

Onderzoek naar rheologisch analoge vloeistoffen voor bloed

Citation for published version (APA):

Schaap, P. (1992). *Onderzoek naar rheologisch analoge vloeistoffen voor bloed*. (DCT rapporten; Vol. 1992.027). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1992

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

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

[Link to publication](#)

General rights

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

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

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

www.tue.nl/taverne

Take down policy

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

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Onderzoek naar rheologisch analoge
vloeistoffen voor bloed.

door : P. Schaap

rapportnummer : WFW 92.027

Begeleiders:
Dr. Ir. G.W.M Peters
Ir. J.P.W. Baayens

Samenvatting

In dit rapport wordt een studie gepresenteerd naar vloeistoffen die het rheologische gedrag van bloed simuleren. De studie bestond uit een literatuur studie, waaruit een aantal voorstellen voor vloeistoffen naar voren kwam. Deze vloeistoffen werden aan de hand van de in de literatuur vermelde gegevens vergeleken.

Vervolgens werden drie vloeistoffen nageemaakt, te weten een Polyacrylamide mengsel, een oplossing van Xanthan gum en een oplossing van Alphanol Echtmarineblau, en de rheologische eigenschappen werden gemeten. De metingen van de stationaire viscositeit wekten het vermoeden dat het mogelijk is om de vloeistoffen na te maken, maar dynamische metingen moeten nog verricht worden.

Om een vloeistof te vinden die dezelfde rheologische eigenschappen heeft als bloed moet nog verder onderzoek gedaan worden. Het bereiden van de vloeistoffen moet met grotere nauwkeurigheid gebeuren en van de bereide vloeistoffen moeten de viscoëlastische eigenschappen gemeten worden in dynamische metingen. Daarnaast moet aandacht geschonken worden aan het thixotropische gedrag van de vloeistoffen en aan hun toepasbaarheid in Laser-Doppler snelheids metingen.

Inhoud

1	Inleiding	2
2	Rheologische eigenschappen van menselijk bloed	3
2.1	Inleiding	3
2.2	Samenstelling van menselijk bloed	3
2.3	Niet-Newtonse eigenschappen van bloed	4
2.3.1	Stationaire stroming	4
2.3.2	Oscillerende stroming	4
2.3.3	Overshoot	6
2.3.4	Thixotropie	6
3	Bloed analoge vloeistoffen	7
3.1	Inleiding	7
3.2	Eén-fase systemen	7
3.2.1	Polyacrylamide mengsel	7
3.2.2	Xanthan gum	8
3.2.3	Milling Yellow kleurstof	9
3.3	Twee-fasen systemen	9
3.3.1	Polystyrene microbolletjes	9
3.3.2	Xanthan gum gel	11
3.3.3	Biconcave schijfjes	15
3.4	Vergelijking tussen de verschillende bloed analoge vloeistoffen	16
4	De experimenten	18
4.1	Het maken van de vloeistoffen	18
4.1.1	Inleiding	18
4.1.2	Polyacrylamide	18
4.1.3	Xanthan Gum	18
4.1.4	Milling Yellow Kleurstof	19
4.1.5	Polystyrene microbolletjes	19
4.1.6	Andere bloed analoge vloeistoffen	20
4.2	De meetresultaten	20
4.2.1	Inleiding	20
4.2.2	Polyacrylamide	20
4.2.3	Xanthan gum	22
4.2.4	Milling Yellow Kleurstof	22

5 Conclusies en aanbevelingen

28

A Adressen

32

Hoofdstuk 1

Inleiding

Menselijk bloed vertoont niet-Newtons gedrag, het is namelijk shear-thinning. Bij afschuifsnelheden, in stationaire stroming, in de orde van grote van 1000 s^{-1} gedraagt bloed zich nagenoeg Newtons en heeft de viscositeit een waarde van $3\text{-}4 \text{ N s/m}^2$ [11,15]. Bij lagere afschuifsnelheden neemt de viscositeit toe, en is daarom shear-thinning.

Bij het schatten van gemiddelde waarden voor de afschuifsnelheden in de lichaamscirculatie, aan de hand van een verondersteld Poiseuille profiel, vindt men dat de afschuifsnelheden in het algemeen in de orde van grootte van 1000 s^{-1} zijn [15], zodat het niet onredelijk zou zijn om aan te nemen dat bloed zich Newtons gedraagt.

Echter, niet in alle situaties is deze aanname geldig. In vertakkingen en bochten kunnen terugstroming en secundaire stroming optreden, waarbij de afschuifsnelheden in het bloedvat nogal kunnen variëren en er zowel hoge als lage afschuifsnelheden optreden. Juist deze bochten en vertakkingen zijn het doel van veel onderzoek, en daarom is het noodzakelijk om het niet-Newtonse gedrag van bloed in onderzoek naar stroming in bloedvaten te betrekken.

Behalve in stationaire stroming vertoont bloed ook in oscillerende stroming niet-Newtons gedrag. Bloed is een viscoëlastische vloeistof en de verlies- en opslag modulus hangen van de amplitude en frequentie van de afschuifsnelheid af. De stroming van bloed door de bloedvaten is oscillerend, zodat de viscoëlastische eigenschappen van bloed ook in het onderzoek betrokken moeten worden.

Om de stromingsverschijnselen in de lichaamscirculatie experimenteel te onderzoeken is het gewenst om over een vloeistof te beschikken die dezelfde rheologische eigenschappen vertoont als bloed. Het is om verschillende redenen namelijk niet altijd mogelijk om bloed toe te passen in experimenten : op de eerste plaats omdat menselijk bloed niet in grote hoeveelheden te verkrijgen is, ten tweede omdat snelheden van bloed niet met laser-Doppler anemometrie te bepalen zijn en ten derde omdat bloed ziektes over kan brengen.

Verskillende onderzoekers hebben voorstellen gedaan voor een vloeistof die in experimenten gebruikt kunnen worden en de rheologische eigenschappen van bloed zoveel mogelijk benaderen. In dit rapport wordt een studie gepresenteerd die tot doel had om een overzicht van de verschillende in de literatuur voorkomende bloed analoge vloeistoffen te geven. Om inzicht te krijgen in de reproduceerbaarheid van de bloed analoge vloeistoffen zijn tevens tests uitgevoerd, waarvan de resultaten tevens in dit rapport weergegeven zijn.

Hoofdstuk 2

Rheologische eigenschappen van menselijk bloed

2.1 Inleiding

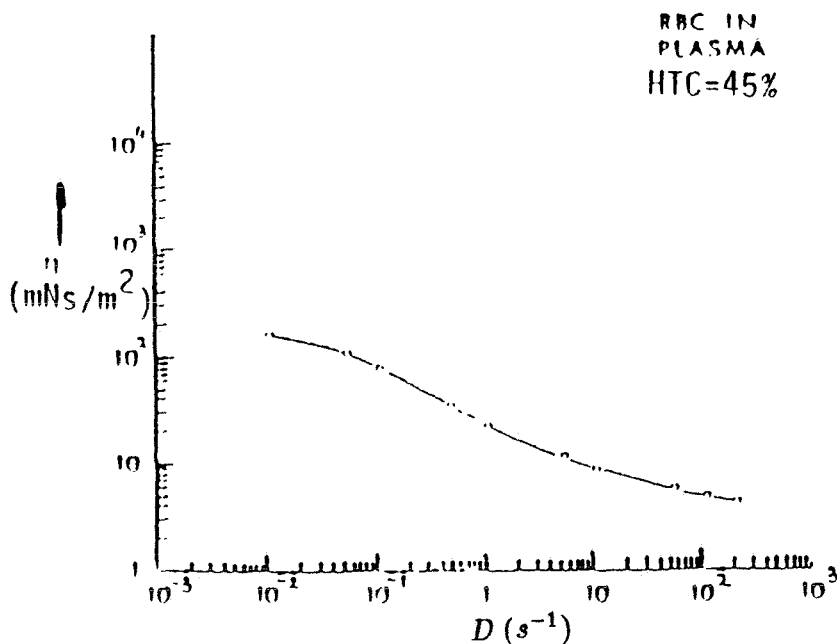
In dit hoofdstuk wordt een beknopte beschrijving gegeven van de rheologische eigenschappen van menselijk bloed, om zo een idee te krijgen welke factoren een rol spelen bij de rheologie van bloed en welke factoren van belang zijn als een vloeistof met analoge eigenschappen gemaakt moet worden.

Eerst zal de samenstelling van bloed worden beschreven, daarna de viscoëlastische eigenschappen, in relatie met de samenstelling van het bloed. Zowel de eigenschappen in stationaire als in oscillerende stroming worden beknopt besproken. Meer gedetailleerde informatie is te vinden in referenties [15, 16, 17 en 18].

2.2 Samenstelling van menselijk bloed

Bloed bestaat uit plasma met daarin opgelost bloedcellen en vloeistof deeltjes. Het plasma is een Newtonse vloeistof met een viscositeit van $1.2 \cdot 10^3 \text{ N s/m}^2$. De vloeistofdeeltjes, chylomicrons, zijn van belang voor het vettransport en hebben door hun lage concentratie geen invloed op de viscositeit van bloed.

Van groot belang voor de rheologische eigenschappen zijn de bloedcellen. De witte bloedcellen hebben als functie het opruimen van infecties, maar doordat ze in lage concentratie voorkomen ($\leq 1\%$) spelen ze geen rol van belang in de viscositeit van het bloed. De rode bloedcellen spelen een grote rol in de rheologische eigenschappen van bloed en komen in een concentratie van ongeveer 45 % voor. De concentratie rode bloedcellen wordt ook wel hematocriet genoemd. Ze hebben als functie het transporteren van zuurstof. Rode bloedcellen zijn in onvervormde toestand biconcave schijfjes van ongeveer $8 \mu\text{m}$ doorsnede en $2\text{-}3 \mu\text{m}$ dikte en bestaan uit een membraan met daarin vloeistof. De rode bloedcellen zijn vervormbaar, onder hoge schuifspanningen worden ze langgerekt. Een ander belangrijk fenomeen is het aggregeren van de cellen, ook wel rouleaux-vorming genoemd. Dit treedt op bij afschuifsnelheden lager dan 50 s^{-1} .



Figuur 2.1: Viscositeit van menselijk bloed (uit [16])

2.3 Niet-Newtonse eigenschappen van bloed

2.3.1 Stationaire stroming

In stationaire stroming wordt de viscositeit gegeven door de relatie,

$$\eta = \tau/D$$

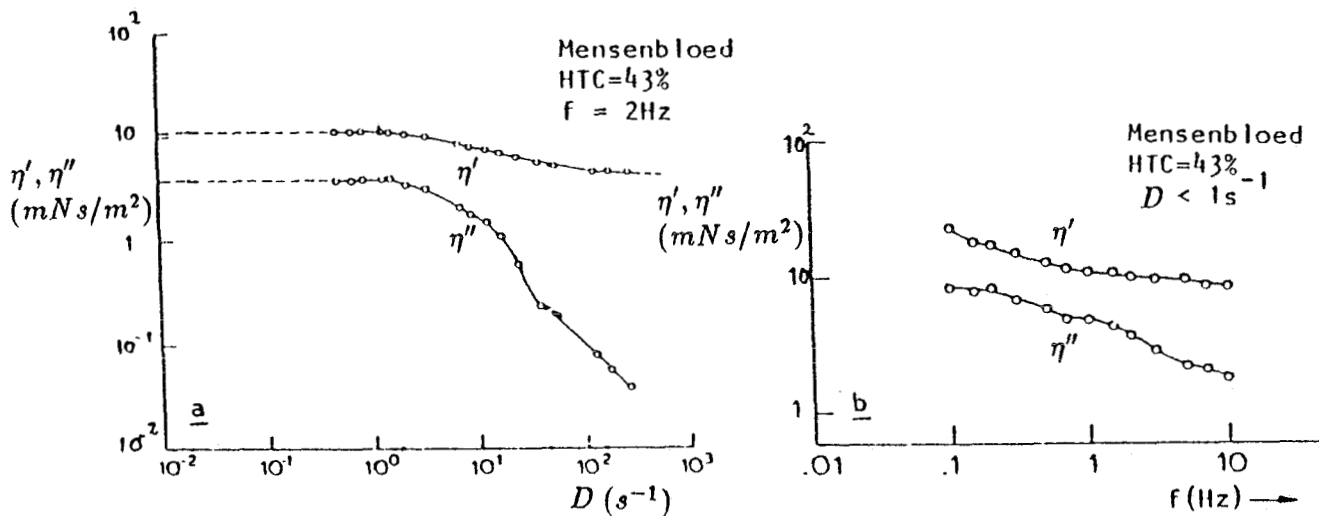
waarin η de viscositeit, τ de schuifspanning, en D de afschuifsnelheid is. Eigenlijk is het beter om van schijnbare viscositeit te spreken, omdat de viscositeit afhangt van de afschuifsnelheid.

