

Stromingsdubbele breking visualisatie met vanadium pentoxide

Citation for published version (APA):

Sabel, M. A. J. B. (1992). *Stromingsdubbele breking visualisatie met vanadium pentoxide*. (DCT rapporten; Vol. 1992.011). 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.

**STROMINGSDubBELE BREKING
VISUALISATIE MET
VANADIUM PENTOXIDE**

Stagebegeleiding: ir. D.E.M. Palmen
dr.ir. F.N. van de Vosse

Kontaktdocent: dr.ir. M.E.H. van Dongen

Mark Sabel
Eindhoven, december 1991

WFW rapport 92.011
NT rapport R-1146-S

SAMENVATTING

Dit verslag handelt over de visualisatietechniek van stromingsdubbele breking met behulp van vanadium pentoxide. Deze visualisatie techniek wordt gebruikt om flowverstorings parameters te zoeken, welke gebruikt kunnen worden als vroegtijdige diagnose voor milde stenoses in de halsslagader vertakking.

De bestaande opstelling voor een schaalmodel van deze vertakking is verbeterd en er is een methode ontwikkeld om de instationaire pomp in het juiste bereik te laten werken. De instationaire pomp zelf is aangepast waardoor deze beter funktioneert.

De eigenschappen van de dubbelbrekende modelvloeistof vanadium pentoxide zijn onderzocht. De viskositeit van vanadium pentoxide is bepaald met behulp van de Rheometrics RFSII. Vanadium pentoxide blijkt bij een oplossing van 0,78 massa-% een Newtons gedrag te vertonen en de dynamische viskositeit bedraagt dan $\eta=10^{-3}$ Pa·s. Ook zijn ten aanzien van de bereiding van vanadium pentoxide enkele punten veranderd en strakker omschreven, waardoor de kwaliteit van de stof verder verbeterd is.

Voor de eigenlijke visualisatie zijn kleuren video opnamen gemaakt gedurende enkele periodetijden op diverse lokaties van zowel het zij- als bovenaanzicht van een asymmetrische stapvormige verwijding in een buis. Hierbij is van een geschaalde fysiologische puls ($Re_{dia}=175$; $Re_{sys}=650$) alsmede van een opgevoerde puls ($Re_{min}=125$; $Re_{max}=900$) gebruik gemaakt.

VOORWOORD

Mijn TU opleiding Technische Natuurkunde te Eindhoven omvat 1 stage periode. Van 19 augustus tot en met 11 oktober 1991 heb ik mijn stage doorlopen bij de vakgroep fundamentele werktuigkunde (WFW) van de fakulteit Werktuigbouwkunde van de TUE. Binnen deze vakgroep houdt een groep zich bezig met het atherosclerose projekt, binnen dit projekt heeft deze stage plaatsgevonden.

Graag wil ik Daniëlle Palmen bedanken voor de spontane begeleiding van de stage. Ook bedank ik Frans van de Vosse voor zijn ondersteunende adviezen. Dankzij hun enthousiaste begeleiding kan ik terugkijken op een leuke en leerzame stage periode. Verder bedank ik Ron Snijders voor het schrijven van het komputer programma en Leo Wouters voor de aanpassing ervan.

IV
INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING	II
VOORWOORD	III
1 INLEIDING	1
1.1 Doel van het onderzoek	1
1.2 Atherosclerose	1
2 THEORIE	3
2.1 Stromingsdubbele breking	3
2.1.1 Brekingsindex	3
2.1.2 Fasedraaiing	4
2.2 Viskositeit	4
2.2.1 Dynamische meting	5
2.2.2 Cox-Merz regel	5
2.3 Schaling	6
3 MEETSYSTEEM	7
3.1 Opstelling	7
3.2 Aanpassing	7
3.3 Meetsektie	8
4 VANADIUM PENTOXIDE	10
4.1 Eigenschappen	10
4.2 Aanmaak	10
4.3 Viskositeits meting	11
4.3.1 Voorbereiding van meting	12
4.3.2 Referentie meting	14
4.3.3 Viskositeits meting vanadium pentoxide	14
5 INSTELLING OPSTELLING	18
5.1 Fysiologische dimensionering	18
5.2 Pompen	19
5.2.1 Stationaire pomp	19
5.2.2 Puls pomp	20
5.2.2.1 Aansturing puls pomp	20
5.2.2.2 Puls pomp problemen	22
6 METINGEN	26
6.1 Video opname	26
6.2 Stromingsverloop	26

6.3 Resultaten	27
7 KONKLUSIE EN AANBEVELINGEN	31
Bijlage :	33-41
grafiek 1, viskositeit water zonder beschermlaag	33
grafiek 2, viskositeit water met beschermlaag	34
grafiek 3, viskositeit olie met beschermlaag	35
grafiek 4, stromingsverloop met speling van pulspomp	36
grafiek 5, stromingsverloop na spelingskorrektie	37
grafiek 6, stromingsverloop opgevoerde pulshoogte	38
grafiek 7, ijking van gebruikte flowsensor	39
figuur A, lokaties van meetsektie	40
tabel 1, overzicht indeling videoband	41
OVERZICHT GEBRUIKTE APPARATUUR	42
LITERATUUROPGAVE	43

1 INLEIDING

1.1 Doel van het onderzoek

De opzet van dit onderzoek is om een bestaande stromingsopstelling te testen en te verbeteren, waarna deze gebruikt gaat worden voor het verrichten van stromingsdubbele breking visualisaties en in een later stadium ook voor LDA metingen. Dit onderzoek maakt deel uit van het atherosclerose project.

1.2 Atherosclerose

In het atherosclerose project wordt door de vakgroep fundamentele werktuigkunde (WFW) onderzoek gedaan naar de stroming in de halsslagadervertakking, zie figuur 1.

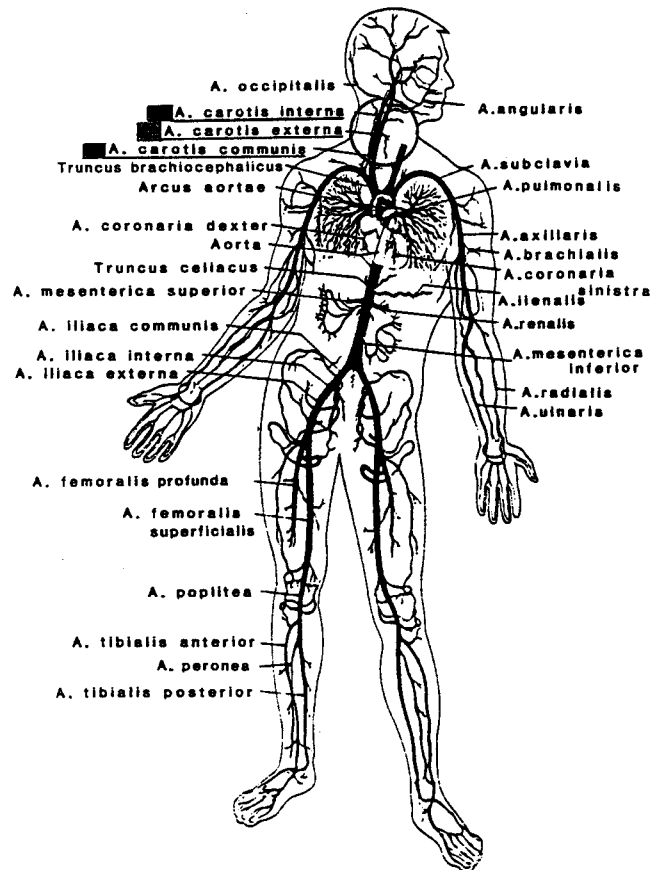


fig.1

belangrijkste arteriën van menselijk lichaam (Liepsch)

De geometrie van de bifurkatie (vertakking) is bepaald door anatomisch onderzoek aan 100 exemplaren van de betreffende ader [1]. In figuur 2 is hiervan een tekening te zien.

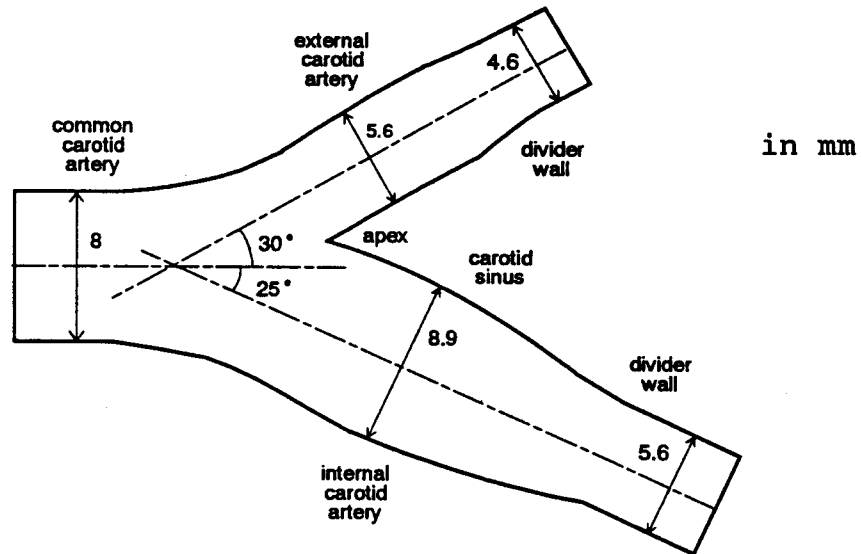


fig.2

geometrie van halsslagader bifurkatie (Balasubramanian)

Uit de klinische praktijk is het bekend dat zich aan de buitenwand van de interna (non divider wall) stenoses (vernauwingen) kunnen ontwikkelen. Deze kunnen pas in een vergevorderd stadium gediagnostiseerd worden. Het atherosclerose project heeft daarom ook een tweeledig doel:

- het beschrijven van de stroming in een gezonde vertakking;
- het zoeken naar flowverstoringsparameters geïnduceerd door vernauwingen.

Deze flowverstoringsparameters kunnen dan gebruikt worden bij de vroegtijdige diagnose van milde stenoses. Dit deelonderzoek valt binnen de tweede doelstelling.

2 THEORIE

2.1 Stromingsdubbele breking

Dubbele breking is een eigenschap van optisch anisotroop materiaal. Bij bepaalde vloeistoffen wordt deze anisotropie veroorzaakt door langgerekte molekulen, welke in oplossing zijn gebracht. Deze molekulen worden georiënteerd door de schuifspanningen, welke optreden ten gevolge van de snelheidsgradiënten in het stromingskanaal. De voorkeursrichting welke ten gevolge hiervan ontstaat, heeft de optische anisotropie tot gevolg. De brekingsindices zullen daarom in verschillende richtingen verschillend zijn. Dit fenomeen wordt stromingsdubbele breking genoemd. Wanneer er licht door zo'n materiaal gestuurd wordt zullen er faseverschillen ontstaan als gevolg van de verschillen in brekingsindex, welke met behulp van polarisatoren zichtbaar gemaakt kunnen worden als interferentie patronen.

