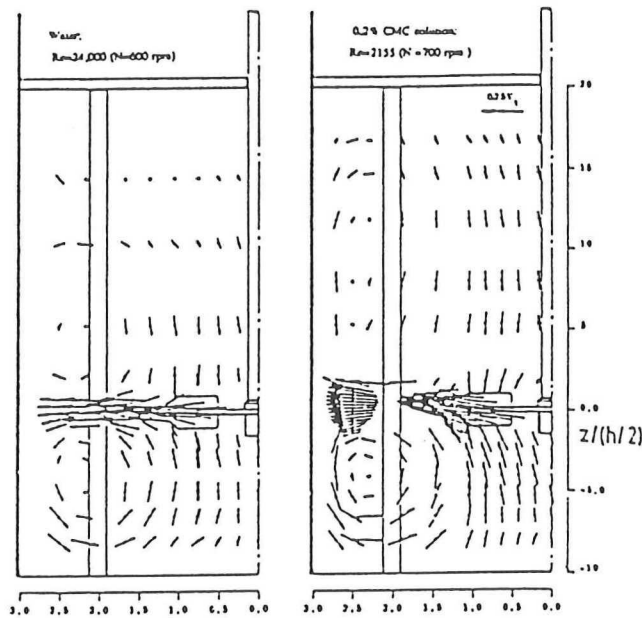
*Koutsakos et al* [11] gebruikten oplossingen met verschillende concentraties van CMC en hydroxyethylcellulose, een pseudoplastische vloeistof. Water werd als Newtonse referentie gebruikt. In de vatconfiguratie van *Koutsakos* bevond de roerder zich halverwege de roerderas (T/2).



Figuur 10. OVP' op één radiale meetpositie voor verschillende vloeistoffen.



Figuur 11. CVP' in water voor twee D/T ratios.



Figuur 12. Vectorveld van water en een 0.2 wt% Blanose oplossing.

Voor een gegeven radiale afstand van de roerdertip, werden de gemiddelde radiale snelheden op verschillende axiale posities gemeten. In dimensieloze vorm wordt vervolgens een zogenaamde "Outlet Velocity Profile (OVP)" verkregen, zie Figuur 8 (CMC). Overeenkomstig wordt, door het meten van de radiale snelheden op de uitstroomhartlijn van de Rushton turbine, een "Centre-line Velocity Profile (CVP)" verkregen, zie Figuur 9 (water). *Koutsakos* gebruikt de relatie van Van der Molen (*Van der Molen en van Maanen* [12]) voor het correleren van de verkregen CVP-meetwaarden,

$$\frac{\langle V_r \rangle}{V_{tip}} = 0.85 * \xi_m * \left( \frac{r}{R} \right)^{-\frac{7}{6}} \quad (11)$$

*Koutsakos* concludeert uit de behaalde resultaten, dat de relatie van Van der Molen zowel voor Newtonse als niet-Newtonse vloeistoffen kan worden gebruikt voor het correleren van CVP-meetwaarden. *Koutsakos* stelt tevens, dat de waarde van de zogenoemde Van der Molen parameter,  $\xi_m$ , gelijk is aan 1, zolang het Reynoldsgetal groter is dan 10000.

*Dyster et al* [13] gebruikten bij hun onderzoek alleen Newtonse vloeistoffen en concluderen, dat de Van der Molen parameter gelijk is aan 1, zolang het Reynoldsgetal groter is dan 500. *Dyster* geeft ook een alternatief voor de Van der Molen relatie,

$$\frac{\langle V_r \rangle}{V_{tip}} = 0.73 * \xi_m * \left( \frac{r}{R} \right)^{-0.94} \quad (12)$$

In de vatconfiguratie van *Dyster* bevond de roerder zich halverwege de roerderas ( $T/2$ ).

*Koutsakos* en *Dyster* bepaalden ook de zogenoemde RMS-waarden, waarmee de overeenkomstige "RMS Outlet Velocity Profile (OVP')" en "RMS Centre-line Velocity Profile (CVP)" werden verkregen, zie Figuur 10 respectievelijk Figuur 11. *Dyster* correleerde de CVP'-meetwaarden via formule (13).

$$\frac{V_r'}{V_{tip}} = 0.454 - 0.128 * \left( \frac{r}{R} \right) \quad (13)$$

*Nouri en Whitelaw* [14] gebruikten hun LDA-meetresultaten voor het bepalen van de stromingsprofielen door middel van snelheidsvectoren, zie Figuur 12. *Nouri* identificeerde in de stromingsprofielen twee ring-vortices, één onder en één boven de Rushton turbine.





## HOOFDSTUK 4

**EXPERIMENTEEL****4.1. Het geroerde vat.**

Het cilindrische glazen vat had een diameter van  $T = 0.286$  m. Hiermee liggen alle dimensies van de overige vatelementen vast, zie Figuur 5. Het actieve volume van het geroerde vat bedroeg 17.94 liter. De cylinder was op een, in een metalen plaat, uitgefreesde cirkel met dezelfde diameter geplaatst en hierin vastgekit. De roestvrije stalen keerschotten hadden een dikte van 6 mm. De stalen Rushton turbine, roerderas, de bodem van het vat en de keerschotten waren zwart gespoten, teneinde hinderlijke reflecties van het laserlicht bij het visualiseren van de stroming tegen te gaan. Het vat was in een eveneens glazen vierkante bak van dezelfde hoogte geplaatst, welke op identieke wijze als het vat op de stalen bodemplaat was gemonteerd. In de ruimte tussen het vat en de bak bevond zich een vloeistof met nagenoeg dezelfde refractie-index (water) als de vloeistof in het vat, teneinde optische vervorming tegen te gaan. Het geroerde vat had geen deksel. Het deksel van de vierkante bak (op de ruimte tussen vat en bak) werd, via vier pennen in de bodemplaat, op de bak vastgeschroefd.

De Rushton turbine werd aangedreven door een luchtgekoelde motor van 2027 Watt, met een maximaal toerental van 3000 omwentelingen per minuut. Door overbrengingsverhoudingen bedroeg het maximale toerental van de Rushton turbine 696 omwentelingen per minuut (11.6 omwentelingen per seconde).

De gehele roerderconfiguratie van vat en motor was bevestigd op een drie-dimensionaal traverseer-mechanisme, waarmee de configuratie handmatig of computer-gestuurd verplaatst kon worden. De minimale stapgrootte bedroeg 0.1 mm. Het traverseer-mechanisme met roerderconfiguratie stond gedurende het afstudeerproject opgesteld in de donkere kamer van het laboratorium.

**4.2. Viscositeitsbepaling.****4.2.1. Rheometers.**

Als rheometer is gebruikt een Contraves Rheomat model 115, met concentrische cylinder-configuratie met een effectief volume van ongeveer 25 ml (model concentrische cylinders CM TAM 015), waarmee afschuifsnelheden bereikt konden worden in het interval  $[22.4, 3398 \text{ s}^{-1}]$ . Bij Shell Research Rijswijk is



gebruik gemaakt van de Rheometrics system 4 van Rheometrics Inc. met een cone-and-plate configuratie. Met de configuratie konden afschuifsnelheden worden bereikt in het afschuif-interval  $[0.01, 3982 \text{ s}^{-1}]$ . Met de cone-and-plate configuratie is het mogelijk de eerste normaalspanning te meten, aan de hand waarvan het eventuele elastische gedrag van een modelvloeistof kan worden bepaald. Het meten van de eerste normaalspanning is bij het afstudeerproject alleen indicatief uitgevoerd.

#### 4.2.2. Experimentele werkwijze.

Van de stoffen, gebruikt om vloeistoffen van niet-Newtons gedrag te maken (zie ook § 4.2.3), zijn analytische testoplossingen gemaakt ter bepaling van de gewenste concentraties. De testoplossingen zijn (in triplo) geanalyseerd met de Contraves Rheomat in Delft, alsmede met de Rheometrics van Shell Research Rijswijk. De afwijking in viscositeit tussen beide rheometers bedroeg maximaal 4 procent.

Direct na het nemen van de foto's of het uitvoeren van de LDA-metingen, werd er een monster getrokken van de modelvloeistof en (in triplo) geanalyseerd met de Contraves Rheomat. De verkregen viscositeitsmeetgegevens werden vergeleken met de meetgegevens van de overeenkomstige analytische testoplossing. Indien de resultaten in viscositeit vergelijkbaar waren (nauwkeurigheid van 0.5 procent), werd aangenomen dat de testoplossing en de modelvloeistof reologisch identiek waren.

De nominale werktemperatuur, waarbij alle rheogrammen zijn bepaald, bedroeg voor beide rheometers  $20.0 \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### 4.2.3. Gebruikte modelvloeistoffen.

Gedemineraliseerd water en een verdunde glycerol oplossing zijn gebruikt als Newtonse modelvloeistoffen. De Newtonse modelvloeistoffen werden gebruikt als basis waartegen de resultaten, verkregen met de niet-Newtonse modelvloeistoffen, werden vergeleken.

Als niet-Newtonse modelvloeistoffen werden oplossingen, in gedemineraliseerd water, gebruikt van carboxymethylcellulose (CMC, handelsnaam Blanose) type 7H4 (Aqualon BV), CMC type medium viscosity (Sigma Chemie), hydroxyethylcellulose (HEC) type Cellosize WP-40, medium viscosity 1 (Fluka Chemica) en polyacrylamide (PAAM, Carl Roth GmbH and Co.).





Tabel 1. Concentraties van de verschillende gebruikte stoffen, de reologische parameters van de overeenkomstige modelvloeistoffen en de toepassingen waarvoor de modelvloeistoffen zijn gebruikt.

Stof	Concentratie	$\eta_0$	K	n	Toepassing
	[wt%]	[Pa*s]	[Pa*s <sup>n</sup> ]	[--]	
Glycerol	75	33	-----	1.00	Foto + LDA
Glycercol	83	89	-----	1.00	Foto
HEC	1.25	28	40.0E-3	0.91	Foto
CMC	0.60	29	50.4E-3	0.86	Foto
CMC	0.90	70	0.136	0.81	Foto
Blanose	0.10	14	31.6E-3	0.77	LDA
Blanose	0.15	26	63.3E-3	0.73	Foto
Blanose	0.20	48	0.121	0.68	LDA
Blanose	0.225	60	0.167	0.66	Foto
PAAm	0.25	70	79.5E-3	0.68	Foto + LDA
PAAm	0.375	155	0.168	0.61	Foto

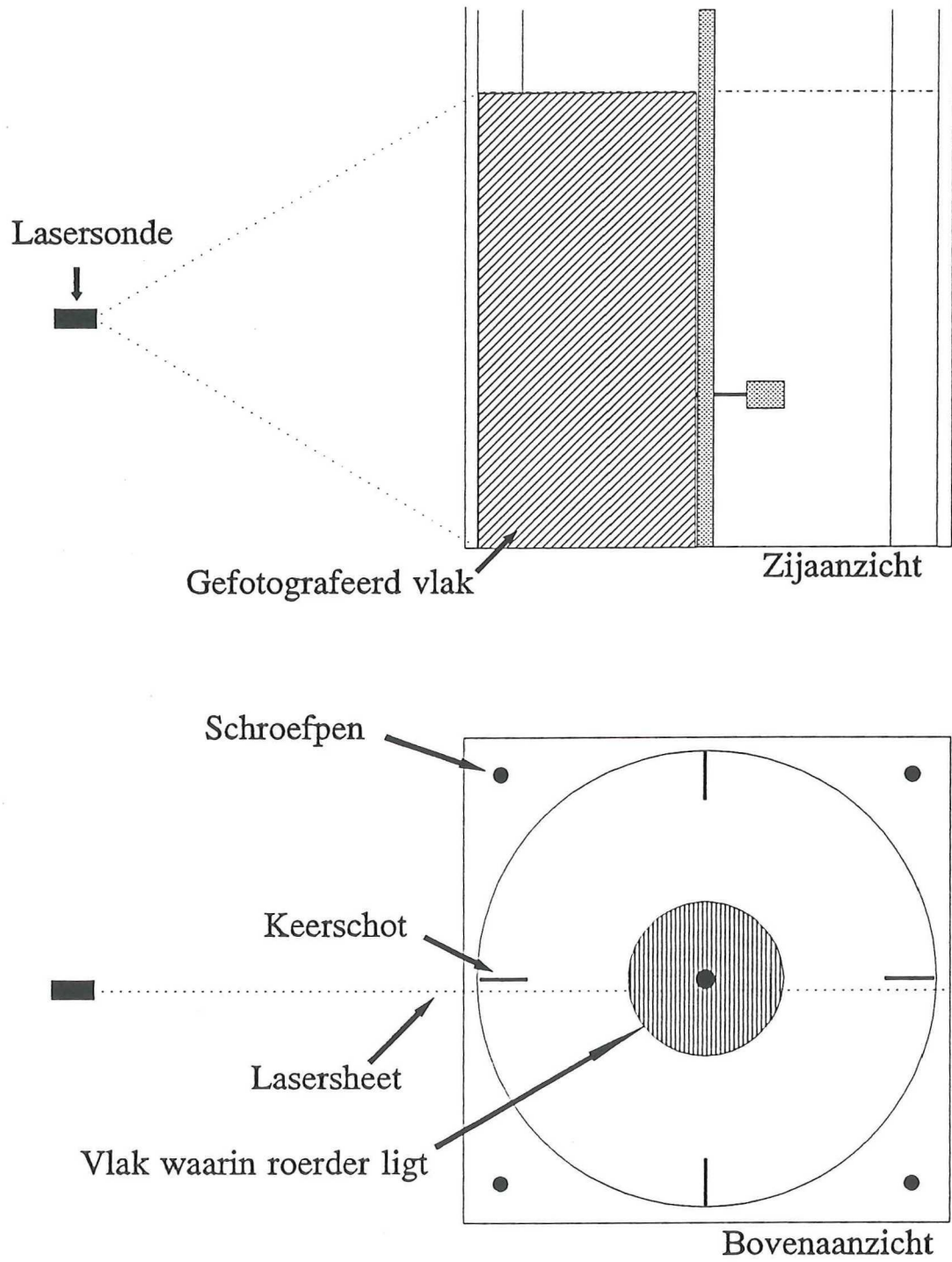


Fig 13. Positioneering lasersheet en gefotografeerd vlak.

---

In Tabel 1 staan de concentraties van de verschillende stoffen, alsmede de reologische parameters, bepaald met het model van Ostwald-de Waele (formule (3)) en de zero-shear viscosity vermeld. In Appendix E is de rheogram van de 0.2 wt% Blanose oplossing gegeven.

Alle gebruikte niet-Newtonse modelvloeistoffen waren biodegradabel. De modelvloeistoffen konden zodoende niet worden opgeslagen. De niet-Newtonse modeloplossingen werden één dag voordat de foto's werden gemaakt of LDA-metingen werden uitgevoerd, aangemaakt in het vat.

### 4.3. Stromingsvisualisatie.

#### 4.3.1. Gebruikte apparatuur en materialen.

De lasersheet, met een dikte van 2 mm, werd verkregen door een cylinder-vormige lens in het pad van de laserstraal (blauw,  $\lambda = 488$  nm) te plaatsen, welke afkomstig was van een Spectra Physics Argon-Ion laser, model 2016. De laser had een effectief vermogen van 0.15 W. Witte, bolvormige polystyreen-deeltjes ( $\rho = 1050$  kg/m<sup>3</sup>), met een diameter van  $0.56 \pm 0.16$  mm, werden gebruikt om het laserlicht te verstrooien.

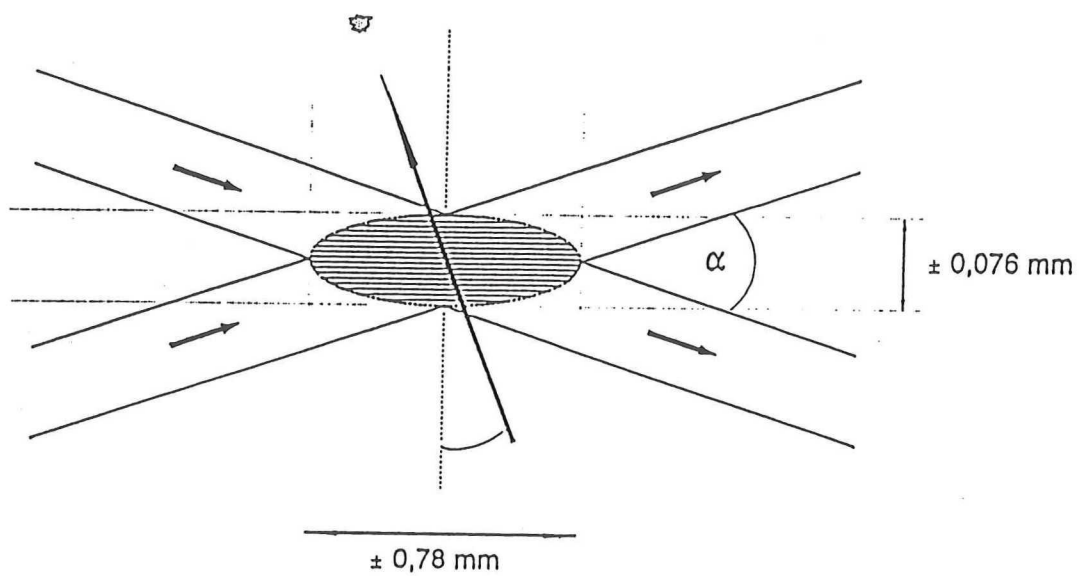
De foto's zijn gemaakt met een Nikon camera type F3, in combinatie met een 55 mm Macrolens. Als fotofilm werd Kodak Gold T-max 3200 ASA film gebruikt. De negatieven werden, met standaard fixeermiddelen, geforceerd ontwikkeld en zodoende opgewaarderd naar 6400 ASA, waardoor een beter contrast werd verkregen.

#### 4.3.2. Experimentele werkwijze.

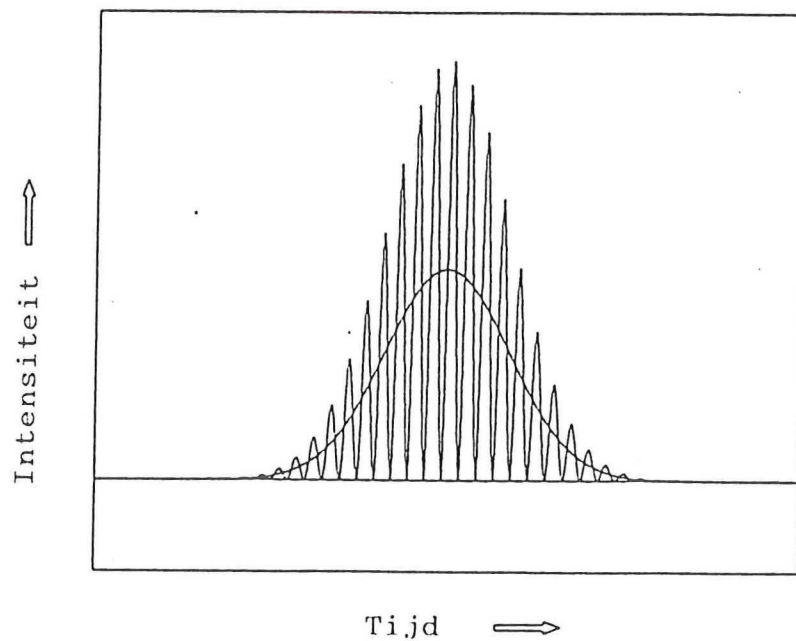
De gewenste oplossing werd met gedemineraliseerd water aangemaakt in het geroerde vat, zodanig dat de vloeistofhoogte gelijk was aan de vatdiameter. Nadat de vaste stof was opgelost, werden de polystyreendeeltjes toegevoegd. De gebruikte concentratie polystyreendeeltjes bedroeg 0.01 volume-procent.

De emitterende lasersonde was zo gepositioneerd, dat de lasersheet rakelings langs de roerderas ging, teneinde overbelichting door de roerderas te voorkomen. De onderkant van de lasersheet kwam de onderkant van het vat binnen op het snijpunt van vatbodem en vatwand, zie Figuur 13. De roerder draaide, gedurende het afstudeerproject, "met de klok mee", gezien van het bovenaanzicht van Figuur 13.

Om optimaal gebruik te kunnen maken van de fotofilm is alleen het vlak voor het aangestroomde keerschot, begrensd door vatbodem, vloeistofoppervlak, vatwand en roerderas,



Figuur 14A. Het gevormde interferentiepatroon bij het snijden van twee laserstralen.



Figuur 14B. De intensiteitsverdeling van een ideale Doppler Burst in het tijddomein.



gefotografeerd, zie Figuur 13. Om positioneel vergelijkbare foto's te verkrijgen stond het camera-statief op een vaste plaats voor het vat opgesteld, waarbij de posities van de poten van het statief op de grond waren gemarkeerd. De kortste afstand tussen lasersheet en filmmateriaal bedroeg 65 cm.

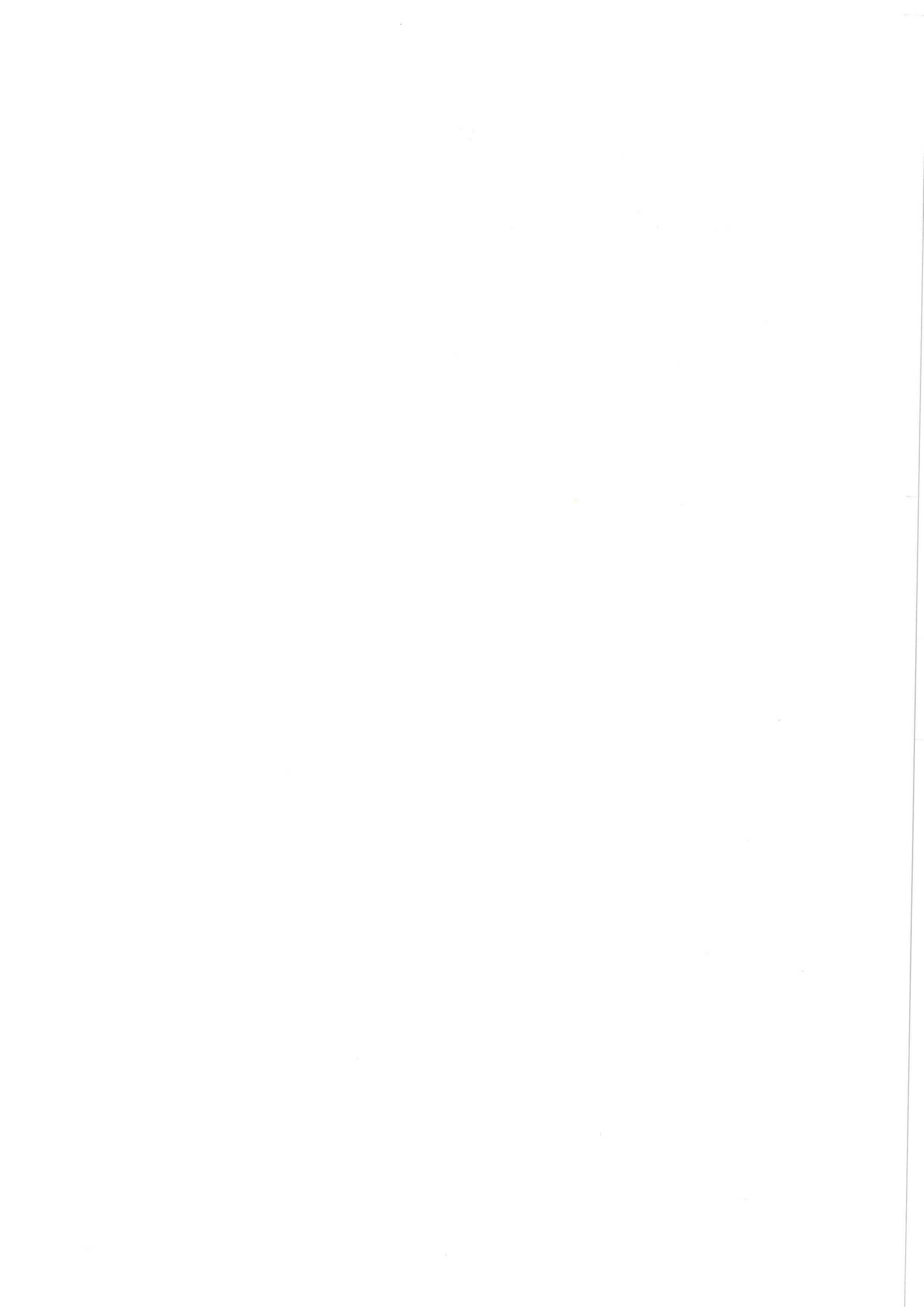
De foto's zijn gemaakt via het principe van de zogenoemde strijklicht-fotografie. De gebruikte diafragma's waren 8, 11 en 16. De sluitertijden varieerden tussen de 0.5 en 4 s, afhankelijk van het gebruikte diafragma. Naast de instelbare sluitertijden, zijn voor iedere modelvloeistof bij elk diafragma foto's gemaakt via de "automatic shutter control"-optie van de camera. De sluitertijden werden hierbij gemeten met een stopwatch en dienden als richtlijn voor de handmatig in te stellen sluitertijden.

De toegepaste roerdersnelheid was afhankelijk van de modelvloeistof (net geen inzuiging van lucht) en varieerde tussen de  $5 \text{ s}^{-1}$  voor water tot  $11.6 \text{ s}^{-1}$  (maximaal toerental) voor de viscoelastische PAAm oplossingen. De temperatuur van de modelvloeistoffen was afhankelijk van de temperatuur in het laboratorium (en zodoende dag-afhankelijk) en varieerde tussen de  $18.5 \text{ }^\circ\text{C}$  en  $21.0 \text{ }^\circ\text{C}$ . De waarde van de viscositeit is hiervoor gecorrigeerd [15], [16]. Gedurende het nemen van de foto's ( $\pm 2$  minuten) is de temperatuur van de afzonderlijke modelvloeistoffen constant verondersteld. Na het nemen van de foto's werd een monster getrokken van de modelvloeistof voor de viscositeitsbepaling, zie § 4.2.2.

#### 4.4. Laser Doppler Anemometrie (LDA).

De vloeistofsnelheidsmetingen zijn uitgevoerd via de Laser Doppler Anemometrie (LDA) techniek. Door gebruik te maken van het Doppler-effect - een lichtfrequentieverandering veroorzaakt door de relatieve beweging tussen bron en waarnemer - kan de stromingssnelheid van een transparant medium worden bepaald. Aangezien LDA een optische methode is, verstoort deze techniek de stroming van het medium niet.

De techniek van de dual-beam Laser Doppler Anemometrie, zoals gebruikt bij het onderzoek, is gebaseerd op het gebruik van twee onderling coherente, monochromatische laserstralen. Door het focussen van de twee laserstralen, snijden de twee stralen elkaar en wordt een doorsnijdingsvolume met een interferentiepatroon verkregen, zie Figuur 14A. Het interferentiepatroon bestaat uit opeenvolgende donkere en lichte vlakken, "fringes" genoemd. Een deeltje, waarvan mag worden aangenomen dat het de stroming goed volgt, dat door het doorsnijdingsvolume gaat, komt beurtelings de donkere en lichte vlakken van het interferentiepatroon tegen. De frequentie, waarmee het deeltje de "fringes" tegenkomt, wordt de Doppler frequentie





genoemd. Het Gaussische signaal, dat wordt gevormd wanneer het deeltje door het interferentiepatroon heengaat (zie Figuur 14B), wordt een "Doppler Burst" genoemd. De richting van de stroming wordt bepaald, door gebruik te maken van "frequency-shifting". Hierbij krijgt één van beide laserstralen een hogere frequentie. De "fringes" bewegen hierdoor van de laserstraal met de hogere frequentie naar de laserstraal met de lagere frequentie. De richting van de vloeistofstroming wordt bepaald door het feit, of het deeltje in dezelfde of in tegengestelde richting beweegt als de "fringes". Voor een uitgebreide bespreking van de LDA-techniek wordt verwezen naar *Drain* [17].

#### 4.4.1. Apparatuur.

De lichtbron van het LDA-systeem is een Argon-Ion laser, model 2016 van Spectra Physics. De laser kan verschillende kleuren licht produceren, waaronder groen ( $\lambda = 514.5$  nm) en blauw ( $\lambda = 488.0$  nm). Het maximale vermogen van de laser bedraagt 4 W.

Het licht van de laser wordt in de "Colorburst Multicolor beam-separator", model 9201 van TSI Inc., gesplitst in afzonderlijke groene en blauwe stralen, per snelheidscomponent één kleur. De stralen worden gezamenlijk via een glasvezelkabel naar een sonde gestuurd, ontkoppeld, gefocust met een lens en het geroerde vat ingezonden.

Het LDA-systeem maakt gebruik van de "backscattering"-techniek, wat betekent, dat de sonde, die het licht uitzendt, ook wordt gebruikt als ontvanger van het verstrooide licht. Het opvangen, verstrooide licht wordt gekoppeld en via een glasvezelkabel naar de "Colorlink" gestuurd. De "Colorlink Multicolor Receiver", model 9230 van TSI Inc., splitst het binnenkomende licht in de kleurcomponenten groen en blauw en zet de ontkoppelde lichtstralen via 2 fotomultiplifiers om in elektrische signalen en die vervolgens worden versterkt.

Het elektrische signaal wordt naar de "Digital Burst Correlator", model IFA 750 van TSI Inc. gestuurd. Het binnenkomende signaal wordt gefilterd, teneinde de signaal/ruis ratio te verbeteren en vervolgens wordt per "Burst" de frequentie bepaald. De "Digital Burst Correlator" past een aantal validatie-criteria toe, waaraan de metingen moeten voldoen, alvorens deze worden goedgekeurd en beschikbaar komen voor verder gebruik.

Via het Unix software pakket VEETEST is de gemiddelde waarde en de RMS-waarde bepaald van de ruwe meetgegevens, afkomstig van de "Digital Burst Correlator".