Het verloop van de schuifspanning τ en de viscositeit η als functie van de afschuifsnelheid D in stationaire stroming staat weergegeven in figuur 2.1. Bij afschuifsnelheden in de orde van grote van 1000 s^{-1} gedraagt bloed zich nagenoeg Newtons met een waarde voor de viscositeit van $3 - 4 \text{ N s/m}^2$. Bij lagere afschuifsnelheden vertoont bloed duidelijk niet-Newtonse eigenschappen. De viscositeit loopt op als de afschuifsnelheid afneemt. Dit hangt samen met het gedrag van de rode bloedcellen. Als voorkomen wordt dat de cellen aggregeren, dan is de viscositeit bij lage afschuifsnelheden een factor 10 lager. Als voorkomen wordt dat de cellen bij hoge afschuifsnelheden vervormen, dan is de viscositeit een factor 10 hoger. Daaruit mag men concluderen dat de aggregatie en de vervormbaarheid van de cellen een grote rol spelen in de viscositeit van bloed. In figuur 2.1 is te zien dat bloed shear-thinning is.

2.3.2 Oscillerende stroming

Uitgaande van lineaire theorie kunnen viscoëlastische eigenschappen in oscillerende stroming door twee parameters beschreven worden, de verlies- en opslag modulus, η' en η'' respectievelijk. Deze twee parameters volgen uit de relatie

$$\eta^* = \tau^*/D^*$$



Figuur 2.2: Visceuse- en elastische component van de complexe viscositeit, a. als functie van de afschuifsneldheid en b. als functie van de frequentie (uit [16])

waarin $\tau^* = \tau * \sin(2\pi ft)$ en $D^* = D * \sin(2\pi ft)$, dat zijn een harmonische excitatie en de harmonische respons. Daaruit volgt dat η^* gezien kan worden als een overdrachtsfunctie tussen schuifspanning en afschuifsneldheid, in oscillerende stroming. De overdrachtsfunctie bestaat uit een reëel en imaginair deel, η' en η'' , dus

$$\eta^* = \eta' + j\eta''$$

In de rheologie is de complexe viscositeit gedefinieerd als functie van de frequentie bij voldoende kleine vervormingen. Het is een maat voor lineair viscoëlastisch gedrag. Het is opvallend dat in de literatuur over bloed of bloed rheologisch analoge vloeistoffen voortdurend de complexe viscositeit als functie van de afschuifsneldheid wordt gegeven, i.p.v. als functie van de frequentie. De reden hiervoor is onduidelijk. Het is alleen zinvol om de afschuifsneldheidsafhankelijkheid te bekijken om te beoordelen of er nog sprake is van lineaire theorie, d.w.z. dat de complexe viscositeit niet afhankelijk is van de afschuifsneldheid.

De frequentie- en afschuifsneldheids afhankelijkheid van η' en η'' staan weergegeven in figuur 2.2a en 2.2b. Figuur 2.2a laat zien dat in een oscillerende stroming bij een frequentie van 2 Hz voor amplituden van de afschuifsneldheid kleiner dan 10 s^{-1} bloed zich lineair gedraagt, zoals al eerder opgemerkt. De frequentie afhankelijkheid van de eigenschappen kan verklaard worden uit de aggregatie van de rode bloed cellen. Bij lage frequenties zijn grote rouleaux aanwezig, terwijl bij oplopende frequentie de rouleaux kleiner worden. De rouleaux zorgen voor elasticiteit van het bloed. In figuur 2.2b is te zien dat voor oplopende frequentie η'' afneemt. Slechts twee metingen van de complexe viscositeit werden gevonden, nl. van Thurston [18] en Liepsch e.a. [14]. De metingen van Thurston zijn het meest compleet: zij werden gedaan voor frequenties tussen 1 en 10 Hz . Liepsch presenteerde ook enkele metingen voor frequenties tussen 0.01 en 10 Hz ; deze gemeten waarden sluiten echter niet aan op die van Thurston, zij zijn een factor tien hoger. Zoals ook al opgemerkt door Caro e.a. [16] worden voor de viscositeit van bloed door verschillende onderzoekers variërende meetresultaten gevonden.

2.3.3 Overshoot

Een derde eigenschap is het optreden van 'overshoot' in de spanningsgroei na een stap in afschuifsnelheid, voor stappen van 0 naar $D \geq 0.55$ (Zie b.v. McMillan e.a. [1987]). In deze studie werd dit gedrag niet nader beschouwd.

2.3.4 Thixotropie

Onder thixotropie wordt het tijdsafhankelijke gedrag van bloed verstaan, dat samenhangt met de verandering van aggregatietoestand. Dit effect blijkt onder andere uit het optreden van hysteresis in de schuifspanning bij een afschuifsnelheidsgeschiedenis die bestaat uit een eerst lineair met de tijd toenemende afschuifsnelheid en dan weer (even snel) afnemende afschuifsnelheid. Dit verschijnsel is in deze studie niet nader beschouwd.

Hoofdstuk 3

Bloed analoge vloeistoffen

3.1 Inleiding

Door verschillende onderzoekers worden in de literatuur rheologisch analoge vloeistoffen voor bloed voorgesteld. In dit hoofdstuk worden de verschillende vloeistoffen besproken en een vergelijking tussen de vloeistoffen gemaakt. Bij de bespreking van de vloeistoffen zal onderscheid gemaakt worden tussen één-fase en twee-fasen systemen. Een één-fase systeem is een vloeistof die uit één fase bestaat, dus alleen vloeistof is, een twee fasen systeem is een vloeistof met daarin vaste deeltjes opgelost, zoals een suspensie. Bij één-fase systemen wordt in eerste instantie niet uitgegaan van de structuur van bloed, maar probeert men de macroscopische rheologische eigenschappen van bloed na te bootsen. Bloed is een suspensie van verschillende soorten deeltjes die opgelost zijn in plasma. Verreweg de belangrijkste daarvan zijn de rode bloedcellen. Bloed kan worden beschouwd als een Newtonse vloeistof met daarin opgelost flexibele a-symetrische deeltjes [15]. Bij een twee-fasen systeem wordt gepoogd de microstructuur van bloed te benaderen, en zo de rheologische eigenschappen.

3.2 Eén-fase systemen

3.2.1 Polyacrylamide mengsel

Samenstelling

Liepsch [1,2] beschrijft een bloed analoge vloeistof, met als samenstelling : 0.05 % Separan AP30 : 0.04 % AP45 (Hoechst, DOW Chemical) in verhouding 3:1. Daaraan wordt 0.01 % $MgCl_2$ toegevoegd. Om de viscositeit van de oplossing enige dagen te stabiliseren, wordt 4 % Isopropanol toegevoegd.

Vloeistoffen met Separan worden in verschillende samenstellingen in onderzoek toegepast. Ku [4] en Liepsch [1] gebruiken als vloeistof 0.0375 % AP30, 0.01 % $MgCl_2$ en 4 % Isopropanol, vermengd met een waterige glycerine oplossing in verhouding 3:7. De glycerine wordt toegevoegd om een goede brekingsindex te verkrijgen voor laser anemometrie, maar het verhoogt de viscositeit van de vloeistof.

In referenties [1, 3 en 5] wordt een vloeistof vermeld waarin geen AP45 gebruikt wordt. De verliesmodulus is in dit geval ongeveer 5 maal hoger dan die van menselijk bloed, terwijl bij afschuifsnelheden boven $50 s^{-1}$ de afwijkingen veel groter worden.

In referentie [6] wordt AP30 toegevoegd aan een waterige oplossing van sodium-thiocyanaat. De viscositeit van de oplossing neemt af met toenemende afschuifsnelheden, maar met een exponent van 0.08, hetgeen de helft is van de exponent van bloed. Dit is mogelijk een gevolg van de hoge concentratie sodium-thiocyanaat nodig om een goede brekingsindex te verkrijgen.

Thurston [8] gebruikt een oplossing van 300 ppm Flopaam 2000 (Pfizer Inc.), een polyacrylamide, in gedistilleerd water.

Eigenschappen

De eigenschappen die hieronder besproken worden zijn van het polyacrylamide mengsel beschreven door Liepsch in referentie [1].

De viscositeit van het polyacrylamide mengsel, als functie van de afschuifsnelheid staat weergegeven in figuur 3.3. In de figuur is te zien dat de viscositeit voor waarden van de afschuifsnelheid tussen 1 en 100 ongeveer 2 maal hoger is dan die van bloed. De helling van de curve komt wel overeen met die van bloed.

De visceuze component (η') van de afschuifsnelheid staat weergegeven in figuur 3.5. Deze component is voor het polyacrylamide mengsel ongeveer 2 maal zo groot als bij bloed.

De elastische component (η'') van de complexe viscositeit staat weergegeven in figuur 3.6. Het verloop van η'' als functie van de afschuifsnelheid van het polyacrylamide mengsel blijkt van dat van bloed aanzienlijk te verschillen. De elastische component is hoger dan bij bloed, variërend van 2 tot 3 maal zo hoog bij $D = 2 \text{ s}^{-1}$ tot gelijke waarden bij $D = 20 \text{ s}^{-1}$. Het verloop van de curve is veel stijler dan die van bloed.

3.2.2 Xanthan gum

Samenstelling

Xanthan gum is een natuurlijke polysacharide met een groot moleculair gewicht, gemaakt door het Xanthomas compestris organisme. De vloeistof beschreven door Thurston [8] wordt gemaakt m.b.v. Flocon Biopolymer 4800P (Pfizer Inc. Oil field productgroup, Chemicals division, Pfizer Inc., New York, NY 10017 USA). Deze vloeistof wordt ook gebruikt door Mann e.a. [11]. Deze voegen tevens 0.0375 wt % $NaCl$ aan de oplossing toe. Het zout werd toegevoegd voor gebruik van een electromagnetische flowmeter, echter slechts op kleine schaal om de niet verder uitgelegde invloed op de rheologische eigenschappen te beperken. Thurston gebruikt een oplossing van 500 ppm Flocom in gedistilleerd water. In figuren 3, 5 en 6 zijn de visceuze en viscoëlastische eigenschappen van deze vloeistof weergegeven.

Eigenschappen

De hieronder besproken eigenschappen van de Xanthan gum hebben betrekking op de vloeistof beschreven door Thurston [8].

In figuur 3.3 staat de viscositeit van de Xanthan gum oplossing als functie van de afschuifsnelheid weergegeven. Voor waarden van de afschuifsnelheid lager dan 1 s^{-1} is de viscositeit lager dan die van bloed, voor hogere waarden is de viscositeit ongeveer gelijk (variërend tussen 1 en 1.5 maal zo groot).

De visceuze component van de complexe viscositeit staat weergegeven in figuur 3.5. Uit de figuur blijkt dat de visceuze component goed overeenkomt met die van bloed.

De elastische component van de complexe viscositeit als functie van de afschuifsnelheid in oscillerende stroming staat weergegeven in figuur 3.6. De elasticiteit van het Xanthan gum mengsel blijkt hoger te zijn dan die van bloed. De curves komen overeen, maar het lijkt erop dat de curve behorend bij de Xanthan gum ongeveer een factor twee van de afschuifsnelheid verschoven is ten opzichte van de curve behorend bij bloed.

3.2.3 Milling Yellow kleurstof

Samenstelling

Deze vloeistof is samengesteld uit 0.26 % Milling Yellow (Hoechst), 0.56 % Na_2SO_4 en 0.13 % $NaCl$ [9].