2.1.1 Brekingsindex

In isotroop materiaal is de brekingsindex uniek, er is geen onderscheid naar richting. Bij anisotrope media is de brekingsindex richtingsafhankelijk en kan ontwikkeld worden naar eigenvektoren met bijbehorende eigenwaarden. De optische as wordt nu gekozen in de richting van een eigenvektor van de brekingsindex. Als gevolg van de richtingsafhankelijke brekingsindex zal er een faseverschil ontstaan tussen de verschillende componenten, welke afhankelijk is van de indringdiepte. Indien de brekingsindex als complexe grootte beschouwd wordt kan voor een E.M.-golf geschreven worden [3]:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i\omega(t - \frac{n}{c}z)} \quad (1)$$

$$n = n' - in'' \quad (2)$$

Hierin zorgt het reële deel van de brekingsindex n' voor een faseverschuiving en het imaginaire deel n'' voor een demping. De dubbel breking (optische aktiviteit) van een

vloeistof wordt gegeven door :

$$\Delta n = n_x - n_y \quad (3)$$

Hierin zijn n_x respektievelijk n_y brekingsindices behorende bij optische x- respektievelijk y-as.

In deze formule zit een lineaire afhankelijkheid voor de concentratie van de opgeloste molekulen [3].

2.1.2 Fasedraaiing

Indien zich in een dubbelbrekende vloeistof licht voortplant zal er een fasedraaiing ontstaan. Door de polarisatierichting van de polarisatoren 90° ten opzichte van elkaar te draaien kunnen interferentie patronen zichtbaar gemaakt worden (zie ook fig.4 pag.8). Het doorgelaten licht heeft een fasedraaiing van $(n+\frac{1}{2})\pi$ doorlopen. Licht dat geheel uitdooft kan onderverdeeld worden in 2 categorieën:

-isochromaten: fasedraaiing is $n\pi$;

-isoklienen : geen fasedraaiing.

Isoklienen kunnen optreden doordat de opgeloste molekulen welke de dubbele breking veroorzaken exakt parallel gericht zijn aan een van de polarisatoren. Het gepolariseerde licht ervaart dan slechts 1 komponent van de brekingsindex, waardoor geen fasedraaiing kan optreden. Isoklienen zijn eenvoudig van isochromaten te onderscheiden door het polarisator stelsel over een hoek te verdraaien. De donkere lijnen welke verdwijnen zijn isoklienen, de isochromaten blijven op dezelfde plaats.

2.2 Viskositeit

Omdat de viskositeitsbepaling een belangrijke rol speelt in dit onderzoek zal hier een summier overzicht gegeven worden van de belangrijkste begrippen van de dynamische meetmethode.

2.2.1 Dynamische meting

Het belangrijkste niet stationaire ingangssignaal voor de opgelegde afschuiving is het periodiek signaal, in complexe notatie:

$$\gamma(t) = \gamma_0 e^{i\omega t} \quad (4)$$

De afschuifsnelheid wordt dan:

$$\dot{\gamma}(t) = i\omega\gamma_0 e^{i\omega t} \quad (5)$$

De uitwijking van het ingangssignaal γ_0 moet klein zijn, hierdoor is er sprake van een lineaire dynamische meting [6].

Voor de afschuifspanning geldt dan:

$$\tau(t) = \tau_0 e^{i(\omega t + \delta)} \quad (6)$$

Hieruit blijkt dat de afschuifsnelheid en -spanning niet noodzakelijk met elkaar in fase zijn.

De complexe viskositeit η^* wordt nu gedefinieerd als [6]:

$$\eta^* = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau_0 e^{i(\omega t + \delta)}}{i\omega\gamma_0 e^{i\omega t}} = \frac{-i\tau_0}{\omega\gamma_0} e^{i\delta} = \frac{\tau_0}{\omega\gamma_0} (\sin\delta - i\cos\delta) = \eta' - i\eta'' \quad (7)$$

η' : dynamische viskositeit

η'' : dynamische elasticiteit

Indien de verlieshoek $\delta=0$ is het materiaal zuiver elastisch, bij $\delta=\pi/2$ zuiver viskeus.

2.2.2 Cox-Merz regel

Er bestaat een empirische regel welke een relatie legt tussen lineair dynamische en stationaire metingen, de Cox-Merz regel. De regel luidt [6]: de norm van de complexe viskositeit is gelijk aan de viskositeit bij overeenkomstige waarden van hoekfrequentie en afschuifsnelheid:

$$\eta(\dot{\gamma}) = |\eta^*(\omega)|_{\omega=\dot{\gamma}} = \eta'(\omega) \sqrt{1 + \left(\frac{\eta''}{\eta'}\right)^2} \Big|_{\omega=\dot{\gamma}} \quad (8)$$

Voor zuivere Newtonse stoffen gaat (8) over in:

$$\eta(\dot{\gamma}) = |\eta^*(\omega)|_{\omega=\dot{\gamma}} = \eta'(\omega)|_{\omega=\dot{\gamma}} \quad (9)$$

Formule 9 kan gebruikt worden om te controleren of de meting in het lineaire gebied heeft plaatsgevonden.

2.3

Schaling

Omdat de meting plaatsvindt aan een schaalmodel is het belangrijk dat het model een ware afspiegeling van de fysiologische omstandigheden vormt. Aan deze voorwaarde wordt voldaan als de dimensieloze kengetallen welke het probleem kunnen beschrijven van het ware model (halsslagader) en schaalmodel (opstelling) gelijk zijn. De 2 bepalende dimensieloze kengetallen voor dit onderzoek zijn:

- Getal van Reynolds (Re)

$$Re = \frac{\rho \bar{v} D}{\eta} \quad (10)$$

Hierin is ρ de massadichtheid, \bar{v} de gemiddelde snelheid over de doorsnede, D de diameter en η de dynamische viskositeit.

- Womersley parameter (α)

$$\alpha = R \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \quad (11)$$

Hierin is R de straal, ω de hoekfrequentie en ν de kinematische viskositeit.

De Womersley parameter geeft de verhouding aan van instationaire versnelling tot viskeuze kracht. Met behulp van deze 2 dimensieloze kengetallen kan het schaalmodel gedimensioneerd worden (zie verder § 5.1).

3 MEETSISTEEM

3.1 Opstelling

Er is uitgegaan van een bestaande opstelling welke verbeterd is, om een beter effect waar te nemen van de stromingsdubbele breking. De opstelling wordt schematisch weergegeven in figuur 3.

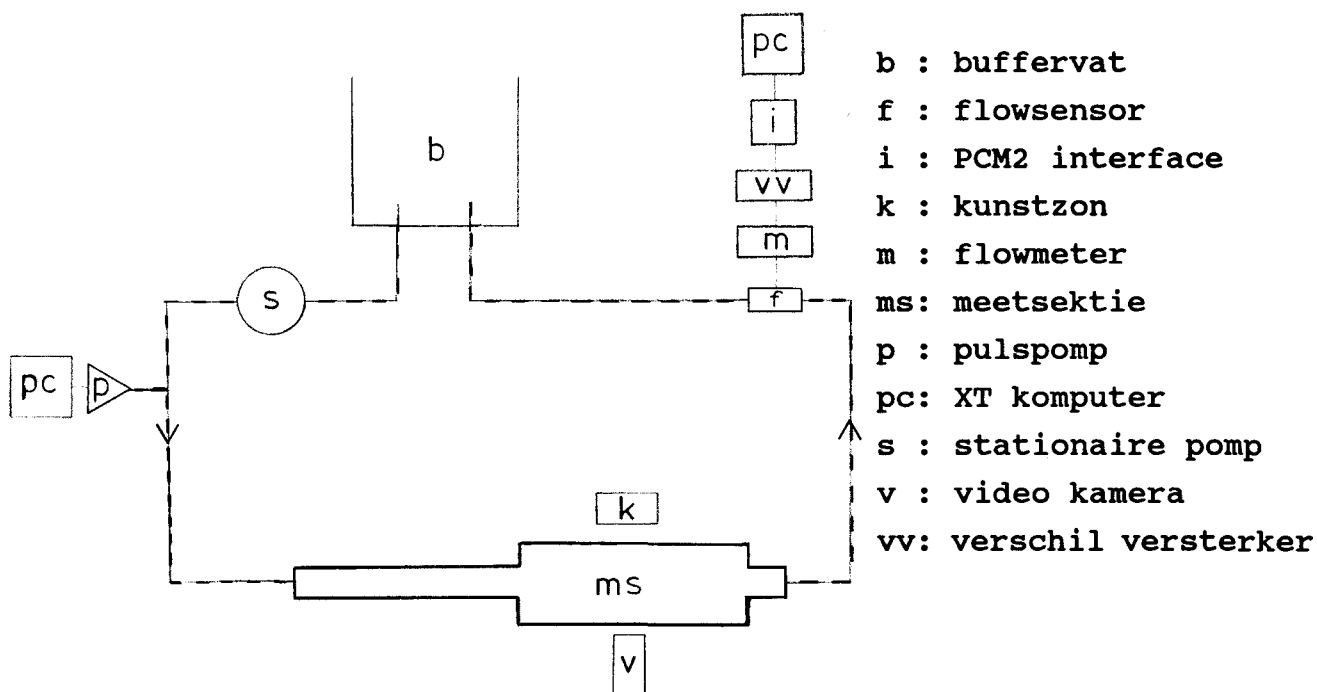


fig.3
meetopstelling

De verschillende componenten van de opstelling zijn met elkaar verbonden door middel van gepantserde slangen. Hierdoor wordt de volumeverandering als gevolg van het opgelegde drukverschil tot een minimum beperkt (geringe compliantie).

3.2 Aanpassing

Het slangenstelsel is ingekort en het buffervat is voorzien van glazen kogeltjes, hierdoor is het totaal volume van de opstelling aanzienlijk gereduceerd. Dit is van belang omdat de toegepaste modelvloeistoffen een belasting voor het

milieu opleveren, dit is hierdoor tot een minimum beperkt. Ook zijn alle flexibele stukjes slang uit de opstelling verwijderd, om de kompliantie te reduceren. De flowsensor is op een andere plaats in de opstelling gebracht, vlak achter de meetsektie. Voorheen zat deze tussen de stationaire- en instationaire pomp, hetgeen een minder betrouwbare indruk van het stromingsverloop in de meetsektie gaf.

3.3

Meetsektie

De opbouw van de meetsektie is weergegeven in figuur 4.