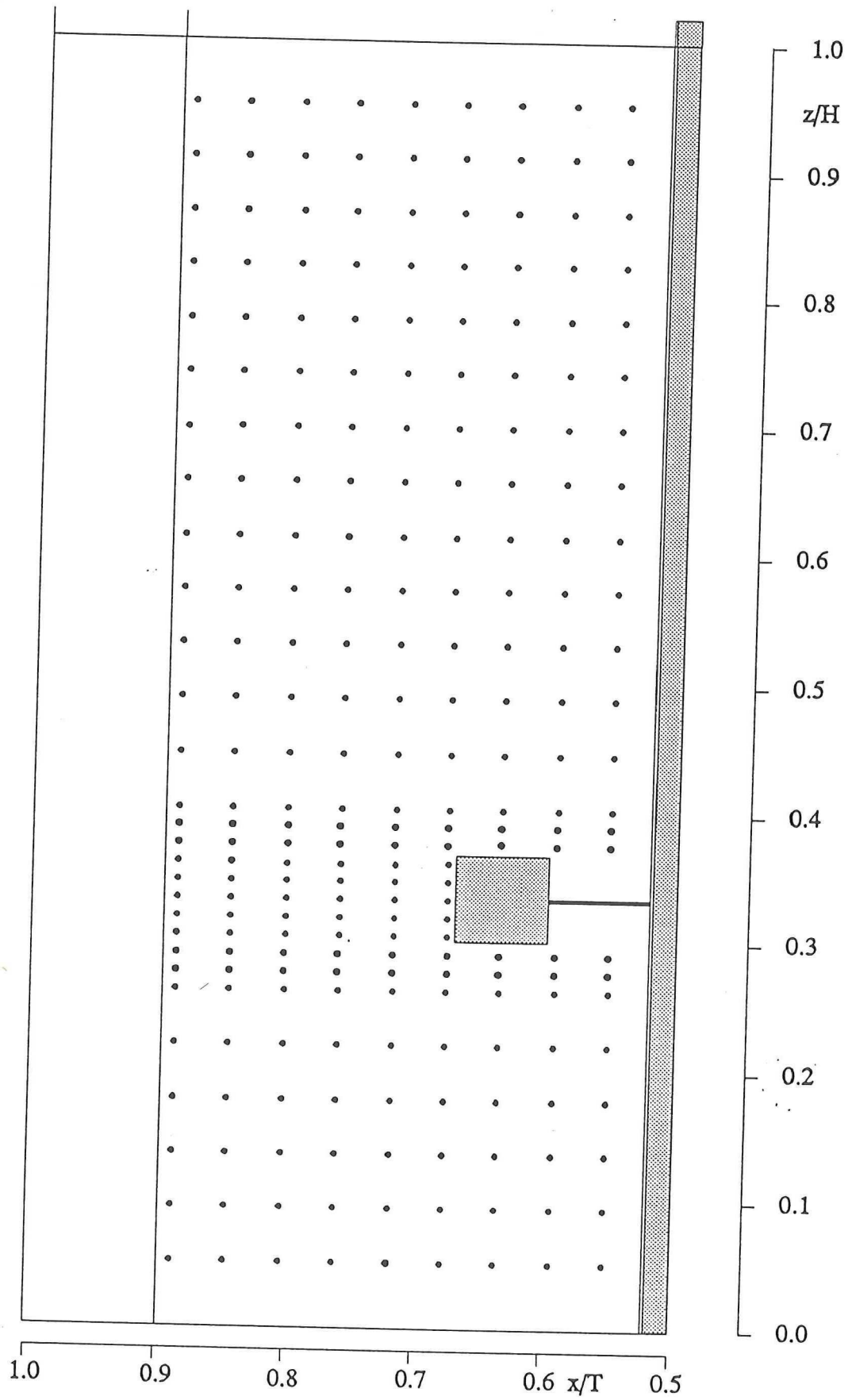


Fig 15. LDA-metposities voor LDA-foto's en roerderuitstroomprofielen.



#### 4.4.2. Experimentele werkwijze.

Het groene optische meetvolume werd gebruikt voor het meten van de axiale vloeistofsnelheden en het blauwe optische meetvolume werd gebruikt voor het meten van de radiale vloeistofsnelheden. In Tabel 2 zijn de afmetingen van beide optische meetvolumes weergegeven (*Drain* [17]).

Tabel 2. De "fringe spacing", lengte en diameter van de optische meetvolumes.

	Fringe spacing [ $\mu\text{m}$ ]	Lengte [mm]	Diameter [mm]	Snelheidscomp.
Groen	2.667	0.805	0.0780	Axiaal
Blauw	2.530	0.763	0.0740	Radiaal

De optische meetvolumes werden via het eerder beschreven traverseer-mechanisme op de gewenste meetpunten gepositioneerd. De brandpuntsafstand van de lens bedroeg 250 mm. De afstand tussen de nog niet gefocusseerde laserstralen bedroeg 48.5 mm voor zowel het groene als het blauwe laserlicht. Teneinde een hoge data rate te verkrijgen zijn aan de afzonderlijke modelvloeistoffen extra deeltjes ( $< 1$  ml) toegevoegd. De toegevoegde deeltjes hadden een diameter van 4  $\mu\text{m}$  en waren voorzien van een metaallaagje, teneinde een hoog reflecterend vermogen te verkrijgen. De data rate was afhankelijk van de meetpositie (hoe hoger de vloeistofsnelheid, des te hoger de data rate) en de modelvloeistof (kleuring) en varieerde tussen de 100 tot 3500 vloeistofsnelheidsmetingen per seconde (0,1 kHz - 3,5 kHz). Per meetpositie werden 40.000 vloeistofsnelheidsmetingen verricht (40 kByte). In het gebied tot 20 mm axiaal boven en onder de hartlijn zijn de vloeistofsnelheidsmetingen uitgevoerd in de "Coincidence Mode" (de "Bursts" van de twee meetrichtingen moeten binnen een zeker tijdsinterval samenvallen, alvorens te worden gevalideerd), op alle overige meetposities in de "Random Mode". Op deze overige meetposities was de data rate te laag, om in "Coincidence Mode" te kunnen meten. De nauwkeurigheid in de absolute gemiddelde vloeistofsnelheid bedroeg hierbij 0.004 m/s. Deze nauwkeurigheid is vastgesteld door op één meetpositie de gemiddelde vloeistofsnelheid een aantal malen te bepalen en van de gevonden gemiddelde waarden de standaarddeviatie te berekenen. Gedurende alle LDA-metingen werd de kwaliteit van de meetsignalen gecontroleerd met een oscilloscoop. Het gebruikte vermogen van de laser was afhankelijk van de modelvloeistof en de positie in het geroerde vat en varieerde tussen de 0,6 en 4,0 W. Criterium hierbij was een voldoende hoge data rate ( $\geq 100$  vloeistofsnelheidsmetingen per seconde). In Figuur 15 is een overzicht

Tabel 3. Definities van de verschillende dimensieloze roerder-  
 uitstroomprofielen voor gegeven radiale afstanden van  
 de roerdertip. De gemiddelde waarden en RMS-waarden  
 worden dimensieloos gemaakt met de tipsnelheid.

Afkorting	Volledige naam	Betekenis
OVP	Outlet Velocity Profile	Gemiddelde radiale snelheden op verschillende axiale meetposities
RMS OVP (OVP')	RMS Outlet Velocity Profile	RMS-waarde radiale snelheden op verschillende axiale meetposities
CVP	Centre-line Velocity Profile	Gemiddelde radiale snelheden op hartlijn
RMS CVP (CVP')	RMS Centre-line Velocity Profile	RMS-waarde radiale snelheden op hartlijn
AOVP	Axial Outlet Velocity Profile	Gemiddelde axiale snelheden op verschillende axiale meetposities
RMS AOVP (AOVP')	RMS Axial Outlet Velocity Profile	RMS-waarden axiale snelheden op verschillende axiale meetposities

gegeven van de LDA-metposities in het geroerde vat. De meetposities liggen in het vlak, ingesloten door vloeistofoppervlak, roerders, vatbodem en keerschot. Naar de met snelheidsvectoren ingetekende figuren wordt gerefereerd als vectorvelden. In lijn met het gefotografeerde 2-dimensionale vlak, zijn de tangentiële vloeistofsnelheden niet bepaald.

De gewenste oplossing werd met gedemineraliseerd water aangemaakt in het geroerde vat, zodanig dat de vloeistofhoogte gelijk was aan de vatdiameter. De toegepaste roerdersnelheid was afhankelijk van de modelvloeistof en varieerde tussen de  $4 \text{ s}^{-1}$  tot  $11 \text{ s}^{-1}$ . De temperatuur van de modelvloeistoffen was afhankelijk van de temperatuur in het laboratorium (en zodoende dag-afhankelijk) en varieerde tussen de  $19.0 \text{ }^\circ\text{C}$  en  $24.0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Na de LDA-metingen werd een monster getrokken van de modelvloeistof voor de viscositeitsbepaling, zie § 4.2.2.

In het gebied 20 mm boven en onder de roerder is met drie rotatiesnelheden van de roerder gewerkt, waarvan de hoogte afhankelijk was van de gebruikte modelvloeistof. De LDA-metgegevens, verkregen met de hoogste rotatiesnelheid van de roerder werden gebruikt voor het maken van de vectorvelden. De LDA-metgegevens van alle drie de rotatiesnelheden werden gebruikt voor het maken van de OVP's, RMS OVP's, CVP's, RMS CVP's, AOVP's (OVP's op basis van de axiale vloeistofsnelheidscomponent) en RMS AOVP's, zie ook Tabel 3.

Alle niet-Newtonse modelvloeistoffen hadden een dichtheid gelijk aan die van water. De Newtonse modelvloeistof glycerol had een dichtheid van  $1189 \text{ kg/m}^3$ .

Via een koelsysteem is de temperatuur van de viscoelastische vloeistof op  $20 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$  gehandhaafd, om effecten ten gevolge van de temperatuursafhankelijkheid van de elasticiteit te minimaliseren. Hierbij werd in een gesloten circuit het water uit de glazen vierkante bak via een thermostaatbad op  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  gehouden. Bij de overige modelvloeistoffen is geen koelsysteem gebruikt.





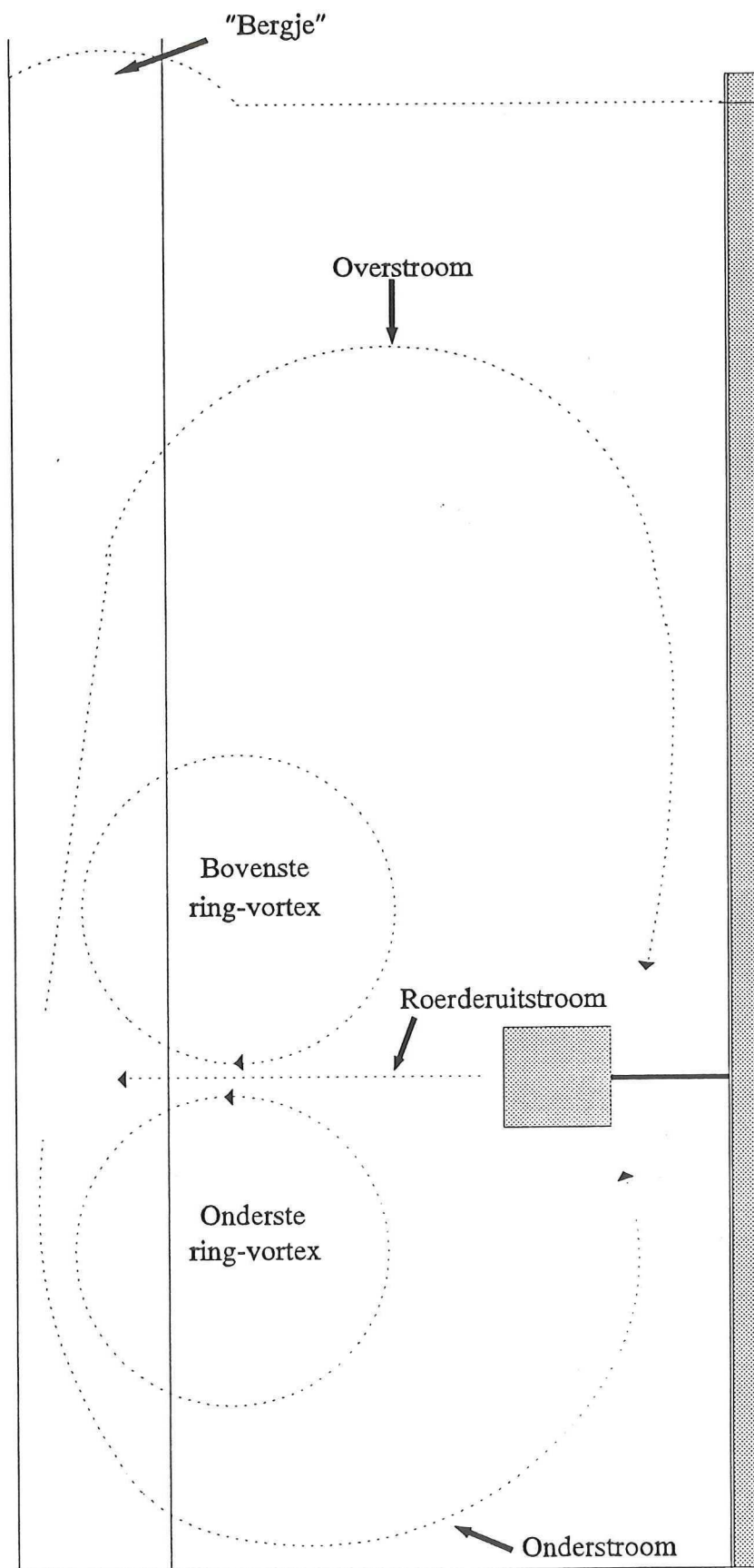


Fig 16. Schematische weergave van de onderdelen van het turbulente stromingspatroon.



Foto 3  
Glycerol ( $\eta = 33 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ )  
 $N = 9$ ,  $Re = 2927$   
 $t \approx 1 \text{ s}$  (auto), diafr. = 11

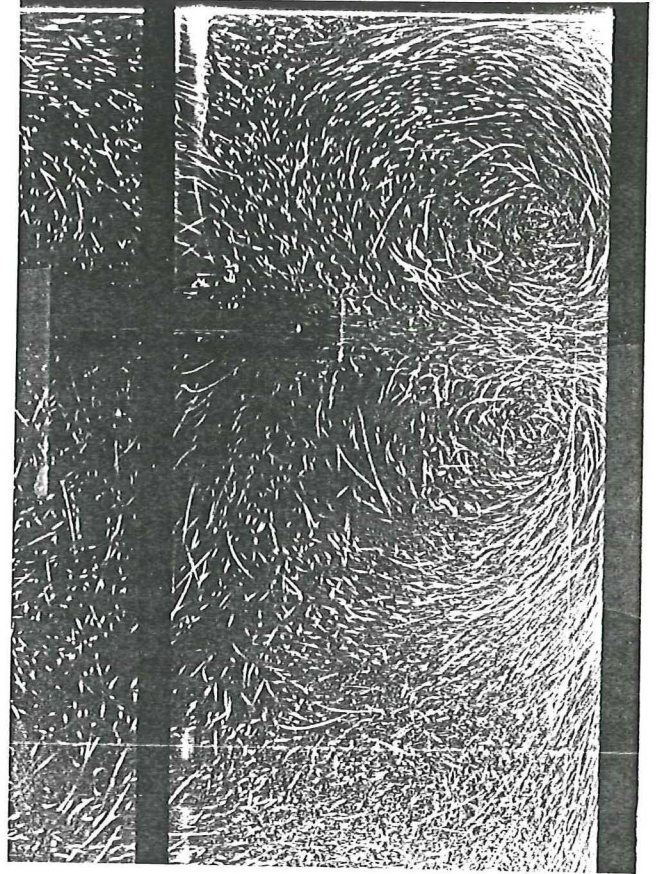


Foto 4  
Glycerol ( $\eta = 88 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ )  
 $N = 11.6$ ,  $Re = 1399$   
 $t = 0.5 \text{ s}$ , diafr. = 8

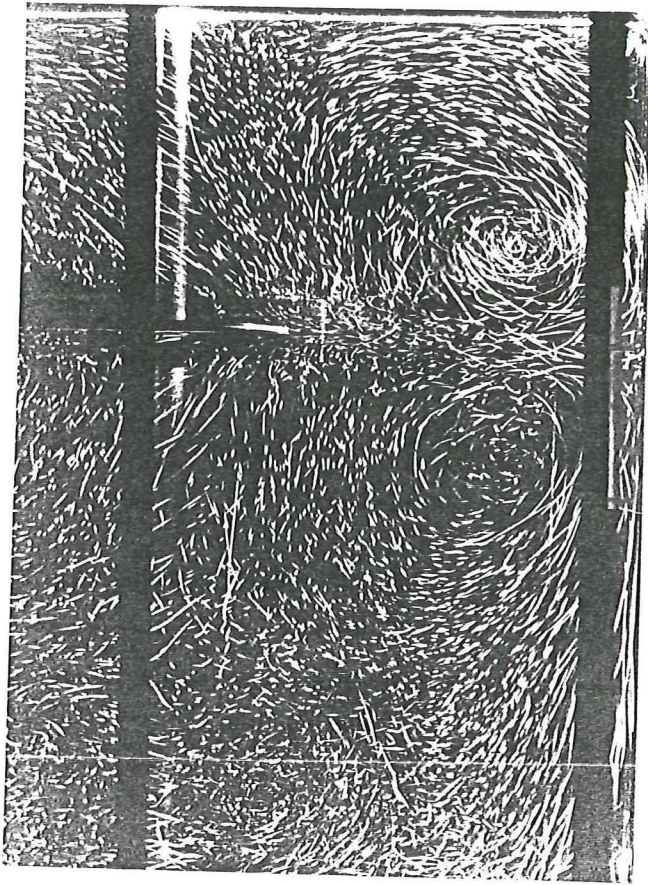


Foto 1  
Water  
 $N = 5$ ,  $Re = 45000$   
 $t = 8 \text{ s}$ , diafr. = 22

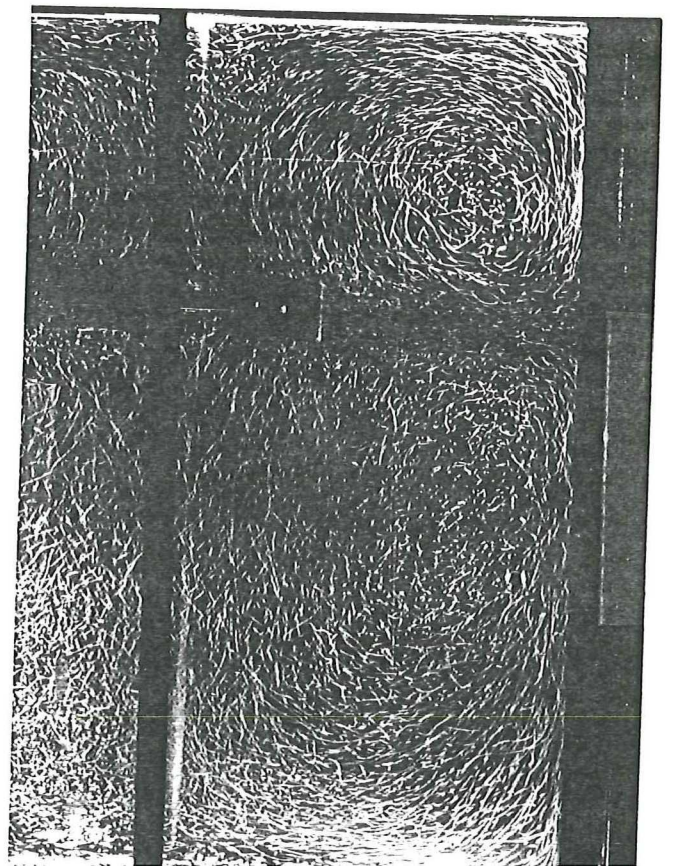
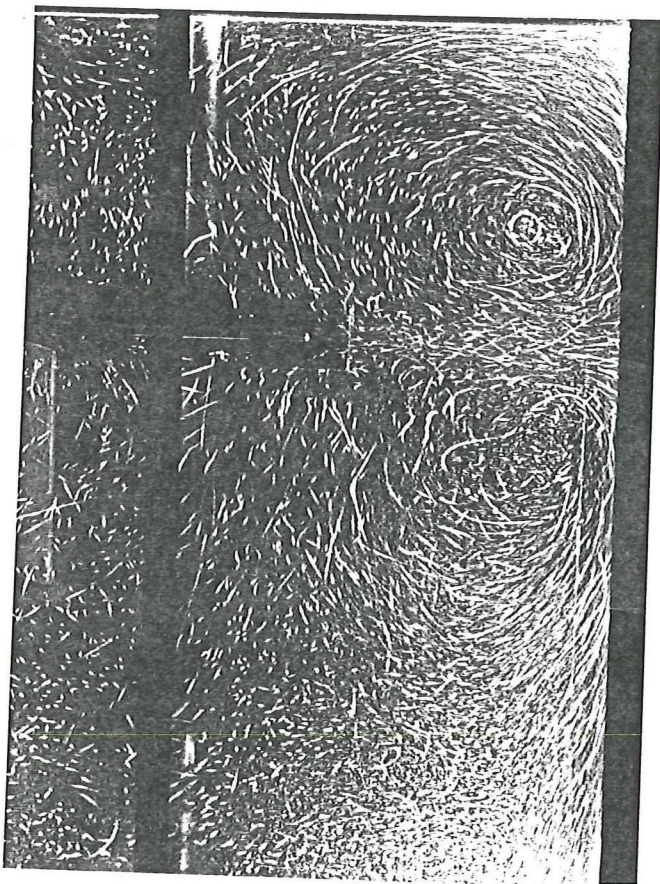


Foto 2  
Glycerol ( $\eta = 33 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ )  
 $N = 9$ ,  $Re = 2927$   
 $t = 0.5 \text{ s}$ , diafr. = 8





## HOOFDSTUK 5

**RESULTATEN****5.1. Stromingsvisualisatie via foto's.****5.1.1. Inleiding.**

Teneinde de foto's van de turbulente stroming van de niet-Newtonse modelvloeistoffen te kunnen beoordelen, zullen in de volgende paragraaf de foto's van de turbulente stroming van de Newtonse modelvloeistoffen uitvoerig worden besproken. Deze foto's dienen als referentie voor de foto's van de niet-Newtonse modelvloeistoffen. De foto's worden gebruikt voor het identificeren van de verschillende onderdelen van de vloeistofstroming. Er kunnen geen uitspraken gedaan over verschillen in absolute vloeistofsnelheden tussen de onderdelen van het stromingspatroon in de modelvloeistoffen, alsmede tussen de modelvloeistoffen onderling. Dit vanwege de 3-dimensionale beweging van de vloeistof. Uitspraken over absolute vloeistofsnelheden worden gedaan in § 5.2 en § 5.3 (LDA). In § 5.1.3 en § 5.1.4. worden de foto's van de niet-Newtonse modelvloeistoffen besproken. In Figuur 16 zijn de onderdelen van het turbulente vloeistofstromingspatroon weergegeven.

**5.1.2. Turbulente Newtonse stroming.**

Als Newtonse modelvloeistoffen zijn water (Foto 1) en twee waterige glycerol oplossingen gebruikt, met viscositeiten van 33 (Foto's 2 en 3) en 88 (Foto 4) maal die van water. Bij elke modelvloeistof is een vaste rotatiesnelheid van de roerder toegepast.

De turbulente Newtonse vloeistofstroming wordt gekarakteriseerd door de aanwezigheid van een grote, radiale vloeistofuitstroom, afkomstig van de roerder. Op Foto's 1 t/m 4 maakt de uitstroom een hoek van ongeveer  $5^\circ$  naar boven ten opzichte van de hartlijn. De hartlijn is de kleinste afstand tussen het centrum van de roerder en keerschot. De uitstroom wordt naar boven en naar beneden afgebogen bij het raken van de vatwand. Dit leidt onder meer tot de vorming van twee ring-vortices.

Op Foto's 2 t/m 4 zijn beide ring-vortices duidelijk zichtbaar. Met name in water is de bovenste ring-vortex moeilijker te identificeren. De onderste ring-vortex is op alle foto's duidelijker te identificeren. Alle ring-vortices



zijn van dezelfde grootte-orde (diameter van ongeveer 50 mm) en de centra van alle ring-vortices bevinden zich op nagenoeg dezelfde positie, net voor het keerschot (ongeveer 20 mm van de keerschotrand). De centra van de onderste en bovenste ring-vortex liggen op dezelfde verticale lijn. De afstand tussen de centra van de ring-vortices bedraagt ongeveer 75 mm ( $1\frac{1}{2}$  maal een ring-vortex diameter).

Naast de twee ring-vortices zijn er twee grotere vloeistofstromen te identificeren, de zogenoemde overstroom en onderstroom. Deze ontstaan uit de afgebogen vloeistofstromen en bewegen nagenoeg parallel (hoek  $\approx 10^\circ$ ) met het keerschot naar het vloeistofoppervlak, respectievelijk de vatbodem. De vloeistofstromen vervolgen hun weg parallel met het vloeistofoppervlak respectievelijk de vatbodem en worden door de bladen van de roerder nagenoeg verticaal ingezogen. De onderstroom is op alle foto's eenvoudiger te identificeren dan de overstroom, met uitzondering van de overstroom in water (Foto 1). Dit is echter toeval. De overstroom in water is duidelijker zichtbaar, tengevolge van het "zwabberen" van de bovenkant van de lasersheet over het vloeistofoppervlak en het gebied direct daaronder, in combinatie met de hoge sluitertijd. De lasersheet is hierdoor plaatselijk veel "dikker" dan de oorspronkelijke 2 mm.

Omdat de lasersheet rakelings langs de roerderas gaat, is daar op Foto's 1 t/m 4 de tangentiële component van de stroming zichtbaar. De tangentiële stroming in de nabijheid van de roerder, wordt door de schijf van de roerder onder een hoek van ongeveer  $45^\circ$  ingezogen, zowel aan de bovenkant als onderkant van de roerder.

### 5.1.3. Turbulente pseudoplastische stroming.

Als pseudoplastische modelvloeistoffen zijn gebruikt 0.6 wt% (Foto 5) en 0.9 wt% (Foto's 6, 7) oplossingen van CMC, een 1.25 wt% oplossing van HEC (Foto's 8, 9) en 0.15 wt% (Foto's 10, 11) en 0.225 wt% (Foto's 12, 13 en 14) oplossingen van Blanose. De reologische gegevens van deze vloeistoffen staan vermeld in Tabel 1. Bij elke modelvloeistof is een vaste rotatiesnelheid van de roerder toegepast.

#### CMC

Foto 5 (0.6 wt%) vertoont grote overeenkomsten met de foto's van de Newtonse modelvloeistoffen. Beide ring-vortices zijn duidelijk identificeerbaar. De diameter van de ring-vortices, de onderlinge afstand, alsmede de afstand tot het keerschot, zijn van dezelfde grootte-orde als die van de ring-vortices in de Newtonse modelvloeistoffen. De tangentiële stroming op



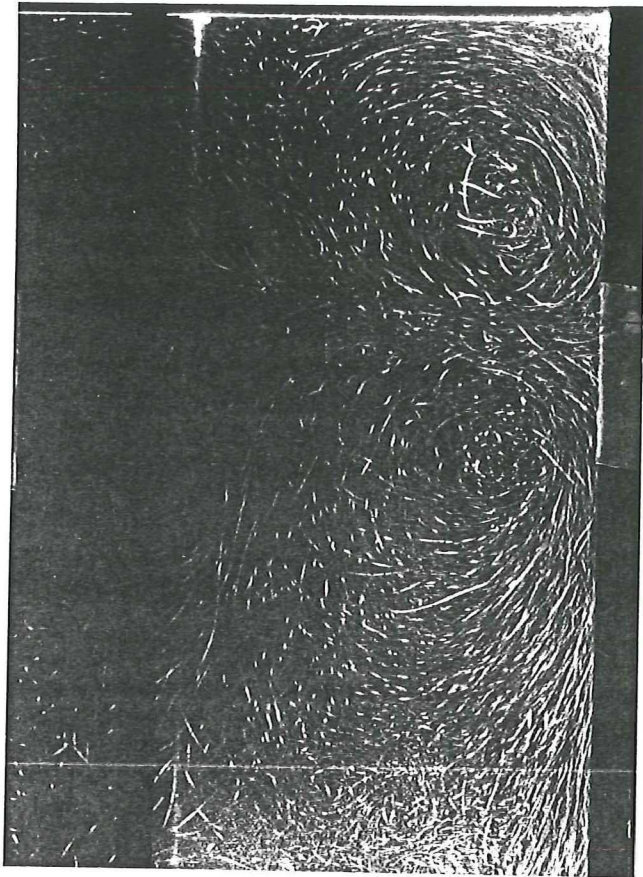


Foto 8  
1.25 wt% HEC  
N = 9, Re = 2897  
t ≈ 0.5 s (auto), diafr. = 8

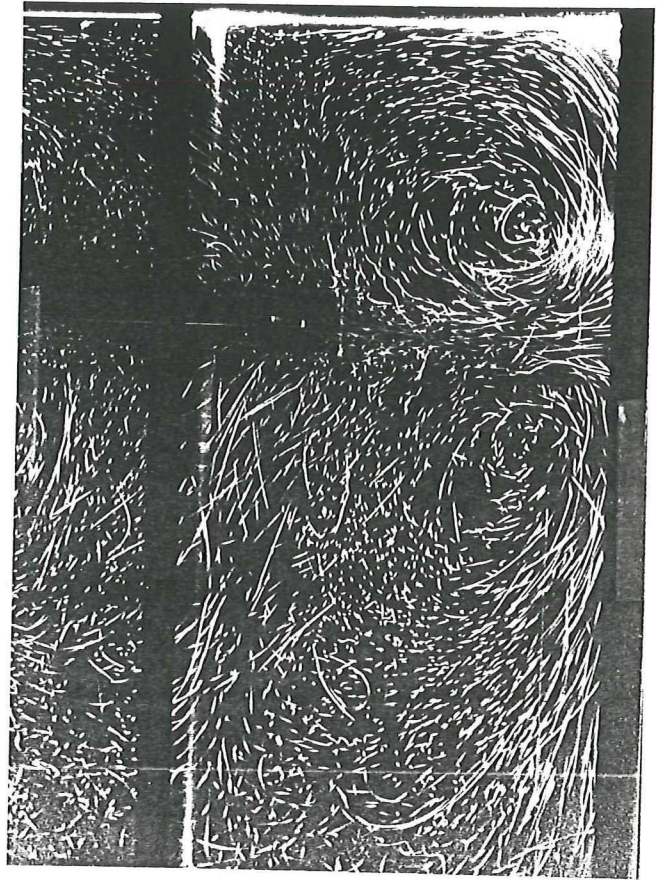


Foto 7  
0.9 wt% CMC  
N = 10, Re = 1635  
t = 1 s, diafr. = 8

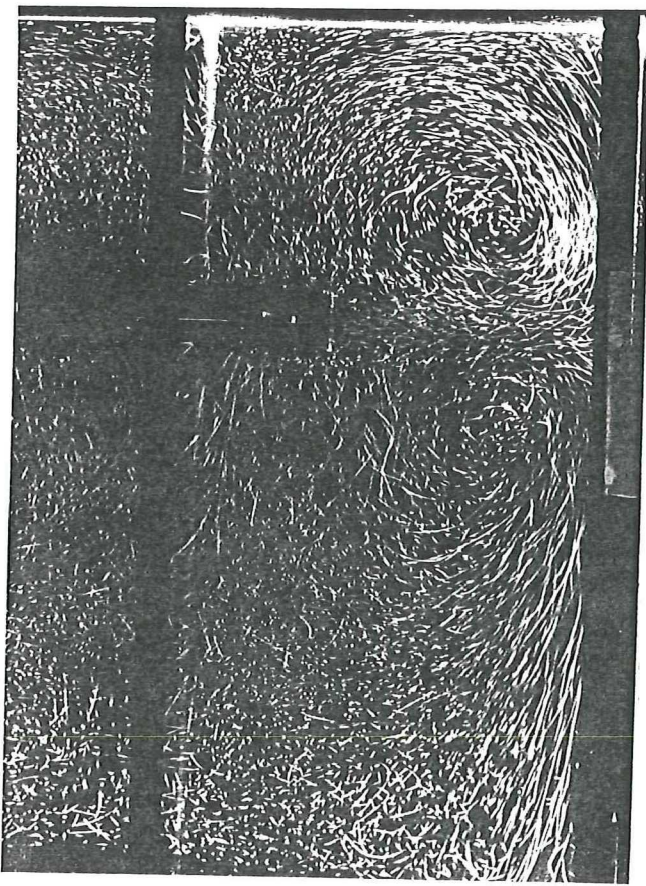


Foto 6  
0.9 wt% CMC  
N = 10, Re = 1635  
t ≈ 2 s (auto), diafr. = 11

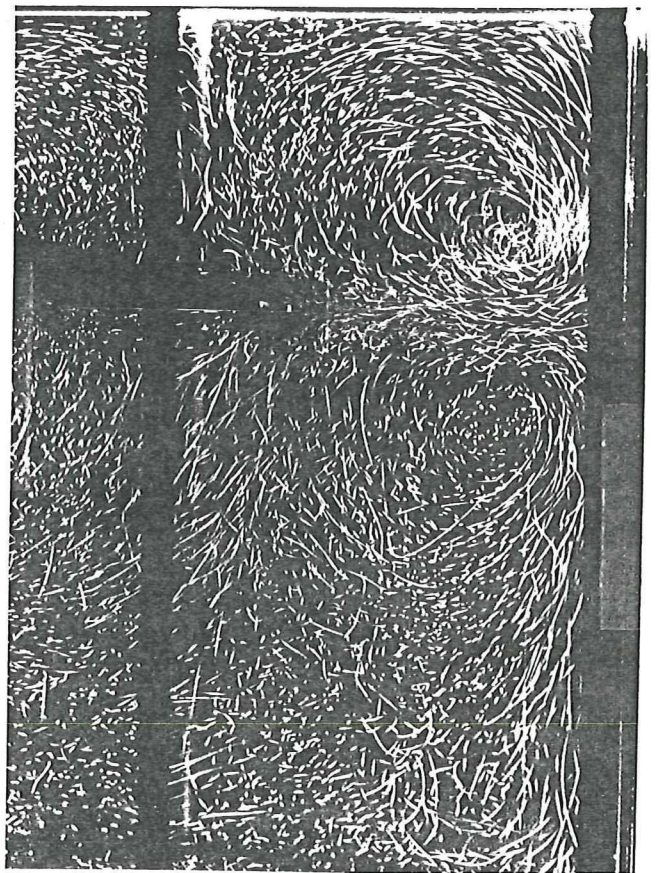


Foto 5  
0.6 wt% CMC  
(5 ml PS)  
N = 8.5, Re = 3086  
t ≈ 2 s (auto), diafr. = 16