Eigenschappen

De afschuifspanning als functie van de afschuifsnelheid in stationaire stroming staat weergegeven in figuur 3.4. Uit deze figuur blijkt dat de viscositeit van de kleurstof oplossing hoger is dan die van bloed. Hoeveel hoger is niet eenvoudig uit te maken omdat de schalen links en rechts van de figuur anders ingedeeld zijn.

Zowel Rankin [10] als Schmitz e.a. [9] hebben geen metingen gedaan aan de complexe viscositeit.

3.3 Twee-fasen systemen

3.3.1 Polystyrene microbolletjes

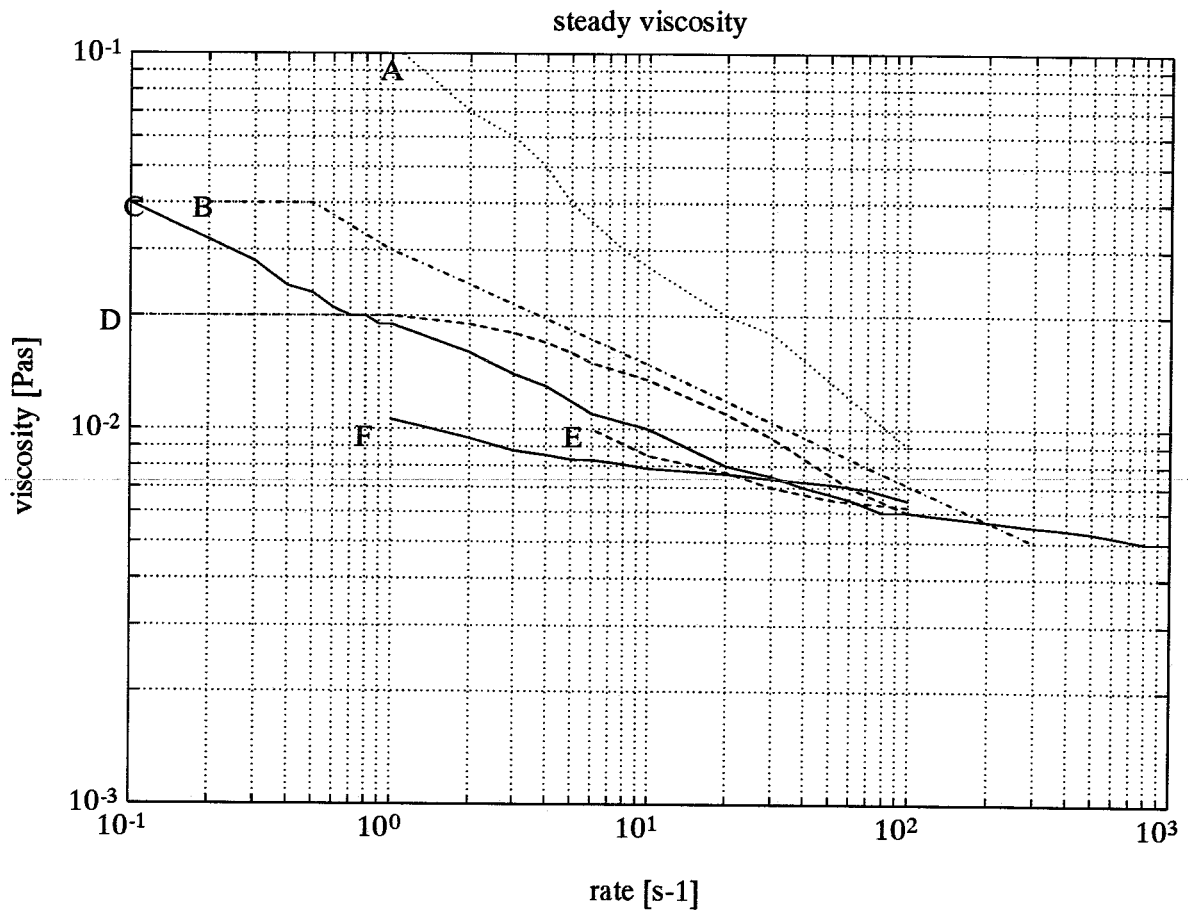
Samenstelling

Fukada e.a. [7] schreven een voorlopig rapport waarin een bloed analoge vloeistof werd beschreven, waarbij gepoogd werd om met een waterige oplossing van Dextran het bloedplasma na te bootsen, terwijl polystyrene microbolletjes het gedrag van de rode bloedcellen moesten benaderen. Daarbij moet echter opgemerkt worden dat polystyrene bolletjes niet deformeerbaar zijn i.t.t. rode bloedcellen.

De beschreven vloeistof is een suspensie van polystyrene bolletjes met een diameter van 1 μm in een waterige oplossing van Dextran, met daaraan toegevoegd $CaCl_2$ om met de calciumionen de elektrische lading op de bolletjes te regelen, en daarmee de mate van aggregatie van de bolletjes.

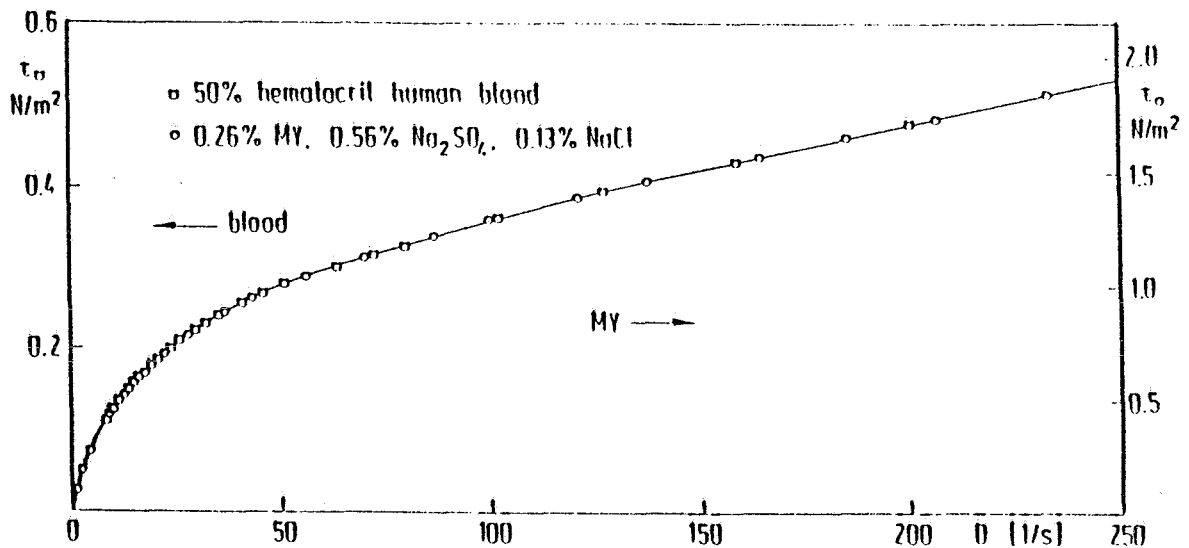
In het rapport wordt beschreven wat het effect op de viscositeit is van verschillende concentraties Dextran en $CaCl_2$ in combinatie met een oplossing van 32 % bolletjes. Ook wordt beschreven wat het effect is van het toevoegen van zowel 5 % Dextran (70000) als 10 $mMol$ $CaCl_2$ aan een oplossing van 12 % bolletjes in H_2O , waarop hier verder niet ingegaan zal worden. Het artikel geeft niet zonder meer uitsluitsel wat de beste oplossing zou zijn. Toch wordt er in het artikel een vloeistof beschreven waarvan de rheologische eigenschappen, zover gerapporteerd, redelijk overeen komen met die van bloed, namelijk 32 % bolletjes opgelost in gedistilleerd water, met daaraan toegevoegd ongeveer 20 $mMol$ $CaCl_2$.

Liepsch e.a. [12] gebruiken in een studie waarin verschillende bloed analoge vloeistoffen vergeleken worden als samenstelling : een suspensie van 5 % Dextran(70000) met 12 % polystyrene bolletjes en 10 $mMol$ $CaCl_2$.



Figuur 3.1: Viscositeit in stationaire stroming van verschillende bloed analoge vloeistoffen, vergeleken met de viscositeit van bloed.

- A : Xanthan gum gel (uit [8])
- B : Polyacrylamide mengsel (uit [1])
- C : Menselijk bloed (uit [8])
- D : Xanthan gum (uit [8])
- E : Polystyrene microbolletjes (uit [7])
- F : Biconcave schijfjes (uit [12])



Figuur 3.2: Afschuifspanning als functie van de afschuifsnelheid, voor Milling Yellow kleurstof (uit [10])

Een belangrijk nadeel is het feit dat de polystyrene microbolletjes oplossing een witte, niet transparante oplossing is, die dus onbruikbaar is voor LDA metingen. Bovendien is de vloeistof moeilijk te verkrijgen; de polystyrene bolletjes zijn wel commercieel verkrijgbaar, maar ook erg duur.

Eigenschappen

De viscositeit in stationaire stroming van de suspensie is voor een beperkt gebied van de afschuifsnelheid gemeten. In dit gebied blijkt dat de viscositeit van de suspensie nagenoeg gelijk is aan die van bloed (figuur 3.3).

De verlies modulus van bloed staat weergegeven in figuur 3.7a. Deze verlies modulus komt overeen met de visceuse component van de complexe viscositeit, maar verschilt hierin dat η^* de overdracht is tussen afschuifspanning en afschuifsnelheid en G^* de overdracht is tussen afschuifspanning en rek. Er is een 'vertaalslag' tussen η en G , die volgt uit het feit dat de afschuifsnelheid de eerste tijdsafgeleide is van de rek. Hieruit volgt dat $\eta = G * 2\pi f$.

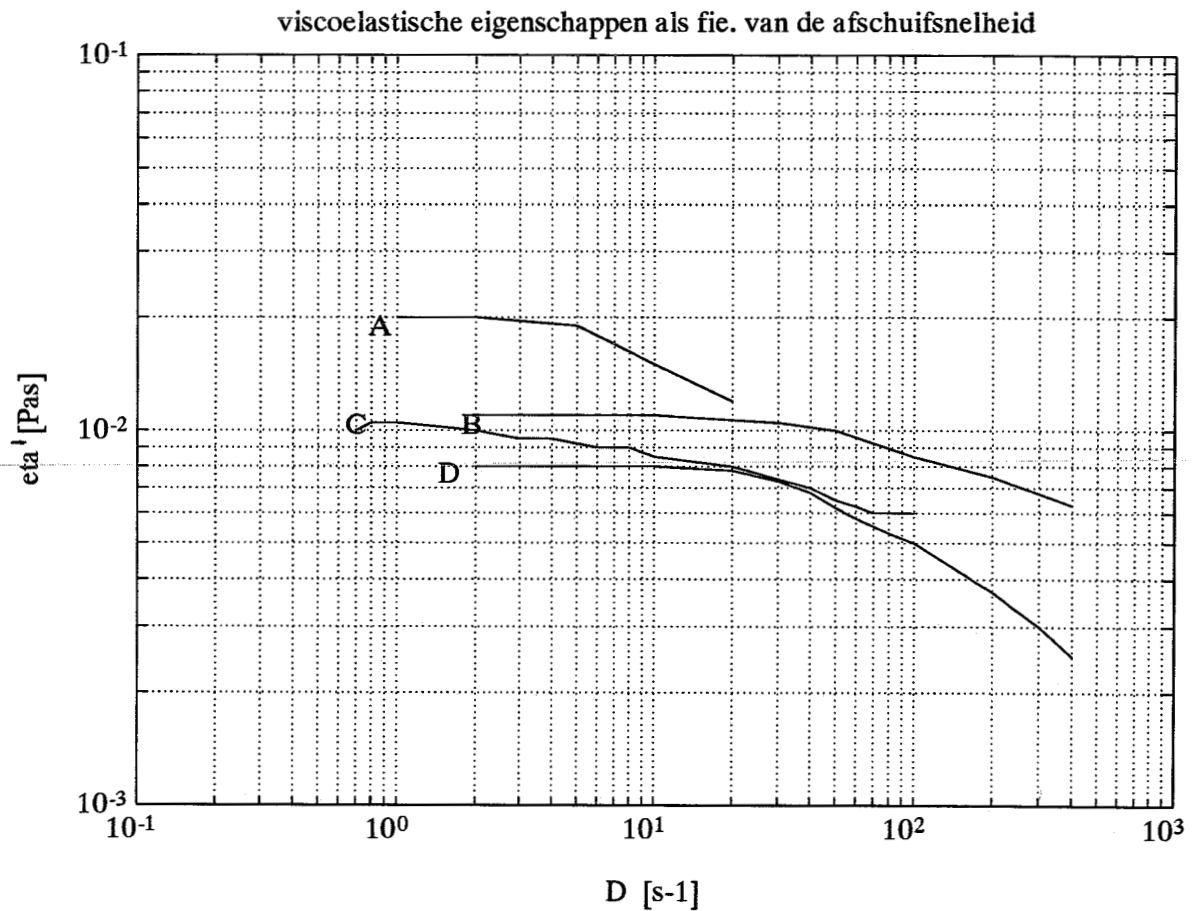
De verlies modulus is gegeven als functie van de frequentie, in één figuur met die van bloed. De bron vermeldt niet bij welke afschuifsnelheid de metingen verricht werden. Deze metingen werden gedaan voor een zeer beperkt bereik van de frequentie. Uit de figuur blijkt dat de verlies modulus hoogstens 2 maal groter is dan die van bloed bij een frequentie van 0.02 Hz en hoogstens 2 maal kleiner bij een frequentie van 0.5 Hz.