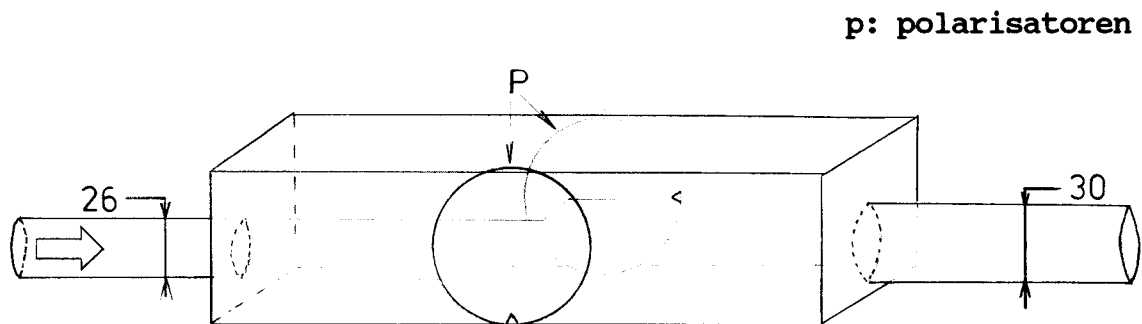


fig.4
meetsektie (in mm)

In dit onderzoek wordt bestudeerd welke stromingsfluctuaties optreden achter milde stenoses (25% oppervlakte reductie). Dit wordt gesimuleerd door een (sterk) vereenvoudigd model, zijnde 2 perspex buizen met verschillende diameters ($(26/30)^2 = 0,75$). Om de lenswerking van de buis te beperken is er een bak om de buis geplaatst welke met water gevuld is. Hierdoor is de brekingsindex overgang kleiner geworden en dientengevolge ook de

lenswerking. De lenswerking van de dwarsdoorsnede van de meetsektie is geïllustreerd in figuur 5.

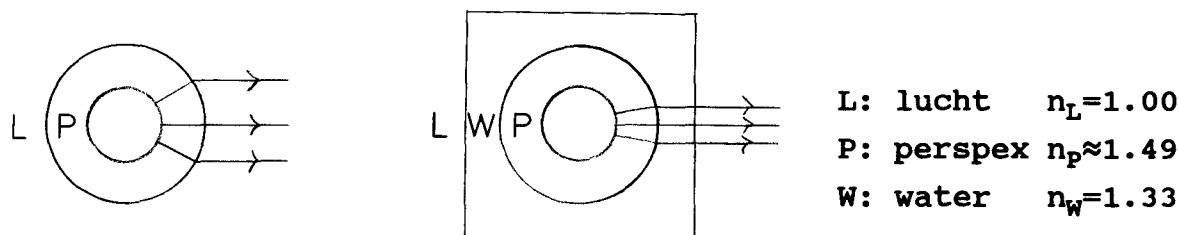


fig.5

lenswerking dwarsdoorsnede meetsektie

De overgang l-w veroorzaakt geen afbuiging omdat het licht loodrecht op het vlak valt. De kwaliteit van de visualisatie is zonder bak wel beter maar dit weegt niet op tegen het nadeel van de grotere lenswerking. Deze grote lenswerking heeft tot gevolg dat de interessante gebieden, dichtbij de boven- en onderwand, niet zichtbaar zijn. Voor de belichting wordt gebruik gemaakt van een kunstzon welke de meetsektie indirect verlicht. Om een mooie lichtspreading te krijgen wordt het licht via een boogvormig wit papier op de meetsektie geprojecteerd. Hierdoor is de storende invloed van schaduwlijnen geëlimineerd. Omdat de lichtsterkte buiten het polarisator stelsel erg groot is wordt dat deel van de meetsektie met behulp van zwart plastic geblinderd. Hierdoor wordt voorkomen dat het visualisatiegebied onderbelicht raakt.

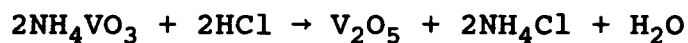
4 VANADIUM PENTOXIDE

4.1 Eigenschappen

Vanadium Pentoxide (V_2O_5) is een dubbelbrekende vloeistof waar met grote zorgvuldigheid mee gewerkt dient te worden. De optisch actieve vloeistof is namelijk zeer gevoelig voor verontreinigingen. Ook dient direkt kontakt met metaal vermeden te worden. Alleen dan kan degeneratie van de vloeistof voorkomen worden om zodoende gebruik te kunnen maken van de dubbelbrekende eigenschap. Alle spullen welke gebruikt worden tijdens de bereiding van vanadium pentoxide moeten vooraf schoongemaakt en afgespoeld worden met gedestilleerd water. De verontreinigingen in leidingwater hebben al desastreuze gevolgen voor de dubbelbrekende werking. Gedestilleerd (geen gedemineraliseerd) water kan gehaald worden bij organische chemie, vloer 9 van Scheikunde Hoog.

4.2 Aanmaak

Het aanmaken van dubbelbrekend vanadium pentoxide gaat volgens recept welke afkomstig is van D.Liepsch van de Fachhochschule in München. De chemische reactie verloopt als volgt:



Het ammonium vanadaat (NH_4VO_3) dient verpulverd te worden, waardoor het reaktie oppervlak vergroot wordt. Hieraan wordt 1-normaal zoutzuur (HCl) toegevoegd. Indien de zoutzuur oplossing zelf aangemaakt wordt moet hiervoor gedestilleerd water gebruikt worden. Voor 1 liter dubbelbrekende vloeistof moet 1 gram NH_4VO_3 en 10 cc HCl genomen worden. Gebruik voor de bereiding een bekerglas en glazen roerstaafje.

Tijdens de reactie zal het van oorsprong witte poeder van kleur veranderen en oranje worden. Hierdoor kan gemakkelijk gecontroleerd worden of het poeder volledig gereageerd

heeft. Pas op voor klontjes welke zich kunnen vormen; deze zijn aan de buitenkant oranje maar als ze met het roerstaafje geplet worden blijkt dat de binnenkant nog wit is. Hieruit valt op te maken dat de reactie nog niet volledig was, hetgeen de zuiverheid van de oplossing niet ten goede komt.

Als aan 1 gram NH_4VO_3 10 cc 1-normaal HCl wordt toegevoegd is het HCl in overmaat aanwezig, alle NH_4VO_3 zal daarom omgezet worden [$10 \text{ cc 1-normaal HCL} = 10^{-2} \text{ mol HCl} = 10^{-2} \text{ mol NH}_4\text{VO}_3 = 1,17 \text{ gram NH}_4\text{VO}_3$].

Laat de gevormde suspensie bezinken en giet de overtollige vloeistof af. Hierna wordt het sediment enkele malen gespoeld met warm gedestilleerd water totdat het water rood begint te kleuren. Als vuistregel kan gebruikt worden dat dit optreedt na ongeveer 3 spoelbeurten met gedestilleerd water gelijk aan de hoeveelheid HCl welke was toegevoegd. Nu kan het gespoelde sediment al roerend aangelengd worden met 1 liter warm gedestilleerd water. Binnen enkele uren is het poeder volledig opgelost en begint dubbelbrekend te worden. Na 2 dagen is de vloeistof klaar voor gebruik.

De aldus ontstane oplossing bevat ongeveer 0,78 gram V_2O_5 [$1 \text{ gram NH}_4\text{VO}_3 \hat{=} 1/117 \text{ mol NH}_4\text{VO}_3 \hat{=} 1/(2 \cdot 117) \text{ mol V}_2\text{O}_5 \hat{=} 0,78 \text{ gram V}_2\text{O}_5$], hetgeen overeen komt met een concentratie van 0,78 massa-%.

De vloeistof kan het beste in een afgesloten fles bewaard worden om verontreinigingen te voorkomen.

4.3 Viskositeits meting

Omdat er gewerkt wordt met een schaalmodel, is het van belang om de viskositeit van de dubbelbrekende vloeistof te bepalen. De viskositeit van vanadium pentoxide is bepaald met de Rheometrics RFS II welke in het polymeerlab staat. Er is gekozen voor een plaat-kegel meting, waardoor er een vrijwel uniforme afschuifsnelheid heerst over de straal van de plaat-kegel geometrie. De diameter van de kegel is zo groot mogelijk gekozen (50 mm) omdat het hier een laag viskeuze stof betreft.

4.3.1 Voorbereiding van meting

De opnemers van het meetinstrument zijn van titanium zodat er niet direkt gemeten kan worden. Immers het vanadium pentoxide zal dan met het metaal in kontakt komen en instantaan degenereren. Dit is gemakkelijk waar te nemen doordat de rode vloeistof verandert in een gele vloeistof waarin zich rode slierten bevinden. Indien geen maatregelen getroffen worden is de meting in zijn geheel niet reproduceerbaar en bovendien wordt ten onrechte de indruk gewekt dat de vloeistof eigenschappen van "shear thinning" vertoont.

De opnemers dienen van een laag voorzien te worden waardoor het metaal afgeschermd is van de vloeistof. De laag moet gemakkelijk aan te brengen en te verwijderen zijn, zonder de opnemers te beschadigen. Voor deze metingen is gebruik gemaakt van de volgende spray: Scotch Fix (mat) 3M.

Die delen van de opnemers welke niet in direkt kontakt met de vloeistof komen moeten afgeplakt worden voordat er gesprayed wordt om zodoende onnodige bewerking met het oplosmiddel te voorkomen. Als oplosmiddel wordt aceton genomen. De spray kan het beste horizontaal gespoten worden zodat alleen de fijne nevel op de opnemer komt, de zwaardere klodders komen er dan niet op terecht. Figuur 6 toont de juiste stand van de opnemer tijdens het sprayen.

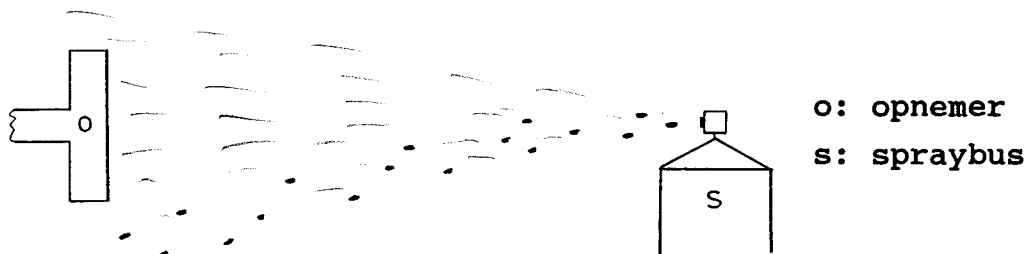


fig.6

juiste stand opnemer tijdens sprayen

Het is van belang om een zo glad mogelijke film aan te brengen, die bovendien dekkend maar niet te dik is.