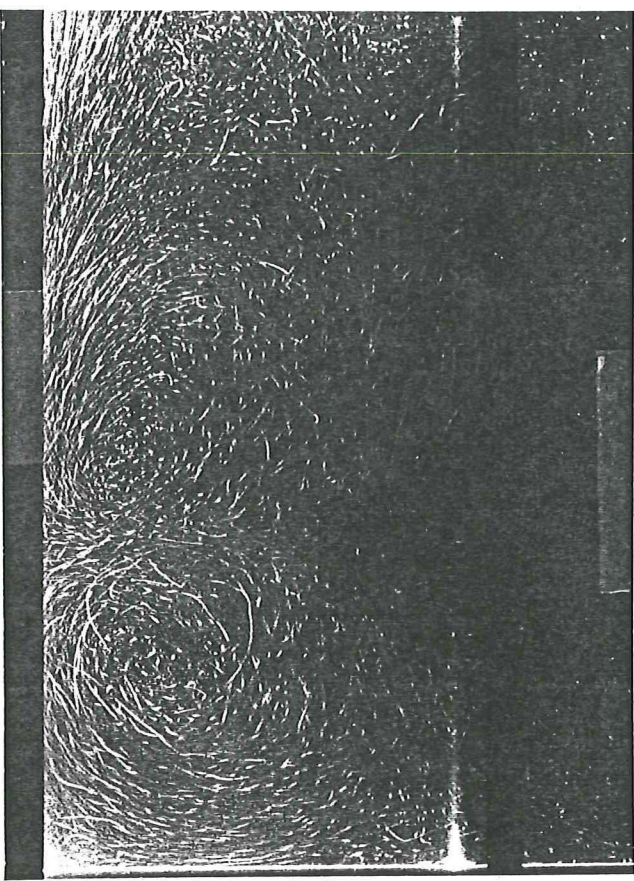


Foto 9  
1.25 wt% HEC  
N = 9, Re = 2897  
t ≈ 1 s (auto), diafr. = 11

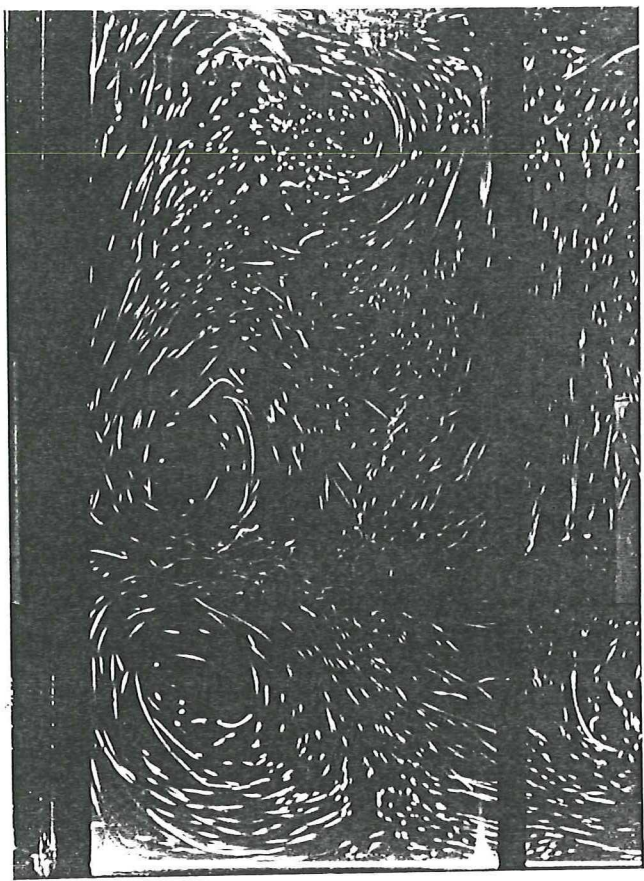


Foto 10  
0.15 wt% Blanose  
N = 8.5, Re = 4176 (5 ml PS)  
t = 0.25 s, diafr. = 8

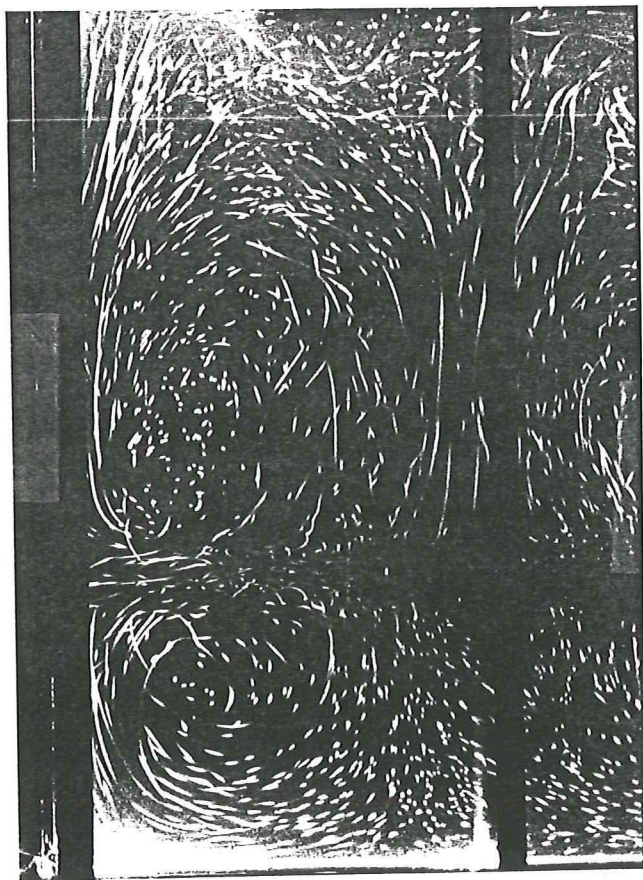


Foto 11  
0.15 wt% Blanose  
N = 8.5, Re = 4176  
t = 0.5 s, diafr. = 8

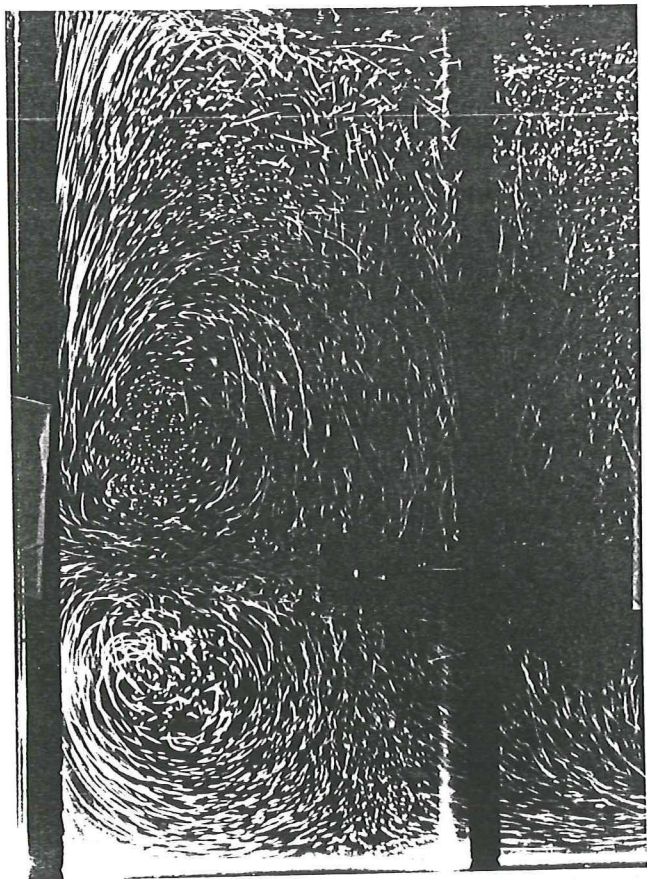


Foto 12  
0.225 wt% Blanose  
N = 10, Re = 2712  
t ≈ 2 s (auto), diafr. = 11



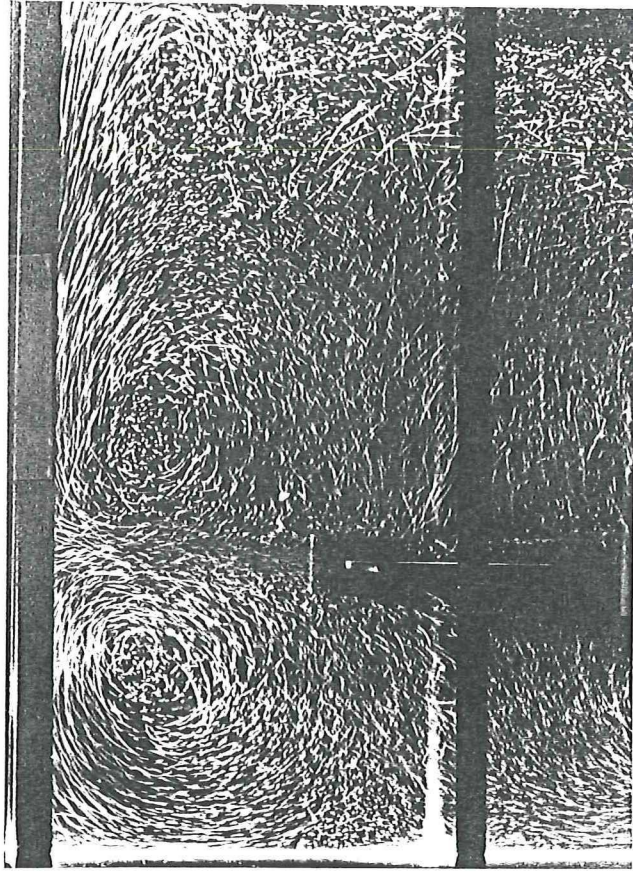


Foto 13  
0.225 wt% Blanose  
N = 10, Re = 2712  
t = 4 s, diafr. = 8

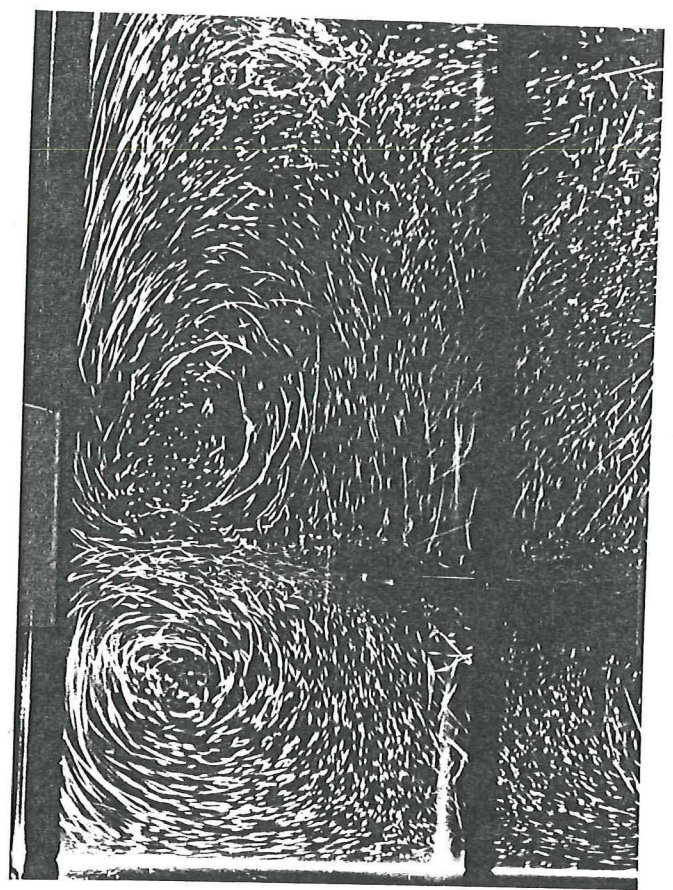


Foto 14  
0.225 wt% Blanose  
N = 10, Re = 2712  
t = 1 s, diafr. = 8

---

Foto 5 lijkt nagenoeg alleen aan de bovenkant van de roerder de vathelpt binnen te komen.

De uitstroom op Foto 6 (0.9 wt%) heeft een hoek van ongeveer  $5^\circ$  met de hartlijn, naar beneden. Op Foto 7 (0.9 wt%) heeft de uitstroom dezelfde hoek en richting als op Foto's 1 t/m 4 en 5. De tangentiële stroming komt nagenoeg volledig boven de roerder de vathelpt binnen. Op Foto 7 en in mindere mate op Foto 6 is te zien, dat de inzuiging, van de boven de schijf van de roerder binnenkomende tangentiële stroming, ongeveer  $60^\circ$  bedraagt. De diameters van de ring-vortices, de afstand tussen de centra van de ring-vortices onderling en de afstand van de centra van de ring-vortices tot het keerschot zijn van dezelfde grootte-orde als bij de Newtonse modelvloeistof.

#### HEC

Het contrast van Foto's 8 en 9 is klein. Dit wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van kleine asdeeltjes in de vaste stof, ten gevolge van het produktieproces, alsmede de sterke geelkleuring van de vloeistof. Getracht is het effect van de asdeeltjes te minimaliseren door de oplossing 24 uur te laten staan om de asdeeltjes te laten bezinken en daarna de heldere vloeistof af te romen.

Op Foto 8 maakt de uitstroom een hoek van ongeveer  $5^\circ$  met de hartlijn naar beneden. Op Foto 9 maakt de uitstroom een hoek van ongeveer  $5^\circ$  naar boven ten opzichte van de hartlijn. Op Foto 8 is, mede door de aanwezigheid van de asdeeltjes, de overstroom voor een groot deel zichtbaar, van ontstaan tot inzuiging in de bladen van de roerder. Foto's 8 en 9 komen verder overeen met de foto's van de Newtonse vloeistofstroming.

#### Blanose

Op Foto 10 (0.15 wt%) is er een derde ring-vortex aanwezig, net onder het vloeistofoppervlak. De derde ring-vortex heeft een grootte van ongeveer 75% van de andere twee ring-vortices, die van dezelfde, bekende (zie boven) grootte-orde zijn. De derde ring-vortex draait "met de klok mee". Boven de derde vortex is een inzuiging van lucht zichtbaar. De tangentiële stroming komt vrijwel geheel onder de roerder, de vathelpt binnen. De tangentiële stroming lijkt de onderstroom weg te drukken. De onderstroom komt zo voor de roerderbladen uit en wordt direct opgenomen in de uitstroom.

Op Foto 11 (ook 0.15 wt%) is de uitstroom van de roerder horizontaal. De vortex boven de roerder is ongeveer  $1\frac{1}{2}$  keer zo groot als de vortex onder de roerder, die een diameter heeft





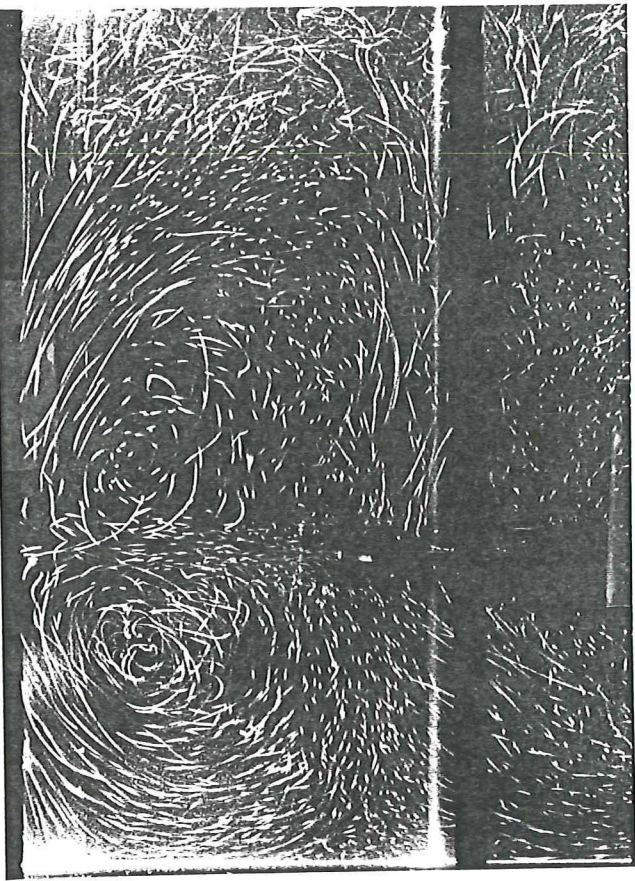


Foto 15  
0.25 wt% PAAm  
N = 11.6, Re = 6304  
t ≈ 0.5 s (auto), diafr. = 8

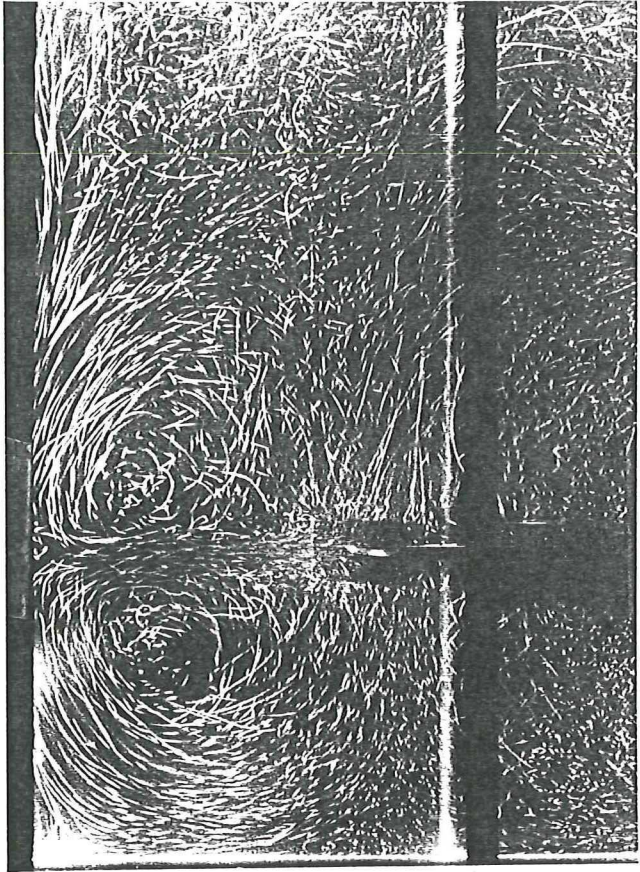


Foto 16  
0.25 wt% PAAm  
N = 11.6, Re = 6304  
t ≈ 2 s, diafr. = 16

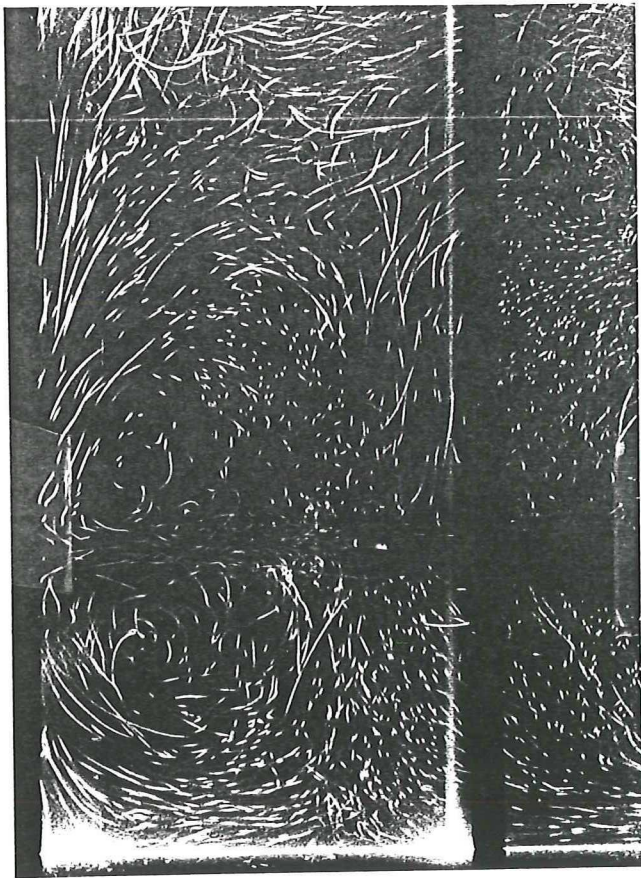


Foto 17  
0.25 wt% PAAm  
N = 8, Re = 3860  
t = 0.5 s, diafr. = 8

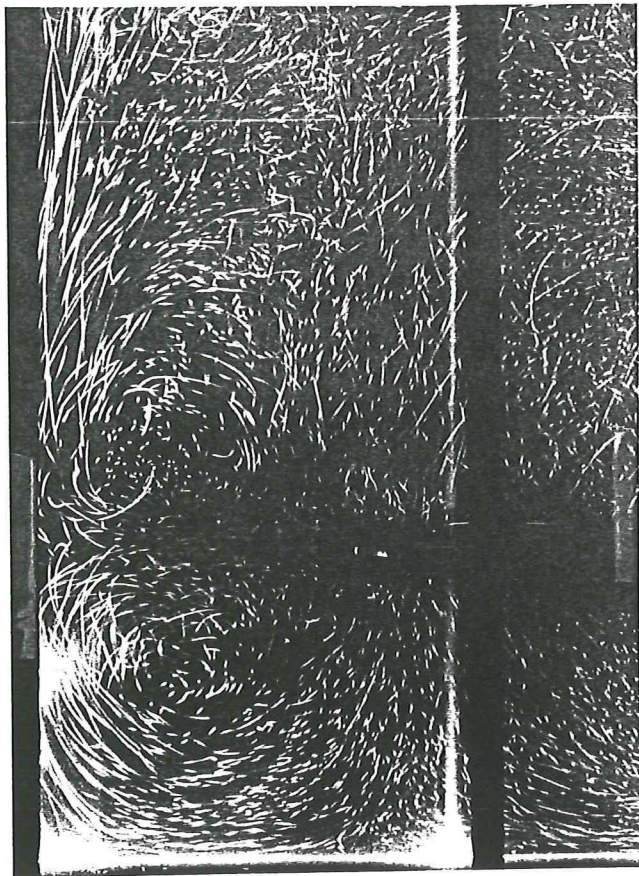


Foto 18  
0.25 wt% PAAm  
N = 8, Re = 3860  
t = 1 s, diafr. = 11



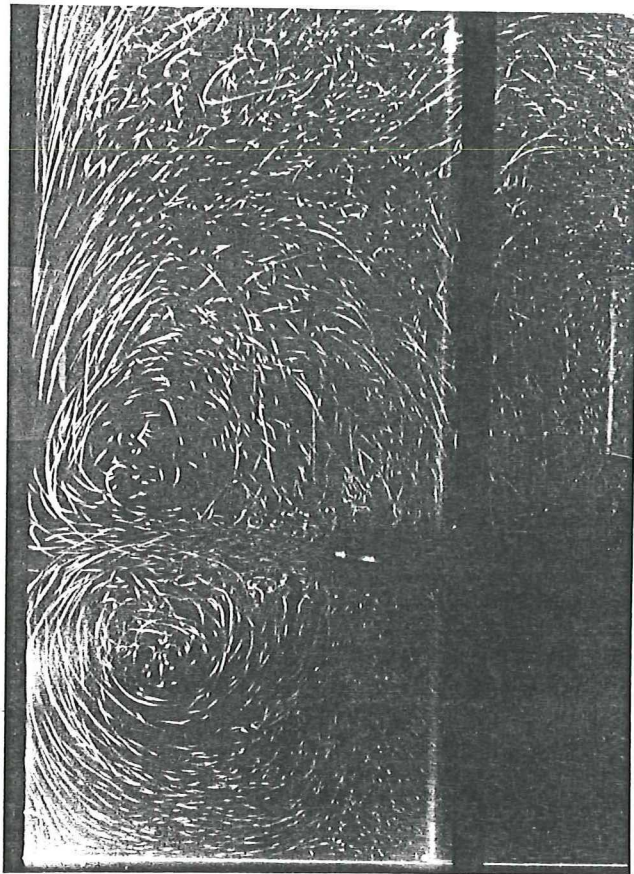


Foto 19  
0.375 wt% PAAm  
N = 8, Re = 2508  
t = 1 s (auto), diafr. = 16

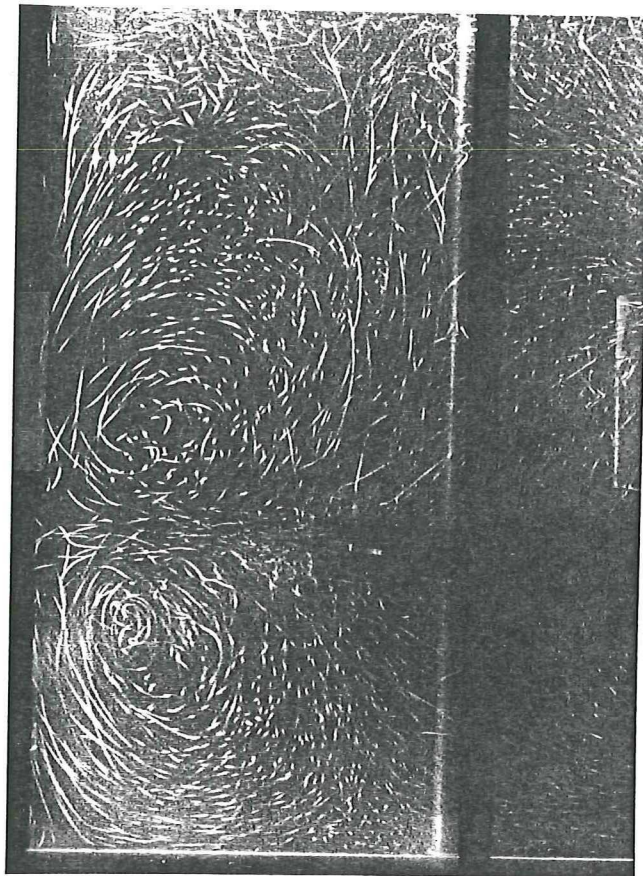


Foto 20  
0.375 wt% PAAm  
N = 9, Re = 2953  
t = 0.5 s, diafr. = 8

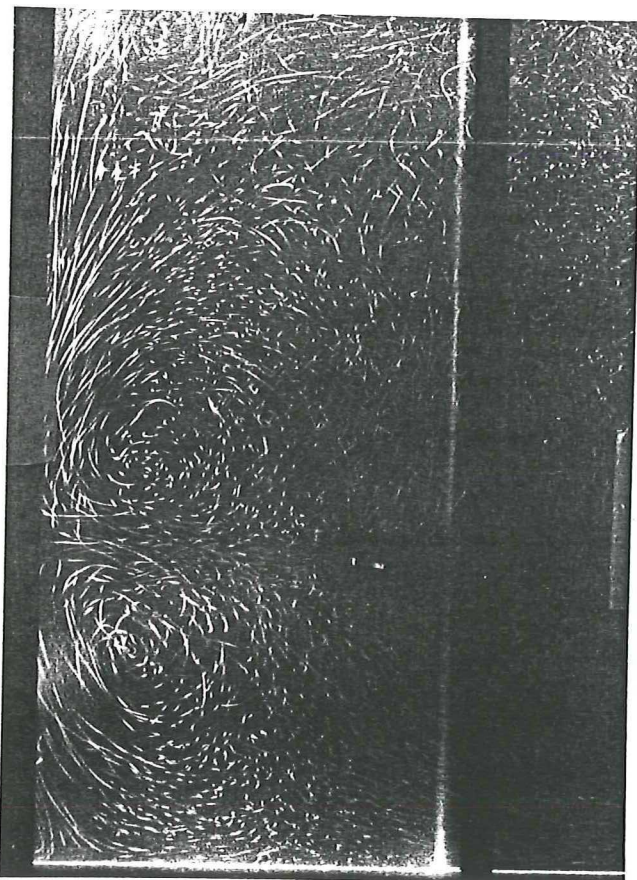


Foto 21  
0.375 wt% PAAm  
N = 9, Re = 2953  
t = 1 s, diafr. = 11

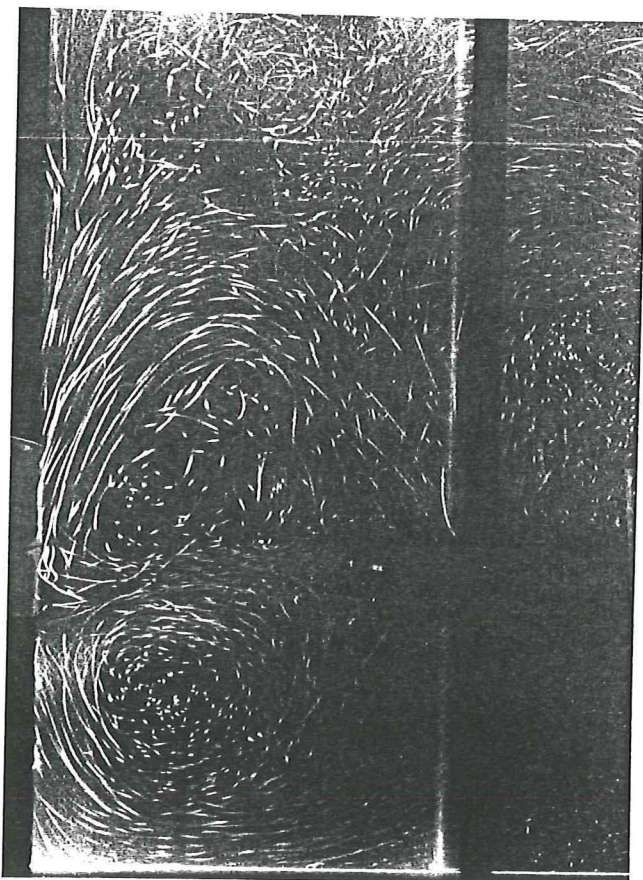


Foto 22  
0.375 wt% PAAm  
N = 11.6, Re = 4202  
t = 0.5 s (auto), diafr. = 8



van 50 mm. De derde vortex is niet identificeerbaar. De overstroom is volledig zichtbaar en wordt nagenoeg verticaal door de bladen en schijf van de roerder ingezogen. De tangentiële stroming komt onder de roerder de vathelft binnen. Het wegdrukken van de onderstroom door de tangentiële stroming is niet identificeerbaar. De onderstroom wordt verticaal ingezogen door de bladen van de roerder.