De opslag modulus is gegeven als functie van de frequentie in figuur 3.7b. De figuur laat zien dat deze 2 maal groter is dan die van bloed, over het hele frequentie bereik.

3.3.2 Xanthan gum gel

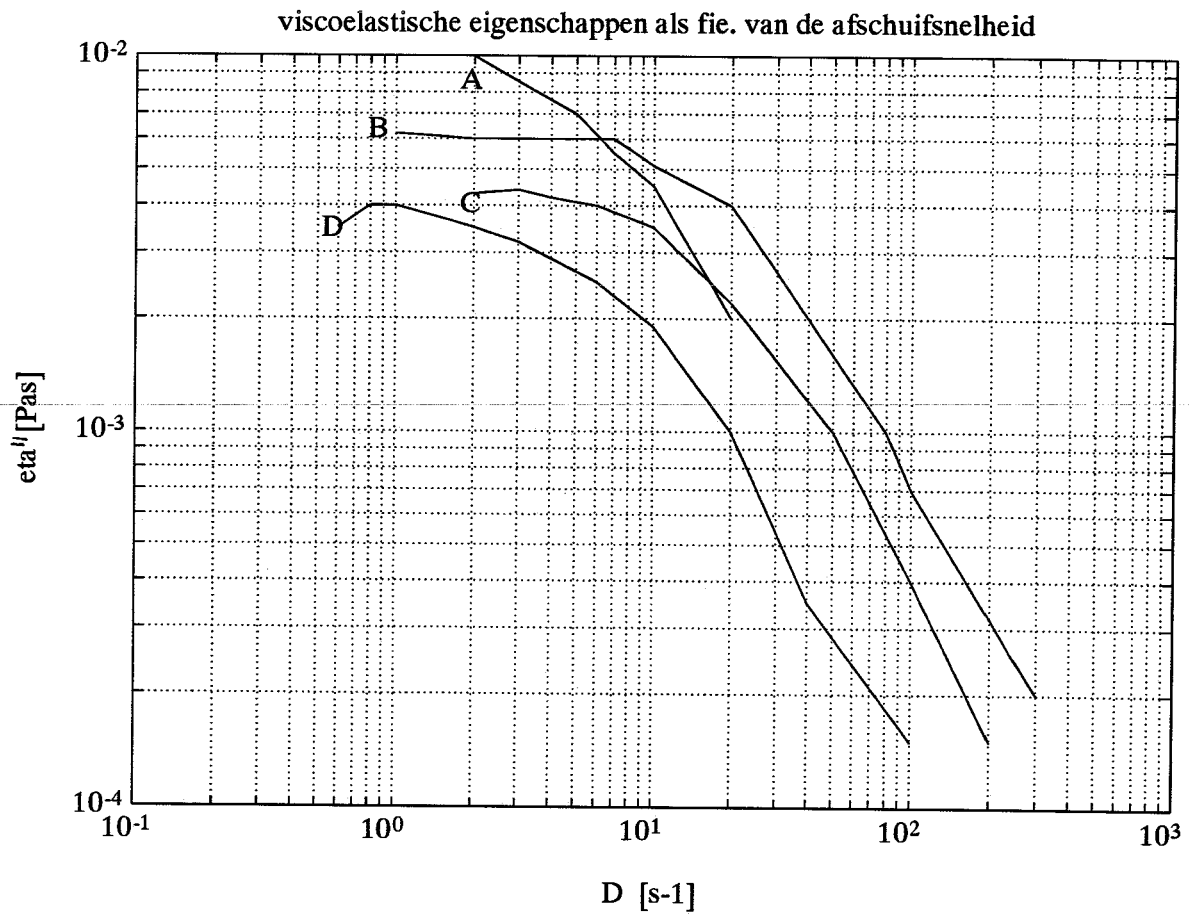
Samenstelling

Thurston beschrijft een tweede vloeistof waarin hij gebruik maakt van Xanthan gum, namelijk Xanthan gum gel [8]. De gel wordt gemaakt door een waterige oplossing van Xanthan gum



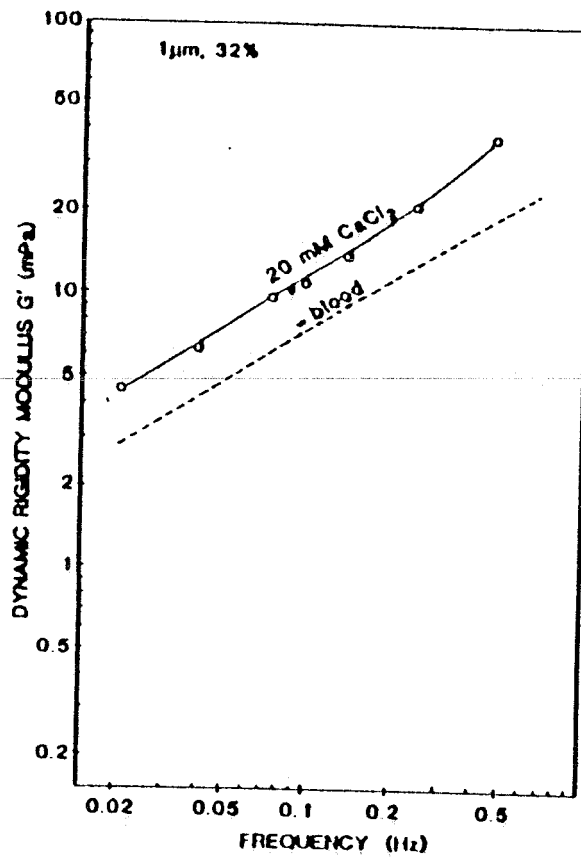
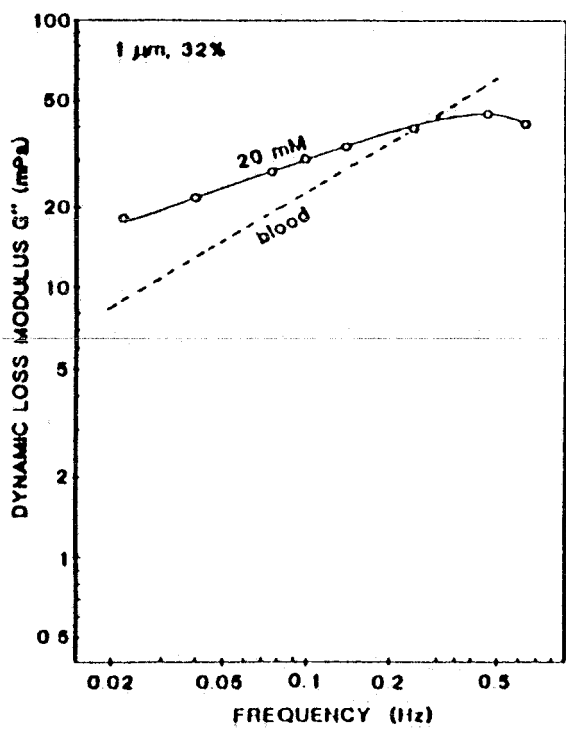
Figuur 3.3: Viskouse component van de complexe viscositeit voor verschillende bloedanaloge vloeistoffen als functie van de afschuifsnelheid, vergeleken met die van bloed.

- A : Polyacrylamide mengsel (uit [1])
- B : Xanthan gum gel (uit [8])
- C : Menselijk bloed (uit [8])
- D : Xanthan gum (uit [8])



Figuur 3.4: Elastische component van de complexe viscositeit voor verschillende bloedanaloge vloeistoffen als functie van de afschuifsnelheid, vergeleken met die van bloed.

- A : Polyacrylamide mengsel (uit [1])
- B : Xanthan gum gel (uit [8])
- C : Xanthan gum (uit [8])
- D : Menselijk bloed (uit [8])



Figuur 3.5: Complexe viscositeit als functie van de frequentie, van de vloeistof met polystyrene bolletjes. a. verlies modulus b. opslag modulus (Uit [7])

met een waterige oplossing (2 % $NaCl$) te vermengen, zodat wanneer een gewenste hoeveelheid chroomchloride oplossing wordt toegevoegd, de gewenste concentraties Xanthan gum en $Cr(3+)$ verkregen worden. De chroomchloride oplossingen zijn in de handel verkrijgbaar (Pfizer Inc. X-Link - 7.5 $Cr(3+)$; of X-Link2000 - 11 % $Cr(3+)$). De oplossing werd geroerd gedurende ongeveer een minuut op kamertemperatuur en daarna in een oven geplaatst op $60\text{ }^{\circ}C$, daarna werd het in kleine stukjes gesneden. De gelfragmenten werden gesuspenderd met een volume concentratie van 50 % in een 50 % waterige oplossing van glycerol. Deze combinatie van percentages was uitgekozen als benadering van de hematocriet van menselijk bloed. Een volume concentratie van 50 % gesuspenderde deeltjes komt ongeveer overeen met een hematocriet van 45 % ; de 50 % waterige oplossing van glycerol dient om het Newtonse plasma te simuleren.

Eigenschappen

De viscositeit van de Xanthan gum gel als functie van de afschuifsnelheid staat weergegeven in figuur 3.3. Uit de figuur blijkt dat de viscositeit van de gel veel hoger is dan die van het bloed, variërend van 10 maal hoger bij $D = 1\text{ s}^{-1}$ tot 2 maal hoger bij $D = 100\text{ s}^{-1}$.

De visceuse component van de complexe viscositeit (figuur 3.5) blijkt iets hoger (minder dan 10 %) te zijn dan die van bloed. Het verloop van de curve komt redelijk overeen met die van bloed.

De elastische component van de complexe viscositeit (figuur 3.6) van de Xanthan gum gel is hoger dan die van bloed, variërend van 1.5 maal zo hoog bij $D = 1\text{ s}^{-1}$ tot ongeveer 4 maal zo groot bij $D = 100\text{ s}^{-1}$.