Hierdoor kunnen afwijkingen van de meetgegevens tot een minimum beperkt worden. Figuur 7 geeft een idee van de invloed van de beschermlaag op de geometrie van de opnemers.

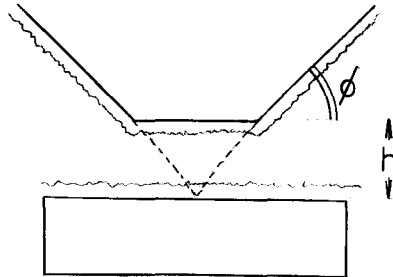


fig.7
geometrie opnemers

De hoek ϕ is hier sterk overdreven getekend, deze bedraagt in werkelijkheid 0,02 rad. De afstand h tussen de plaat en de afgeknotte kegel is 45,3 μm . De positie van deze afgeknotte kegel is gelijk aan de positie van een volledige kegel als deze de plaat net zou raken. Deze afmetingen in ogenschouw nemende is het belang van een dunne egale beschermlaag evident.

Om betrouwbare metingen te verrichten welke reproduceerbaar zijn moet aan de volgende punten voldaan worden.

- Er dient voldoende vloeistof tussen de plaat en kegel aangebracht te worden; er zal dan een bolle vloeistofrand zichtbaar zijn zoals in figuur 8 is weergegeven.

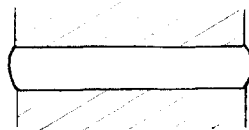


fig.8
vloeistofrand tijdens meting

Indien er te weinig vloeistof tussen zit zal er de

vloeistofrand hol zijn. Bij deze meting is de invloed van de buitenkant (grote straal) veel groter dan die van de binnenkant (kleine straal) op het uiteindelijke meetresultaat. Daarom is het belangrijk dat juist aan de rand geen lucht maar ook vloeistof zit.

- Tijdens de meting moet steeds gecontroleerd worden of het minimaal vereiste koppel gehaald wordt. De komputer geeft aan wanneer dit niet het geval is.

4.3.2 Referentie metingen

Allereerst is de invloed van de beschermlaag op de meting bepaald door controle metingen met water te verrichten.

Er zijn 2 metingen gedaan zonder beschermlaag (zie grafiek 1 bijlage) en 2 met beschermlaag (zie grafiek 2, bijlage). Hieruit valt op te maken dat de invloed van de beschermlaag te verwaarlozen is. Hierbij zijn de meetwaarden voor een hoekfrequentie $\omega < 1$ rad/s onbetrouwbaar omdat het minimale koppel niet bereikt is. Ook is het een algemeen aanvaard gebrek van het meetinstrument dat het eerste geregistreeerde meetpunt onbetrouwbaar is, in deze en verdere metingen voor $\omega = 100$ rad/s.

Ook is een controle meting verricht met een soort snijolie zie grafiek 3 uit bijlage, om te controleren of er niet altijd een viscositeit van de orde 10^{-3} Pa·s gemeten wordt als gevolg van de aangebrachte beschermlaag. Dit wordt door de meting niet bevestigd.

Deze controle metingen tonen aan dat de beschermlaag een verwaarloosbare invloed op de meetresultaten heeft.

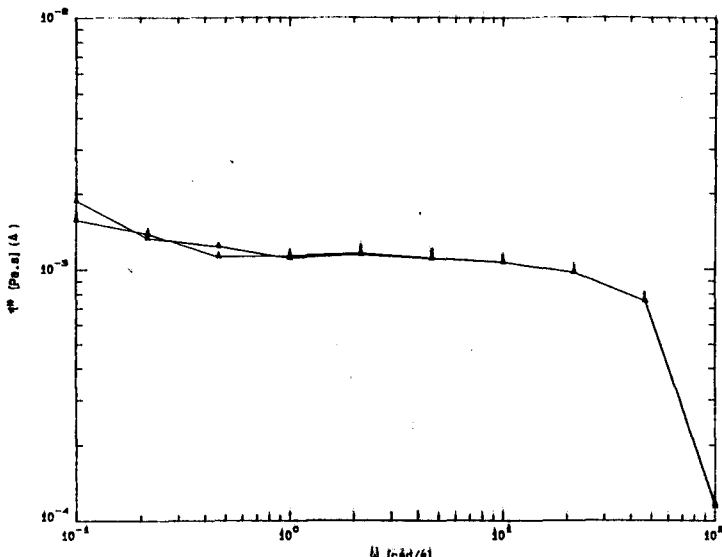
4.3.3 Viskositeits meting vanadium pentoxide

De bepaling van de viscositeit van vanadium pentoxide heeft in het verleden problemen met zich mee gebracht. De metingen waren in het geheel niet reproduceerbaar, hetgeen de betrouwbaarheid niet ten goede komt. De metingen welke nu verricht zijn, zijn zeer reproduceerbaar.

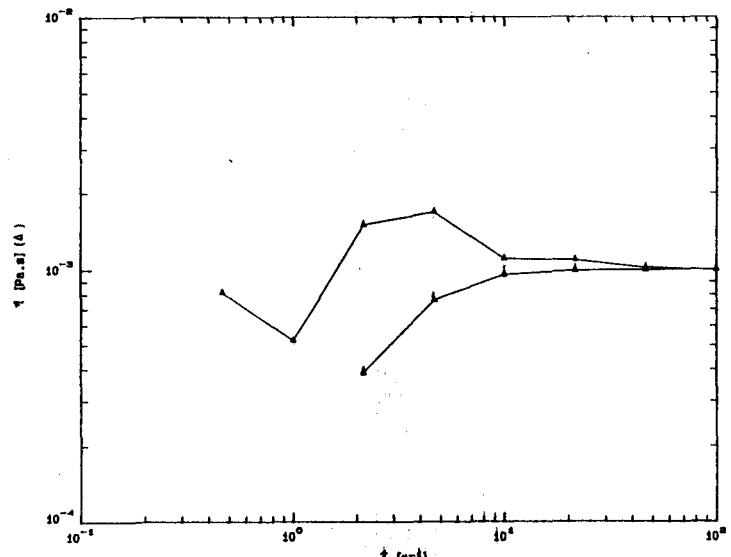
Een verrassend resultaat is dat deze oplossing vanadium pentoxide van 0,78 massa-% zich volkomen Newtons gedraagt.

Er is een "frequency sweep" meting gedaan (dynamische meting) voor $0,1 \leq \omega \leq 100$ rad/s bij een temperatuur van 20°C . In figuur 9 is goed te zien dat de reproduceerbaarheid voor $1 \leq \omega \leq 100$ rad/s hoog is. Ook hier zijn de meetwaarden voor $\omega < 1$ rad/s niet betrouwbaar vanwege het te lage koppel. Vanadium pentoxide gedraagt zich Newtons met een viskositeit $\eta^* \approx 10^{-3}$ Pa·s.

Ook is er een "strain sweep" meting gedaan (statische meting) voor $0,1 \leq \dot{\gamma} \leq 100$ 1/s bij 20°C . Uit deze meting, zie figuur 10, valt op te maken dat de empirische regel van Cox-Merz stand houdt. Dit geldt alleen voor afschuifsnelheid $\dot{\gamma} > 10$ 1/s, daar is het koppel voldoende hoog. Er is af te lezen dat de eindwaarde van de viskositeit η overeenkomt met de viskositeit η^* van de dynamische meting. Hieruit kan gekonkludeerd worden dat de metingen in het lineaire gebied plaats gevonden hebben (zie ook § 2.2.3).

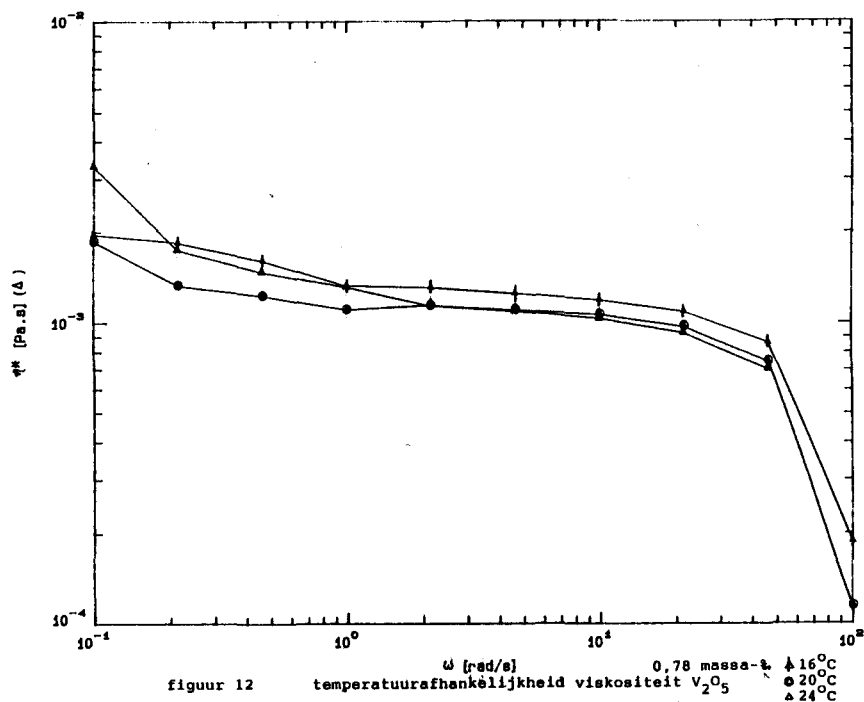
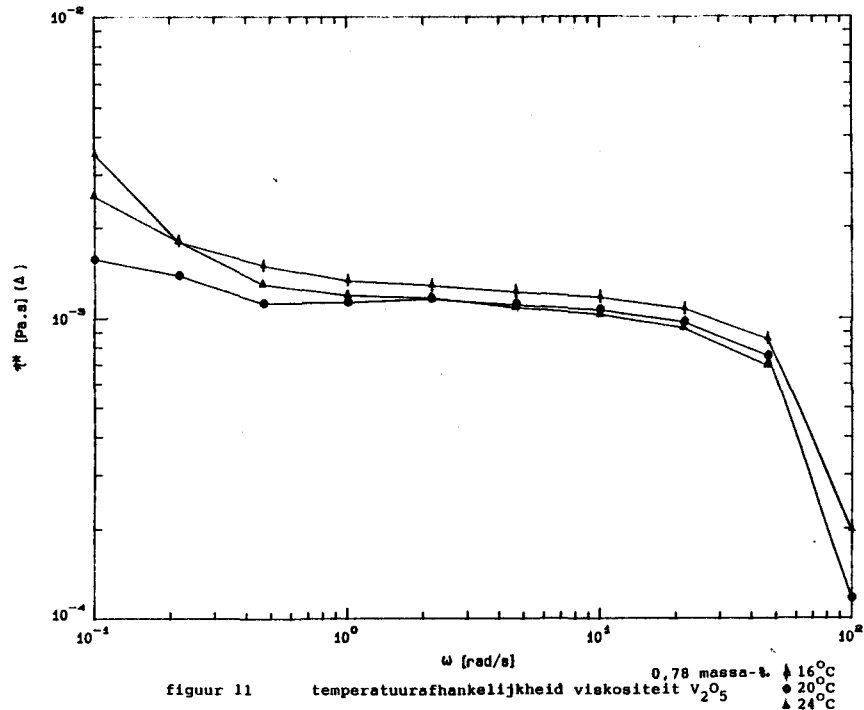


figuur 9 dynamische viskosititeit V_2O_5 $T=20^\circ\text{C}$ 0,78 massa-%



figuur 10 statische viskosititeit V_2O_5 $T=20^\circ\text{C}$ 0,78 massa-%

De temperatuur afhankelijkheid van de viskositeit is gemeten door een "frequency sweep" uit te voeren bij temperaturen van 16, 20 en 24°C. De temperatuur afhankelijkheid is gering zie figuur 11, de kurven van 20 en 24°C liggen dichtbij elkaar, terwijl die van 16°C duidelijk iets hoger ligt. De meting is ook reproduceerbaar zie figuur 12 waardoor de afwijking van de viskositeit bij 16°C een essentieel gegeven is en niet berust op een toevallige meetfout.