Op Foto's 12 en 13 (0.225 wt%) kan geen derde vortex worden geïdentificeerd. Op Foto 14 kan in de hoek, gevormd door keerschot en vloeistofoppervlak een derde vortex worden geïdentificeerd. De onderstroom wordt verticaal ingezogen door de bladen van de roerder. De tangentiële stroming komt voornamelijk onder de roerder de vathelft binnen, op Foto 14 na, waar ook een kleine tangentiële stroming net onder het vloeistofoppervlak kan worden geïdentificeerd. Op Foto's 12 en 14 is de overstroom volledig zichtbaar. De overstroom wordt verticaal ingezogen door de bladen en de schijf van de roerder. Op Foto 12 gaat, aan de kant van de roerderas, een deel van de overstroom de andere vathelft binnen. De diameters van de ring-vortices, de afstand tussen de centra van de ring-vortices onderling en de afstand van de centra van de ring-vortices tot het keerschot zijn van dezelfde grootte-orde als bij de Newtonse modelvloeistof.

#### 5.1.4. Turbulente viscoelastische stroming.

Bij de viscoelastische modelvloeistoffen zijn verschillende rotatiesnelheden van de roerder toegepast. Voor de 0.25 wt% oplossing 696 rpm (Foto's 15, 16) en 480 rpm (Foto's 17, 18) en voor de 0.375 wt% oplossing 480 rpm (Foto 19), 540 rpm (Foto 20, 21) en 696 rpm (Foto 22).

Op Foto's 15 t/m 19 is de uitstroom horizontaal of nagenoeg horizontaal. Op Foto's 20 en 21 maakt de uitstroom een hoek van  $5^\circ$  met de hartlijn naar boven. Op Foto 22 maakt de uitstroom een hoek van  $10^\circ$  naar beneden. Alle ring-vortices van dezelfde grootte-orde, op de bovenste ring-vortex op Foto 22 na. Deze ring-vortex begint, mede door de veranderde uitstroom, bij het keerschot ter hoogte van de onderkant van de roerderbladen en eindigt in de inzuigstroming van de bladen en schijf aan de bovenkant van de roerder.

Op Foto 15 is de volledige overstroom zichtbaar. Op alle overige foto's is het axiale deel van de overstroom langs het keerschot, alsmede langs de roerderas zichtbaar. Op Foto 22 passeert de onderstroom de roerderas en gaat de andere vathelft binnen.

Op alle foto's is er sprake van een tangentiële stroming onder de roerder, waarbij deze stroming onder een hoek van  $45^\circ$  door de schijf van de roerder wordt ingezogen.



#### 5.1.5. Algemeen stromingspatroon voor turbulente Newtonse en niet-Newtonse vloeistoffen in een geroerd vat.

Op basis van bovenstaande foto's kan het volgende worden opgemerkt. De turbulente stromingspatronen voor alle bestudeerde modelvloeistoffen zijn globaal gesproken gelijk. De asymmetrische roerderuitstroom heeft een kleine hoek naar boven. Het stromingspatroon wordt gekenmerkt door twee ringvortices. De onderste ring-vortex is iets kleiner (90%) dan de bovenste ring-vortex, welke een diameter heeft van ongeveer 50 mm. De centra van de ringvortices liggen verticaal boven elkaar op een onderlinge afstand van ongeveer 75 mm. De centra liggen ongeveer 20 mm voor het keerschot. De overstroom en onderstroom, stromen in hun respectievelijke axiale richtingen nagenoeg parallel met het keerschot naar het vloeistofoppervlak resp. vatbodem. Na radiaal over resp. onder de ringvortex te zijn gestroomd, worden de stromen verticaal door de bladen en de schijf van de roerder ingezogen voor herhaling van het proces.

Benadrukt dient te worden, dat foto's globale, kortstondige opnamen zijn. De gebruikte sluitertijden zijn klein en de kans op een foto met daarop een toevallige fluctuatie is zodoende altijd aanwezig. Een belangrijk kental daarbij is het produkt van roedersnelheid en sluitertijd. De genomen foto's liggen tussen een snapshot en een tijdgemiddelde meting in.

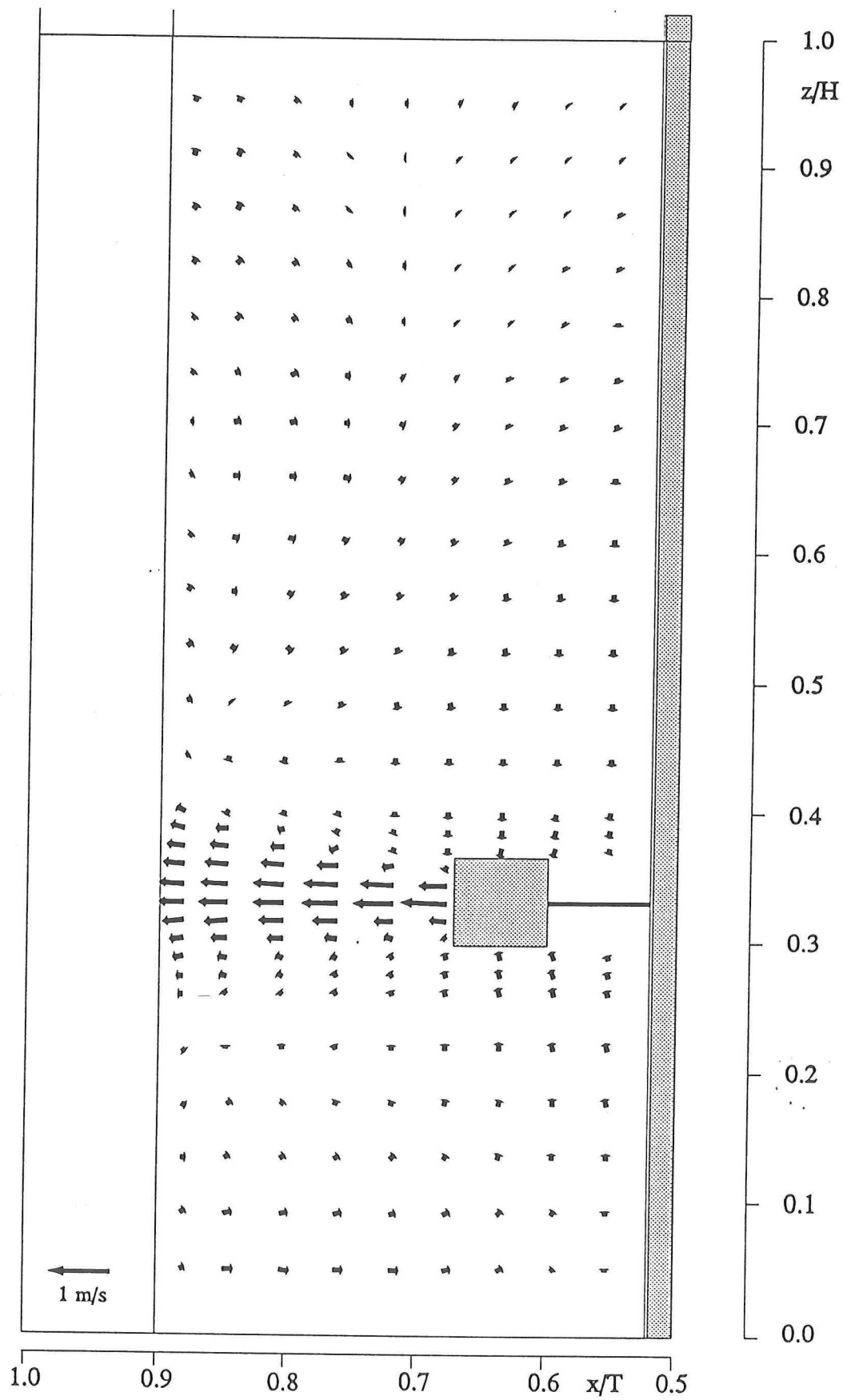


Fig 17. Vectorveld van glycerol.  
 $N = 8$ ,  $Re = 2601$



## 5.2. Bepaling vectorvelden via LDA.

### 5.2.1. Inleiding.

In § 5.2.2 worden de zogenoemde vectorvelden besproken. De foto's van de Newtonse modelvloeistoffen van § 5.1.2 dienen hierbij als referentie voor de vectorvelden van de Newtonse en niet-Newtonse modelvloeistoffen. De vectorvelden worden gebruikt voor het identificeren van de verschillende onderdelen van het turbulente vloeistofstromingspatroon en voor het bepalen van de grootte en richting van de dimensieloze vloeistofsnelheden op verschillende plaatsen in de modelvloeistoffen.

### 5.2.2. Vectorvelden.

Als Newtonse modelvloeistof is glycerol (Figuur 17) gebruikt, met een viscositeit van 33 maal die van water. Als niet-Newtonse modelvloeistoffen zijn gebruikt een 0.1 wt% (Figuur 18) en 0.2 wt% (Figuur 19) oplossing van Blanose en een 0.25 wt% (Figuur 20) oplossing van PAAM. De reologische gegevens van deze vloeistoffen staan vermeld in Tabel 1. Bij elke modelvloeistof is de hoogst mogelijke (zonder lucht in te zuigen) rotatiesnelheid van de roerder toegepast, voor een zo groot mogelijk Reynoldsgetal. De vloeistofsnelheden zijn dimensieloos gemaakt met de tipsnelheid.

Alle vectorvelden worden gekarakteriseerd door de aanwezigheid van de grote, asymmetrische, radiale vloeistofuitstroom, afkomstig van de roerder. In de Newtonse modelvloeistof (Figuur 17) en in de pseudoplastische modelvloeistoffen (Figuur 18 en 19) maakt de uitstroom een hoek van  $3^\circ$  naar boven ten opzichte van de hartlijn. In de viscoelastische modelvloeistof bedraagt de hoek  $2^\circ$ . De vloeistofsnelheden in het uitstroombroefiel vlakbij het keerschot zijn groter in de niet-Newtonse modelvloeistoffen, ten gevolge van een verschil in radiale meetpositie tussen de Newtonse modelvloeistof enerzijds en de niet-Newtonse modelvloeistoffen anderzijds. De uitstroombroefielen van de niet-Newtonse modelvloeistoffen hebben, naast de grote radiale stroming, een sterk axiaal karakter in de buurt van het keerschot, vergeleken met de Newtonse modelvloeistof. Tengevolge van een verschil in refractie-index tussen glycerol enerzijds en de niet-Newtonse modelvloeistoffen anderzijds, was het in de gebruikte vatconfiguratie niet mogelijk het keerschot dichter te naderen.

In alle modelvloeistoffen zijn beide ring-vortices duidelijk zichtbaar. In alle modelvloeistoffen heeft de onderste ring-vortex een diameter van ongeveer 45 mm en de bovenste ring-vortex een diameter van ongeveer 50 mm. De centra van de



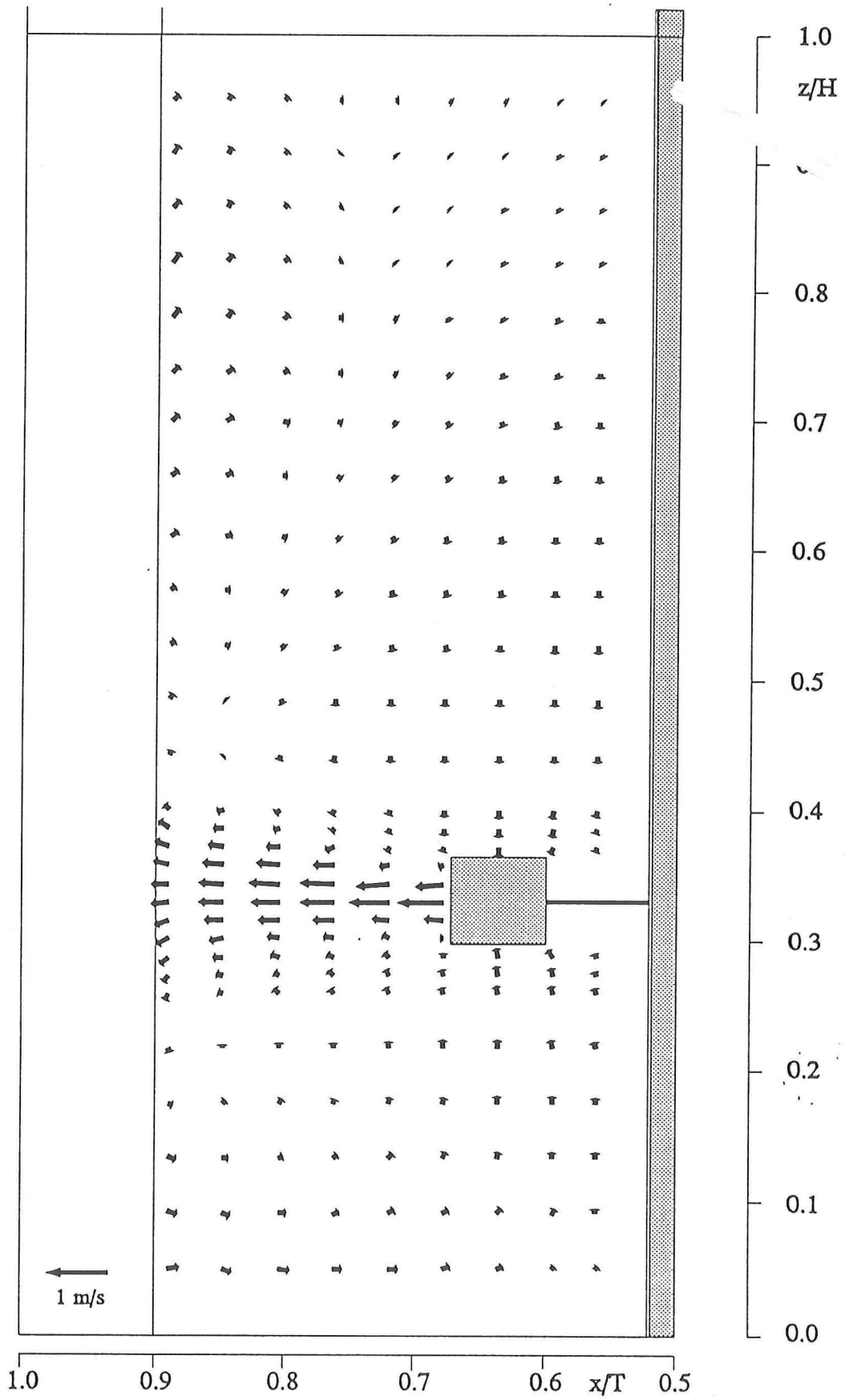


Fig 18. Vectorveld van de 0.1 wt% Blanose oplossing.  
 $N = 7$ ,  $Re = 5485$

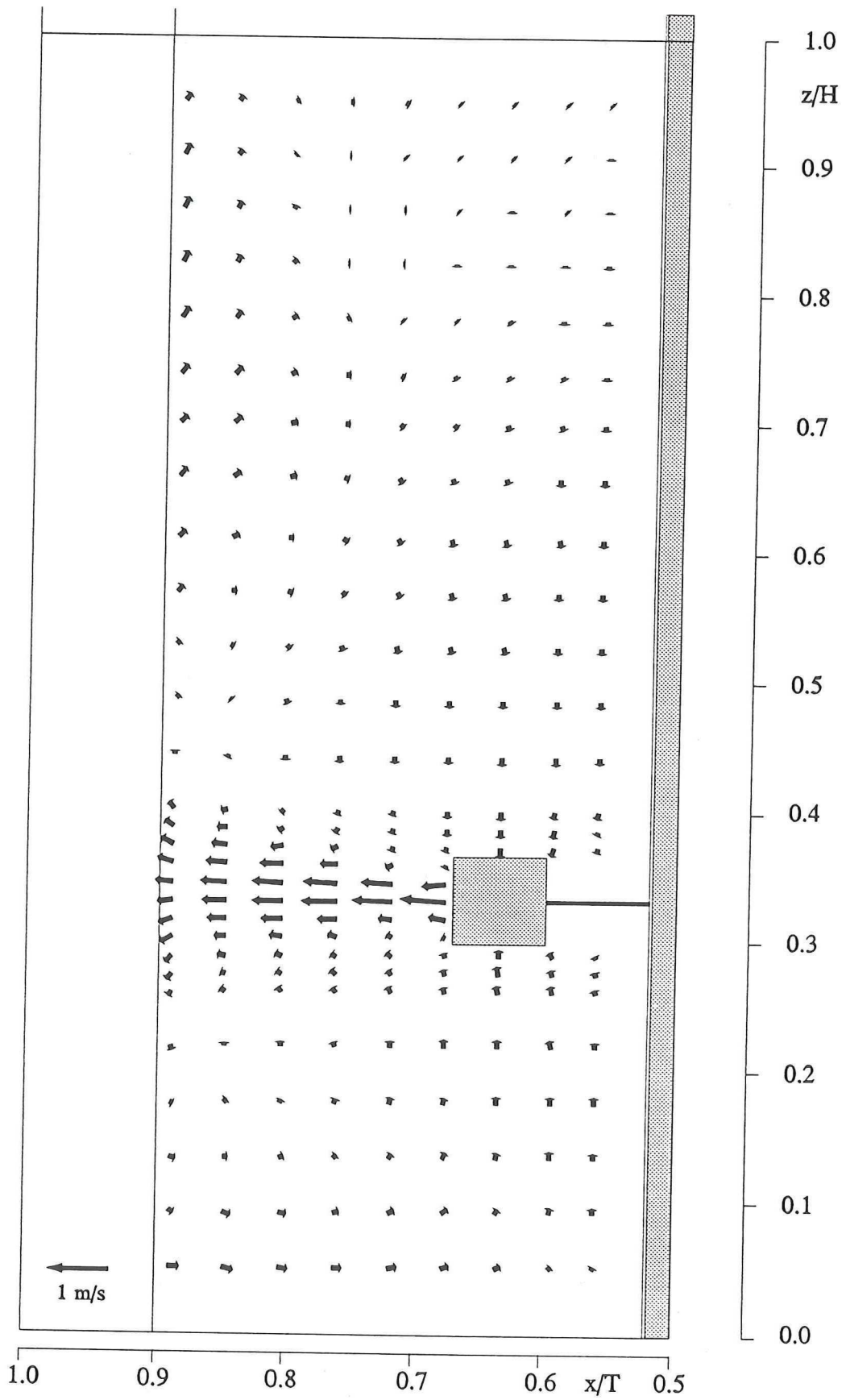


Fig 19. Vectorveld van de 0.2 wt% Blauose oplossing.  
 $N = 8, Re = 2536$

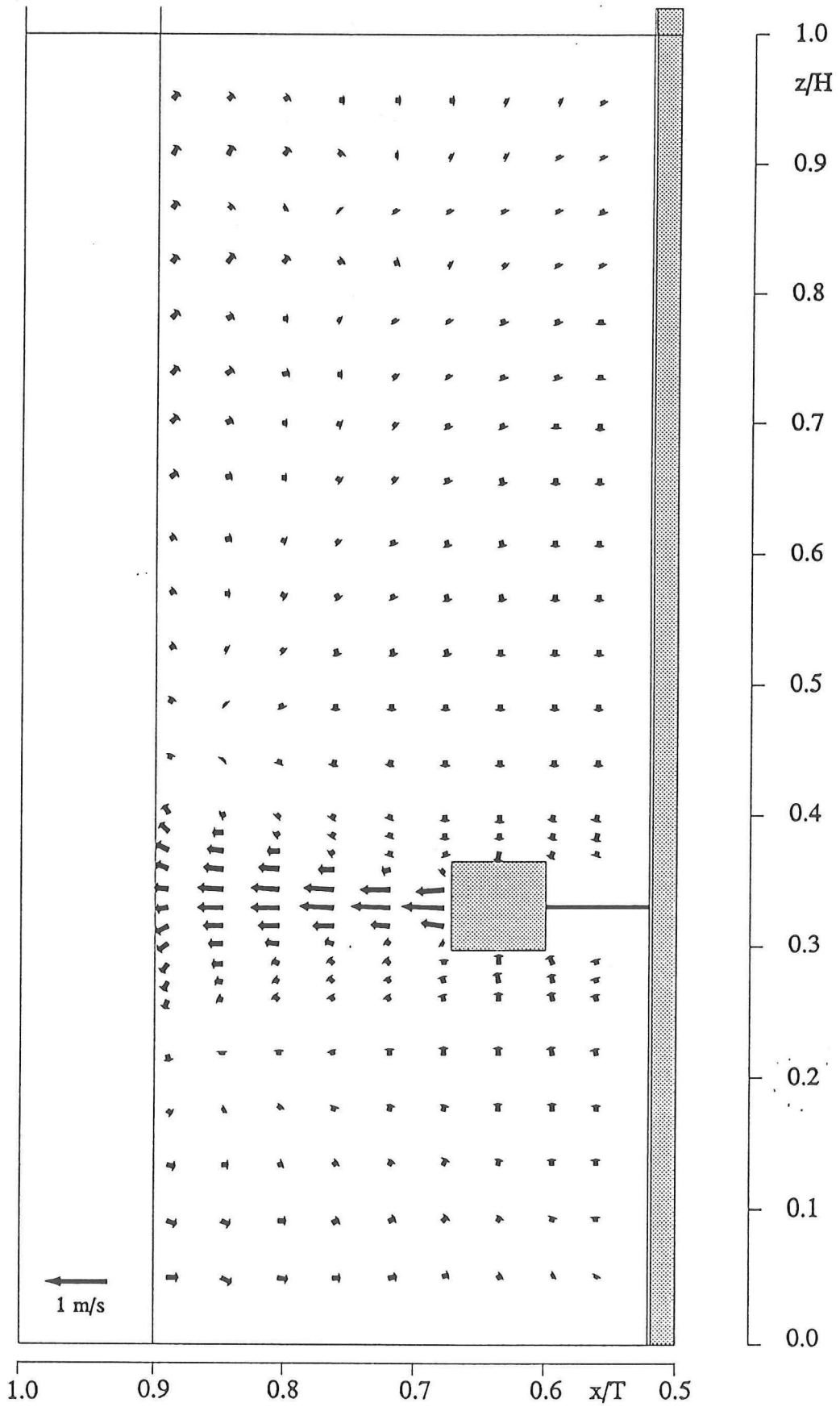


Fig 20. Vectorveld van de 0.25 wt% PAAm oplossing.  
 $N = 11$ ,  $Re = 5877$

onderste en bovenste ring-vortex liggen op dezelfde verticale lijn, ongeveer 15 mm voor het keerschot. De onderlinge afstand van de centra van de ring-vortices bedraagt ongeveer 75 mm. In alle modelvloeistoffen is het radiale deel en axiale deel, dichtbij de roerderas van de overstroom en onderstroom duidelijk zichtbaar. Het axiale deel, dichtbij het keerschot, is grotendeels niet zichtbaar. Beide stromen worden verticaal door de bladen en de schijf van de roerder ingezogen.

Voor de vectorvelden van de modelvloeistoffen onderling geldt, dat beide Blannose oplossingen vloeistofsnelheden hebben, die even groot of net iets kleiner zijn als die van glycerol op de overeenkomstige posities. De viscoelastische modelvloeistof heeft dimensieloze vloeistofsnelheden, die maximaal 30% lager zijn dan die van de Newtonse modelvloeistof op de overeenkomstige posities.





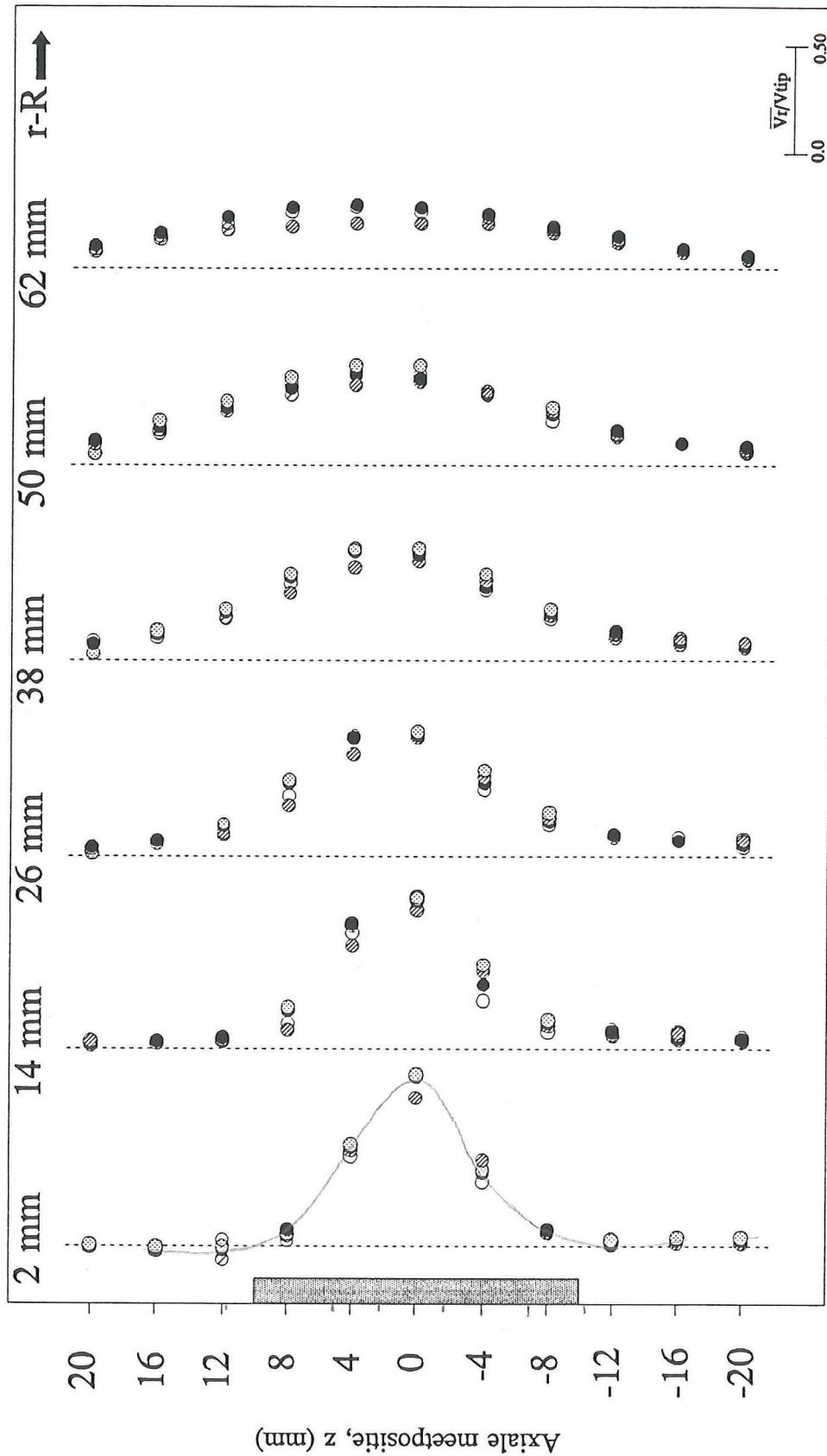


Fig 21. OVP voor alle modelvloeistoffen.

● : Glycerol,  $N = 8$ ,  $Re = 2601$ .

● : 0.1 wt% Blanose,  $N = 7$ ,  $Re = 5485$ .

⊙ : PAAm,  $N = 11$ ,  $Re = 5877$ .

○ : 0.2 wt% Blanose,  $N = 8$ ,  $Re = 2536$ .

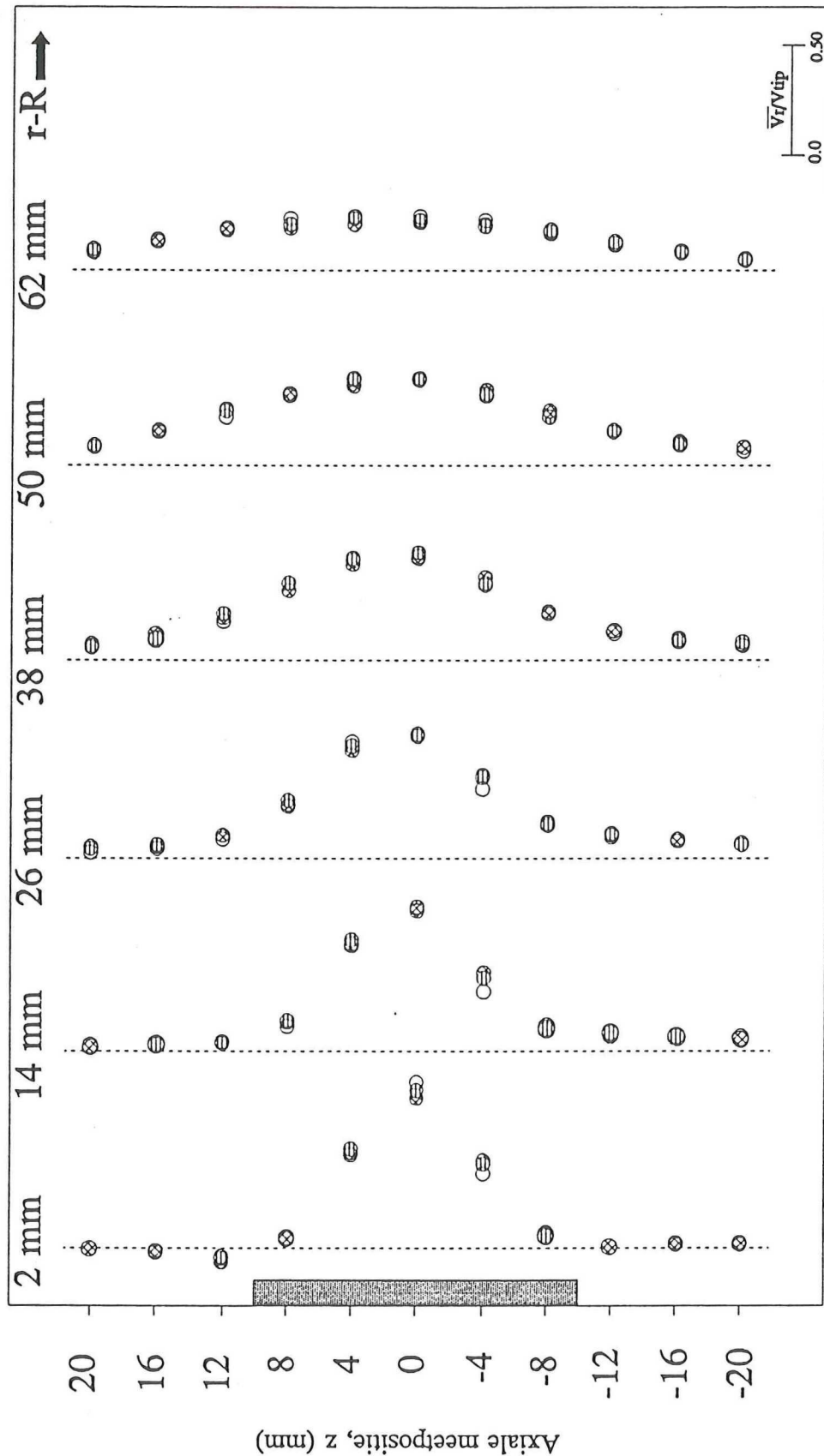


Fig 22. OVP voor de 0.25 wt% PAAM oplossing.