3.3.3 Biconcave schijfjes

Samenstelling

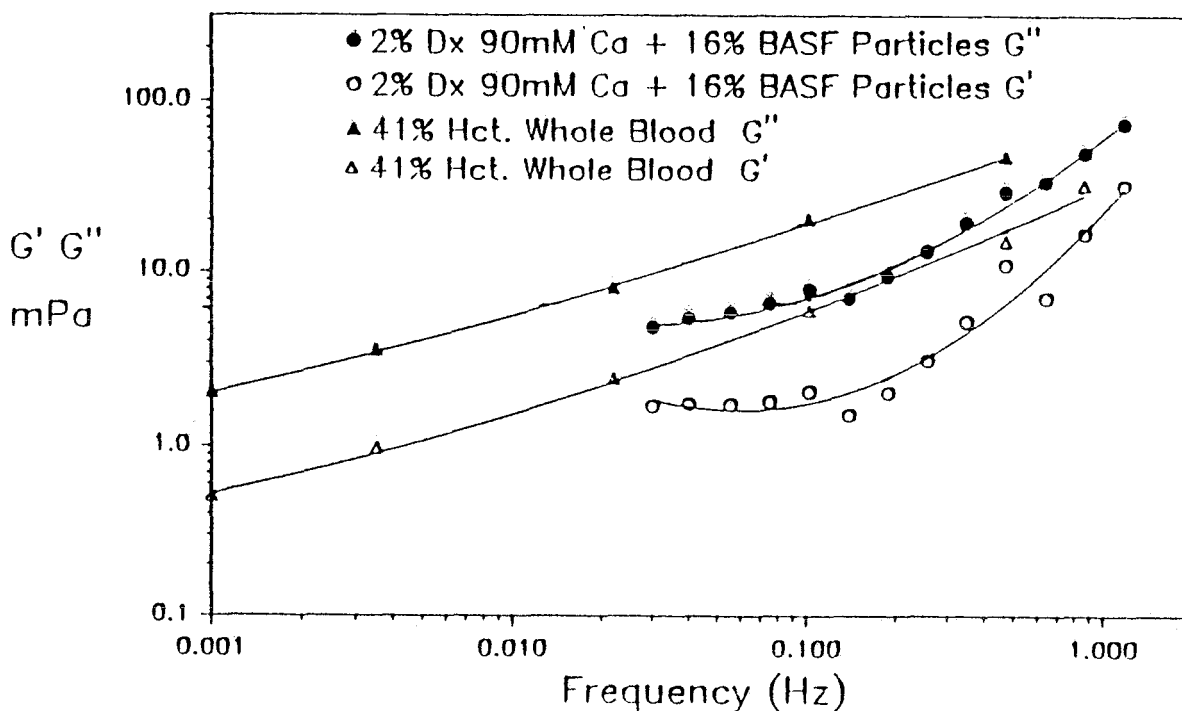
Om het twee-fasen karakter van bloed te simuleren wordt door Liepsch e.a.[12] gebruik gemaakt van microcapsules geleverd door BASF, opgelost in water. Deze capsules zijn schijfvormig en de capsulewand is flexibel en transparant, met een dikte van $1\text{ }\mu m$. De diameter van de capsule is $3-10\text{ }\mu m$ (ter vergelijking: die van rode bloedcellen $8\text{ }\mu m$). Er werd een concentratie van 16 % van deze deeltjes in een 2 % waterige dextran (70000) oplossing met 90 mMol Calcium gebruikt. (Liepsch e.a.[14] noemen een concentratie van 0.8 % Dextran.)

Liepsch [13] vermeld daarnaast als samenstelling : 0.04 % AP30 met 0.01 % magnesiumchloride en 4 % Isopropanol met 1 % biconcave schijfjes.

Eigenschappen

Figuur 3.3 laat de viscositeit zien als functie van de afschuifsnelheid. De viscositeit van de oplossing komt globaal redelijk overeen met die van bloed. Bij afschuifsnelheden kleiner dan 10 s^{-1} is de viscositeit maximaal twee maal zo laag, bij afschuifsnelheden tussen 10 en 100 s^{-1} is de overeen stemming erg goed

Figuur 3.8 laat de verlies- en opslag modulus van bloed zien (resp. G' en G''), vergeleken met die van bloed, als functie van de frequentie, in een zeer beperkt frequentiegebied. De gemeten curves voor de oplossing van de biconcave schijfjes verschillen aanzienlijk van die van bloed. Zowel de opslag- als de verliesmodulus van de suspensie is maximaal drie maal zo hoog als die van bloed.



Figuur 3.6: Opslag- en verliesmodulus als functie van de frequentie van een suspensie met biconcave schijfjes, vergeleken met bloed. (Uit [12])

3.4 Vergelijking tussen de verschillende bloed analoge vloeistoffen

Om een idee te krijgen van de kwaliteiten van de verschillende in de literatuur vermelde vloeistoffen, is het wenselijk om een vergelijking te maken tussen deze stoffen. Echter het is niet zonder meer mogelijk om alle in de literatuur vermelde gegevens van de vloeistoffen uit te wisselen, om zo tot een goede vergelijking te komen. De viscositeit in stationaire stroming is voor alle stoffen gegeven, behalve voor de Milling Yellow kleurstof. Deze is dus moeilijk met de andere stoffen te vergelijken. De viscoëlastische eigenschappen van de vloeistoffen zijn zowel van de frequentie als van de afschuifsnelheid afhankelijk. In referenties [1, 5, 11 en 12] staan de eigenschappen als afhankelijkheid van de afschuifsnelheid, terwijl in referentie [7 en 12] de afhankelijkheid van de frequentie weergegeven staat.

Lineair viscoëlastisch gedrag wordt bestudeerd door η' te meten onder lineaire (dus kleine) vervormingen. Of een meting lineair is kan opgemaakt worden uit een 'strain sweep' experiment, zoals b.v. in figuur 3.6. Waar de complexe viscositeit niet afhankelijk is van de afschuifsnelheid geldt dat de vloeistof zich voor die afschuifsnelheden lineair gedraagt. Het rheologische gedrag wordt gekarakteriseerd door de complexe viscositeit te meten voor een breed frequentiespectrum. Omdat essentiële metingen, dus metingen van $\eta^*(f)$, voor veel vloeistoffen in het voorgaande ontbreken is het onmogelijk om een goed beeld van het rheologisch gedrag te krijgen.

Voor de afschuifsnelheid wordt meestal $D \approx 1s^{-1}$ genomen, omdat dan de grootste effecten van aggregatie verwacht kunnen worden. Bij een 'strainsweep' wordt voor de frequentie $2 Hz$ genomen, hetgeen overeenstemt met de frequentie in de lichaamscirculatie.

Voor zover mogelijk zijn de overeenkomende rheologische eigenschappen van de vloeistoffen in één figuur gepresenteerd om een goede vergelijking mogelijk te maken. Aan de hand van figuren 3.3, 3.4 en 3.5 kan een vergelijking gemaakt worden tussen een aantal van de in de literatuur vermelde stoffen.

In figuur 3.3 staat de stationaire viscositeit van verschillende vloeistoffen samen met bloed weergegeven als functie van de afschuifsnelheid. Uit de figuur blijkt dat, in het gebied waar de metingen gedaan zijn, de suspensie van Polystyrene microbolletjes (curve E) het gedrag van bloed het beste benadert. Het Polyacrylamide mengsel (curve B) heeft een hogere viscositeit, maar het verloop komt goed overeen. De viscositeit van de Xanthan gum oplossing (curve A) is veel hoger dan die van alle andere vloeistoffen, maar voor lage afschuifsnelheden gaat de viscositeit niet naar een constante waarde, hetgeen in overeenstemming is met het gedrag van bloed. De vergelijking tussen de verschillende vloeistoffen wekt het vermoeden dat de suspensie van Polystyrene microbolletjes het gedrag van bloed het beste benadert, maar daarbij dient opgemerkt worden dat het gedrag van de suspensie niet bekend is bij lage afschuifsnelheden ($D < 10s^{-1}$), waar bij bloed aggregatie van de rode bloed cellen optreedt. De viscositeit van de oplossing van Xanthan Gum (curve D) komt redelijk overeen met die van bloed, maar voor lage afschuifsnelheden ($< 10s^{-1}$) wordt de viscositeitte laag. Het verloop van de viscositeit van de oplossing met biconcave schijfjes (curve F) komt voor hogere afschuifsnelheden ($> 10 s^{-1}$) redelijk overeen met dat van bloed, terwijl voor lage afschuifsnelheden ($< 10 s^{-1}$) geen meetgegevens beschikbaar zijn.

De viskeuse component van de complexe viscositeit voor verschillende vloeistoffen staat weergegeven in figuur 3.5. De Xanthan gum- en Xanthan gum gel oplossing (curve C en curve B, respectievelijk) vertonen een gedrag dat redelijk met dat van bloed overeenkomt, terwijl de viskeuse component van het Polyacrylamide mengsel (curve A) hoger is.

De elastische component (figuur 3.6) blijkt voor alle in de figuur vergeleken vloeistoffen hoger te zijn. De oplossing van Xanthan gum (curve C) blijkt nog het meeste met bloed in overeenstemming te zijn.

De andere bloed analoge vloeistoffen zijn moeilijk met elkaar en de voornoemde vloeistoffen te vergelijken, vanwege de bovengenoemde problemen.

Hoofdstuk 4

De experimenten

4.1 Het maken van de vloeistoffen

4.1.1 Inleiding

In de literatuur worden een aantal bloed analoge vloeistoffen vermeld, zoals in het voorgaande beschreven. Aan de hand van de in de literatuur vermelde gegevens zijn een aantal van deze stoffen nagemaakt. In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe deze stoffen gemaakt zijn, met name de samenstellende stoffen en de bereidingswijze. De metingen aan deze vloeistoffen worden in het volgende hoofdstuk besproken.

4.1.2 Polyacrylamide

Voor de bereiding van de vloeistof zijn de polyacrylamide Separan AP30 en AP45-E gebruikt, geleverd door DOW-Chemical.

De vloeistof is op de volgende wijze bereid:

A $\left. \begin{array}{l} 1 \text{ kg demiwater} \\ 0.5 \text{ g AP30} \end{array} \right\} \text{ mengen}$

B $\left. \begin{array}{l} 0.33 \text{ kg demiwater} \\ 0.133 \text{ g AP45} \end{array} \right\} \text{ mengen}$

C Oplossing A en B werden gemengd

D Aan het mengsel werd 0.15 g MgCl_2 en 53.5 g Isopropanol toegevoegd

De Polyacrylamides werden met behulp van een electromagnetische roerder gedurende een nacht in het demiwater opgelost. De Separan moest voorzichtig geroerd worden om de lange ketens waaruit ze bestaan niet te beschadigen. In plaats van puur MgCl_2 werd $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ gebruikt, waarvan 0.32 g nodig was om dezelfde hoeveelheid MgCl_2 te verkrijgen.

4.1.3 Xanthan Gum

Deze vloeistof werd gemaakt aan de hand van de gegevens verstrekt door Mann e.a.[11]. De Xanthan Gum werd geleverd door Fluka BioChemika.

De stof werd op de volgende wijze bereid:

2 kg demiwater
0.75 g Xanthan gum } mengen

De Xanthan gum lostte bij kamertemperatuur slecht op in het demiwater. Om een goede oplossing te krijgen werd de temperatuur van het water langzaam verhoogd met behulp van een gasvlam totdat de Xanthan gum oploste.

Deze vloeistof werd twee keer gemaakt, een keer werd in navolging van Mann e.a. [11] $NaCl$ aan de oplossing toegevoegd, terwijl dat de andere keer achterwege gelaten werd, in navolging van Thurston [8].

4.1.4 Milling Yellow Kleurstof

In de bloed analoge vloeistof beschreven door Schmitz [9] wordt gebruik gemaakt van de Milling Yellow kleurstof, geleverd door de firma Hoechst. Het was echter niet mogelijk om deze kleurstof te bestellen. Liepsch [1] gebruikte een soortgelijke stof, genaamd Alphanol-echtgelb. Firma Hoechst leverde deze kleurstof, echter niet in de kleur geel. De uiteindelijk gebruikte kleurstof was Alphanol-echtmarineblau R 200-PW.

De samenstelling was als volgt:

0.5 kg demiwater
1.3 g Alphanol
2.8 g Na_2SO_4
0.65 g $NaCl$ } mengen

De Alphanol werd met behulp van ultrasone golven gedurende 30 tot 45 minuten in het demiwater opgelost.

4.1.5 Polystyrene microbolletjes

In deze vloeistof werd gebruik gemaakt van polystyrene microbolletjes met een diameter van 1 μm , welke geleverd werden door Dr. Ir. Eshuis, van de faculteit scheikunde. De geleverde bolletjes waren opgelost in een oplossing van half water, half ethanol, met een volume percentage van 15 %. Volgens de heer Eshuis was zonder de ethanol het gewichts percentage (dat is nagenoeg gelijk aan het volume percentage in water) gelijk aan 30 %.