De gedane metingen worden bevestigd door [4], vanadium pentoxide gedraagt zich Newtons bij lage concentraties. Bij hogere concentraties gaat dit gedrag over in shear thinning, zoals te zien in figuur 13. De fundering van de in de figuur gespecificeerde percentages is onduidelijk.

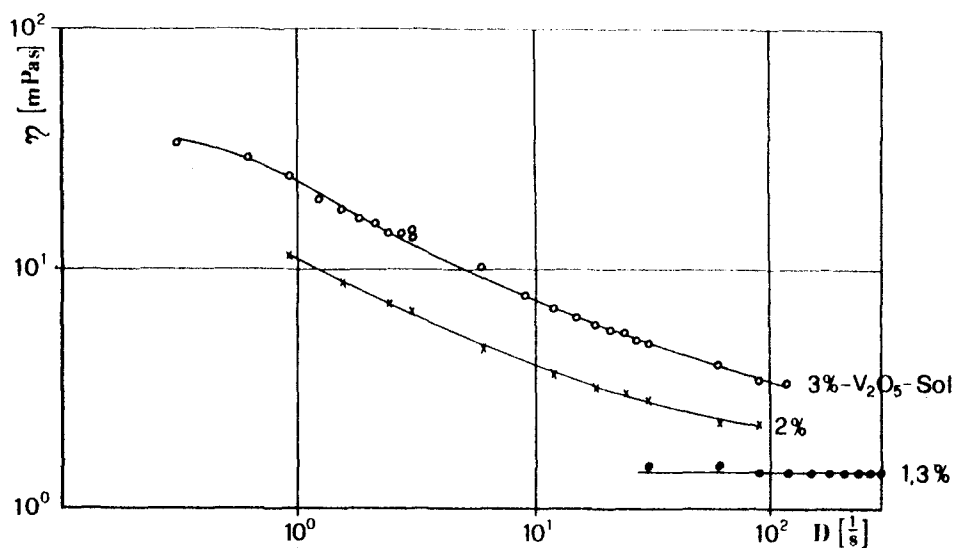
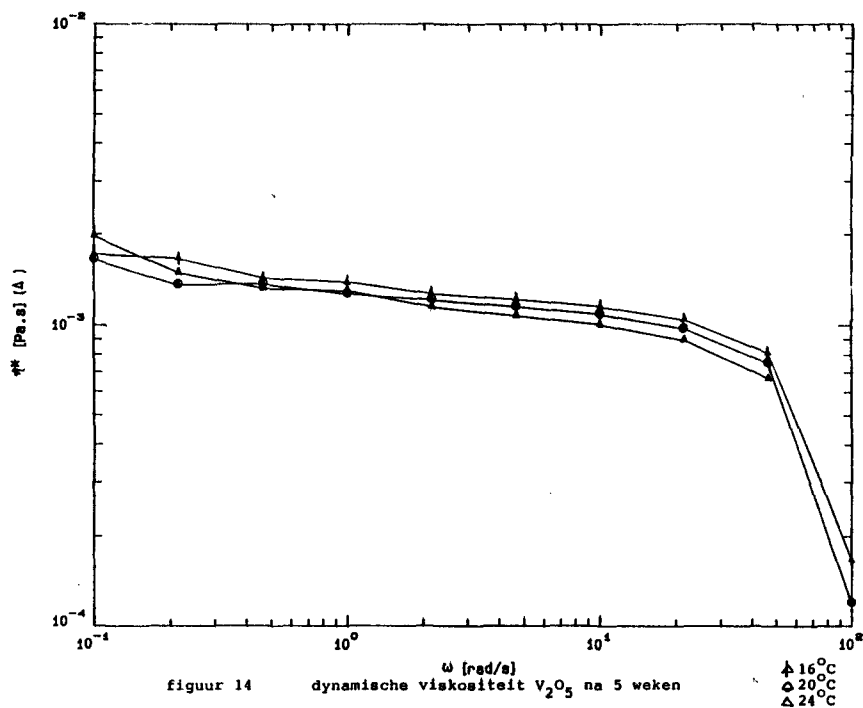


fig.13

viskositeitsverloop vanadium pentoxide (Liepsch)

Om na te gaan of de viskositeit van de dubbelbrekende vloeistof verandert na verloop van tijd is de meting na 5 weken herhaald. De viskositeit is stabiel gebleven gedurende de periode zie figuur 14.

figuur 14 dynamische viskositeit V_2O_5 na 5 weken

▲ 16°C
△ 20°C
△ 24°C

5 INSTELLING OPSTELLING

5.1 Fysiologische dimensionering

Als uitgangspunt voor de fysiologische puls is het stromingsverloop in de halsslagader genomen zoals te zien is in figuur 15 [8].

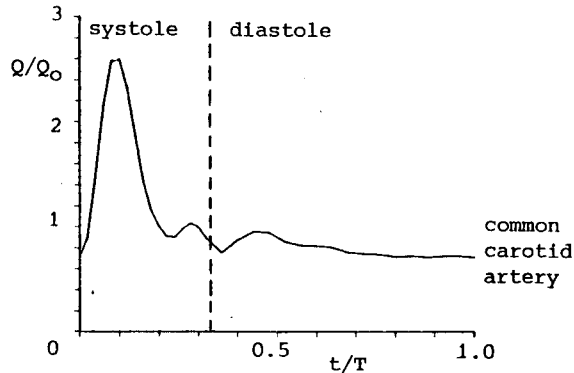


fig.15

stromingsverloop in halsslagader

Hierbij geldt dat de gemiddelde stromingssnelheid een Reynoldswaarde van $Re=250$ vertegenwoordigt en fluktueert tussen 175 en 650. Voor de tijdschaling wordt de Womersley parameter $\alpha=4$ genomen, welke gebaseerd is op een hartcyclus tijd van 1 seconde.

Deze gegevens laten zich vertalen naar de volgende waarden voor het schaalmodel:

- voor de stroomsnelheid geldt (10):

$$\bar{v} = \frac{\eta}{\rho D} Re \quad (12)$$

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

$$\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$D = 26 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$Re=650 \rightarrow \bar{v} = 2,50 \cdot 10^{-2} \text{ m/s} \rightarrow \Phi = 0,796 \text{ l/min}$$

$$Re=175 \rightarrow \bar{v} = 6,73 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} \rightarrow \Phi = 0,214 \text{ l/min}$$

- voor de periodetijd geldt (11):

$$T = \frac{2\pi}{v \left(\frac{\alpha}{R}\right)^2} \quad (13)$$

$$v = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$R = 13 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\alpha = 4 \rightarrow T = 66 \text{ s.}$$

De vereenvoudigde fysiologische puls wordt nu voorgesteld zoals in figuur 16 is weergegeven.

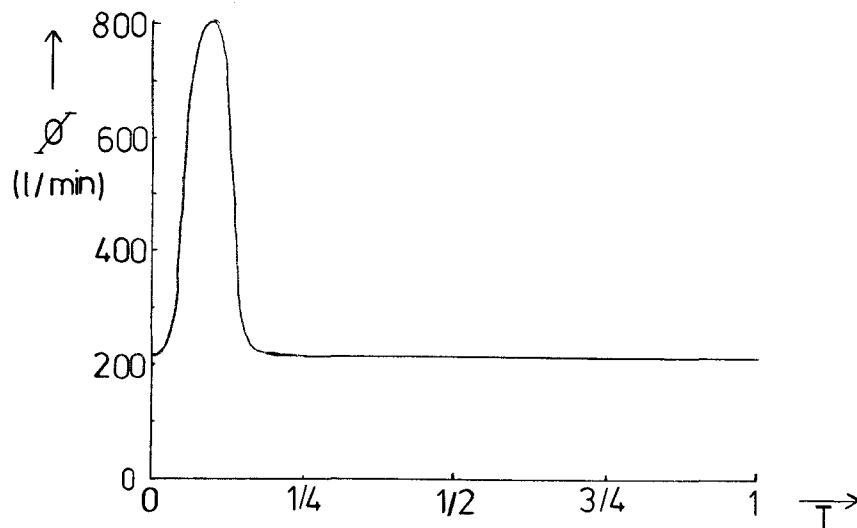


fig.16

vereenvoudigde fysiologische puls

Hierbij zijn de kleine pulsjes in de stroming verwaarloosd, tevens is de systole-diastole verhouding 1:4 gekozen. Als funktievorm van de piek is gekozen voor $\sin^2 x$, omdat deze mooi met 1^e afgeleide aansluit op de stationaire component.

5.2 Pompen

5.2.1 Stationaire pomp

In opstelling zijn 2 pompen aanwezig, een zorgt voor de stationaire component van de stromingsfunctie (stationaire pomp) terwijl de andere pomp zorgt voor de gesuperponeerde

puls (instationaire- of pulspomp). De stationaire pomp heeft als bijzonderheid dat de pompkop inwendig geheel uit kunststof opgebouwd is. Dit is noodzakelijk omdat de gebruikte modelvloeistof niet tegen metaal bestand is. De pomp mag niet droog draaien, voor de smering wordt gebruik gemaakt van de rondgepompte vloeistof. De pomp levert een erg stabiel debiet, welke traploos regelbaar is tussen 0 en 5 l/min.