$\otimes$  :  $N = 11$ ,  $Re = 5877$ .  $\circ$  :  $N = 5$ ,  $Re = 2076$ .

$\oplus$  :  $N = 8$ ,  $Re = 3860$ .

---

### 5.3. Bepaling roerderuitstroomprofiel via LDA.

#### 5.3.1. Inleiding.

In afzonderlijke paragrafen zullen de OVP's, de RMS OVP's, de CVP's, de RMS CVP's, de AOVV's en de RMS AOVV's van de verschillende modelvloeistoffen worden besproken. De uitstroomprofielen van de Newtonse modelvloeistof fungeren als referentie voor de overeenkomstige profielen van de niet-Newtonse modelvloeistoffen. Als modelvloeistoffen zijn dezelfde vloeistoffen gebruikt, die zijn toegepast bij het maken van de vectorvelden. Bij iedere modelvloeistof zijn drie rotatiesnelheden van de roerder toegepast, om de invloed van de grootte van het Reynoldsgetal te kunnen vaststellen. Voor glycerol en de 0.2 wt% oplossing van Blanose 480, 360 en 240 rpm, voor de 0.1 wt% oplossing van Blanose 420, 360 en 300 rpm en voor de 0.25 wt% PAAm oplossing 660, 480 en 300 rpm.

#### 5.3.2. Outlet Velocity Profile (OVP).

In Figuur 21 (zie ook Appendix A) zijn van alle modelvloeistoffen alle dimensieloze radiale vloeistofsnelheden, behorende bij de hoogste rotatiesnelheid van de roerder, toegepast bij desbetreffende modelvloeistof, in één OVP geplaatst. Wanneer per meetpositie minder dan vier symbolen zichtbaar zijn, is er sprake van overlap van de symbolen. Omwille van de overzichtelijkheid, zijn de dimensieloze gemiddelde vloeistofsnelheden van glycerol op de laatste radiale meetpositie (59 mm van de roerdertippen) weggelaten. De weggelaten gemiddelde vloeistofsnelheden staan wel vermeld in Tabel A1 (Appendix A). Opvallend is het verschil in vorm van de OVP tussen de PAAm oplossing en glycerol enerzijds en beide Blanose oplossingen anderzijds, met name in het gebied tussen de hartlijn en de bovenkant van de roerdertippen. Het is met name in dit gebied, dat het profiel van de PAAm oplossing vlakker is, ten opzichte van de profielen van de overige modelvloeistoffen. Het verschil in dimensieloze vloeistofsnelheden van de viscoelastische modelvloeistof bedraagt in dit gebied gemiddeld 10% van de dimensieloze vloeistofsnelheden van de overige modelvloeistoffen op de overeenkomstige posities. De OVP's van de afzonderlijke modelvloeistoffen zijn onafhankelijk van de rotatiesnelheid van de roerder. Als voorbeeld hiervan is de OVP van de 0.25 wt% PAAm oplossing genomen, zie Figuur 22. De overeenkomst tussen alle profielen is groot. Voor de Newtonse en pseudoplastische vloeistoffen maakt de uitstroom een hoek van 3° met de hartlijn naar boven, voor alle toegepaste rotatiesnelheden van de roerder. Voor de viscoelastische vloeistof bedraagt de hoek 2° (niet getoonde resultaten). Dit is in overeenstemming met de resultaten van de vectorvelden.

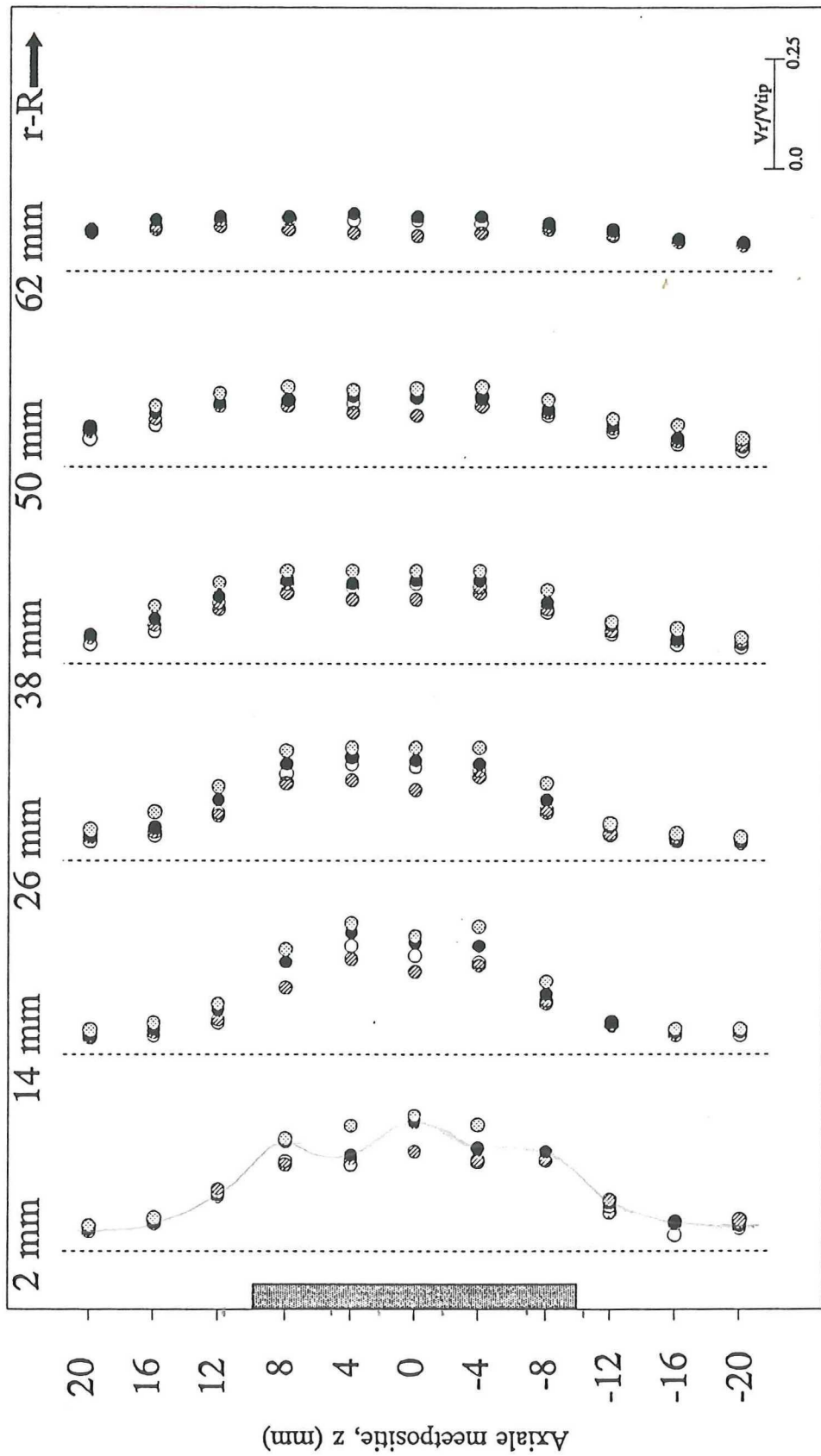


Fig 23. OVP' voor alle modelvloeistoffen.

- ⊗ : Glycerol, N = 8, Re = 2601.
- : 0.1 wt% Blanose, N = 7, Re = 5485.
- ⊙ : PAAm, N = 11, Re = 5877.
- : 0.2 wt% Blanose, N = 8, Re = 2536.



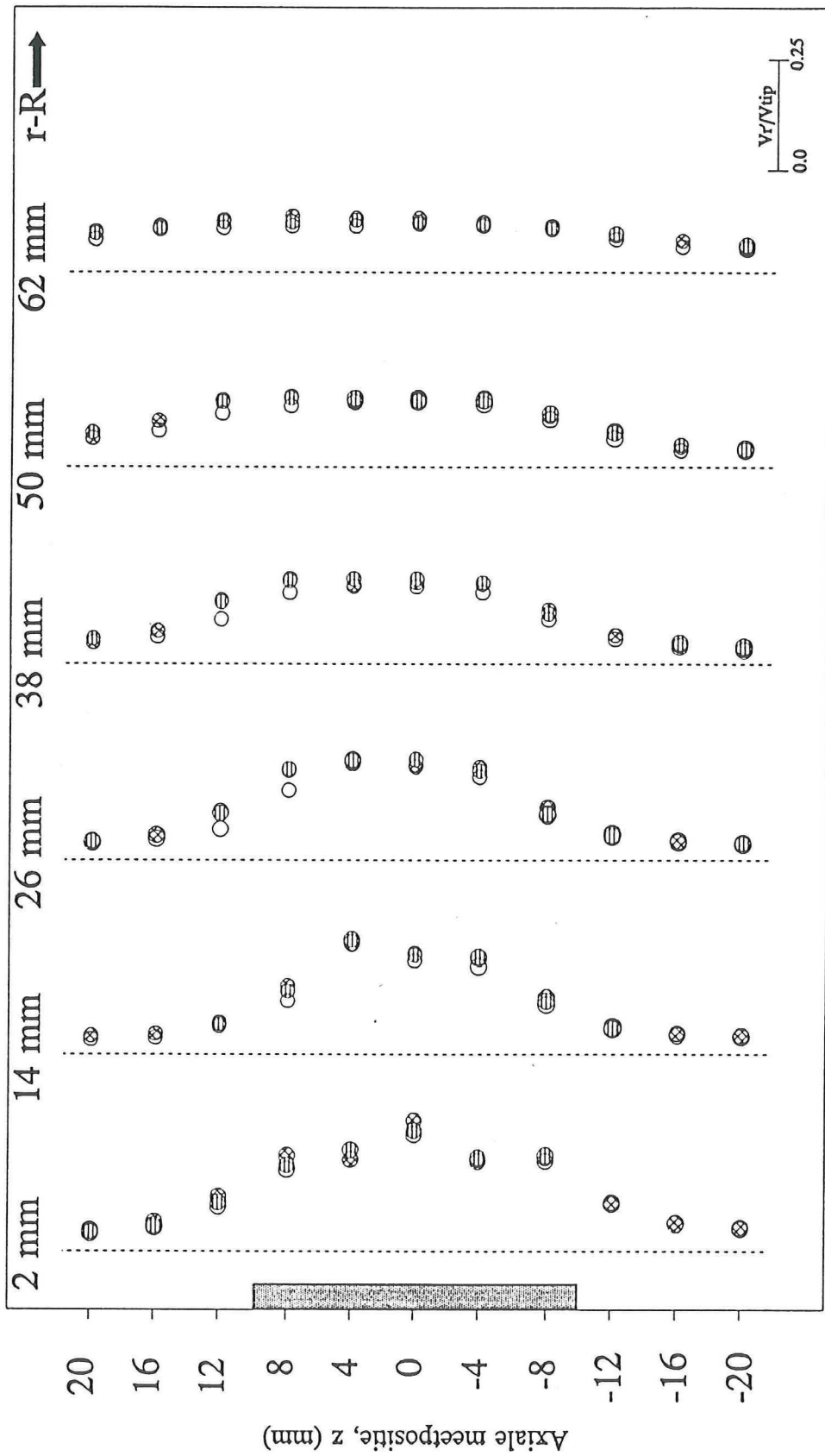


Fig 24. OVP' voor de 0.2 wt% Blanose oplossing.

⊗ :  $N = 8$ ,  $Re = 2536$ . ○ :  $N = 4$ ,  $Re = 1016$ .

⊖ :  $N = 6$ ,  $Re = 1735$ .

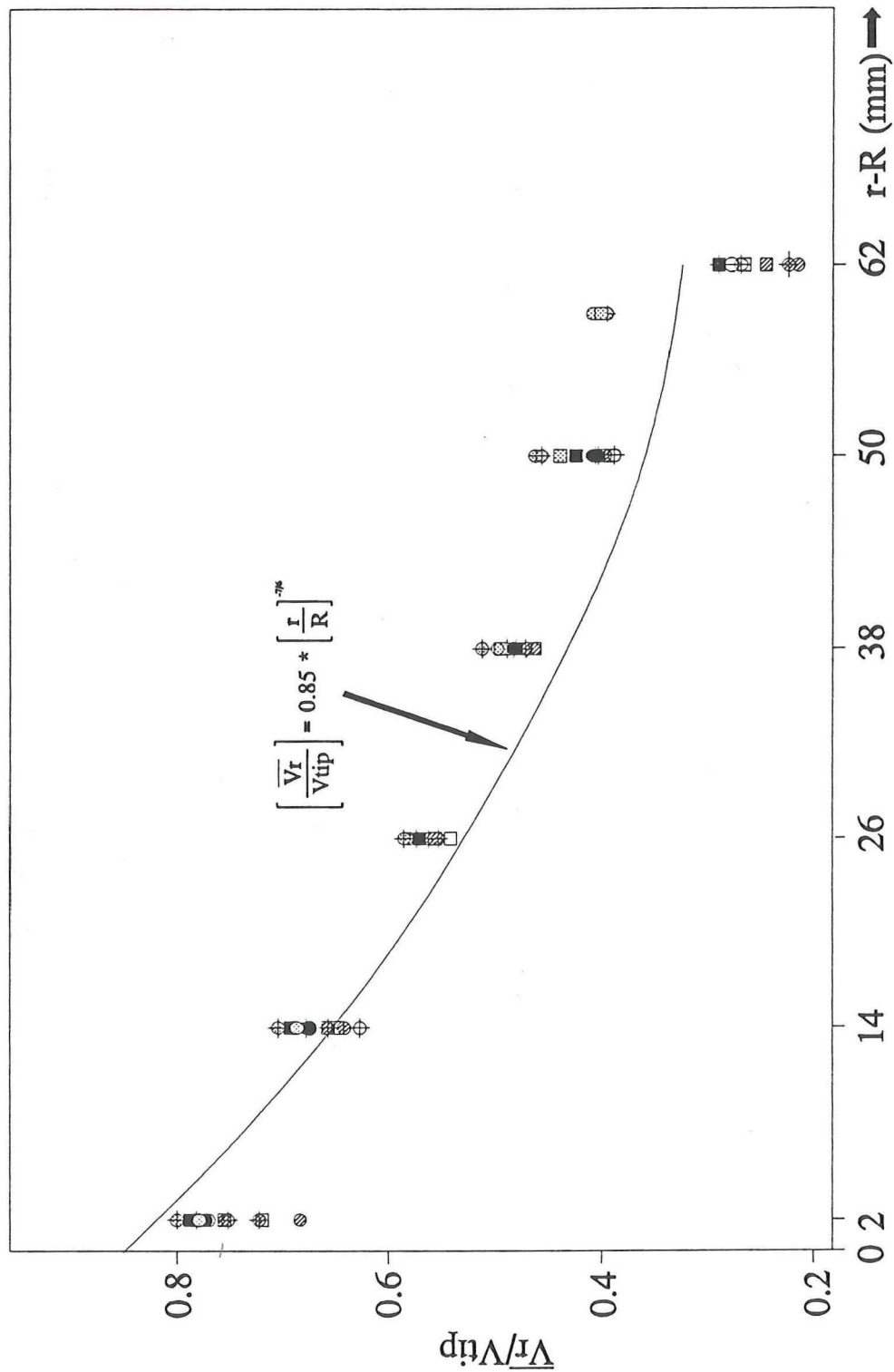


Fig 25. CVP voor alle modelvloeistoffen.

Glycerol	0.1 wt% Blanose	0.2 wt% Blanose	PAAm
⊙ : N=8, Re=2601	● : N=7, Re=5485	○ : N=8, Re=2536	⊙ : N=11, Re=5877
⊕ : N=6, Re=1951	● : N=6, Re=4538	⊕ : N=6, Re=1735	⊕ : N=8, Re=3860
⊞ : N=4, Re=1301	■ : N=5, Re=3626	□ : N=4, Re=1016	⊞ : N=5, Re=2076

Tabel 4. Door regressie-analyse verkregen CVP's van de verschillende modelvloeistoffen, via formule (14).

Modelvloeistof	A	p	Opmerking
Glycerol	0.821	-0.81	N = 8, Re = 2601
	0.848	-0.88	N = 6, Re = 1951
	0.836	-0.89	N = 4, Re = 1301
	0.835	-0.86	Alle N
Blanose (0.10 wt%)	0.842	-1.04	N = 7, Re = 5485
	0.853	-1.06	N = 6, Re = 4538
	0.859	-1.06	N = 5, Re = 3626
	0.852	-1.05	Alle N
Blanose (0.20 wt%)	0.847	-1.02	N = 8, Re = 2536
	0.810	-1.05	N = 6, Re = 1735
	0.792	-1.02	N = 4, Re = 1016
	0.816	-1.03	Alle N
PAAm (0.25 wt%)	0.770	-1.01	N = 11, Re = 5877
	0.805	-1.03	N = 8, Re = 3860
	0.825	-1.08	N = 5, Re = 2076
	0.800	-1.04	Alle N





### 5.3.3. RMS Outlet Velocity Profile (OVP').

In Figuur 23 (zie ook Appendix B) zijn van alle modelvloeistoffen alle dimensieloze RMS-waarden van de fluctuerende radiale vloeistofsnelheden, behorende bij de hoogste rotatiesnelheid van de roerder, toegepast bij desbetreffende modelvloeistof, in één OVP' geplaatst. Wanneer per meetpositie minder dan vier symbolen zichtbaar zijn, is er sprake van overlap van de symbolen. Omwille van de overzichtelijkheid, zijn de dimensieloze gemiddelde vloeistofsnelheden van glycerol op de laatste radiale meetpositie (59 mm van de roerdertippen) weggelaten. De weggelaten RMS-waarden staan wel vermeld in Tabel B1 (Appendix B). Qua grootte van de RMS-waarden heeft, voor alle radiale meetposities, van 4 mm axiaal onder de hartlijn tot 12 mm axiaal boven de hartlijn, de Newtonse vloeistof de hoogste en de PAAM oplossing de laagste dimensieloze RMS-waarden. In dit gebied bedragen de dimensieloze RMS-waarden van de PAAM oplossing ( $n = 0.68$  en elastisch), de 0.2 wt% Blanose oplossing ( $n = 0.68$ ) en de 0.1 wt% Blanose oplossing ( $n = 0.77$ ) respectievelijk 55%, 70% en 75% van de RMS-waarden van de Newtonse modelvloeistof op de overeenkomstige posities. Gemiddeld genomen over het gebied bedragen deze waarden respectievelijk 74%, 78% en 88%. Op de overige meetposities komen de RMS-waarden van alle modelvloeistoffen nagenoeg met elkaar overeen. De [OVP']'s van de afzonderlijke modelvloeistoffen zijn onafhankelijk van de rotatiesnelheid van de roerder. Als voorbeeld hiervan is de OVP' van de 0.2 wt% Blanose oplossing genomen, zie Figuur 24.

### 5.3.4. Centre-line Velocity Profile (CVP).

In Figuur 25 zijn de dimensieloze vloeistofsnelheden van alle modelvloeistoffen, weergegeven in één CVP en gecorreleerd met de Van der Molen vergelijking (formule (11)).

De CVP's van de verschillende modelvloeistoffen zijn gefit met relaties, in de vorm van de Van der Molen vergelijking (formule (14)). De resultaten staan vermeld in Tabel 4.

$$\left(\frac{V_r}{V_{tip}}\right) = A * \left(\frac{r}{R}\right)^p \quad (14)$$

Overeenkomstig met de in de § 5.3.2 besproken OVP's zijn de dimensieloze vloeistofsnelheden van de PAAM oplossing het laagst. Bij de eerste testmeting, uitgevoerd in de PAAM oplossing op 2 mm radiaal van de roerdertippen op de hartlijn, had de coëfficiënt van de Van der Molen vergelijking een waarde van 0,602 bij de hoogst toegepaste roerdersnelheid (660 rpm). De oplossing was toen nieuw. Nadat de oplossing 48 uur had stilgestaan zijn bovenstaande resultaten voor de PAAM

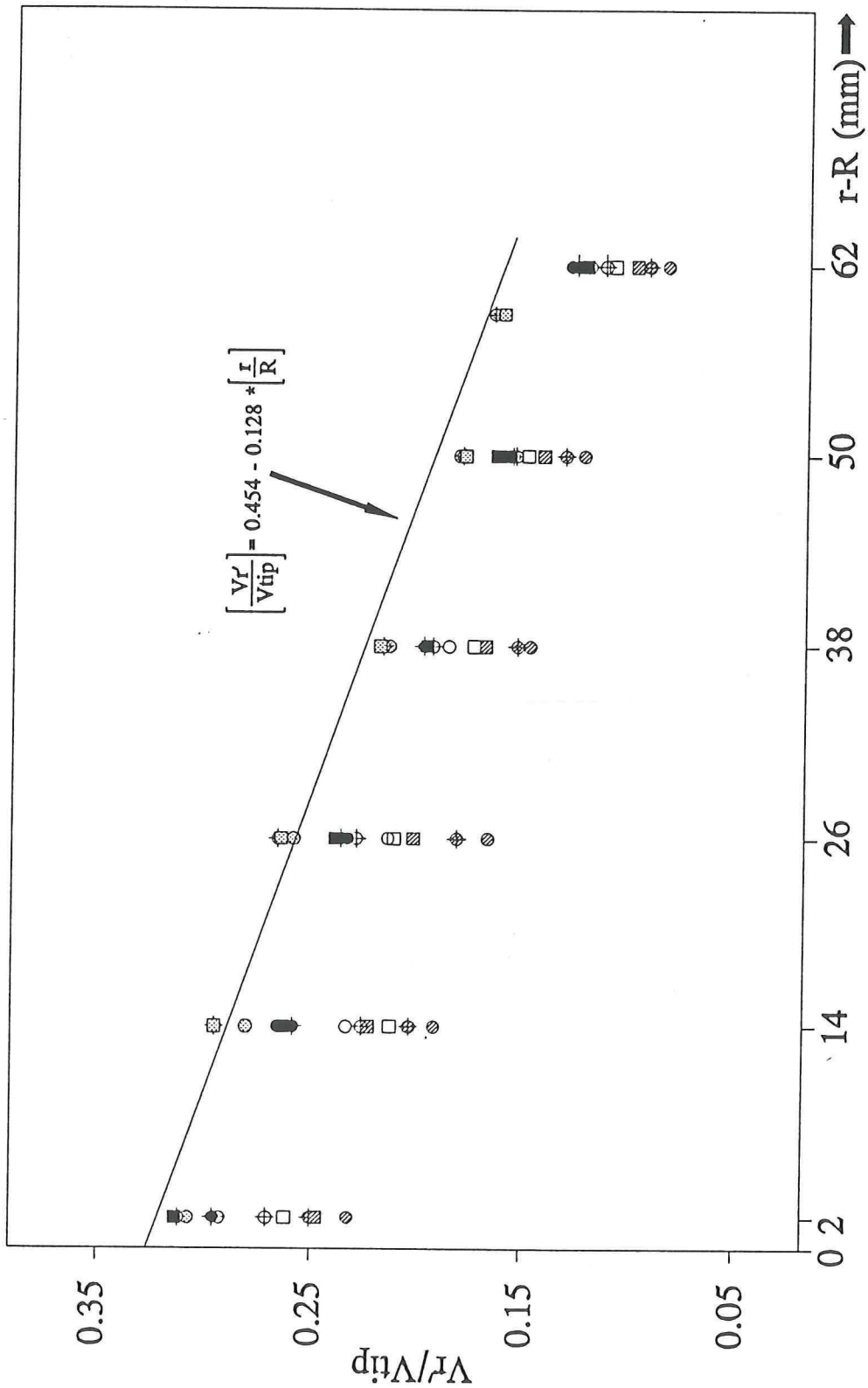


Fig 26. CVP' voor alle modelvloeistoffen.

- | Glycerol         | 0.1 wt% Blanose  | 0.2 wt% Blanose  | PAAm              |
|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| ⊙ : N=8, Re=2601 | ● : N=7, Re=5485 | ○ : N=8, Re=2536 | ⊙ : N=11, Re=5877 |
| ⊕ : N=6, Re=1951 | ⦿ : N=6, Re=4538 | ⊕ : N=6, Re=1735 | ⊗ : N=8, Re=3860  |
| ⊞ : N=4, Re=1301 | ■ : N=5, Re=3626 | □ : N=4, Re=1016 | ⊞ : N=5, Re=2076  |

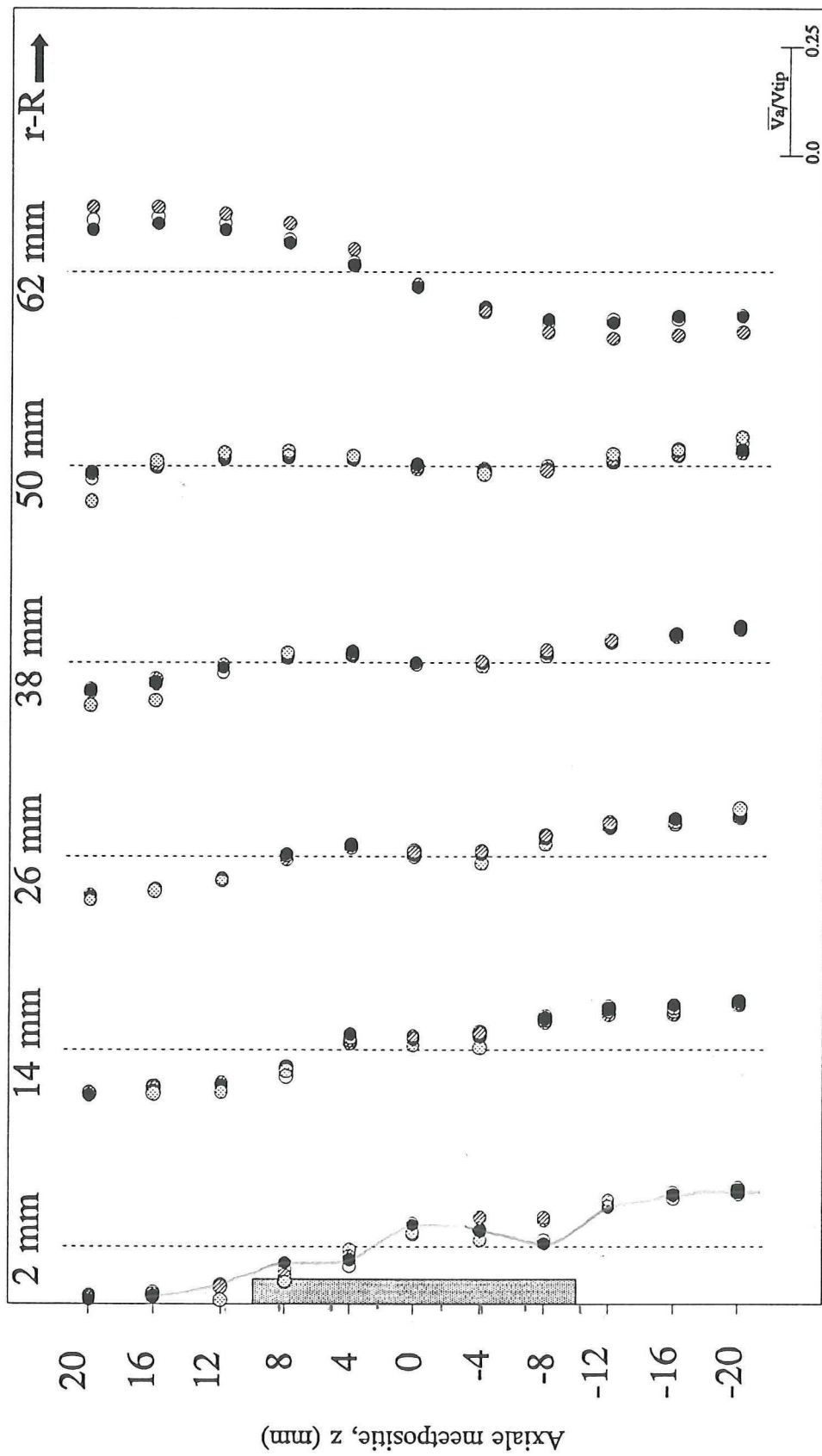


Fig 27. AOVV voor alle modelvloeistoffen.

● : Glycerol,  $N = 8$ ,  $Re = 2601$ .

● : 0.1 wt% Blanose,  $N = 7$ ,  $Re = 5485$ .

● : PAAM,  $N = 11$ ,  $Re = 5877$ .

○ : 0.2 wt% Blanose,  $N = 8$ ,  $Re = 2536$ .