Om uiteindelijk de gewenste vloeistof te maken moest de ethanol uit de geleverde oplossing verwijderd worden. De ethanol kan verwijderd worden door gelijktijdig de temperatuur tot 40 °C te verhogen en de druk te verlagen tot de ethanol verdampt.

De vloeistof zou als volgt samengesteld moeten zijn :

12 % polystyrene bolletjes
5 % Dextran
10 mMol/liter $CaCl_2$ }

De Dextran werd geleverd door Fluka Biochemika. In plaats van $CaCl_2$ werd $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ gebruikt.

De uiteindelijk vloeistof werd dan als volgt samengesteld:

40 g van de geleverde vloeistof, zonder ethanol	} mengen
5 g Dextran	
0.147 g $CaCl_2 \cdot 2H_2O$	
55 g demiwater	

Doordat de destilleerkolf niet voor het beëindigen van de stage operationeel was is het helaas niet gelukt om daadwerkelijk de vloeistof te maken.

4.1.6 Andere bloed analoge vloeistoffen

De bloed analoge vloeistof met biconcave schijfjes, vermeld door Liepsch e.a. [12] was niet meer zonder meer te maken, omdat bij navraag bleek dat BASF de schijfjes niet meer levert. De vloeistof met Xanthan gum gel was moeilijk te maken omdat het snijden van de gel met de aanwezige middellen niet mogelijk was.

4.2 De meetresultaten

4.2.1 Inleiding

De rheologische eigenschappen van de gemaakte vloeistoffen werden gemeten met behulp van de Rheometrics fluid spectrometer. Dit apparaat biedt de mogelijkheid om Couette-viscositeits metingen te doen, zowel stationair als dynamisch. Voor ieder van de gemaakte vloeistoffen werden stationaire en dynamische metingen verricht. Voor de meeste metingen, met name de dynamische metingen, waren de verschillen met de in de literatuur weergegeven metingen zo groot dat het meest waarschijnlijk is dat de Rheometrics gedurende deze metingen niet goed gefunctioneerd heeft. De enige metingen waarvoor de meetresultaten bevredigend overeenstemden met de literatuur waren de stationaire metingen aan het Polyacrylamide mengsel en Xanthan gum oplossing, en de dynamische metingen van de complexe viscositeit als functie van de afschuifsnelheid in het geval van de Xanthan gum oplossing.

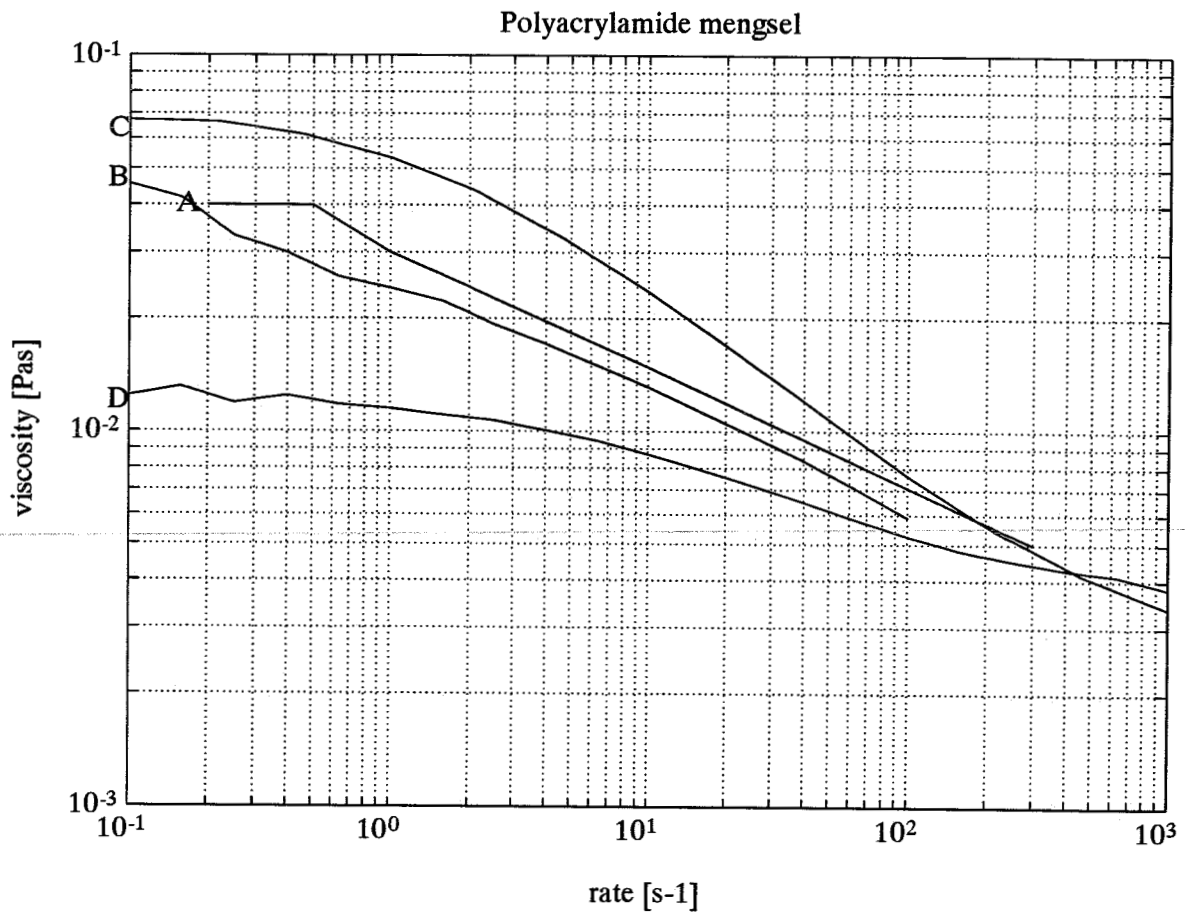
4.2.2 Polyacrylamide

Stationaire metingen

In figuur 4.9 staat de viscositeit van het Polyacrylamide mengsel in stationaire stroming als functie van de afschuifsnelheid weergegeven. De vloeistof werd twee keer gemaakt (oplossing I & II) en de viscositeit van oplossing I werd gemeten, nadat de vloeistof twee weken in de koelkast bewaard was. De resultaten van de metingen staan in de figuur weergegeven, samen met de door Liepsch [1] verstrekte gegevens.

Voor oplossing I kwam de viscositeit goed overeen met de gegevens van Liepsch, maar na twee weken in de koelkast bleek de vloeistof andere viskeuse eigenschappen te hebben, de viscositeit werd hoger. De vloeistof werd in een afgesloten pot in de koelkast bewaard, zodat verdampen van water uitgesloten kan worden. Liepsch [1] maakt melding van het verouderen van de vloeistof, en voegde om dat enige dagen te voorkomen Isopropanol toe. Blijkbaar werkte de Isopropanol niet lang genoeg om de rheologische eigenschappen twee weken te behouden.

Oplossing II vertoonde een ander verloop voor de viscositeit dan oplossing I. De viscositeit is ongeveer 3 maal lager dan de door Liepsch gemeten viscositeit. Blijkbaar was de viscositeit



Figuur 4.1: Gemeten waarden van de stationaire viscositeit voor het Polyacrylamide mengsel, als functie van de afschuifsnelheid, vergeleken met de waarden uit de literatuur. Temperatuur: $21\text{ }^{\circ}\text{C}$

- A : Literatuur [1]
- B : Oplossing I
- C : Oplossing I, verouderd
- D : Oplossing II

van de vloeistof gevoelig voor de manier waarop de vloeistof gemaakt werd. De aan het water toe te voegen hoeveelheid polyacrylamide is zo klein dat relatief grote fouten bij het wegen van de stof snel op kunnen treden. De stof bestaat namelijk uit relatief grote korrels, zodat een korreltje meer of minder al snel een relatief grote fout op kan leveren.

Dynamische metingen

De metingen die gedaan werden van de complexe viscositeit weken zodanig af van de in de literatuur gevonden gegevens, dat aangenomen mag worden dat in het meetproces iets fout verlopen is. Welke oorzaken dit had was niet bekend. Onervarenheid in onze groep met het apparaat speelde waarschijnlijk een grote rol.

4.2.3 Xanthan gum

Stationaire metingen

In figuur 4.10 staan de meetgegevens van de oplossing van Xanthan gum weergegeven, samen met de door Thurston [8] verstrekte gegevens. Ook deze oplossing werd twee keer gemaakt. Oplossing II werd twee weken bewaard, op kamertemperatuur, in een open pot. Uit de figuur blijkt dat twee keer maken van de vloeistof niet hetzelfde resultaat opleverde, de viscositeit van oplossing I kwam goed overeen met de gegevens verstrekt door Thurston, terwijl de viscositeit van oplossing II voor waarden van de afschuifsnelheid kleiner dan 10 s^{-1} ongeveer anderhalf maal zo hoog werd. Mogelijke oorzaken voor deze verschillen waren: het maken van de vloeistof was niet goed gecontroleerd, zo werd bijvoorbeeld het water verwarmd totdat de Xanthan gum korrels oplostten, maar daarbij werd de temperatuur van het water niet gemeten. Ook bleek dat het bewaren van de vloeistof invloed op de rheologische eigenschappen had, de viscositeit van de bewaarde vloeistof was ongeveer twee maal hoger geworden dan de originele oplossing. Waarschijnlijk was gedurende het bewaren water uit de pot verdampt, zodat de concentratie Xanthan gum veranderde.

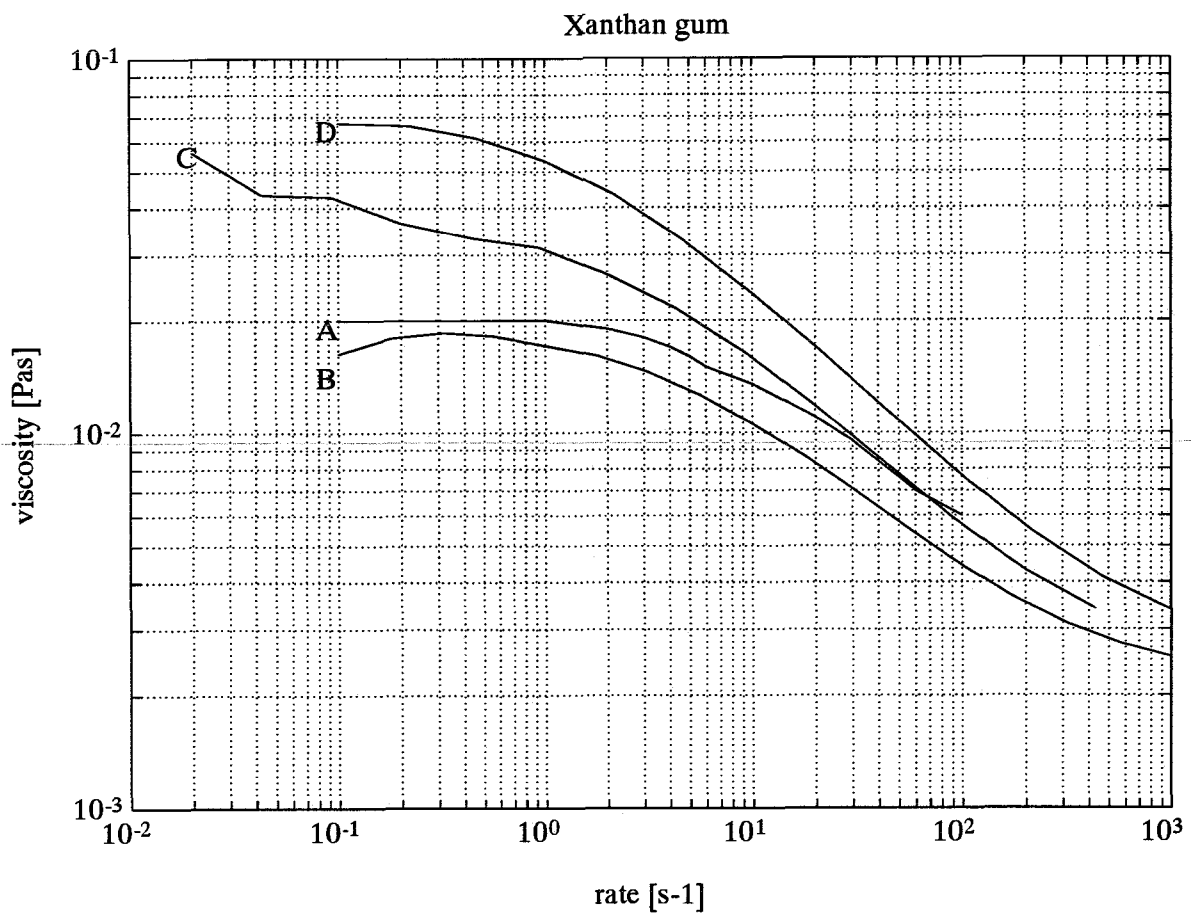
Dynamische metingen

De resultaten van metingen van de complexe viscositeit als functie van de afschuifsnelheid staan weergegeven in figuren 4.11 en 4.12, de viskeuse- en elastische component respectievelijk. Het blijkt dat de viskeuse component goed overeen kwam met de door Thurston verstrekte gegevens, maar dat de elastische component tussen de twee en drie keer te hoog was. De schommelingen in de curves voor lage waarden van de afschuifsnelheid kan verklaard worden uit de meetnauwkeurigheid van de Rheometrics. De te meten momenten werden zo klein dat ze bijna of helemaal buiten het meetbereik van de transducer vielen.