5.2.2 Pulspomp

De pulspomp zorgt voor de korte piek in de stromingsfunctie welke het systolische deel van de fysiologische puls vertegenwoordigt. De pulspomp bestaat uit een cilinder welke afgesloten wordt door een beweegbare zuiger. Hierdoor kan het cilindervolume veranderd worden waardoor er vloeistof aan het model onttrokken of toegevoegd wordt. Op deze manier wordt er een instationaire komponent op de stationaire komponent gesuperponeerd, dit resulteert in de gewenste fysiologische puls.

5.2.2.1 Aansturing pulspomp

De aansturing van de pulspomp kan in dit onderzoek niet meer met de standaard bijgeleverde funktiegenerator gedaan worden omdat de hier benodigde periodetijd veel te lang is. Er moet daarom een methode ontwikkeld worden om de pulspomp direkt aan te sturen met een signaal welke de zuigerpositie voorschrijft. De stand van de keuzeschakelaar op de "servo power amplifier" moet toch op de stand "velocity" staan in plaats van "position" omdat anders de zuiger een sterk oscillerend gedrag vertoont. Nader onderzoek hiervan heeft uitgewezen dat de keuzeschakelaar verkeerd aangesloten is. Er dient de stand geselecteerd te worden die niet gewent is, in dit geval "velocity" omdat de positie van de zuiger voorgeschreven wordt.

Allereerst is de standaard pompkop weer gemonteerd omdat deze een voldoende groot slagvolume heeft. Vervolgens is er uitvoerig geëxperimenteerd met de signaalvorm om de zuiger

te sturen. Het signaal dat gebruikt wordt om de zuiger aan te sturen hoeft niet noodzakelijk overeen te komen met de hierdoor opgewekte stroming in het schaalmodel, hiertussen zit de overdrachtsfunctie van de pomp.

Uiteindelijk is proefondervindelijk vastgesteld dat de stuurfunctie weergegeven in figuur 17 in hoge mate de gewenste fysiologische puls oplevert.

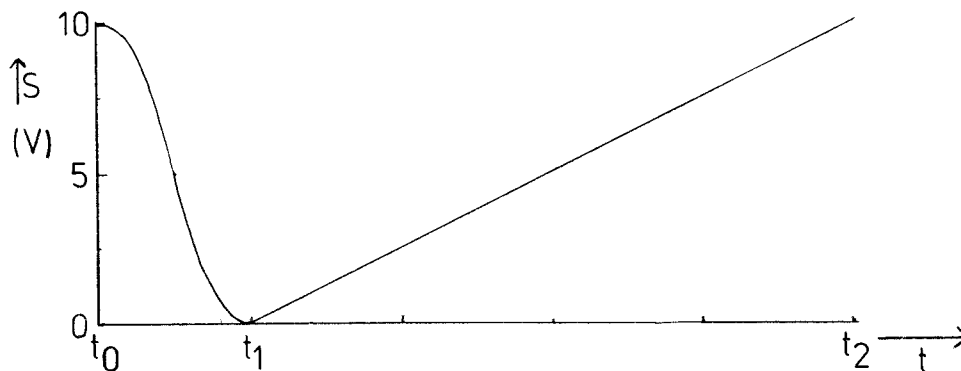


fig.17
stuurfunctie pulspomp

Deze stuurpuls wordt met behulp van het computer programma asyst gegenereerd en is te verdelen in 2 stukken:

$t_0 \leq t \leq t_1$: vorm $\cos x$ voor $0 \leq x \leq \pi$

$t_1 \leq t \leq t_2$: rechte lijn met positieve helling.

Het programma berekent de puls nadat er antwoord is gegeven op de volgende vragen:

-periodetijd van de gehele stuurpuls [66]

-periodetijd van cosinus [26]

-overgangstijdstip van cosinus naar rechte lijn [13]

De waarden tussen haakjes leveren de gewenste fysiologische puls.

Tevens wordt er aan het begin van de stuurpuls ($t=t_0$) een triggersignaal gegenereerd, deze wordt gebruikt om stromingsmetingen over verschillende perioden te synchroniseren. Hierdoor is het mogelijk om verschillende metingen te middelen om zodoende de invloed van storingspieken te minimaliseren zonder te filteren.

De rustpositie van de zuiger komt overeen met een stuurspanning van 5 V.

Het 1^e deel van de stuurpuls ($t_0 \leq t \leq t_1$) zorgt voor de gehele piek op de fysiologische puls, zowel het stijgende als het dalende deel. Het maximum van de fysiologische puls wordt bereikt als ds/dt het meest negatief is. Op dat moment wordt namelijk de grootste hoeveelheid vloeistof per seconde het schaalmodel in geperst, waardoor het debiet een maximum bereikt.

Het 2^e deel van de stuurpuls ($t_1 \leq t \leq t_2$) wordt de zuiger met konstante snelheid teruggebracht naar de uitgangspositie. Deze snelheid is zo gekozen dat exakt na het verstrijken van de periodetijd ($t=t_2$) de zuiger op de beginstand staat. Op deze wijze heeft de teruggaande beweging van de zuiger geen storende invloed op de stroming. Uiteraard moet de stationaire pomp wel het debietdefekt compenseren wat ontstaat door de teruggaande beweging van de zuiger. Deze zal daarom hoger ingesteld moeten worden dan het uiteindelijk gewenste stationaire debiet.

5.2.2.2 Pulspomp problemen

De bovenbeschreven procedure werkt goed bij korte periodetijden, maar bij de gewenste periodetijd van ≈ 66 s doen zich problemen voor.

Het 1^e probleem is het schokken van de zuiger gedurende de teruggaande beweging. De snelheid waarmee dat gebeurt is nu zo laag dat de zuiger onregelmatig begint te bewegen. Omdat de originele pompkop nooit is gebruikt, is eerst gedacht aan verontreiniging van de cilinderwand. Uitvoerig reinigen van cilinderwand en zuigerafdichtring leverde slechts kortstondig een verbetering. Ook herhaald schoonmaken blijkt geen afdoende oplossing. Vervolgens is het oppervlak van de zuigerafdichtring verkleind om de wrijving tussen zuiger en wand te verminderen. Dit is in kleine stapjes gedaan totdat er nagenoeg geen storingen meer in de stroming te meten zijn, de schokjes zijn inmiddels zo klein

dat ze niet meer met het blote oog waarneembaar zijn. Het verkleinen van het afdichtingsoppervlak is een kompromis tussen het verminderen van de wandwrijving en het behouden van een adequate afdichting. Een verdere verkleining lijkt om deze reden dan ook niet raadzaam.

Na deze ingreep is het stromingsverloop in het schaalmodel gemeten, zie grafiek 4 uit bijlage. Hier is duidelijk een andere storing waarneembaar, in de direkte nabijheid van de piek is de stationaire komponent verhoogd. Dit effect wordt veroorzaakt door de mechanische speling in de aandrijflijn van de pulspomp. Op het moment dat de zuiger van richting moet veranderen staat deze enige tijd stil als gevolg van de mechanische speling, de gehele aandrijflijn moet de andere kant op gaan draaien. De omkering van richting is pas merkbaar aan het einde van de aandrijflijn, de zuiger, als alle speling in het mechaniek is opgeheven. Het stilstaan van de zuiger manifesteert zich in de stroming in de vorm van een tijdelijk verhoogd debiet. De stationaire pomp moet immers hoger ingesteld worden als de feitelijk gewenste stationaire komponent om juist de teruggaande beweging van de zuiger te compenseren. Maar omdat de zuiger niet direkt van richting verandert, is deze hogere instelling terug te vinden in het stromingsverloop van het schaalmodel. In dit stuk met verhoogd debiet is ook te zien dat de stationaire pomp een stabiel debiet levert. Ook is door de mechanische speling te verklaren dat het debiet niet direkt aan het begin van de periodetijd ($t=t_0$) begint met stijgen, dit zou verwacht mogen worden omdat op dit tijdstip ook het triggersignaal afgegeven wordt.

Het probleem van de mechanische speling is opgelost door de stuurpuls iets aan te passen. Door aan het einde van een zuigerbeweging een kleine sprong in de stuurpuls aan te brengen in de nieuwe bewegingsrichting, zoals te zien is in

figuur 18, kan de invloed van de speling teniet gedaan worden.

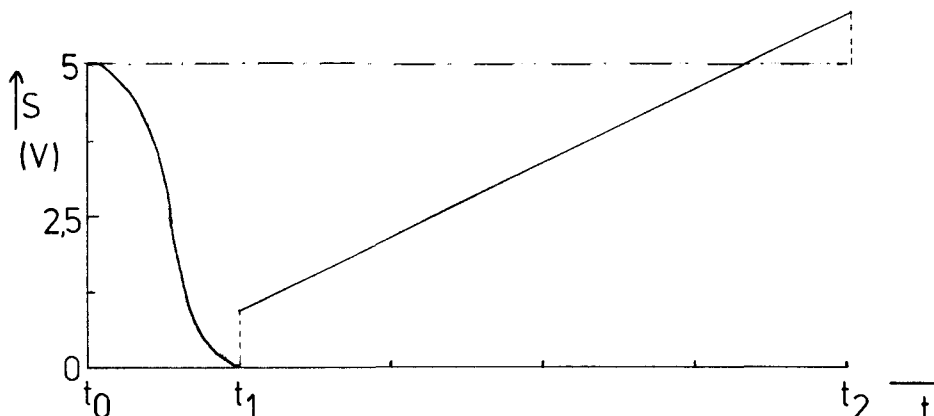


fig.18
aanpassing stuurfunctie pulspomp

Hiervoor is het komputer programma aangepast (ppc.com) en heeft nu een 4^e parameter nodig alvorens de stuurpuls te kunnen berekenen:

- grootte van de stap. [350]

Er is geëxperimenteerd met de stapgrootte, het beste resultaat wordt verkregen indien een stapgrootte van ≈ 350 aangehouden wordt. Dit getal slaat op het aantal stappen van de DAC en komt overeen met $(350/2047) \cdot 10 \approx 1,70$ V. Het probleem is dat deze stapgrootte afhankelijk is van de hoogte in de stromingspiek. De universele stuurpuls wordt afhankelijk van deze hoogte in meer of mindere mate verzwakt om zodoende de vereiste zuigerbeweging te verkrijgen. Maar de mechanische speling is natuurlijk konstant, niet afhankelijk van de gekozen piekhoogte. De stapgrootte in de stuurpuls wordt ook verzwakt maar moet wel dezelfde mechanische aktie verzorgen, de parameter "stapgrootte · verzwakking" moet konstant blijven.

Het effect van deze aanpassing is te zien in het gemeten stromingsverloop, grafiek 5 uit bijlage.