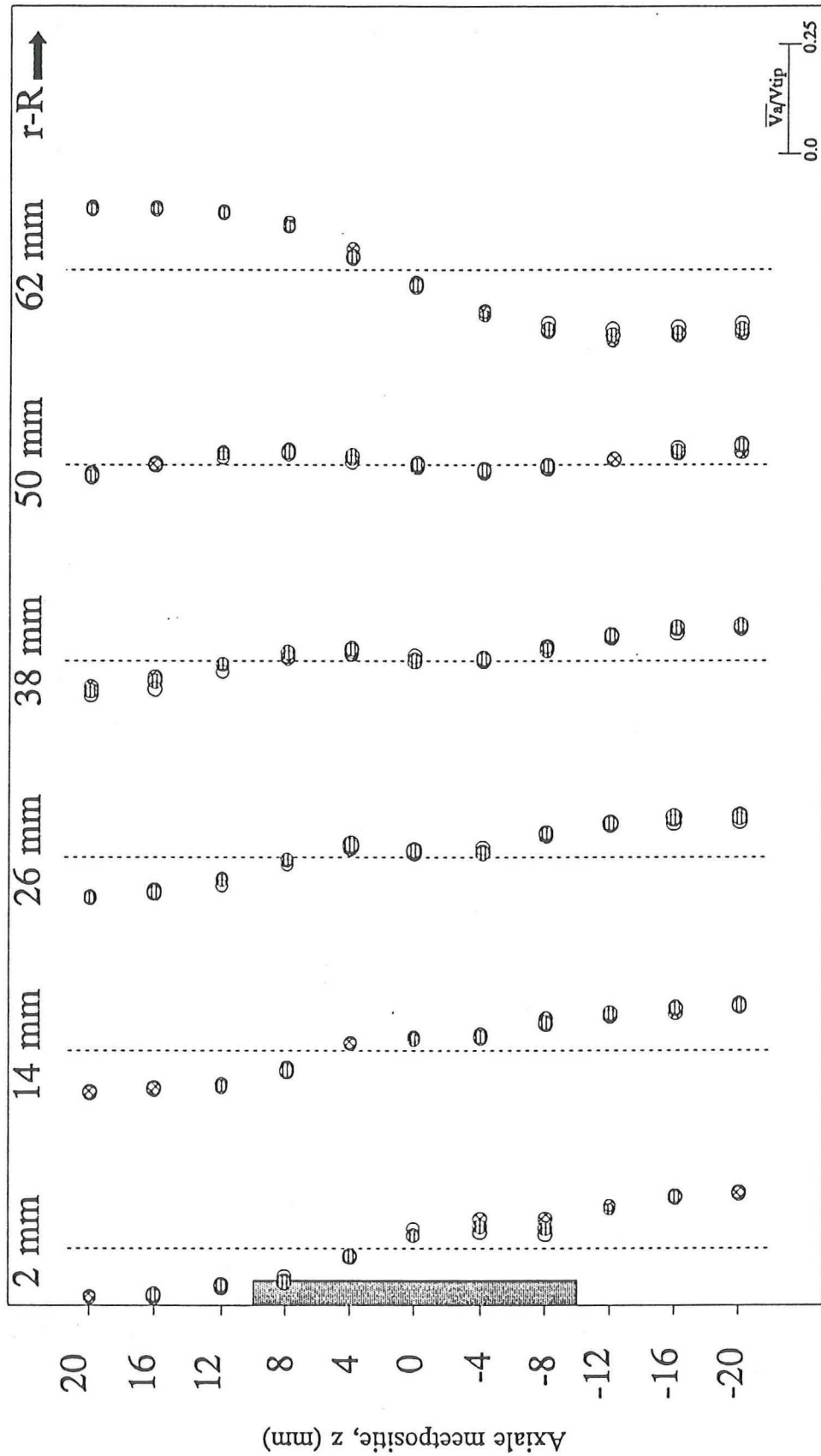


Fig 28. AOVP voor de 0.25 wt% PAAm oplossing.

⊗ :  $N = 11$ ,  $Re = 5877$ .    ⊙ :  $N = 5$ ,  $Re = 2076$ .

⊖ :  $N = 8$ ,  $Re = 3860$ .



oplossing verkregen. Na twaalf uur meten (en roeren bij verschillende rotatiesnelheden) in de oplossing had de coëfficiënt een waarde van 0,789, verkregen bij de hoogst toegepaste roerdersnelheid.

### 5.3.5. RMS Centre-line Velocity Profile (CVP').

In Figuur 26 zijn de dimensieloze RMS-waarden van de fluctuerende vloeistofsnelheden van alle modelvloeistoffen weergegeven in één CVP' en gecorreleerd met de, door *Dyster et al* [13] voorgestelde vergelijking (formule (13)).

De [CVP']'s van de verschillende modelvloeistoffen zijn gefit met relaties, in de vorm van de door *Dyster* voorgestelde vergelijking (formule (15)). De resultaten staan vermeld in Tabel 5.

$$\left( \frac{V'_r}{V_{tip}} \right) = B + C * \left( \frac{r}{R} \right) \quad (15)$$

Overeenkomstig met de in de § 5.3.3 besproken [OVP']'s zijn de dimensieloze vloeistofsnelheden van de PAAM oplossing het laagst.

### 5.3.6. Axial Outlet Velocity Profile (AOVP).

In Figuur 27 (zie ook Appendix C) zijn van alle modelvloeistoffen alle dimensieloze axiale vloeistofsnelheden, behorende bij de hoogste rotatiesnelheid van de roerder, toegepast bij desbetreffende modelvloeistof, in één AOVP geplaatst. Wanneer per meetpositie minder dan vier symbolen zichtbaar zijn, is er sprake van overlap van de symbolen. Omwille van de overzichtelijkheid, zijn de dimensieloze gemiddelde vloeistofsnelheden van glycerol op de laatste radiale meetpositie (59 mm van de roerdertippen) weggelaten. De weggelaten gemiddelde vloeistofsnelheden staan wel vermeld in Tabel C1 (Appendix C). De AOVP's van de afzonderlijke modelvloeistoffen zijn onafhankelijk van de rotatiesnelheid van de roerder. Als voorbeeld hiervan is de AOVP van de 0.25 wt% PAAM oplossing genomen, zie Figuur 28. Op de laatste radiale meetpositie (62 mm van de roerdertippen) bedragen de dimensieloze axiale vloeistofsnelheden van de 0.1 wt% Blanose oplossing en de 0.2 wt% Blanose oplossing, 73% respectievelijk 80% van de dimensieloze axiale vloeistofsnelheden op de overeenkomstige posities van de viscoelastische modelvloeistof.

Tabel 5. Door regressie-analyse verkregen [CVP']'s van de verschillende modelvloeistoffen, via formule (15).

Modelvloeistof	B	C	Opmerking
Glycerol	0.443	-0.126	N = 8, Re = 2601
	0.462	-0.134	N = 6, Re = 1951
	0.466	-0.137	N = 4, Re = 1301
	0.457	-0.133	Alle N
Blanose (0.10 wt%)	0.438	-0.134	N = 7, Re = 5485
	0.438	-0.136	N = 6, Re = 4538
	0.464	-0.149	N = 5, Re = 3626
	0.448	-0.140	Alle N
Blanose (0.20 wt%)	0.413	-0.128	N = 8, Re = 2536
	0.394	-0.118	N = 6, Re = 1735
	0.375	-0.113	N = 4, Re = 1016
	0.409	-0.127	Alle N
PAAm (0.25 wt%)	0.342	-0.111	N = 11, Re = 5877
	0.364	-0.118	N = 8, Re = 3860
	0.373	-0.116	N = 5, Re = 2076
	0.359	-0.114	Alle N

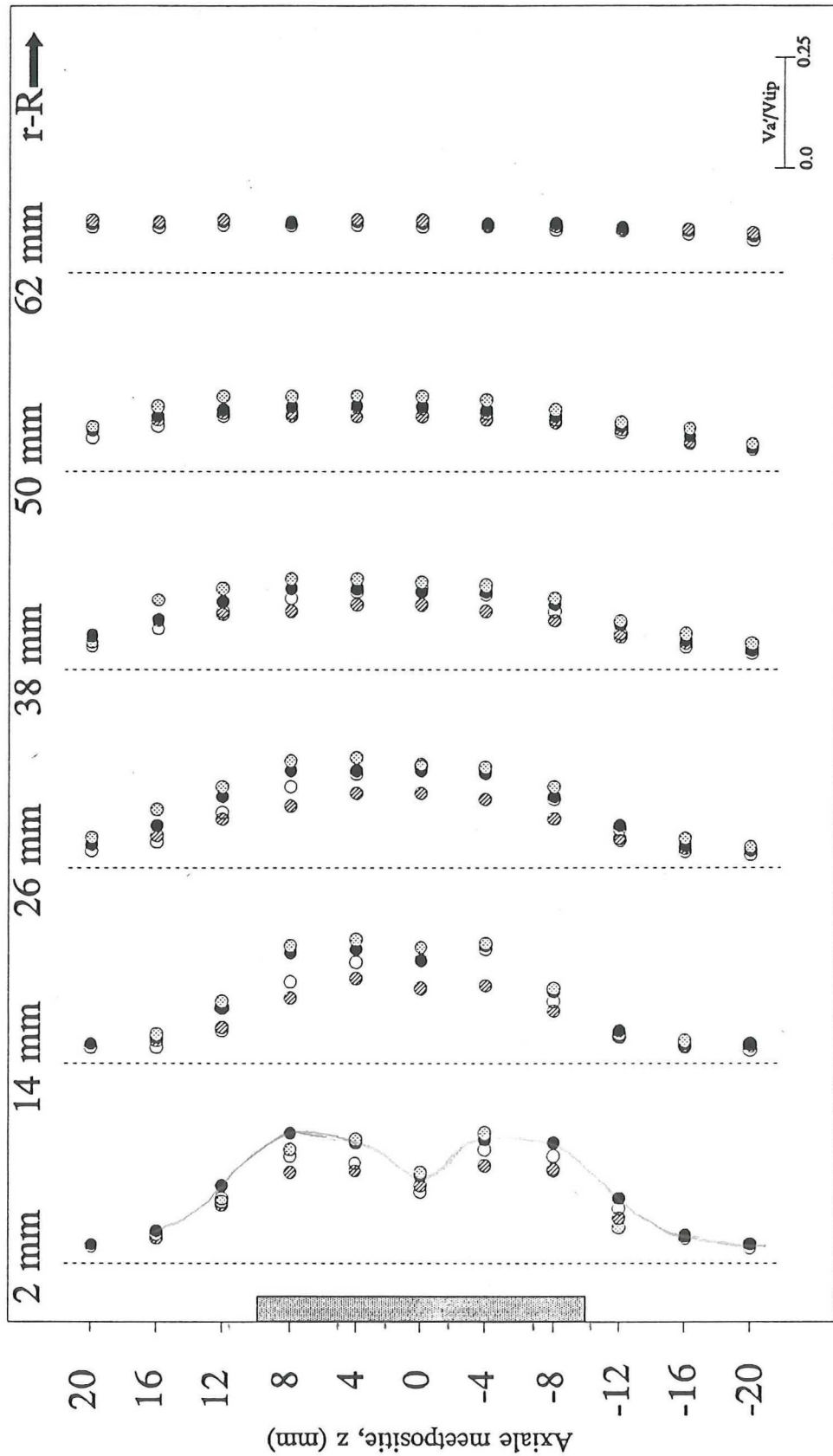


Fig 29. AOVP' voor alle modelvloeistoffen.

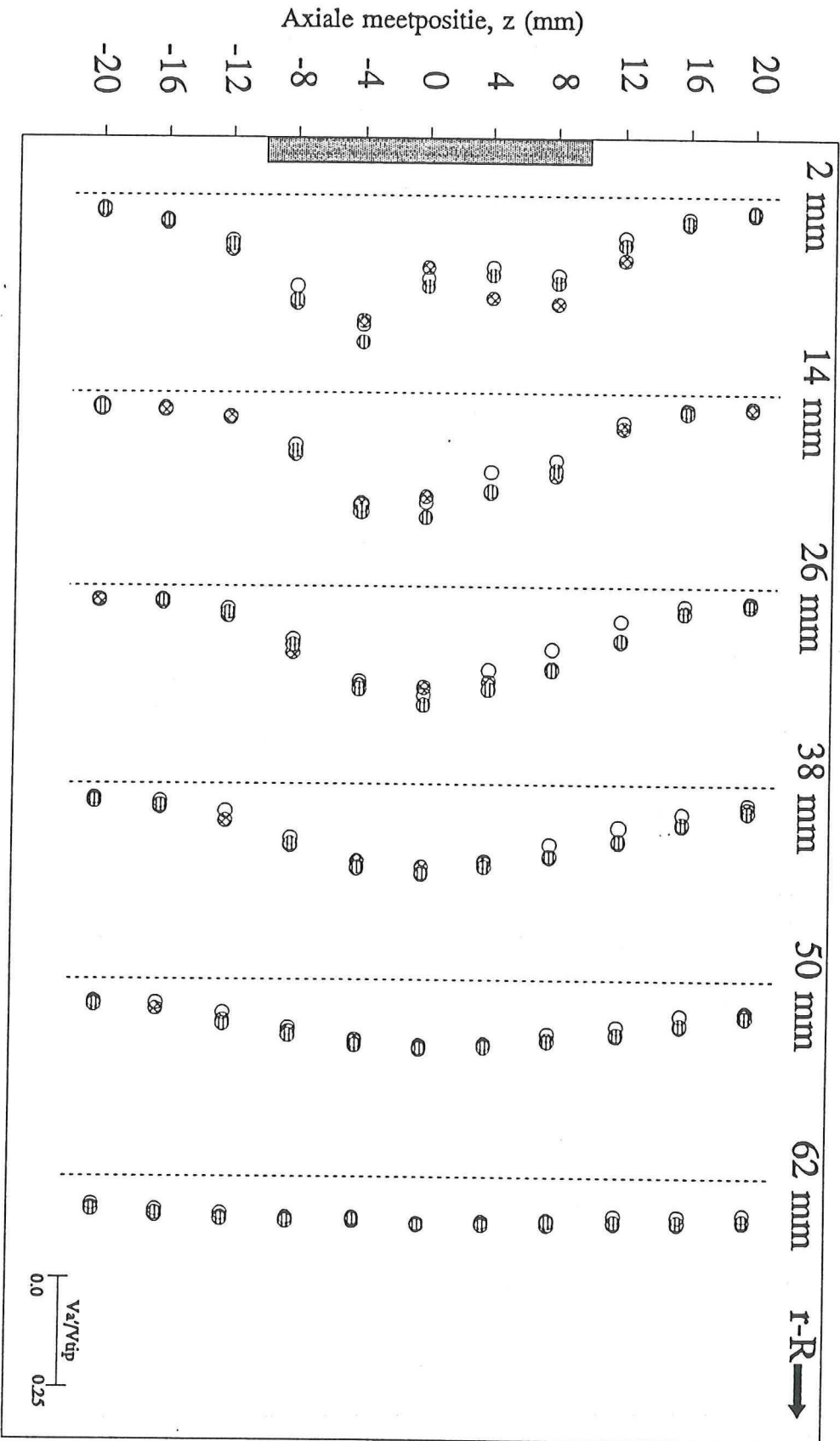
⊙ : Glycerol, N = 8, Re = 2601.

● : 0.1 wt% Blanose, N = 7, Re = 5485.

⊗ : PAAm, N = 11, Re = 5877.

○ : 0.2 wt% Blanose, N = 8, Re = 2536.

Fig 30. AOV<sub>P</sub> voor de 0.2 wt% Blanzose oplossing.  
 ⊗ : N = 8, Re = 2536. ○ : N = 4, Re = 1016.  
 ⊕ : N = 6, Re = 1735.





### 5.3.7. RMS Axial Outlet Velocity Profile (AOVP').

In Figuur 29 (zie ook Appendix D) zijn van alle modelvloeistoffen alle dimensieloze RMS-waarden van de fluctuerende axiale vloeistofsnelheden, behorende bij de hoogste rotatiesnelheid van de roerder, toegepast bij desbetreffende modelvloeistof, in één AOVP' geplaatst. Wanneer per meetpositie minder dan vier symbolen zichtbaar zijn, is er sprake van overlap van de symbolen. Omwille van de overzichtelijkheid, zijn de dimensieloze gemiddelde vloeistofsnelheden van glycerol op de laatste radiale meetpositie (59 mm van de roerdertippen) weggelaten. De weggelaten RMS-waarden staan wel vermeld in Tabel D1 (Appendix D). Qua grootte van de RMS-waarden heeft, voor alle radiale meetposities, van 4 mm axiaal onder de hartlijn tot 12 mm axiaal boven de hartlijn, de Newtonse vloeistof de hoogste en de PAAM oplossing de laagste RMS-waarden. In dit gebied bedragen de RMS-waarden van de dimensieloze fluctuerende axiale vloeistofsnelheden van de PAAM oplossing, de 0.2 wt% Blanose oplossing en de 0.1 wt% Blanose oplossing respectievelijk 72%, 80% en 88% van de dimensieloze RMS-waarden van de Newtonse modelvloeistof op de overeenkomstige posities. Deze percentages komen nagenoeg overeen met de percentages gevonden bij de [OVP']'s in hetzelfde gebied. De [AOVP']'s van de afzonderlijke modelvloeistoffen zijn onafhankelijk van de rotatiesnelheid van de roerder. Als voorbeeld hiervan is de AOVP' van de 0.2 wt% Blanose oplossing genomen, zie Figuur 30. De overeenkomst tussen de profielen is groot.



## HOOFDSTUK 6

**DISCUSSIE EN AANBEVELINGEN****6.1. Discussie.**

Onder aanname, dat de polystyreendeeltjes homogeen in het vat verdeeld zijn, is het maken van foto's een goed hulpmiddel bij het redelijk gedetailleerd in kaart brengen van het vloeistofstromingspatroon in een geroerd vat. Indien het afstellen van de lasersheet en de positionering van de camera nauwkeurig worden uitgevoerd, is de reproduceerbaarheid van de foto's hoog, voor wat betreft de identificatie van de onderdelen van het stromingspatroon. Uitspraken over de absolute snelheden van de polystyreendeeltjes en zodoende vloeistofsnelheid zijn onmogelijk door de 3-dimensionale beweging van de deeltjes en worden niet gedaan. Tevens kan een foto worden gezien, als zijnde opgebouwd uit vele foto's met zeer kleine sluitertijden, welke op elkaar zijn gedrukt. Hierdoor kan nooit worden vastgesteld, wanneer een deeltje zich in de lasersheet bevindt.

Foto's zijn dus globale, momentane opnamen van wat er in het vat gebeurt. De gebruikte sluitertijden zijn klein (maximaal 8 seconden) en de kans op een foto met daarop een toevallige fluctuatie is zodoende altijd aanwezig (zie verder in discussie). Bij LDA zijn de meettijden groter (maximaal 10 minuten), waardoor toevallige fluctuaties worden uitgemiddeld, alsmede dat het vat gedetailleerder kan worden bestudeerd.

De schijnbare viscositeiten, berekend volgens de methode van Metzner en Otto en de daarmee bepaalde Reynoldsgetallen moeten met de nodige voorzichtigheid worden geïnterpreteerd, maar laten een eenvoudige vergelijking van de Newtonse en niet-Newtonse resultaten toe. Tevens kan met de bepaalde Reynoldsgetallen de Reynolds-onafhankelijkheid van de roerderuitstroombrofielen worden vastgesteld.

Op de genomen foto's zijn de meeste onderdelen van de vloeistofstroming duidelijk identificeerbaar. In de meeste gevallen worden problemen ondervonden bij het identificeren van het radiale deel van de overstroom, alsmede het bepalen van de exacte onderlinge grootte van de ring-vortices en de exacte positie van de centra van de ring-vortices.

De foto's van de vloeistofstroming van de Newtonse en pseudoplastische modelvloeistoffen zijn bij het hoogst mogelijke gehele toerental (per seconde) opgenomen, zonder





lucht in te zuigen. Dit om een zo hoog mogelijk Reynoldsgetal te bereiken. Voor de viscoelastische vloeistoffen is voor een aantal roerdersnelheden gekozen, om eventuele elastische effecten, tengevolge van het toepassen van verschillende roerdersnelheden te kunnen vaststellen. Bij de viscoelastische modelvloeistoffen konden hogere roerdersnelheden worden toegepast, dan bij de overige modelvloeistoffen. Dit wordt blijkbaar veroorzaakt door het elastisch karakter van eerstgenoemde vloeistof.

Voor wat betreft de onderdelen van het vloeistofstromingspatroon kan worden gesteld, dat de foto's van de Newtonse, pseudoplastische en viscoelastische modelvloeistoffen hetzelfde beeld te zien geven. De vloeistofstroming is onafhankelijk van de viscositeit, zowel van de Newtonse als niet-Newtonse, alsmede van het Reynoldsgetal. De resultaten zijn overeenkomstig met de resultaten behaald door *Hockey et al* [9].

De onderdelen van de vloeistofstroming zijn onafhankelijk van de elasticiteit, tot zover dat met de beschikbare foto's van de viscoelastische vloeistoffen kan worden vastgesteld. Een verandering van uitstroomhoek door toename van de PAAM-concentratie of door het op zich elastisch zijn van de oplossing, is niet waargenomen. Dit komt niet overeen met de resultaten van *Greene et al* [10]. Toepassen van verschillende roerdersnelheden en dus andere viscositeiten, elasticiteiten en Reynoldsgetallen, heeft geen verandering van de uitstroomhoek tot gevolg. Ook *Hockey et al* [9] en *Nouri en Whitelaw* [14] weerleggen de conclusies van *Greene*.

Op een aantal foto's is hoogstwaarschijnlijk sprake van toeval of van toevallige fluctuaties, dan van nog niet eerder geïdentificeerde onderdelen van de vloeistofstroming. Zo is de op Foto 22 zichtbare afwijking van de stromingsrichting en vorm van de bovenste vortex in de PAAM oplossing niet op één van de andere foto's waargenomen. Op Foto's 10 en 14 is sprake van het mooiste, maar verder niet aangetroffen verschijnsel. Dit betreft de aanwezigheid van de derde ring-vortex, net onder het vloeistofoppervlak. De ring-vortex op Foto 10 is hoogstwaarschijnlijk geïnduceerd door de ingezogen luchtstroom, die zichtbaar is boven de ring-vortex. Een combinatie van optische bedrog en de ingezogen luchtstroom (elk neemt een deel van de "ring" voor zijn rekening) wordt ook niet uitgesloten. De derde ring-vortex op Foto 14 lijkt te worden geïnduceerd door de vloeistof, die tegen het keerschot wordt aangedrukt. Aan het vloeistofoppervlak kruipt de vloeistof tegen het keerschot op. (niet gefotografeerde resultaten). De vloeistof in dit "bergje" (zie Figuur 16) kan alleen in de richting van de roerders worden afgevoerd. Verder onderzoek zal moeten uitwijzen of de waargenomen verschijnselen inderdaad op toeval berusten.



Via de camera-optie "Automatic shutter control" zijn de beste foto's verkregen, vooral met diafragma 8 en 11. Nadeel hierbij is het niet exact bekend zijn van de sluitertijd, welke met een stopwatch is gemeten. Dit is voor het identificeren van de onderdelen van de vloeistofstroming echter minder belangrijk. Voordeel is, dat het contrast optimaal is en zodoende de verschillende onderdelen van de vloeistofstroming beter identificeerbaar zijn, alsmede dat geen filmmateriaal onnodig wordt verbruikt. De optie is waardevol bij het vaststellen van de toe te passen vaste sluitertijden van de camera, bij de verschillende diafragma's.

De vectorvelden bevestigen de uitspraken over de grootte-orde van de onderdelen van de stromingspatronen, die getrokken zijn op basis van de foto's. Met de vectorvelden kan worden bepaald, dat de dimensieloze vloeistofsnelheden van de Newtonse en pseudoplastische modelvloeistoffen van dezelfde grootte-orde zijn. De dimensieloze vloeistofsnelheden in de viscoelastische modelvloeistof zijn tot 30% lager. Dit zou kunnen worden toegeschreven aan het elastische karakter van laatstgenoemde modelvloeistof. Dit, omdat in het gebied 20 mm boven en onder de roerder bij drie verschillende roerder-snelheden en zodoende drie verschillende Reynoldsgetallen is gemeten en geen Reynolds-afhankelijkheid is gevonden. Dit gebied zal aan het eind van deze paragraaf nader worden besproken, via de uitstroomprofielen. Op de vectorvelden kan een asymmetrische uitstroom worden geïdentificeerd, met een kleine uitstroomhoek naar boven. De hoek in de uitstroom, alsmede het asymmetrische stromingsprofiel van de uitstroom wordt veroorzaakt, doordat de roerder op een afstand  $T/3$  van de bodem is geplaatst. Door de asymmetrische plaatsing van de roerder is het vloeistofvolume boven de roerder tweemaal zo groot als daaronder. Voor de Newtonse en pseudoplastische vloeistoffen bedraagt deze hoek  $3^\circ$ , voor de viscoelastische vloeistof  $2^\circ$ . De uitstroomprofielen van de niet-Newtonse modelvloeistoffen hebben, naast de grote radiale stroming, een sterk axiaal karakter in de buurt van het keerschot, vergeleken met de Newtonse modelvloeistof. Dit heeft echter te maken met het verschil in radiale meetpositie tussen de Newtonse modelvloeistof enerzijds en de niet-Newtonse modelvloeistoffen anderzijds, tengevolge van een verschil in refractie-index.

Op basis van de foto's en de vectorvelden kan het volgende, voor Newtonse, pseudoplastische en viscoelastische vloeistoffen geldende stromingspatroon worden opgemerkt, Van de roerder komt een krachtige, asymmetrische uitstroom met een kleine hoek naar boven. Onder en boven de uitstroom, voor de roerder, bevindt zich een ring-vortex. De onderste ring-vortex is iets kleiner (90%) dan de bovenste ring-vortex, welke een





diameter heeft van ongeveer 50 mm. De centra van de ringvortices liggen verticaal boven elkaar op een onderlinge afstand van ongeveer 75 mm. De centra liggen ongeveer 15 mm voor het keerschot. De overstroom en onderstroom, welke ontstaan uit de afgebogen stromen van de uitstroom tegen de vatwand, stromen in hun respectievelijke axiale richtingen nagenoeg parallel met het keerschot naar het vloeistofoppervlak resp. vatbodem. Na radiaal over resp. onder de ringvortex te zijn gestroomd, worden de stromen verticaal door de bladen en de schijf van de roerder ingezogen voor herhaling van het proces.

De asymmetrische vorm van de OVP's kan al uit de vectorvelden worden gehaald. De OVP's en AOVV's van de afzonderlijke modelvloeistoffen zijn onafhankelijk van het Reynoldsgetal. Qua grootte van de dimensieloze vloeistofsnelheden zijn de OVP's van de Newtonse modelvloeistof en de pseudoplastische modelvloeistoffen aan elkaar gelijk. Met name in de directe nabijheid van de roerder zijn de dimensieloze gemiddelde radiale vloeistofsnelheden in de OVP van de viscoelastische modelvloeistof kleiner (gemiddeld 10%).

Qua grootte van de dimensieloze vloeistofsnelheden komen de AOVV's van alle modelvloeistoffen overeen, op de laatste radiale meetpositie na (zie Appendix C), waar de dimensieloze gemiddelde axiale vloeistofsnelheden van de Newtonse modelvloeistof afwijken van die van de overige modelvloeistoffen. In de OVP's wordt op de laatste radiale meetpositie eveneens een verschil (zie Appendix A) tussen de Newtonse modelvloeistof enerzijds en de niet-Newtonse modelvloeistoffen anderzijds waargenomen. De waarden van de dimensieloze axiale en radiale vloeistofsnelheden van glycerol zijn kleiner respectievelijk groter, dan die van de niet-Newtonse modelvloeistoffen. Dit wordt veroorzaakt door een verschil in radiale meetpositie (59 mm voor glycerol vs. 62 mm van de roerdertippen van de niet-Newtonse modelvloeistoffen), tengevolge van een verschil in refractie-index tussen glycerol enerzijds en de niet-Newtonse modelvloeistoffen anderzijds. Met glycerol was het in de gebruikte vatconfiguratie zodoende niet mogelijk het keerschot dichterbij te naderen.

Op de laatste radiale meetpositie bedragen de dimensieloze axiale vloeistofsnelheden van de 0.1 wt% Blanose oplossing en de 0.2 wt% Blanose oplossing, 73% respectievelijk 80% van de dimensieloze axiale vloeistofsnelheden op de overeenkomstige posities van de viscoelastische modelvloeistof. De axiale vloeistofstroming, ofwel divergentie van de roerderuitstroom, lijkt toe te nemen met toenemende pseudoplastische karakter, in geval van de viscoelastische modelvloeistof, door het gecombineerde elastische en pseudoplastische karakter van de vloeistof.



Qua vorm van de [OVP']'s en [AOVP's]'s in de directe nabijheid van de roerder, komen de niet-Newtonse modelvloeistoffen overeen, waarbij de PAAM oplossing lagere RMS-waarden heeft. De lagere RMS-waarden lijken te worden veroorzaakt door de elasticiteit van de PAAM oplossing, de overeenkomst in niet-Newtonse [OVP']'s aan de pseudoplastischeit. De afzonderlijke [OVP']'s van de verschillende modelvloeistoffen zijn onafhankelijk van het Reynoldsgetal. Qua grootte van de dimensieloze RMS-waarden van de fluctuerende radiale vloeistofsnelheden is er, met name in de directe nabijheid van de roerder, sprake van niet-Newtonse effecten. In het gebied 4 mm axiaal onder de hartlijn tot 12 mm axiaal boven de hartlijn, bedragen de dimensieloze RMS-waarden van de fluctuerende radiale vloeistofsnelheden van de PAAM oplossing, de 0.2 wt% Blanose oplossing en de 0.1 wt% Blanose oplossing gemiddeld respectievelijk 74%, 78% en 88% van de dimensieloze RMS-waarden van de radiale vloeistofsnelheden in de Newtonse modelvloeistof op de overeenkomstige posities. In de [AOVP']'s worden in hetzelfde gebied de percentages 72%, 80% en 88% gevonden. De verschillen lijken te worden veroorzaakt door verschil in pseudoplastischeit en, in geval van de viscoelastische modelvloeistof, door het gecombineerde elastische en pseudoplastische karakter van de vloeistof.

De CVP's zijn gecorreleerd met relaties, in de vorm van de Van der Molen vergelijking. Qua exponent hebben de niet-Newtonse modelvloeistoffen nagenoeg dezelfde waarde, in de buurt van -1, zie Tabel 4. De waarde -1 mag verwacht worden op basis van de wet van behoud van impuls. Het verlies aan kinetische energie ( $\propto v_r^2$ ) van de vloeistof is recht evenredig met het steeds groter wordend doorstroomd oppervlak ( $\propto r^2$ ). De waarde van de exponent van de Newtonse modelvloeistof is lager. Wel is opvallend, dat de exponent exact het omgekeerde is van dat van de Van der Molen vergelijking (-6/7 vs. -7/6). De waarden van de coëfficiënten van de Van der Molen vergelijking (voor alle meetresultaten en alle meetresultaten per modelvloeistof afzonderlijk) komen meer overeen met de waarde gevonden door *Van der Molen en van Maanen* [12] (0.85), dan met de waarde gevonden door *Dyster et al* [13] (0.73), waarbij de PAAM oplossing de kleinste coëfficiënt heeft en de 0.1 wt% Blanose oplossing het grootste. Bij de PAAM oplossing en de 0.1 wt% Blanose oplossing neemt de waarde van de coëfficiënt toe, met kleiner wordende roerdersnelheid en Reynoldsgetal, terwijl een daling wordt verwacht (*Dyster et al* [13], *Koutsakos et al* [11]). Aangenomen is, dat de Van der Molen parameter 1 is, overeenkomstig de resultaten van *Dyster* (Voor  $Re > 500$ ,  $\xi_m = 1$ ). Op het laatste radiale meetpunt neemt de dimensieloze radiale vloeistofsnelheid, met name in de niet-Newtonse modelvloeistoffen, sterk af. Dit wordt veroorzaakt door de verandering van radiale naar axiale stromingsrichting bij het naderen van het keerschot.







Bij de eerste testmeting, uitgevoerd in de PAAM oplossing op 2 mm radiaal van de roerdertippen op de hartlijn, had de coëfficiënt een waarde van 0,602. De oplossing was toen nieuw. Na twaalf uur meten had de coëfficiënt een waarde van 0,789. De elasticiteit van de PAAM oplossing heeft een duidelijk tijdsafhankelijk karakter. Het wordt echter niet uitgesloten, dat er sprake is geweest van "vernietiging" van de elasticiteit in de oplossing ten gevolge van de grote experimentele tijdsduur (Analogie met het langdurig en veelvuldig uitrekken van een elastiekje).