4.2.4 Milling Yellow Kleurstof

Stationaire metingen

De gemeten viscositeit van de oplossing van Alphanol Echtmarineblau, als functie van de afschuifsnelheid, staat weergegeven in figuur 4.13. In de figuur staan drie curves weergegeven, één curve geeft de viscositeit van een oplossing van 0.26 % Alphanol, een andere correspondeert met een oplossing van 1.3 % Alphanol, een derde geeft de viscositeit van bloed weer. Uit de figuur blijkt dat de viscositeit voor afschuifsnelheden kleiner dan 10 s^{-1} ongeveer twee



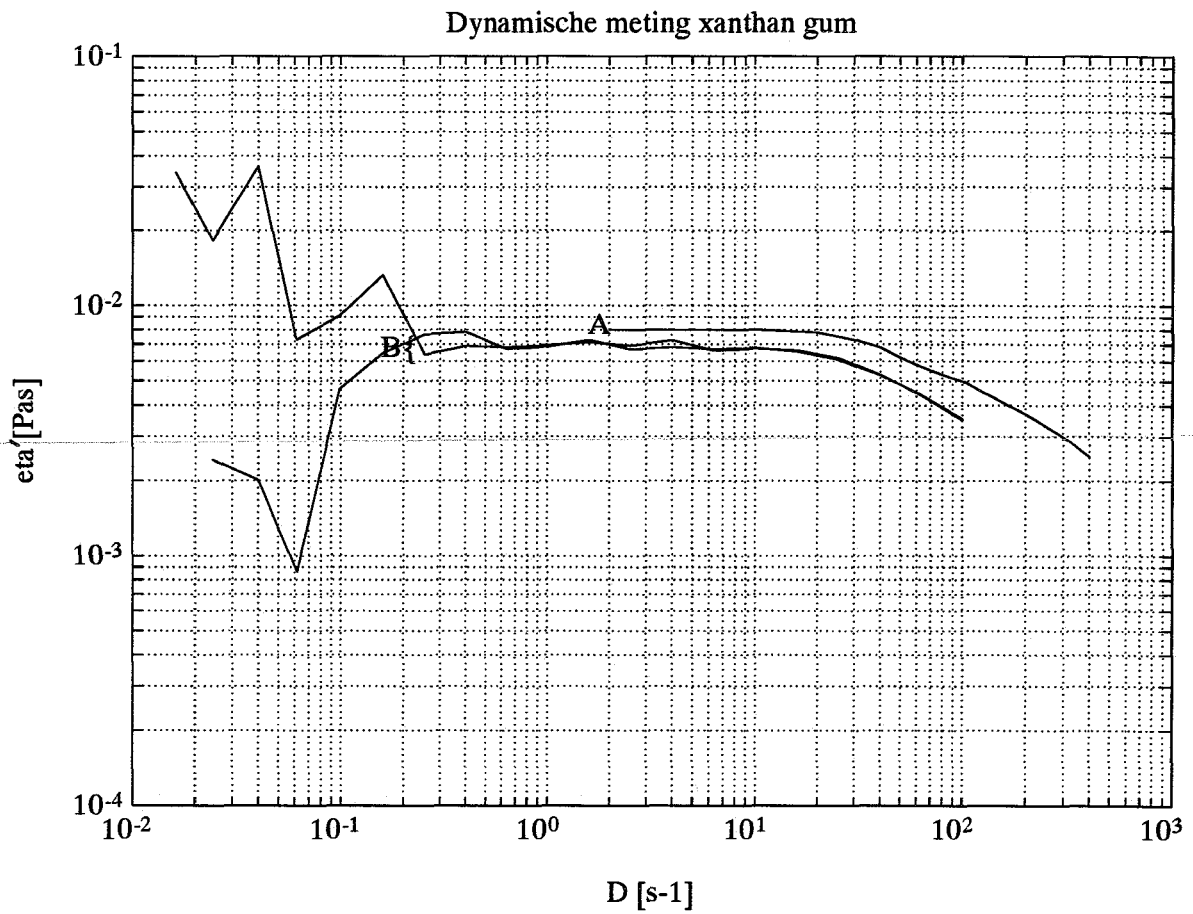
Figuur 4.2: Gemeten waarden van de stationaire viscositeit voor de Xanthan gum oplossing, als functie van de afschuifsnelheid, vergeleken met de waarden uit de literatuur. Temperatuur: $21\text{ }^{\circ}\text{C}$

A : Literatuur [8]

B : Oplossing I

C : Oplossing II

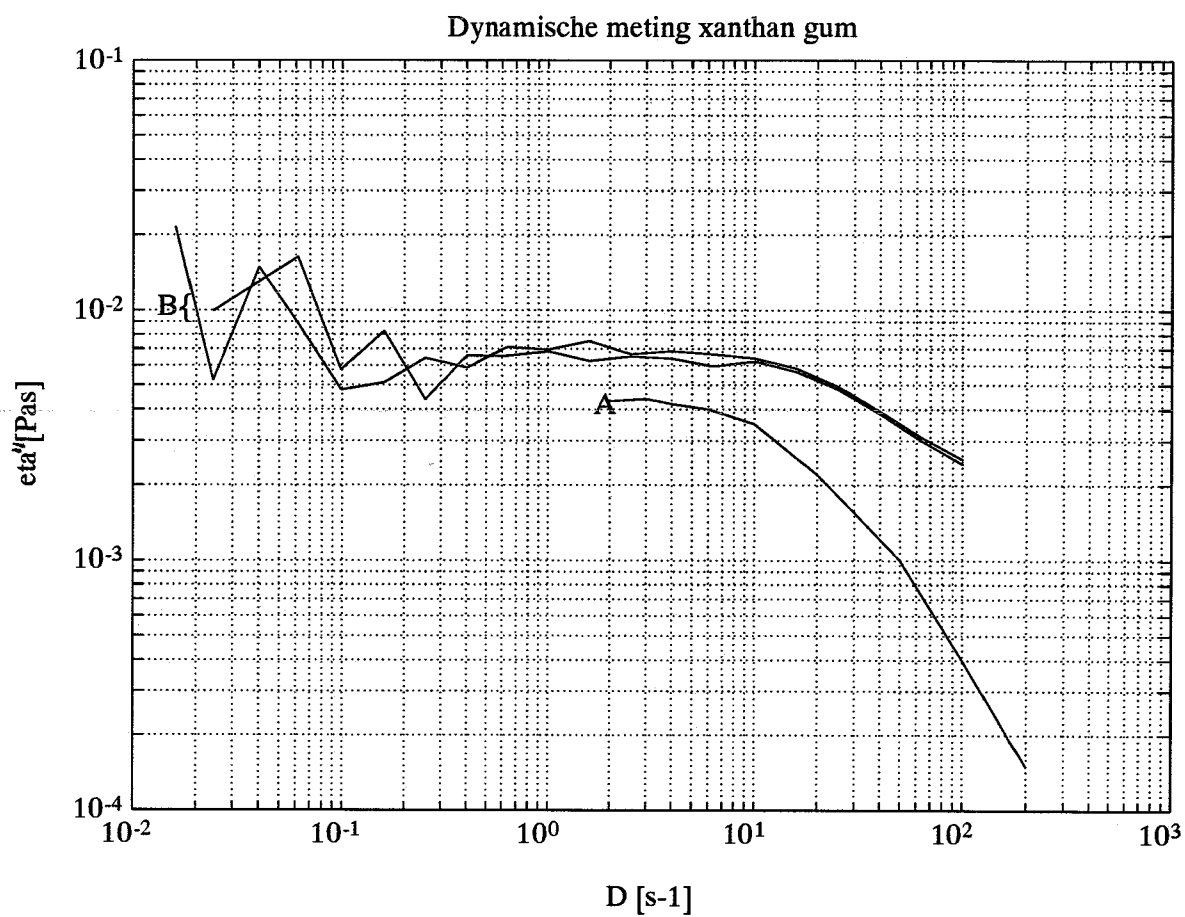
D : Oplossing II, verouderd



Figuur 4.3: Gemeten waarden voor de visceuse component van de complexe viscositeit voor de Xanthan gum oplossing, als functie van de afschuifsnelheid, bij een frequentie van 2 Hz, vergeleken met de waarden uit de literatuur. Temperatuur: 21 °C

A : Literatuur [8]

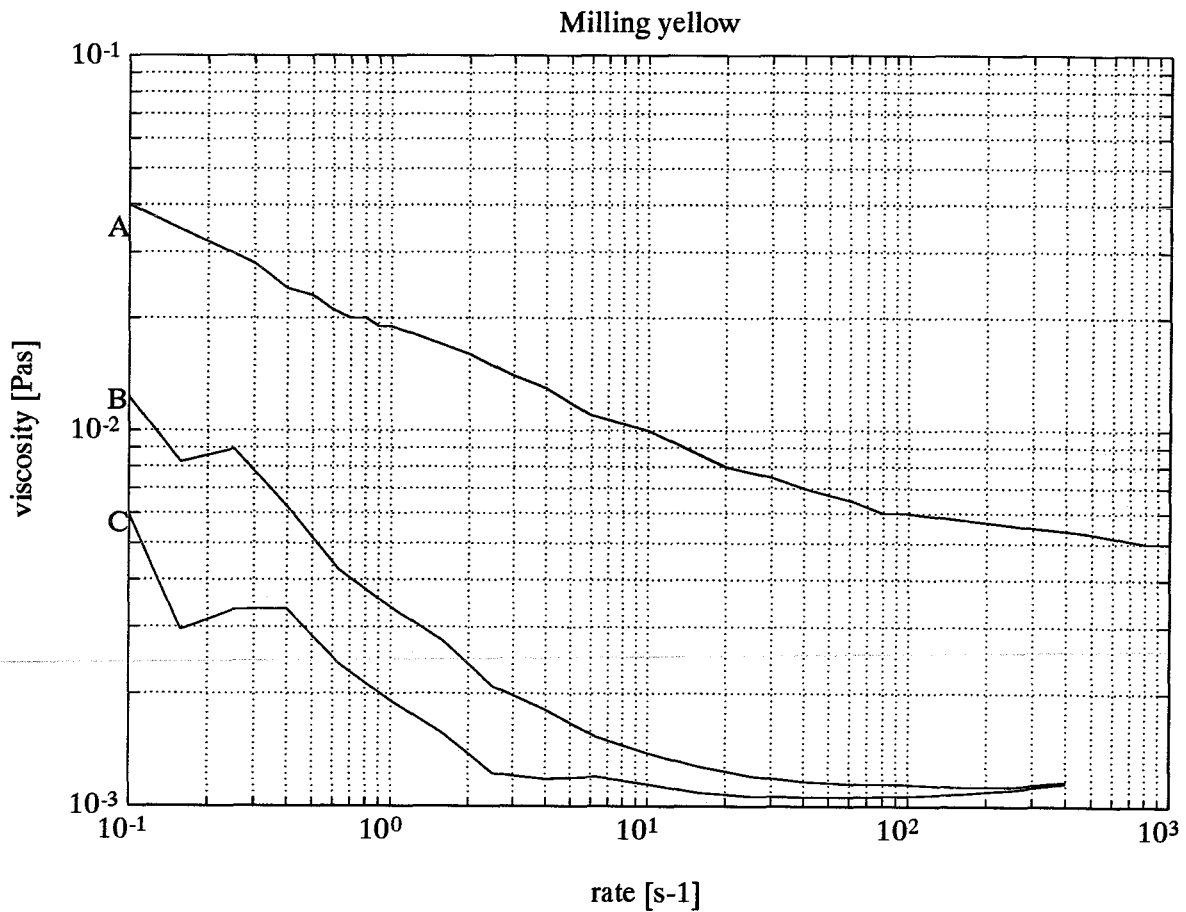
B : Oplossing II



Figuur 4.4: Gemeten waarden voor de elastische component van de complexe viscositeit voor de Xanthan gum oplossing, als functie van de afschuifsnelheid, bij een frequentie van 2 Hz, vergeleken met de waarden uit de literatuur. Temperatuur: 21 °C