Deze en voorgaande grafiek zijn gemeten vlak voordat de stromings visualisaties zijn gemaakt, er is dan ook duidelijk te zien dat de zuiger weer een schokkend gedrag

vertoont. Dit is gedurende het verstrijken van de tijd alleen maar toegenomen, maar zoals eerder betoogd is het verder verkleinen van dit storend effect met deze zuiger afdichtring niet mogelijk. In de toekomst is het dan ook raadzaam om een andere afdichtring te gebruiken met een geringere wrijving, de firma Eriks (☎072-141911) in Alkmaar is gespecialiseerd in dit soort applicaties.

6 METINGEN

6.1 Video opname

De stromingsdubbele breking visualisaties met vanadium pentoxide zijn met een kleuren video camera opgenomen. Hierbij is de kamera zo ver mogelijk van de opstelling verwijderd om zodoende een zo klein mogelijke openingshoek van de lens te verkrijgen. De optische vertekening van de visualisatie is hierdoor geminimaliseerd.

Er zijn verschillende gebieden van de meetsektie in beeld gebracht, van zowel zij- als bovenaanzicht. Tevens is er een opname gemaakt van een lineaal welke zich achter de meetsektie bevindt waardoor er een indruk van de lenswerking van het geheel verkregen wordt. Een overzicht van de gemaakte opnamen is in tabelvorm weergegeven zie tabel 1 uit bijlage. Ook zijn de verschillende lokaties van de meetsektie aangegeven, in figuur A uit bijlage, waar de visualisatie opnamen gemaakt zijn.

6.2 Stromingsverloop

Omdat vanadium pentoxide niet in aanraking met metaal mag komen is het niet mogelijk om de flowsensor te gebruiken indien deze stof zich in het schaalmodel bevindt. De flowsensor is van het elektro magnetisch type en heeft een metalen binnenkant. Om deze reden is het niet mogelijk om het stromingsverloop van vanadium pentoxide direkt te meten. De gewenste stroming is van te voren ingesteld met behulp van een fysiologische zoutoplossing. Dit geeft een goede indruk van de stroming van vanadium pentoxide omdat de viskositeit van de beide stoffen gelijk is, maar een exakte afspiegeling van de stroming is het niet. Om deze reden is de korrektie van de opgemeten ijkgrafiek van de gebruikte flowsensor, zie grafiek 7 uit bijlage, ook niet doorgevoerd, deze afwijking is maximaal 10%.

Nadat de visualisaties met de fysiologische puls verricht zijn, is de piekhoogte van deze puls verhoogd om zo een beter illustratief beeld van de stromingsverschijnselen te

krijgen. De piekhoogte is zover opgevoerd dat de stationaire komponent van de stroming nog juist positief blijft. Het stromingsverloop behorende bij deze opgevoerde puls is later nagemeten met een fysiologische zoutoplossing als modelvloeistof, zie grafiek 6 uit bijlage.

6.3

Resultaten

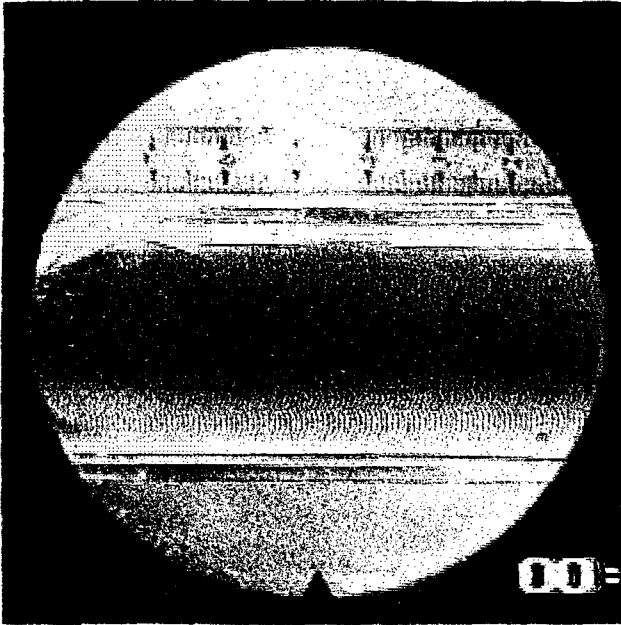
Het resultaat van de visualisatie met behulp van vanadium pentoxide is het beste te zien op de videoband. Maar om een indruk te krijgen van deze visualisatie is er een meetserie met behulp van het beeldverwerkingspakket TIM bewerkt. Hierdoor is het kleuren videobeeld geschikt gemaakt om een zwart-wit afdruk te maken. Het resultaat hiervan is te zien op de verschillende afdrukken in figuur I-VIII op de volgende 2 pagina's. Deze zijn gemaakt op lokatie B (juist achter de vernauwing) van de meetsektie met de opgevoerde puls.

Op de eerste 2 afdrukken is te zien dat de snelheidsgradiënt toeneemt, de lijnen worden dunner en rijker aan contrast. Op $t=6,5$ s wordt de maximale stroomsnelheid bereikt. Op $t=14,5$ s is duidelijk het ontstaan van een minder stabiel gebied zichtbaar welke zich uitbreidt en met de stroom "meerolt". Vervolgens stabiliseert de stroming weer en op $t=50$ s is geen verstoring meer waarneembaar.

De kwaliteit van de getoonde afdrukken laat te wensen over, maar hierbij moet aangetekend worden dat de beelden met een kleuren kamera gemaakt zijn waardoor de contrast inhoud van het verkregen beeld gering is. De kleuren opnamen zijn dan ook primair bedoeld om te bekijken op kleuren video en niet als zwart-wit afdruk welke het resultaat zijn van het beeldverwerkingspakket.

De videoband is beter geschikt voor het bestuderen van de visualisatie. De reproduceerbaarheid van de fenomenen in zowel plaats als tijd is erg hoog.