De [CVP]'s zijn gecorreleerd met relaties, in de vorm zoals voorgesteld door *Dyster et al* [13]. De relatie gevonden voor de Newtonse vloeistof, waarbij alle meetpunten zijn gebruikt, komt overeen met de relatie, voorgesteld door *Dyster*, zie Tabel 5. Opmerkelijk is, dat voor alle vloeistoffen, op de 0.2 wt% Blanose oplossing na, de coëfficiënt toeneemt, met dalend toerental en dus Reynoldsgetal. Dit is tegengesteld aan wat verwacht mag worden. Hoe lager het Reynoldsgetal hoe meer laminair de stroming, hoe kleiner de vloeistofsnelheidsfluctuaties. De pseudoplasticiteit van de niet-Newtonse oplossingen zou een bijdrage kunnen leveren, bij het verlagen van de dimensieloze RMS-waarden van de fluctuerende radiale vloeistofsnelheden, zoals reeds gevonden bij de [OVP]'s. Echter de helling van de 0.1 wt% Blanose oplossing is weer groter dan die van glycerol, dat geen pseudoplastisch karakter heeft. Verder onderzoek moet uitwijzen, welke factoren verantwoordelijk zijn voor de hiervoor gevonden verschillen.

## 6.2. Aanbevelingen voor verder onderzoek.

De meest voor de hand liggende aanbeveling is het uitvoeren van meer LDA-metingen en het maken van meer foto's om een beter inzicht te verwerven in dit, nog nauwelijks ontgonnen onderwerp. Door met name meer LDA-metingen te doen, kunnen relaties worden opgesteld en conclusies worden getrokken, die meer zekerheid bieden.

Het toepassen van een motor met een hoger maximaal toerental, dan bij dit werk gebruikt is, in combinatie met een gesloten top op het geroerde vat. Het netto maximum toerental van de in dit werk gebruikte motor bedraagt 696 toeren per minuut. Door het toepassen van hogere toerentallen (1500 - 3000 toeren per minuut) wordt het mogelijk een groter interval aan Reynoldsgetallen te bestrijken, alsmede metingen te kunnen doen in het volledig ontwikkelde turbulente gebied. Door het toepassen van een top op het geroerde vat moet worden gezorgd, dat bij de hoger toegepaste toerentallen, de inzuiging van lucht tot een minimum wordt beperkt.



Het gebruik van de CCD-camera, die aanwezig is op het Kramers Laboratorium, als mogelijk alternatief voor het maken van foto's. Van de software, die nodig is voor het besturen van de camera, is vrije recent een verbeterde versie beschikbaar gekomen. Ook is er een nieuwe, betere camera aangeschaft. Met de CCD-camera kan een minimum van 7 plaatjes per seconde worden gemaakt (ofwel een sluitertijd van 1/7 seconde). Door iets meer polystyreendeeltjes toe te voegen kunnen mooie resultaten worden behaald, zonder dat hiervoor kostbaar filmmateriaal nodig is. Tevens kan worden ingezoomd. Dit kan weliswaar ook met een foto-camera, maar voor het gedetailleerd in beeld brengen van het hele vat is een vermogen aan filmmateriaal nodig, waar ook nog verre van optimaal gebruik wordt gemaakt. Nadeel is, dat het contrast kleiner zal zijn.

Een klein onderzoek wordt aanbevolen naar het ophelderen van het tijdsafhankelijke karakter van de PAAM oplossing, of dat er daadwerkelijk sprake is van "vernietiging" van elasticiteit.

Het gebruiken van een koppelmeter voor het betrouwbaar kunnen bepalen van het niet-Newtonse Reynoldsgetal via de universele "power curve", in plaats van met de minder betrouwbare methode van Metzner en Otto.

Het kunnen meten van viscositeiten bij hogere afschuif-snelheden, dan tot dusver mogelijk is geweest. Door het grotere interval aan afschuif-snelheden wordt het mogelijk het Carreau model of een overeenkomstig model toe te passen. Deze modellen bieden meer zekerheid, dan de in dit werk toegepaste machtwet.





## HOOFDSTUK 7

**CONCLUSIES**

De stroming van Newtonse en niet-Newtonse vloeistoffen in een turbulent geroerd vat kan goed worden bestudeerd aan de hand van foto's en LDA-metingen. De foto's geven een globaal en momentaan beeld van de turbulente stroming. Met LDA is de turbulente stroming gedetailleerder en tijdgemiddeld bestudeerd.

De onderdelen van de stromingspatronen van de bestudeerde Newtonse, pseudoplastische en viscoelastische vloeistoffen in een turbulent geroerd vat zijn van dezelfde grootte-orde.

De viscoelastische vloeistof heeft, met name in de directe nabijheid van de roerder, lagere dimensieloze gemiddelde radiale vloeistofsnelheden dan de Newtonse en pseudoplastische modelvloeistoffen, die gelijkwaardig in snelheid zijn. De dimensieloze gemiddelde axiale vloeistofsnelheden zijn voor alle modelvloeistoffen gelijkwaardig.

De dimensieloze RMS-waarden van de fluctuerende radiale en axiale vloeistofsnelheden verschillen voor alle gebruikte modelvloeistoffen, waarbij de Newtonse vloeistof de grootste en de viscoelastische vloeistof de kleinste RMS-waarden heeft. De dimensieloze RMS-waarden van de viscoelastische vloeistof bedragen, in het roerderuitstroomprofiel, ongeveer 75% van de RMS-waarden van glycerol.

De profielen van de afzonderlijke vloeistoffen zijn onafhankelijk van het Reynoldsgetal in het bestudeerde Reynoldsgebied.



---

## LITERATUUR

- 01) K. Wichterle and O. Wein, Threshold of mixing of non-Newtonian liquids (1981), *Int. Chem. Eng.*, **21**, 116 - 120.
- 02) S. Nagata, M. Nishikawa, H. Tada and S. Gotoh, Power consumption of mixing impellers in pseudoplastic liquids (1971), *J. Chem. Eng. Japan*, **4**, 72 - 76.
- 03) R.B. Bird, W.E. Stewart en E.N. Lightfoot, *Transport Phenomena*, John Wiley and Sons, Singapore, 1960.
- 04) A.B. Metzner en R.E. Otto, Agitation of non-Newtonian fluids (1957), *A.I.Ch.E. Journal*, **3**, 3 - 9.
- 05) N.P. Cheremisinoff (ed.), *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Volume 6: Complex Flow Phenomena and Modelling, Gulf Publishing Company, Houston, 1987.
- 06) N.P. Cheremisinoff en R. Gupta (eds.), *Handbook of Fluids in Motion*, Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Michigan, 1983. Hoofdstuk 7: A.H.P. Skelland, *Mixing and Agitation of non-Newtonian Fluids*, 179 - 196.
- 07) F.T.M. Nieuwstadt, *Turbulentie, Dictaat bij het college turbulentie A (b60A)*, Technische Universiteit Delft, Delft, 1989.
- 08) J.F. Zevenbergen, Determination of flow patterns of non-Newtonian fluids in the turbulent regime in an agitated tank, Literature survey, Intern rapport Kramers Laboratorium voor Fysische Technologie TU Delft, Delft, 1994.
- 09) R.M. Hockey, J.M. Nouri en F. Pinho, Flow visualization of Newtonian and non-Newtonian fluids in stirred reactor (1989), *Int. Symp. of Flow Visualization V*, 976 - 987.
- 10) H.L. Greene, C. Carpenter en L. Casto, Mixing characteristics of axial impellers with Newtonian and non-Newtonian fluids (1982), *Proc. 4th Eur. Conf. on Mixing*, paper D1, 109 - 126.
- 11) E. Koutsakos, A.W. Nienow en K.N. Dyster, Laser anemometry study of shear thinning fluids by a Rushton turbine (1991), *Fluid Mixing IV*, 51 - 73.
- 12) K. Van der Molen en H.R.E. van Maanen, Laser Doppler measurements of the turbulent flow in stirred vessels to establish scaling rules (1978), *Chem. Eng. Sci.*, **33**, 1161.





- 
- 13) K.N. Dyster, E. Koutsakos, Z. Jawaorski en A.W. Nienow, An LDA study of the radial discharge velocities generated by a Rushton turbine: Newtonian fluids (1993), *Trans. I. Chem. Eng.*, 71, 11 - 23.
  - 14) J.M. Nouri en J.H. Whitelaw, Flow characteristics of stirred reactors with Newtonian and non-Newtonian fluids (1990), *A.I.Ch.E. Journal*, 36, 627 - 629.
  - 15) Aqualon BV, Physical and chemical properties of Natrosol, Aqualon BV, Rijswijk
  - 16) Aqualon BV, Physical and chemical properties of Blanose, Aqualon BV, Rijswijk.
  - 17) L.E. Drain, Laser Doppler Technique, John Wiley and Sons, New York, 1980.



---

## NAWOORD

Ik heb het genoeg gehad tijdens mijn afstudeerwerk mezelf verder te ontwikkelen op het gebied van de Fysische Technologie, met name op het gebied van de reologie, maar ook daarbuiten. Ik wil daartoe het Kramers Laboratorium voor Fysische Technologie bedanken voor het bieden van deze mogelijkheid. Dank gaat uit naar Prof. H.E.A. Van den Akker en mijn begeleider Ir. B.C.H. Venneker.

Dank gaat uit naar Dhr. Fernandez Luque, Dhr. van der Bruggen en Dhr. Cornelissen van SHELL Research Rijswijk, voor het beschikbaar stellen van de Rheometrics viscositeitsmeter aldaar.

Speciale dank gaat uit naar Dhr. Schinkel voor de medewerking bij het maken van de foto's. Ze zijn fantastisch! Daarnaast wil ik Dhr. Schinkel en Dhr. Vermeulen bedanken voor de ondersteuning gedurende het afstudeerproject.





Tabel A1. De dimensieloze gemiddelde waarden van de fluctuerende radiale vloeistofsnelheden van glycerol, gerangschikt naar aflopend toerental van de roerder (480, 360 en 240 rpm). De radiale meetpositie is de afstand van de roerdertippen. De axiale meetpositie is de afstand van de hartlijn.

Axiale meet- pos.	Radiale meetpositie					
	2 mm	14 mm	26 mm	38 mm	50 mm	59 mm
20 mm	0.004	0.015	0.021	0.027	0.059	0.131
	0.006	0.008	0.022	0.029	0.051	0.135
	0.003	0.009	0.017	0.028	0.055	0.133
16 mm	0	0.024	0.057	0.135	0.208	0.218
	0	0.023	0.059	0.139	0.209	0.212
	0	0.010	0.053	0.144	0.258	0.241
12 mm	-0.005	0.044	0.143	0.240	0.301	0.296
	-0.005	0.048	0.139	0.243	0.296	0.284
	-0.005	0.038	0.127	0.244	0.279	0.271
8 mm	0.063	0.195	0.357	0.404	0.404	0.364
	0.060	0.194	0.360	0.402	0.398	0.359
	0.045	0.236	0.382	0.409	0.393	0.346
4 mm	0.463	0.565	0.557	0.517	0.465	0.409
	0.472	0.593	0.564	0.508	0.455	0.397
	0.463	0.571	0.590	0.505	0.428	0.366
0 mm	0.778	0.688	0.584	0.513	0.463	0.409
	0.798	0.706	0.586	0.512	0.456	0.396
	0.789	0.693	0.575	0.494	0.439	0.401
-4 mm	0.361	0.394	0.406	0.400	0.325	0.305
	0.359	0.392	0.410	0.407	0.317	0.313
	0.342	0.391	0.410	0.407	0.321	0.299
-8 mm	0.069	0.137	0.205	0.247	0.264	0.246
	0.073	0.126	0.196	0.236	0.261	0.243
	0.041	0.093	0.137	0.184	0.218	0.215
-12 mm	0.034	0.070	0.088	0.112	0.134	0.155
	0.030	0.071	0.088	0.114	0.144	0.153
	0.024	0.058	0.064	0.095	0.133	0.158
-16 mm	0.034	0.059	0.072	0.080	0.111	0.129
	0.034	0.061	0.070	0.078	0.099	0.124
	0.030	0.051	0.053	0.066	0.095	0.106
-20 mm	0.031	0.043	0.051	0.051	0.064	0.078
	0.028	0.041	0.050	0.047	0.060	0.070
	0.027	0.034	0.032	0.034	0.052	0.073



Tabel A2. De dimensieloze gemiddelde waarden van de fluctuerende radiale vloeistofsnelheden van de 0.1 wt% Blanose oplossing, gerangschikt naar aflopend toerental (420, 360 en 300 rpm). De radiale meetpositie is de afstand van de roerdertippen. De axiale meetpositie is de afstand van de hartlijn.

Axiale meet- pos.	Radiale meetpositie					
	2 mm	14 mm	26 mm	38 mm	50 mm	62 mm
20 mm	0	0.025	0.050	0.084	0.109	0.102
	0	0.025	0.039	0.075	0.110	0.104
	0	0.022	0.034	0.061	0.106	0.099
16 mm	-0.014	0.032	0.074	0.124	0.176	0.172
	-0.016	0.030	0.060	0.124	0.173	0.146
	-0.011	0.027	0.043	0.107	0.162	0.160
12 mm	-0.021	0.052	0.138	0.232	0.264	0.239
	-0.024	0.045	0.127	0.219	0.257	0.222
	-0.027	0.040	0.108	0.204	0.254	0.210
8 mm	0.077	0.174	0.338	0.384	0.363	0.279
	0.063	0.153	0.317	0.369	0.350	0.275
	0.045	0.130	0.297	0.351	0.357	0.267
4 mm	0.458	0.568	0.561	0.494	0.426	0.306
	0.453	0.525	0.543	0.489	0.427	0.298
	0.452	0.534	0.540	0.474	0.417	0.301
0 mm	0.774	0.676	0.570	0.479	0.408	0.291
	0.785	0.678	0.575	0.483	0.403	0.290
	0.789	0.693	0.571	0.478	0.422	0.290
-4 mm	0.338	0.294	0.340	0.351	0.328	0.251
	0.329	0.285	0.335	0.356	0.329	0.260
	0.318	0.265	0.318	0.354	0.321	0.250
-8 mm	0.072	0.115	0.170	0.218	0.239	0.198
	0.063	0.106	0.171	0.220	0.236	0.197
	0.050	0.104	0.166	0.214	0.231	0.194
-12 mm	0.009	0.079	0.108	0.135	0.161	0.148
	0.010	0.080	0.101	0.135	0.157	0.146
	0.011	0.082	0.103	0.134	0.159	0.139
-16 mm	0.027	0.065	0.082	0.094	0.114	0.094
	0.027	0.065	0.080	0.093	0.109	0.098
	0.023	0.066	0.078	0.084	0.107	0.095
-20 mm	0.024	0.048	0.061	0.075	0.069	0.064
	0.022	0.053	0.064	0.069	0.085	0.063
	0.025	0.044	0.055	0.064	0.069	0.061





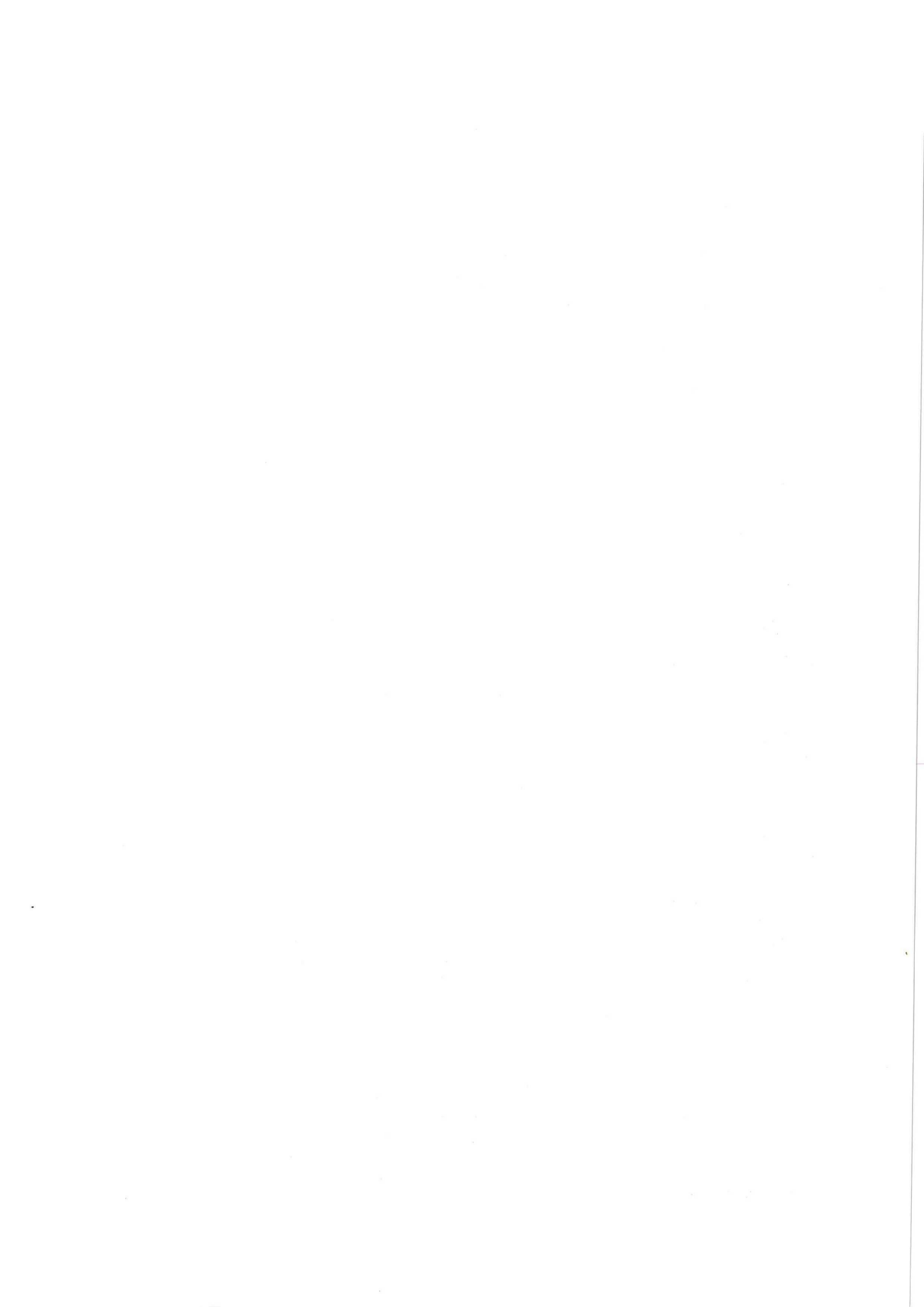
Tabel A3. De dimensieloze gemiddelde waarden van de fluctuerende radiale vloeistofsnelheden van de 0.2 wt% Blanose oplossing, gerangschikt naar aflopend toerental (480, 360 en 240 rpm). De radiale meetpositie is de afstand van de roerdertippen. De axiale meetpositie is de afstand van de hartlijn.

Axiale meet- pos.	Radiale meetpositie					
	2 mm	14 mm	26 mm	38 mm	50 mm	62 mm
20 mm	0	0.019	0.039	0.068	0.099	0.094
	0	0.019	0.031	0.060	0.093	0.097
	0	0.019	0.032	0.042	0.075	0.071
16 mm	-0.008	0.029	0.055	0.104	0.156	0.152
	-0.008	0.026	0.046	0.099	0.154	0.152
	-0.008	0.027	0.042	0.071	0.115	0.129
12 mm	0.036	0.038	0.107	0.196	0.258	0.215
	0.022	0.027	0.104	0.191	0.257	0.201
	0.013	0.023	0.067	0.146	0.212	0.176
8 mm	0.013	0.120	0.285	0.365	0.361	0.282
	0.023	0.131	0.312	0.368	0.350	0.246
	0.023	0.090	0.232	0.310	0.347	0.224
4 mm	0.413	0.533	0.557	0.503	0.436	0.306
	0.425	0.624	0.592	0.500	0.407	0.283
	0.385	0.558	0.547	0.477	0.399	0.272
0 mm	0.770	0.693	0.580	0.497	0.420	0.280
	0.751	0.627	0.555	0.471	0.388	0.270
	0.721	0.648	0.541	0.462	0.393	0.265
-4 mm	0.312	0.226	0.309	0.337	0.330	0.242
	0.299	0.167	0.252	0.324	0.312	0.221
	0.291	0.163	0.239	0.284	0.293	0.226
-8 mm	0.048	0.099	0.150	0.193	0.213	0.196
	0.034	0.112	0.131	0.173	0.214	0.176
	0.024	0.099	0.124	0.154	0.193	0.172
-12 mm	0.023	0.089	0.100	0.117	0.142	0.131
	0.027	0.094	0.103	0.115	0.134	0.120
	0.035	0.080	0.093	0.100	0.123	0.114
-16 mm	0.033	0.071	0.086	0.090	0.102	0.087
	0.031	0.075	0.085	0.083	0.094	0.075
	0.021	0.063	0.077	0.078	0.082	0.061
-20 mm	0.033	0.056	0.065	0.068	0.075	0.056
	0.029	0.058	0.065	0.064	0.063	0.037
	0.019	0.051	0.058	0.059	0.060	0.030



Tabel A4. De dimensieloze gemiddelde waarden van de fluctuerende radiale vloeistofsnelheden van de 0.25 wt% PAAm oplossing, gerangschikt naar aflopend toerental (660, 480 en 300 rpm). De radiale meetpositie is de afstand van de roerdertippen. De axiale meetpositie is de afstand van de hartlijn.

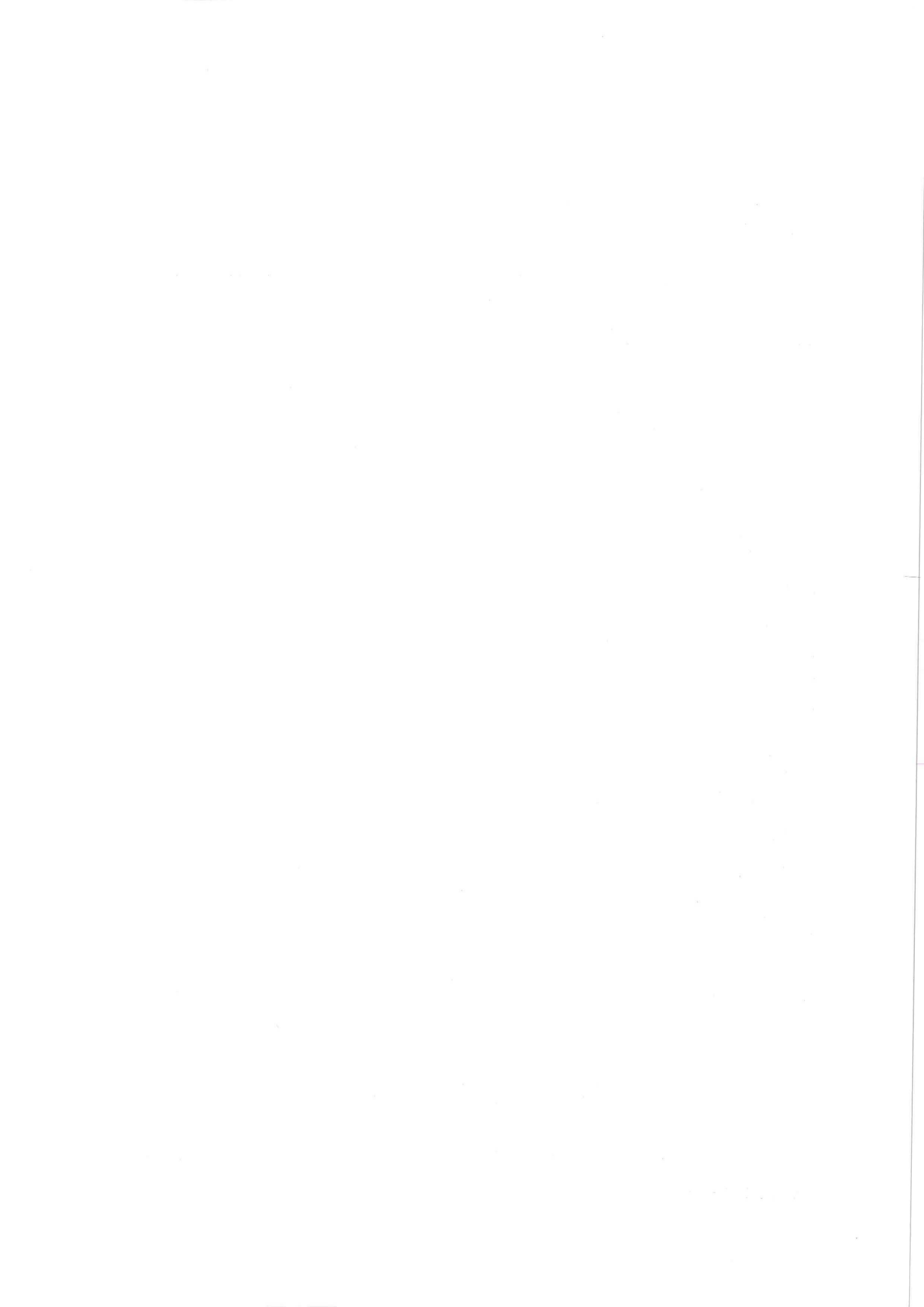
Axiale meet- pos.	Radiale meetpositie					
	2 mm	14 mm	26 mm	38 mm	50 mm	62 mm
20 mm	0	0.030	0.050	0.069	0.098	0.078
	0	0.030	0.048	0.068	0.090	0.083
	0	0.025	0.040	0.057	0.099	0.090
16 mm	-0.016	0.032	0.056	0.114	0.165	0.134
	-0.015	0.029	0.059	0.102	0.160	0.137
	-0.011	0.033	0.046	0.095	0.161	0.138
12 mm	-0.061	0.038	0.107	0.194	0.259	0.184
	-0.044	0.041	0.104	0.213	0.256	0.195
	-0.034	0.034	0.086	0.178	0.231	0.191
8 mm	0.056	0.134	0.245	0.315	0.325	0.193
	0.053	0.137	0.266	0.352	0.334	0.210
	0.041	0.110	0.241	0.319	0.337	0.236
4 mm	0.443	0.486	0.487	0.435	0.370	0.208
	0.456	0.511	0.509	0.473	0.403	0.233
	0.428	0.495	0.527	0.460	0.399	0.249
0 mm	0.684	0.642	0.553	0.462	0.396	0.215
	0.722	0.657	0.564	0.489	0.405	0.224
	0.753	0.656	0.556	0.471	0.402	0.246
-4 mm	0.401	0.361	0.375	0.375	0.361	0.208
	0.388	0.330	0.365	0.356	0.330	0.205
	0.344	0.273	0.318	0.347	0.273	0.225
-8 mm	0.073	0.111	0.166	0.217	0.253	0.169
	0.068	0.102	0.164	0.219	0.227	0.170
	0.056	0.099	0.153	0.208	0.229	0.178
-12 mm	0.008	0.067	0.101	0.131	0.155	0.118
	0.008	0.078	0.103	0.132	0.158	0.122
	0.008	0.089	0.108	0.128	0.153	0.129
-16 mm	0.019	0.068	0.081	0.099	0.110	0.079
	0.022	0.065	0.081	0.095	0.107	0.083
	0.026	0.068	0.084	0.088	0.098	0.079
-20 mm	0.022	0.050	0.070	0.076	0.082	0.043
	0.019	0.050	0.065	0.080	0.083	0.051
	0.025	0.053	0.064	0.060	0.070	0.049





Tabel B1. De dimensieloze RMS-waarden van de fluctuerende radiale vloeistofsnelheden van glycerol, gerangschikt naar aflopend toerental van de roerder (480, 360 en 240 rpm). De radiale meetpositie is de afstand van de roerdertippen. De axiale meetpositie is de afstand van de hartlijn.

Axiale meet- pos.	Radiale meetpositie					
	2 mm	14 mm	26 mm	38 mm	50 mm	59 mm
20 mm	0.059	0.057	0.070	0.067	0.084	0.111
	0.060	0.058	0.067	0.072	0.090	0.109
	0.051	0.055	0.071	0.069	0.087	0.110
16 mm	0.073	0.073	0.111	0.136	0.140	0.138
	0.071	0.071	0.109	0.143	0.146	0.132
	0.062	0.071	0.109	0.144	0.153	0.136
12 mm	0.132	0.123	0.172	0.184	0.171	0.159
	0.129	0.117	0.167	0.186	0.170	0.157
	0.122	0.112	0.160	0.185	0.166	0.150
8 mm	0.261	0.247	0.252	0.215	0.184	0.165
	0.256	0.237	0.252	0.219	0.181	0.164
	0.226	0.213	0.235	0.206	0.177	0.159
4 mm	0.294	0.311	0.265	0.217	0.183	0.168
	0.296	0.315	0.266	0.219	0.182	0.167
	0.222	0.259	0.243	0.221	0.184	0.162
0 mm	0.308	0.281	0.259	0.214	0.181	0.165
	0.312	0.296	0.266	0.217	0.180	0.165
	0.313	0.295	0.264	0.218	0.179	0.160
-4 mm	0.288	0.304	0.259	0.215	0.182	0.164
	0.293	0.306	0.264	0.219	0.184	0.165
	0.269	0.302	0.209	0.255	0.176	0.158
-8 mm	0.234	0.172	0.181	0.176	0.161	0.150
	0.219	0.161	0.178	0.171	0.164	0.146
	0.217	0.153	0.166	0.161	0.147	0.136
-12 mm	0.089	0.071	0.083	0.100	0.112	0.115
	0.090	0.073	0.081	0.101	0.112	0.108
	0.090	0.070	0.084	0.101	0.104	0.107
-16 mm	0.070	0.061	0.063	0.080	0.094	0.097
	0.071	0.059	0.065	0.082	0.093	0.092
	0.069	0.060	0.066	0.075	0.083	0.084
-20 mm	0.065	0.058	0.055	0.059	0.065	0.075
	0.063	0.057	0.057	0.064	0.070	0.077
	0.061	0.056	0.056	0.056	0.068	0.073



Tabel B2. De dimensieloze RMS-waarden van de fluctuerende radiale vloeistofsnelheden van de 0.1 wt% Blanose oplossing, gerangschikt naar aflopend toerental van de roerder (420, 360 en 300 rpm). De radiale meetpositie is de afstand van de roerdertippen. De axiale meetpositie is de afstand van de hartlijn.