A : Literatuur [8]

B : Oplossing II



Figuur 4.5: Gemeten waarden voor de stationaire viscositeit voor de Milling Yellow kleurstof oplossing, als functie van de afschuifsnelheid. Temperatuur: 21 °C

A : menselijk bloed

B : 1.3 % Alphanol Echtmarineblau

C : 0.26 % Alphanol Echtmarineblau

maal hoger werd door de concentratie Alphanol vijf maal te verhogen. Tevens blijkt uit de figuur dat voor waarden van de afschuifsnelheid boven 10 s^{-1} naar een constante waarde ($1.2 \cdot 10^{-3} \text{ Pas}$) ging. Het is niet zonder meer mogelijk om de meetgegevens met de gegevens uit de literatuur te vergelijken, omdat de literatuur alleen maar de afschuifspanning als functie van de afschuifsnelheid weergaf. Het is wel mogelijk om de viscositeiten met die van bloed te vergelijken. Uit figuur 4.13 blijkt dat beide oplossingen een veel te lage viscositeit hebben, de viscositeit van bloed is een orde 10 hoger dan de viscositeit van beide vloeistoffen. In deze studie werd verder niet onderzocht of door de concentratie alphanol veel verder te verhogen, de overeenstemming met bloed beter werd.

Dynamische metingen

Evenals voor de polyacrylamide oplossing waren de resultaten van de dynamische metingen uiterst onbetrouwbaar en zijn daarom hier verder niet weergegeven.

Hoofdstuk 5

Conclusies en aanbevelingen

In het voorgaande zijn de resultaten van een studie gepresenteerd die tot doel had om een vloeistof te vinden die dezelfde rheologische eigenschappen bezit als bloed, om toe te passen in onderzoek naar stromingsverschijnselen in vertakkingen en bochten in de menselijke lichaams-circulatie. In de literatuur zijn een aantal vloeistoffen voorgesteld. De literatuur gegevens zijn in dit rapport met elkaar vergeleken. Uit die vergelijking kwam naar voren dat de suspensie van Polystyrene microbolletjes, voorgesteld door Fukada e.a. [7] gunstige eigenschappen had, de viscositeit kwam goed overeen met die van bloed en hetzelfde gold voor de viscoëlastische eigenschappen. De suspensie heeft echter als groot nadeel dat de polystyrene bolletjes erg duur of moeilijk te verkrijgen waren, dat de suspensie niet zo gemakkelijk te maken is, en ondoorzichtig is voor laser licht bij LDA metingen.

Enkele vloeistoffen die gemaakt werden zijn het polyacrylamide mengsel, de Xanthan gum oplossing en de oplossing met Milling Yellow kleurstof. De gedane metingen laten zien dat al de gemaakte vloeistoffen, net zoals bloed shear-thinning zijn. Voor de oplossing van Xanthan gum en het polyacrylamide mengsel werd redelijke overeenstemming bereikt voor de viscositeit in stationaire afschuifstroming tussen de zelf gemeten waarden en de in de literatuur gegeven waarden. Uit de gedane metingen van de stationaire viscositeit kwam naar voren dat de bereiding van de vloeistoffen nauwkeurigheid vereist en een gecontroleerd bereidingsproces. Als aan deze eisen voldaan wordt zou het mogelijk moeten zijn om een reproduceerbare vloeistof te maken die in onderzoek toe te passen is. Om een en ander afdoende te bepalen zouden nog dynamische metingen gedaan moeten worden om zo te bepalen of ook de complexe viscositeit van de vloeistoffen overeen komt met de in de literatuur gevonden waarden. Een probleem dat blijft is dat de in de literatuur voorgestelde vloeistoffen vaak grote verschillen in gedrag vertonen met bloed.

In de gedane studie werd geen aandacht geschonken aan de thixotrope eigenschappen van de vloeistoffen, en aan het verschijnsel 'overshoot'. Liepsch e.a. [12] gaat in een vergelijkende studie wel in op deze eigenschappen, maar vergelijkt de verschillende stoffen dan verder niet met elkaar. Deze eigenschappen moeten verder onderzocht worden.

Tevens werd in deze studie geen aandacht geschonken aan de bruikbaarheid van de vloeistoffen in laser-doppler anemometrie metingen. Als de vloeistoffen gemaakt worden zoals in de literatuur weergegeven zouden ze de goede brekingsindices voor licht moeten hebben, maar men moet dit nagaan als de vloeistoffen gemaakt zijn.

In de literatuur wordt vaak aandacht geschonken aan de afschuifnelheids-afhankelijkheid van de complexe viscositeit, terwijl deze afhankelijkheid alleen van belang is om te beoordelen

of bloed zich lineair gedraagt en daarmee de definitie van complexe viscositeit nog steeds geldig is. Dit geldt voor kleine afschuifsnelheden, waar de viskeuse- en elastische component constant zijn. Opvallend is echter dat metingen van de frequentie-afhankelijkheid van de complexe viscositeit vaak juist ontbreken.

De algemene conclusie is, dat op grond van de in de literatuur gevonden gegevens en de metingen die in deze studie gedaan zijn, geen vloeistof als geschikte modelvloeistof voor bloed aangemerkt kan worden. Xanthan gum en het Polyacrylamide mengsel lijken het meest interessant voor meer gedetailleerd onderzoek, waarbij met name het lineair viscoëlastische gedrag en het transiënt gedrag ('overshoot') onderzocht moeten worden.

Literatuur

1. **Liepsch, D.** Strömungsuntersuchungen an modellen menschlicher blutgefäß-systeme. *VDI fortschrittberichte nr 113, 1987*
2. **Liepsch, D. Moravec, St.** Pulsatile flow of non-Newtonian fluid in distensible models of human arteries. *Biorheology 21; 571-586; 1984*
3. **Nandy, S. Tarbell, J.M.** Flush hot film anemometer measurements of wall shear distal to a tri-leaflet valve for Newtonian and non-Newtonian blood analog fluids. *Biorheology 24; 483-500; 1987*
4. **Ku, D.N. Liepsch, D.** The effects of non-Newtonian viscoelasticity and wall elasticity on flow at 90° bifurcation. *Biorheology 23; 359-370; 1986*
5. **Moravec, St. Liepsch, D.** Flow investigations in a model of three-dimensional human artery with Newtonian and non-Newtonian fluids. Part 1. *Biorheology 20; 745-759; 1983*
6. **Friedman, M.H. Barger, C.B. Duncan, D.D. Mark, F.F. Hutchins, G.M.** Wall shear in a compliant cast of a human artery perfused with a non-Newtonian fluid, and its correlation with intimal thickness. *Proceedings 2nd international conference on biofluids and biomechanics, Munich, June 1989*
7. **Fukada, E. Seamann, G.V.F. Liepsch, D. Lee, M. Friis-Baastad, L.** Blood modelling using polystyrene microspheres. *Biorheology 26; 401-413; 1989*
8. **Thurston, G.B.** Rheological analogs for human blood in large vessels. *Proceedings 2nd international symposium on biofluid mechanics and biorheology in large blood vessels, Munich, June 1989*
9. **Schmitz, E. Merzkirch, W.** A test fluid for simulating blood flows. *Experiments in fluids 2; 103-104; 1984*
10. **Rankin, G.W. Sabbah, H.N. Stein, P.D.** A stream birefringence study of the flow at the junction of the aorta and renal arteries. *Experiments in fluids 7; 73-80; 1989*
11. **Mann, D.E. Tarbell, J.M.** Flow of non-Newtonian blood analog fluids in rigid curved and straight artery models. *Biorheology 27; 711-733; 1990*
12. **Liepsch, D. Thurston, G. Lee, M.** Studies of fluids simulating blood-like rheological properties and applications in models of arterial branches. *Accepted in Biorheology.*
13. **Liepsch, D.W.** Fluid studies in artery models simulating blood. *Proceedings 40th annual conference on engineering in medicine and biology, Niagara Falls, September 1987*

14. **Liepsch, D. Lee, M.** Flow studies in models of non-Newtonian fluids in arterial branches. *7th int. congress biorheology*
15. **van Steenhoven, A.A.** Reologie en microcirculatie. *Dictaat TUE 4607, 1984*
16. **Caro, C.G., Pedley, R.C., Schroter, R.C., Seed, W.A.** The mechanics of the circulation. *Oxford, University Press; 1978*
17. **Thurston, G.B.** Frequency and shear rate dependence of viscoelasticity of human blood. *Biorheology 10; 375-381; 1973*
18. **Thurston, G.B.** Rheological parameters for the viscosity, viscoelasticity and thixotropy of blood. *Biorheology 16; 149-162; 1979*

Appendix A

Adressen

- D. Liepsch
Fachhochschule München
Lothstraße 34
D-8000 München, Deutschland
Tel : 09-49-89-12650
Fax : 09-49-89-12651490
of
Eisenhower Medical Center
Rancho Mirage
Hal. B. Wallis Research Facility
Tel : 09-1-619-3403911
I.v.m. Polyacrylamide mengsel, Polystyrene bolletjes, biconcave schijffjes.
- BASF Nederland B.V.
Postbus 1019
6801 MC Arnhem
Tel : 085-717260
Afdeling PR :
BASF Nedrland B.V.
Afdeling PR
Kadestraat 1
6811 CA Arnhem
I.v.m. Biconcave schijffjes.
- Dr. Ir. Arend Eshuis
FT-Hal 1.39
(47)2199
I.v.m. Polystyrene bolletjes
- G.B. Thurston
University of Texas at Austin
Rheology laboratory
Department of Mechanical engineering
Tel : 09-1-512-4713184 (Universiteit : 09-1-512-4713434)

Fax : 09-1-512-4717681 (Universiteit : 09-1-512-4715532)

I.v.m. Xanthan gum

- Department of Hemorheology & Hemodynamics
Institute Medicine, Physics & Biophysics
School of Medicine ('Charite')
Humboldt University
Flüstraße 20-21
Tel : 09-37-2-20930 (Universiteit)
Tel : 09-37-2-2860 (Afdeling)
I.v.m. opsomming van een aantal bloed analoge vloeistoffen

- Ruhr Universität
Bochum, Deutschland
Institut für Thermo- und Fluidodynamik
Tel : 09-49-234-7001
Fax : 09-49-234-7002001 (Afdeling : 09-49-234-7002541)
I.v.m. Milling Yellow kleurstof

- W. Merzkirch
Lehrstuhl für Strömungslehre
Universität Essen
Postfach 103764
D-4300 Essen, Deutschland
Tel : (0) 201/1832912
Fax : (0) 201/1833716
I.v.m. Milling Yellow kleurstof

- Hoechst
Tel : 020-5908911
I.v.m. Milling Yellow kleurstof.