Axiale meet- pos.	Radiale meetpositie					
	2 mm	14 mm	26 mm	38 mm	50 mm	62 mm
20 mm	0.052	0.047	0.054	0.067	0.088	0.100
	0.050	0.047	0.056	0.066	0.084	0.100
	0.052	0.048	0.053	0.062	0.078	0.102
16 mm	0.070	0.061	0.072	0.102	0.124	0.121
	0.071	0.057	0.070	0.100	0.118	0.115
	0.065	0.054	0.072	0.092	0.110	0.117
12 mm	0.127	0.108	0.140	0.159	0.148	0.126
	0.130	0.098	0.135	0.156	0.140	0.128
	0.127	0.086	0.129	0.150	0.143	0.123
8 mm	0.255	0.215	0.227	0.194	0.161	0.129
	0.248	0.199	0.218	0.196	0.161	0.128
	0.232	0.176	0.218	0.194	0.166	0.131
4 mm	0.224	0.285	0.238	0.191	0.162	0.132
	0.219	0.284	0.244	0.191	0.160	0.127
	0.222	0.284	0.243	0.197	0.161	0.129
0 mm	0.295	0.266	0.234	0.198	0.161	0.130
	0.296	0.259	0.236	0.198	0.158	0.127
	0.314	0.263	0.239	0.196	0.163	0.122
-4 mm	0.234	0.256	0.223	0.194	0.161	0.125
	0.226	0.250	0.218	0.189	0.162	0.128
	0.217	0.235	0.218	0.191	0.155	0.121
-8 mm	0.234	0.146	0.140	0.141	0.137	0.114
	0.220	0.150	0.140	0.146	0.137	0.113
	0.209	0.137	0.140	0.144	0.135	0.112
-12 mm	0.116	0.074	0.080	0.092	0.100	0.100
	0.116	0.071	0.074	0.088	0.096	0.099
	0.111	0.071	0.072	0.092	0.099	0.097
-16 mm	0.070	0.053	0.048	0.054	0.069	0.078
	0.070	0.051	0.050	0.057	0.067	0.080
	0.063	0.052	0.052	0.059	0.070	0.078
-20 mm	0.057	0.051	0.045	0.045	0.049	0.070
	0.056	0.049	0.047	0.047	0.046	0.066
	0.052	0.048	0.046	0.044	0.050	0.067





Tabel B3. De dimensieloze RMS-waarden van de fluctuerende radiale vloeistofsnelheden van de 0.2 wt% Blanose oplossing, gerangschikt naar aflopend toerental van de roerder (480, 360 en 240 rpm). De radiale meetpositie is de afstand van de roerdertippen. De axiale meetpositie is de afstand van de hartlijn.

Axiale meet- pos.	Radiale meetpositie					
	2 mm	14 mm	26 mm	38 mm	50 mm	62 mm
20 mm	0.048	0.041	0.043	0.048	0.064	0.092
	0.043	0.041	0.045	0.056	0.070	0.090
	0.041	0.036	0.041	0.048	0.063	0.075
16 mm	0.063	0.048	0.057	0.077	0.103	0.107
	0.056	0.048	0.057	0.077	0.102	0.099
	0.052	0.040	0.047	0.061	0.080	0.095
12 mm	0.121	0.073	0.110	0.143	0.149	0.119
	0.108	0.072	0.109	0.140	0.144	0.115
	0.100	0.065	0.070	0.103	0.119	0.101
8 mm	0.213	0.159	0.200	0.191	0.160	0.126
	0.192	0.144	0.207	0.190	0.159	0.114
	0.182	0.121	0.158	0.163	0.140	0.104
4 mm	0.205	0.255	0.221	0.182	0.154	0.123
	0.226	0.262	0.227	0.194	0.157	0.117
	0.206	0.254	0.225	0.177	0.147	0.104
0 mm	0.292	0.234	0.214	0.186	0.156	0.121
	0.270	0.226	0.229	0.193	0.155	0.114
	0.261	0.213	0.211	0.174	0.149	0.109
-4 mm	0.205	0.220	0.212	0.180	0.156	0.115
	0.208	0.221	0.200	0.187	0.154	0.112
	0.199	0.201	0.190	0.163	0.143	0.107
-8 mm	0.209	0.131	0.119	0.122	0.121	0.106
	0.210	0.121	0.107	0.113	0.124	0.103
	0.198	0.113	0.099	0.100	0.109	0.097
-12 mm	0.107	0.064	0.057	0.065	0.081	0.086
	0.107	0.061	0.055	0.065	0.078	0.088
	0.104	0.059	0.052	0.056	0.064	0.075
-16 mm	0.061	0.046	0.043	0.044	0.050	0.069
	0.061	0.046	0.043	0.046	0.051	0.069
	0.061	0.041	0.040	0.040	0.040	0.056
-20 mm	0.052	0.042	0.039	0.037	0.039	0.057
	0.052	0.042	0.040	0.042	0.043	0.058
	0.051	0.041	0.036	0.034	0.037	0.051



Tabel B4. De dimensieloze RMS-waarden van de fluctuerende radiale vloeistofsnelheden van de 0.25 wt% PAAM oplossing, gerangschikt naar aflopend toerental van de roerder (660, 480 en 300 rpm). De radiale meetpositie is de afstand van de roerdertippen. De axiale meetpositie is de afstand van de hartlijn.

Axiale meet- pos.	Radiale meetpositie					
	2 mm	14 mm	26 mm	38 mm	50 mm	62 mm
20 mm	0.048	0.045	0.053	0.063	0.081	0.088
	0.051	0.047	0.052	0.060	0.076	0.087
	0.049	0.046	0.052	0.063	0.078	0.094
16 mm	0.067	0.054	0.064	0.090	0.111	0.100
	0.066	0.054	0.060	0.078	0.111	0.107
	0.064	0.052	0.060	0.080	0.101	0.107
12 mm	0.139	0.086	0.102	0.128	0.142	0.103
	0.138	0.089	0.099	0.136	0.138	0.106
	0.124	0.080	0.090	0.133	0.135	0.107
8 mm	0.204	0.159	0.178	0.164	0.141	0.095
	0.205	0.171	0.184	0.171	0.141	0.100
	0.198	0.160	0.175	0.168	0.145	0.104
4 mm	0.216	0.224	0.190	0.153	0.130	0.088
	0.227	0.230	0.197	0.155	0.133	0.090
	0.218	0.238	0.216	0.178	0.143	0.097
0 mm	0.232	0.192	0.167	0.147	0.122	0.084
	0.249	0.203	0.181	0.154	0.131	0.092
	0.246	0.223	0.202	0.168	0.142	0.099
-4 mm	0.203	0.212	0.193	0.162	0.140	0.092
	0.212	0.209	0.203	0.169	0.144	0.096
	0.202	0.198	0.192	0.173	0.149	0.107
-8 mm	0.207	0.123	0.110	0.125	0.130	0.095
	0.211	0.132	0.111	0.129	0.123	0.096
	0.204	0.139	0.099	0.124	0.131	0.103
-12 mm	0.118	0.065	0.061	0.072	0.091	0.083
	0.121	0.070	0.062	0.073	0.094	0.084
	0.116	0.066	0.061	0.079	0.092	0.094
-16 mm	0.068	0.045	0.052	0.053	0.059	0.070
	0.071	0.053	0.051	0.053	0.058	0.070
	0.068	0.054	0.054	0.060	0.064	0.077
-20 mm	0.063	0.052	0.048	0.049	0.051	0.058
	0.061	0.053	0.051	0.048	0.049	0.064
	0.057	0.052	0.050	0.056	0.055	0.068





Tabel C1. De dimensieloze gemiddelde waarden van de fluctuerende axiale vloeistofsnelheden van glycerol, gerangschikt naar aflopend toerental van de roerder (480, 360 en 240 rpm). De radiale meetpositie is de afstand van de roerdertippen. De axiale meetpositie is de afstand van de hartlijn.

Axiale meet- pos.	Radiale meetpositie					
	2 mm	14 mm	26 mm	38 mm	50 mm	59 mm
20 mm	-0.118	-0.104	-0.102	-0.097	-0.082	0.049
	-0.115	-0.104	-0.090	-0.092	-0.078	0.046
	-0.104	-0.094	-0.077	-0.093	-0.076	0.050
16 mm	-0.114	-0.101	-0.078	-0.036	0.010	0.058
	-0.109	-0.101	-0.073	-0.028	0.008	0.059
	-0.098	-0.093	-0.058	-0.032	0.050	0.070
12 mm	-0.122	-0.095	-0.051	-0.004	0.028	0.067
	-0.120	-0.096	-0.042	-0.002	0.027	0.061
	-0.120	-0.092	-0.044	-0.012	0.036	0.060
8 mm	-0.093	-0.044	0.010	0.022	0.032	0.043
	-0.094	-0.044	0.012	0.024	0.030	0.044
	-0.083	-0.024	0.037	0.046	0.032	0.036
4 mm	-0.009	0.028	0.023	0.022	0.023	0.025
	-0.013	0.027	0.022	0.020	0.021	0.025
	-0.011	0.039	0.034	0.041	0.019	0.016
0 mm	0.028	0.010	0.002	0.002	0.003	-0.005
	0.010	0.010	0.025	0.025	-0.005	-0.003
	0.031	0.010	0.009	0.002	-0.002	-0.007
-4 mm	0.017	0.006	-0.015	-0.010	-0.020	-0.030
	0	-0.004	-0.014	-0.010	-0.015	-0.030
	0.012	-0.006	-0.020	-0.015	-0.016	-0.007
-8 mm	0.061	0.059	0.033	0.014	0	-0.021
	0.046	0.063	0.030	0.012	-0.004	-0.028
	0.064	0.089	0.040	0.024	-0.004	-0.040
-12 mm	0.105	0.087	0.068	0.048	0.027	-0.018
	0.107	0.088	0.067	0.044	0.026	-0.015
	0.118	0.096	0.072	0.045	0.016	-0.035
-16 mm	0.115	0.093	0.077	0.060	0.035	-0.008
	0.115	0.093	0.075	0.050	0.035	-0.009
	0.116	0.091	0.070	0.052	0.030	-0.019
-20 mm	0.117	0.099	0.110	0.074	0.065	-0.009
	0.120	0.096	0.080	0.064	0.052	-0.008
	0.120	0.091	0.075	0.064	0.047	-0.017



Tabel C2. De dimensieloze gemiddelde waarden van de fluctuerende axiale vloeistofsnelheden van de 0.1 wt% Blanose oplossing, gerangschikt naar aflopend toerental (420, 360 en 300 rpm). De radiale meetpositie is de afstand van de roerdertippen. De axiale meetpositie is de afstand van de hartlijn.

Axiale meet- pos.	Radiale meetpositie					
	2 mm	14 mm	26 mm	38 mm	50 mm	62 mm
20 mm	-0.120	-0.104	-0.091	-0.063	-0.016	0.100
	-0.119	-0.100	-0.094	-0.071	-0.024	0.107
	-0.115	-0.101	-0.094	-0.079	-0.034	0.127
16 mm	-0.114	-0.096	-0.075	-0.044	0	0.110
	-0.113	-0.096	-0.085	-0.049	0	0.115
	-0.111	-0.095	-0.084	-0.055	0	0.121
12 mm	-0.087	-0.082	-0.049	-0.012	0.017	0.095
	-0.080	-0.088	-0.051	-0.019	0.014	0.098
	-0.092	-0.090	-0.060	-0.019	0.013	0.098
8 mm	-0.036	-0.041	0.008	0.021	0.020	0.065
	-0.038	-0.055	0	0.013	0.018	0.067
	-0.050	-0.064	-0.004	0.009	0.026	0.071
4 mm	-0.029	0.036	0.027	0.026	0.016	0.014
	-0.028	0.015	0.024	0.018	0.015	0.022
	-0.044	0.027	0.026	0.014	0.014	0.022
0 mm	0.046	0.020	0.004	0.002	0.004	-0.039
	0.046	0.015	0.007	0.001	0.002	-0.036
	0.045	0.016	0.003	0	0.001	-0.034
-4 mm	0.035	0.028	0.011	0	-0.012	-0.081
	0.033	0.021	0.014	0	-0.008	-0.082
	0.027	0.029	0.013	0	-0.008	-0.080
-8 mm	0.008	0.070	0.044	0.025	-0.005	-0.116
	0.012	0.069	0.036	0.018	-0.003	-0.112
	0.023	0.071	0.035	0.019	-0.005	-0.114
-12 mm	0.088	0.091	0.070	0.048	0.009	-0.119
	0.090	0.092	0.070	0.047	0.013	-0.119
	0.101	0.089	0.068	0.046	0.007	-0.116
-16 mm	0.118	0.102	0.087	0.071	0.024	-0.108
	0.121	0.099	0.082	0.064	0.028	-0.113
	0.119	0.097	0.081	0.062	0.026	-0.116
-20 mm	0.128	0.108	0.095	0.081	0.037	-0.107
	0.131	0.107	0.090	0.078	0.038	-0.108
	0.129	0.103	0.081	0.071	0.049	-0.109





Tabel C3. De dimensieloze gemiddelde waarden van de fluctuerende axiale vloeistofsnelheden van de 0.2 wt% Blanose oplossing, gerangschikt naar aflopend toerental (480, 360 en 240 rpm). De radiale meetpositie is de afstand van de roerdertippen. De axiale meetpositie is de afstand van de hartlijn.

Axiale meet- pos.	Radiale meetpositie					
	2 mm	14 mm	26 mm	38 mm	50 mm	62 mm
20 mm	-0.113	-0.098	-0.088	-0.070	-0.027	0.121
	-0.109	-0.092	-0.073	-0.057	-0.029	0.116
	-0.106	-0.088	-0.070	-0.056	-0.034	0.111
16 mm	-0.108	-0.089	-0.078	-0.048	-0.006	0.126
	-0.102	-0.082	-0.065	-0.037	-0.012	0.114
	-0.098	-0.082	-0.065	-0.046	-0.017	0.119
12 mm	-0.087	-0.082	-0.056	-0.022	0.016	0.110
	-0.093	-0.082	-0.040	-0.012	0.012	0.099
	-0.099	-0.075	-0.052	-0.019	0.007	0.103
8 mm	-0.052	-0.060	-0.008	0.012	0.022	0.075
	-0.065	-0.048	-0.010	0.020	0.025	0.061
	-0.066	-0.059	-0.007	0.014	0.016	0.074
4 mm	-0.044	0.023	0.024	0.017	0.019	0.020
	-0.025	0.031	0.028	0.013	0.006	0.008
	-0.038	0.015	0.024	0.022	0.008	0.026
0 mm	0.051	0.024	0.010	-0.001	-0.001	-0.040
	0.080	0.027	0	-0.009	-0.012	-0.053
	0.069	0.014	0.005	0.002	-0.008	-0.042
-4 mm	0.039	0.039	0.013	0	-0.009	-0.093
	0.043	0.030	0.022	0	-0.019	-0.099
	0.029	0.018	0.022	0	-0.012	-0.097
-8 mm	0.018	0.071	0.049	0.027	0	-0.120
	0.029	0.071	0.066	0.031	0	-0.128
	0.037	0.059	0.056	0.032	0	-0.122
-12 mm	0.094	0.092	0.072	0.051	0.016	-0.114
	0.100	0.093	0.081	0.052	0.011	-0.135
	0.090	0.071	0.069	0.053	0.019	-0.124
-16 mm	0.120	0.101	0.084	0.068	0.036	-0.116
	0.125	0.101	0.087	0.065	0.029	-0.138
	0.105	0.083	0.074	0.060	0.034	-0.112
-20 mm	0.131	0.107	0.088	0.078	0.051	-0.105
	0.133	0.108	0.087	0.072	0.048	-0.127
	0.115	0.091	0.075	0.063	0.051	-0.111



Tabel C4. De dimensieloze gemiddelde waarden van de fluctuerende axiale vloeistofsnelheden van de 0.25 wt% PAAm oplossing, gerangschikt naar aflopend toerental (660, 480 en 300 rpm). De radiale meetpositie is de afstand van de roerdertippen. De axiale meetpositie is de afstand van de hartlijn.

Axiale meet- pos.	Radiale meetpositie					
	2 mm	14 mm	26 mm	38 mm	50 mm	62 mm
20 mm	-0.114	-0.096	0.087	-0.059	-0.017	0.147
	-0.110	-0.096	0.089	-0.069	-0.027	0.138
	-0.110	-0.092	0.091	-0.079	-0.026	0.139
16 mm	-0.111	-0.088	-0.075	-0.038	0.005	0.147
	-0.108	-0.088	-0.081	-0.051	0.001	0.143
	-0.105	-0.086	-0.087	-0.064	0.001	0.140
12 mm	-0.093	-0.077	-0.050	-0.011	0.027	0.138
	-0.087	-0.079	-0.055	-0.007	0.024	0.133
	-0.086	-0.081	-0.068	-0.025	0.015	0.127
8 mm	-0.074	-0.043	-0.008	0.010	0.031	0.109
	-0.075	-0.044	-0.005	0.019	0.030	0.102
	-0.068	-0.048	-0.019	0.006	0.024	0.099
4 mm	-0.023	0.014	0.023	0.014	0.014	0.051
	-0.018	0.014	0.029	0.024	0.022	0.029
	-0.020	0.016	0.028	0.023	0.010	0.027
0 mm	0.027	0.027	0.008	0.002	-0.006	-0.031
	0.025	0.023	0.016	0	-0.002	-0.036
	0.042	0.028	0.014	0.007	0.005	-0.040
-4 mm	0.067	0.034	0.016	0.002	-0.019	-0.090
	0.046	0.029	0.013	0.005	-0.012	-0.103
	0.034	0.025	0.021	0.004	-0.009	-0.094
-8 mm	0.065	0.064	0.050	0.027	-0.011	-0.141
	0.044	0.062	0.052	0.024	0	-0.135
	0.030	0.054	0.054	0.031	-0.005	-0.122
-12 mm	0.095	0.080	0.074	0.051	0.013	-0.162
	0.089	0.081	0.080	0.057	0.013	-0.148
	0.095	0.078	0.074	0.053	0.013	-0.137
-16 mm	0.115	0.083	0.087	0.071	0.026	-0.150
	0.114	0.095	0.088	0.073	0.031	-0.143
	0.115	0.094	0.079	0.063	0.037	-0.133
-20 mm	0.124	0.105	0.094	0.078	0.030	-0.146
	0.124	0.104	0.093	0.081	0.041	-0.137
	0.121	0.098	0.085	0.071	0.048	-0.122





Tabel D1. De dimensieloze RMS-waarden van de fluctuerende axiale vloeistofsnelheden van glycerol, gerangschikt naar aflopend toerental van de roerder (480, 360 en 240 rpm). De radiale meetpositie is de afstand van de roerdertippen. De axiale meetpositie is de afstand van de hartlijn.

Axiale meet- pos.	Radiale meetpositie					
	2 mm	14 mm	26 mm	38 mm	50 mm	59 mm
20 mm	0.045	0.044	0.070	0.064	0.103	0.125
	0.043	0.048	0.061	0.067	0.109	0.120
	0.039	0.044	0.078	0.063	0.105	0.115
16 mm	0.065	0.071	0.138	0.160	0.152	0.143
	0.060	0.067	0.142	0.159	0.156	0.139
	0.051	0.065	0.118	0.160	0.153	0.136
12 mm	0.140	0.142	0.187	0.191	0.169	0.151
	0.130	0.129	0.204	0.197	0.169	0.151
	0.109	0.119	0.179	0.199	0.170	0.145
8 mm	0.260	0.269	0.250	0.207	0.176	0.153
	0.255	0.267	0.246	0.207	0.174	0.153
	0.217	0.259	0.241	0.199	0.168	0.143
4 mm	0.288	0.286	0.252	0.209	0.176	0.155
	0.276	0.286	0.250	0.206	0.174	0.153
	0.280	0.284	0.271	0.224	0.173	0.146
0 mm	0.210	0.265	0.242	0.203	0.170	0.150
	0.209	0.273	0.249	0.205	0.172	0.150
	0.220	0.274	0.264	0.206	0.166	0.143
-4 mm	0.320	0.274	0.234	0.196	0.165	0.147
	0.324	0.289	0.249	0.203	0.170	0.150
	0.311	0.293	0.247	0.199	0.163	0.143
-8 mm	0.214	0.174	0.184	0.166	0.146	0.134
	0.215	0.172	0.189	0.167	0.155	0.134
	0.211	0.163	0.200	0.173	0.145	0.129
-12 mm	0.085	0.066	0.093	0.110	0.115	0.119
	0.082	0.064	0.095	0.113	0.117	0.109
	0.075	0.061	0.095	0.118	0.109	0.107
-16 mm	0.061	0.049	0.066	0.085	0.100	0.103
	0.058	0.050	0.066	0.092	0.101	0.102
	0.055	0.048	0.065	0.085	0.099	0.094
-20 mm	0.047	0.043	0.046	0.059	0.067	0.087
	0.045	0.043	0.049	0.064	0.082	0.086
	0.042	0.041	0.050	0.060	0.073	0.076



Tabel D2. De dimensieloze RMS-waarden van de fluctuerende axiale vloeistofsnelheden van de 0.1 wt% Blanose oplossing, gerangschikt naar aflopend toerental van de roerder (420, 360 en 300 rpm). De radiale meetpositie is de afstand van de roerdertippen. De axiale meetpositie is de afstand van de hartlijn.

Axiale meet- pos.	Radiale meetpositie					
	2 mm	14 mm	26 mm	38 mm	50 mm	62 mm
20 mm	0.046	0.044	0.056	0.081	0.098	0.109
	0.048	0.041	0.055	0.075	0.091	0.106
	0.048	0.041	0.049	0.072	0.090	0.104
16 mm	0.072	0.057	0.095	0.115	0.124	0.117
	0.071	0.054	0.087	0.112	0.124	0.108
	0.070	0.048	0.079	0.103	0.115	0.112
12 mm	0.182	0.131	0.166	0.161	0.141	0.117
	0.174	0.118	0.155	0.150	0.136	0.112
	0.155	0.095	0.141	0.153	0.141	0.113
8 mm	0.301	0.252	0.221	0.184	0.149	0.119
	0.286	0.225	0.215	0.179	0.150	0.116
	0.271	0.208	0.210	0.179	0.152	0.117
4 mm	0.281	0.265	0.226	0.186	0.152	0.117
	0.270	0.265	0.224	0.185	0.155	0.117
	0.262	0.254	0.221	0.190	0.150	0.115
0 mm	0.201	0.234	0.225	0.183	0.153	0.115
	0.195	0.237	0.227	0.188	0.153	0.113
	0.170	0.249	0.234	0.190	0.157	0.114
-4 mm	0.307	0.266	0.217	0.178	0.145	0.112
	0.306	0.269	0.224	0.179	0.146	0.109
	0.309	0.274	0.232	0.181	0.145	0.107
-8 mm	0.277	0.168	0.167	0.149	0.132	0.110
	0.265	0.165	0.171	0.153	0.132	0.108
	0.250	0.157	0.172	0.153	0.131	0.106
-12 mm	0.150	0.075	0.098	0.108	0.108	0.105
	0.137	0.070	0.097	0.104	0.107	0.103
	0.123	0.069	0.089	0.107	0.109	0.102
-16 mm	0.068	0.044	0.051	0.068	0.081	0.095
	0.066	0.042	0.055	0.068	0.080	0.093
	0.066	0.044	0.048	0.069	0.081	0.094
-20 mm	0.046	0.047	0.039	0.045	0.061	0.082
	0.046	0.038	0.040	0.046	0.057	0.081
	0.046	0.040	0.040	0.047	0.064	0.082





Tabel D3. De dimensieloze RMS-waarden van de fluctuerende axiale vloeistofsnelheden van de 0.2 wt% Blanose oplossing, gerangschikt naar aflopend toerental van de roerder (480, 360 en 240 rpm). De radiale meetpositie is de afstand van de roerdertippen. De axiale meetpositie is de afstand van de hartlijn.

Axiale meet- pos.	Radiale meetpositie					
	2 mm	14 mm	26 mm	38 mm	50 mm	62 mm
20 mm	0.043	0.034	0.038	0.055	0.076	0.102
	0.040	0.034	0.044	0.061	0.083	0.098
	0.035	0.030	0.034	0.043	0.068	0.085
16 mm	0.065	0.041	0.059	0.092	0.103	0.107
	0.060	0.043	0.064	0.090	0.101	0.102
	0.051	0.036	0.046	0.067	0.078	0.092
12 mm	0.148	0.077	0.128	0.132	0.127	0.108
	0.112	0.077	0.126	0.131	0.124	0.103
	0.095	0.065	0.079	0.098	0.104	0.092
8 mm	0.250	0.189	0.189	0.166	0.138	0.111
	0.199	0.175	0.194	0.161	0.139	0.103
	0.180	0.156	0.145	0.137	0.122	0.097
4 mm	0.236	0.230	0.218	0.179	0.147	0.109
	0.182	0.225	0.237	0.192	0.153	0.111
	0.165	0.180	0.194	0.177	0.143	0.104
0 mm	0.165	0.235	0.233	0.188	0.148	0.108
	0.169	0.231	0.274	0.208	0.157	0.111
	0.161	0.251	0.249	0.205	0.152	0.109
-4 mm	0.288	0.261	0.228	0.176	0.138	0.105
	0.338	0.274	0.235	0.191	0.149	0.102
	0.297	0.253	0.222	0.178	0.139	0.098
-8 mm	0.248	0.142	0.154	0.137	0.119	0.101
	0.241	0.132	0.134	0.136	0.125	0.103
	0.210	0.119	0.122	0.123	0.109	0.094
-12 mm	0.125	0.059	0.070	0.086	0.092	0.096
	0.116	0.059	0.060	0.086	0.099	0.099
	0.104	0.055	0.052	0.061	0.076	0.085
-16 mm	0.063	0.038	0.040	0.051	0.067	0.088
	0.060	0.038	0.036	0.050	0.067	0.085
	0.056	0.036	0.033	0.039	0.051	0.075
-20 mm	0.041	0.033	0.033	0.038	0.051	0.074
	0.039	0.035	0.034	0.039	0.057	0.077
	0.036	0.033	0.032	0.033	0.046	0.064

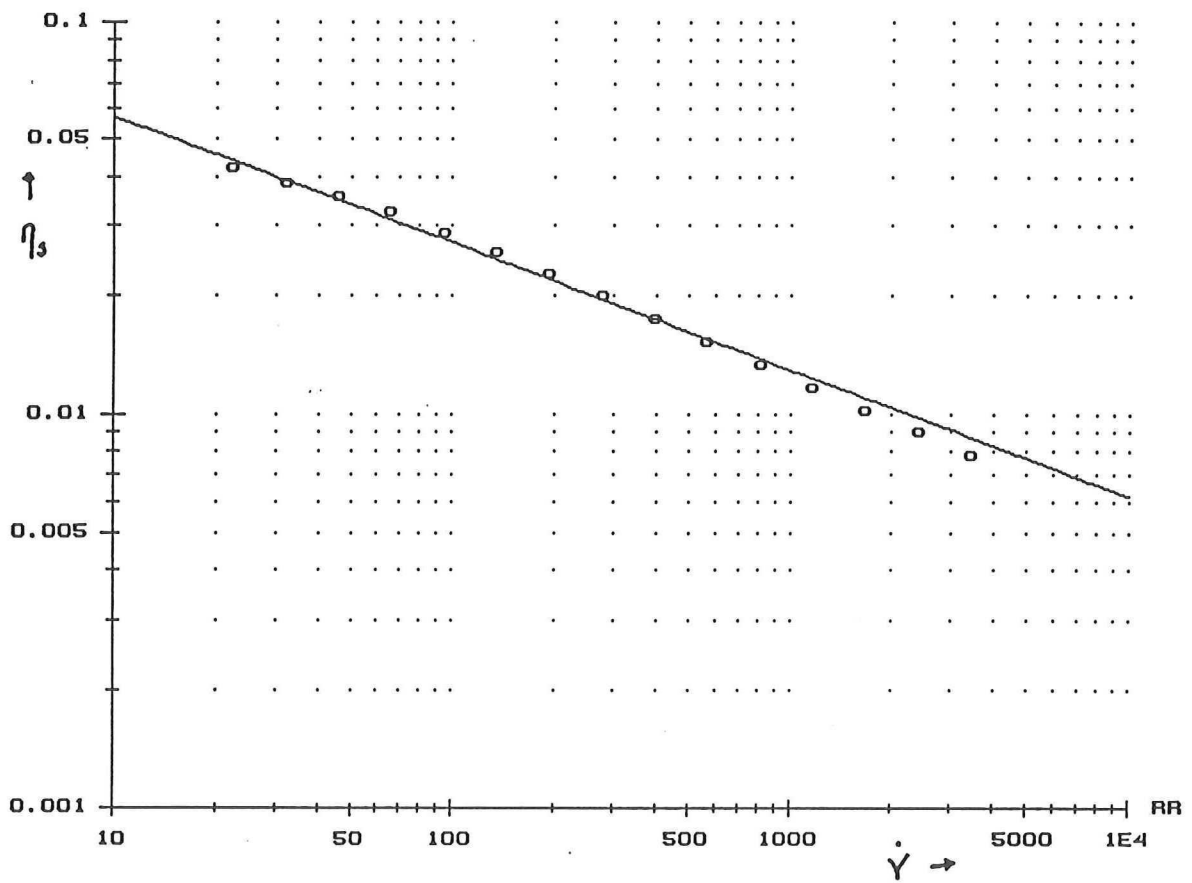


Tabel D4. De dimensieloze RMS-waarden van de fluctuerende axiale vloeistofsnelheden van de 0.25 wt% PAAm oplossing, gerangschikt naar aflopend toerental van de roerder (660, 480 en 300 rpm). De radiale meetpositie is de afstand van de roerdertippen. De axiale meetpositie is de afstand van de hartlijn.

Axiale meet- pos.	Radiale meetpositie					
	2 mm	14 mm	26 mm	38 mm	50 mm	62 mm
20 mm	0.045	0.043	0.053	0.079	0.102	0.119
	0.046	0.044	0.048	0.073	0.092	0.124
	0.048	0.043	0.050	0.069	0.095	0.121
16 mm	0.061	0.049	0.074	0.110	0.118	0.119
	0.063	0.048	0.064	0.096	0.121	0.124
	0.060	0.048	0.062	0.097	0.121	0.121
12 mm	0.135	0.085	0.115	0.130	0.135	0.121
	0.129	0.085	0.115	0.140	0.135	0.125
	0.115	0.079	0.108	0.139	0.137	0.123
8 mm	0.212	0.149	0.143	0.134	0.126	0.116
	0.227	0.169	0.160	0.150	0.136	0.116
	0.235	0.167	0.163	0.155	0.148	0.124
4 mm	0.219	0.198	0.175	0.148	0.125	0.122
	0.250	0.211	0.187	0.165	0.140	0.122
	0.267	0.218	0.190	0.172	0.150	0.129
0 mm	0.179	0.175	0.175	0.149	0.126	0.118
	0.179	0.184	0.185	0.163	0.138	0.119
	0.162	0.192	0.198	0.174	0.151	0.135
-4 mm	0.223	0.175	0.154	0.138	0.123	0.110
	0.255	0.190	0.169	0.149	0.133	0.111
	0.277	0.217	0.177	0.141	0.145	0.121
-8 mm	0.219	0.121	0.109	0.114	0.115	0.102
	0.229	0.131	0.118	0.126	0.119	0.108
	0.227	0.139	0.116	0.127	0.129	0.111
-12 mm	0.106	0.058	0.064	0.077	0.095	0.102
	0.112	0.062	0.068	0.085	0.102	0.103
	0.105	0.066	0.069	0.090	0.105	0.107
-16 mm	0.063	0.039	0.046	0.060	0.070	0.100
	0.062	0.046	0.048	0.060	0.076	0.101
	0.061	0.046	0.049	0.068	0.085	0.101
-20 mm	0.048	0.043	0.041	0.045	0.058	0.088
	0.048	0.044	0.043	0.045	0.059	0.094
	0.047	0.044	0.042	0.052	0.067	0.094







Rheogram van de 0.2 wt% Blonose oplossing.