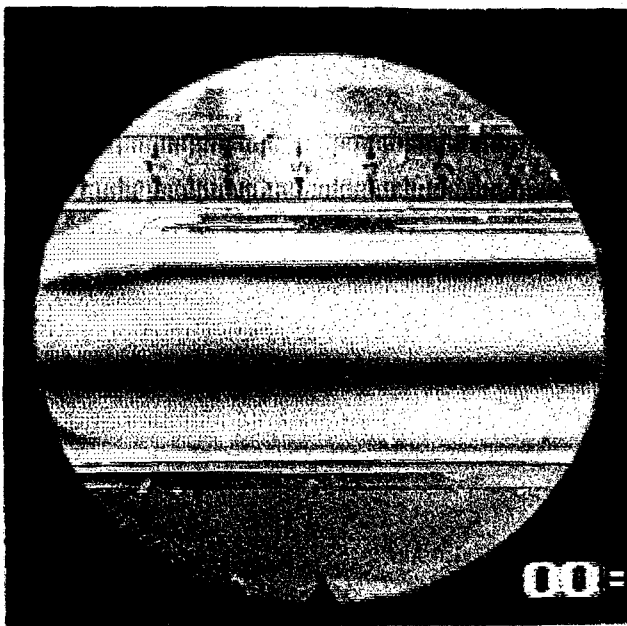
afdruk meetserie I-IV



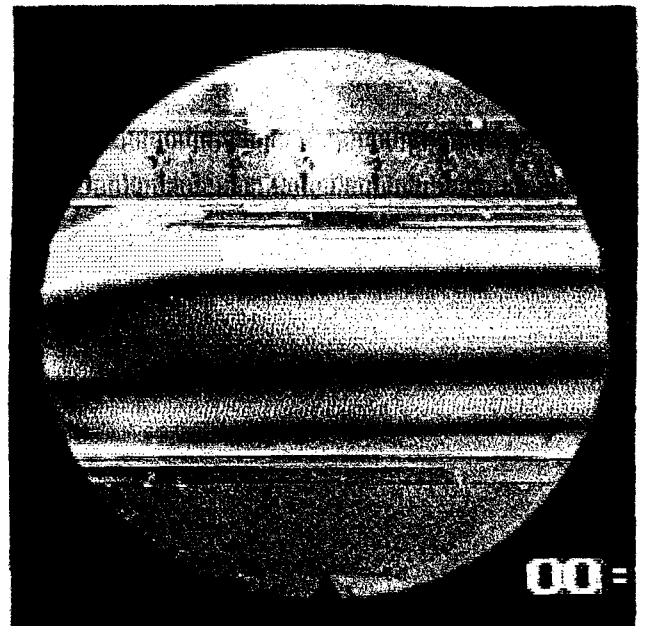
figuur I
t=0 s



figuur II
t=6,5 s

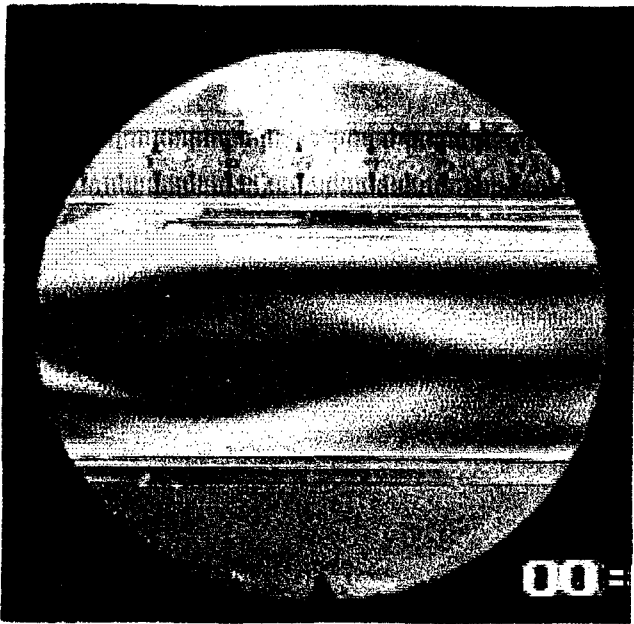


figuur III
t=12,5 s

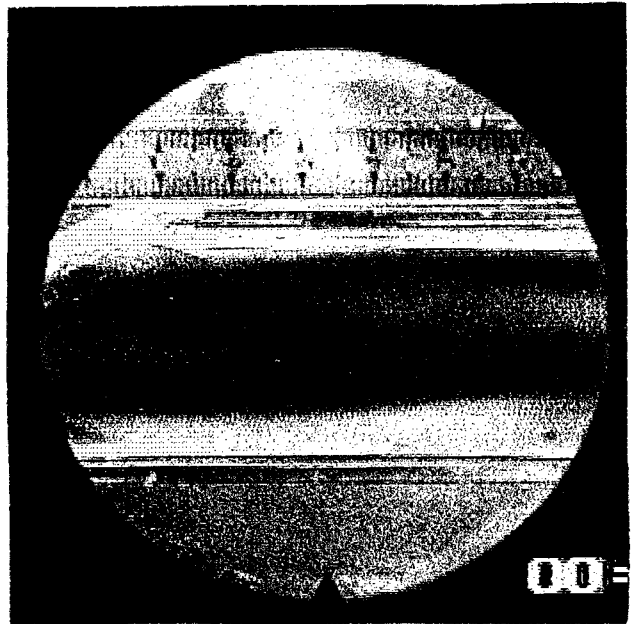


figuur IV
t=14,5 s

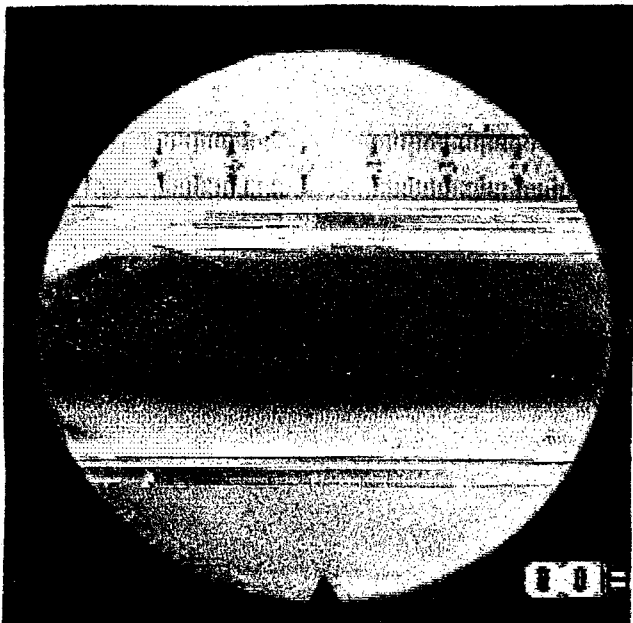
afdruk meetserie V-VIII



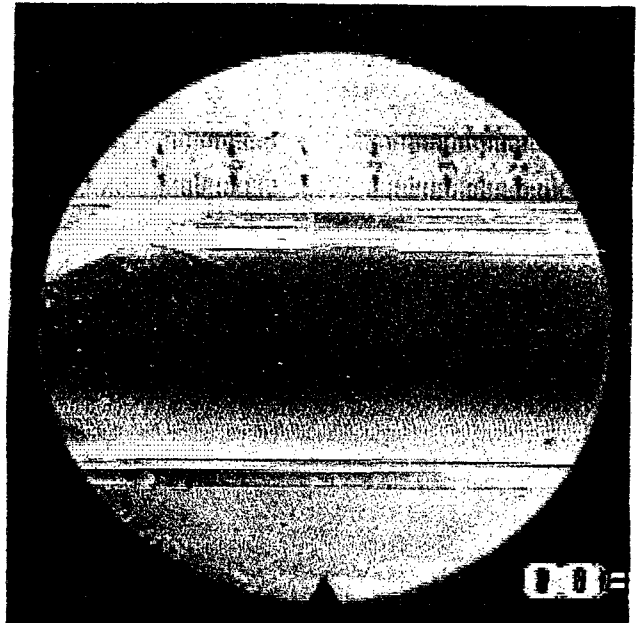
figuur V
t=18,5 s



figuur VI
t=25,0 s



figuur VII
t=35,0 s



figuur VIII
t=50,0 s

Het begin van de fysiologische puls is op de videoband duidelijk waarneembaar. De randen van de buis, boven- en onderkant, zijn dan plotseling licht gekleurd. Dit wordt veroorzaakt door de grotere snelheidsgradiënt juist aan de rand van de buis als gevolg van het toenemen van de stroomsnelheid.

Het onregelmatig bewegen van de zuiger van de instationaire pomp aan het einde van de fysiologische puls is ook zichtbaar op de videoband. Ook hier worden de randen van de buis lichter. Dit is het gevolg van de schokkende beweging van de zuiger waardoor er plotseling grote snelheidsveranderingen optreden.

Aan het einde van het systolische deel van de fysiologische puls ontstaat aan de bovenkant van de buis ter hoogte van het einde van de vernauwing een lijn. Deze lijn verplaatst zich gedurende het verstrijken van de periode naar het centrum van de buis. Dit fenomeen kan samenhangen met ontstaan van een terugstroomgebied. De snelheidsgradiënt aan de rand van een terugstroomgebied is immers groot en is daarom met deze visualisatie techniek goed zichtbaar, zie figuur 19.

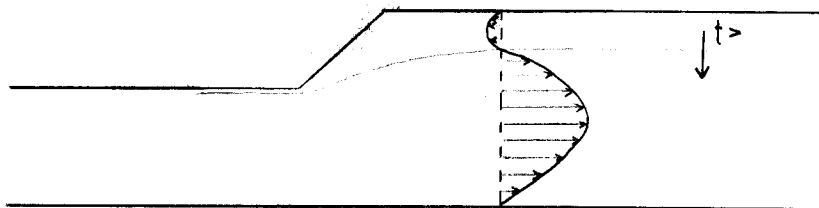


fig.19
ontstaan terugstroomgebied

Dezelfde effecten zijn waarneembaar bij de fysiologische puls, maar dan in mindere mate waardoor het zich minder leent voor illustratieve doeleinden.

KONKLUSIE EN AANBEVELINGEN

De gebruikte modelvloeistof is geschikt voor het visualiseren van stromingsgedrag achter een vernauwing. De juiste interpretatie van de stromingsdubbele breking visualisatie is erg lastig. De volgende factoren dragen hiertoe bij:

- de snelheidsgradiënt en niet de snelheid wordt gevisualiseerd;
- een 3 dimensionele stroming wordt op 2 dimensies geprojecteerd;
- de gevisualiseerde stroming is erg ordentelijk, er zijn geen grote snelheidsfluctuaties.

Een LDA meting zal een beter inzicht geven over de stroming omdat dan over de gehele dwarsdoorsnede de snelheid lokaal bepaald kan worden. De stromingsdubbele breking visualisatie kan dan goed dienen om voor de LDA meting interessante lokaties op te sporen. Met name indien stromingsinstabiliteiten van belang zijn.

Er dient terdege rekening gehouden te worden met de beperkingen van vanadium pentoxide:

- geen contact met metaal;
- sterke gevoeligheid voor verontreinigingen.

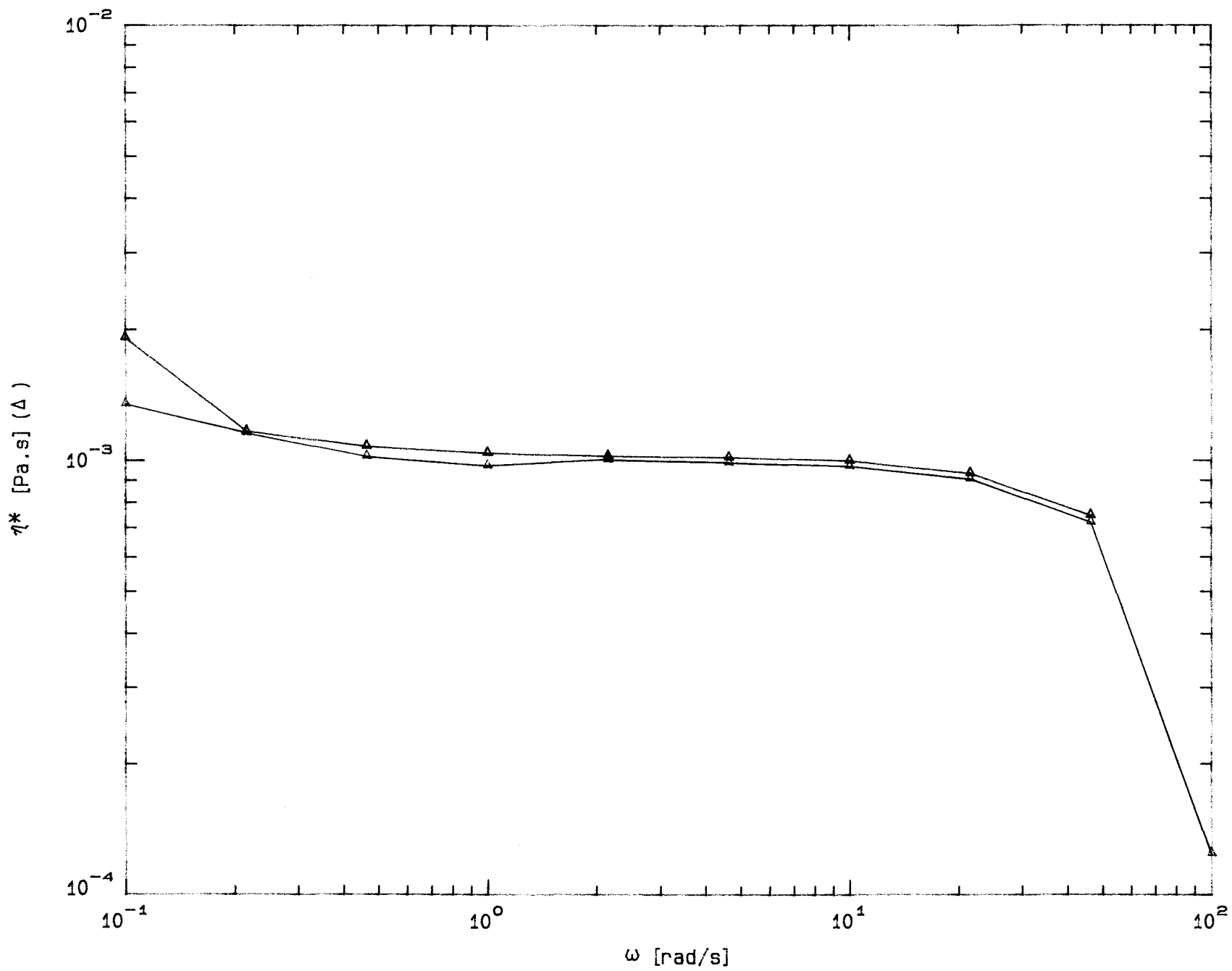
Dit geldt zeker ook gedurende de bereiding van de stof. Alvorens de opstelling geheel met vanadium pentoxide af te vullen is het raadzaam om een klein gedeelte van de aangemaakte hoeveelheid in de opstelling te brengen. Hierdoor worden de eventueel achtergebleven verontreinigingen geneutraliseerd en is niet de gehele bulkhoeveelheid vloeistof aangetast.

De viskositeit van vanadium pentoxide is redelijk temperatuur onafhankelijk ($\Delta\eta \approx 10\%$ bij $\Delta T = 8^\circ\text{C}$) en bij voldoende lage concentraties (0,78 massa-%) gedraagt het zich volkomen Newtons. Om de optische activiteit van de stof te vergroten verdient het de aanbeveling om de

koncentratie zo hoog mogelijk te kiezen. Er zal daarom een optimale concentratie bestaan welke een kompromis is tussen de optische en viskeuze eigenschappen van vanadium pentoxide.

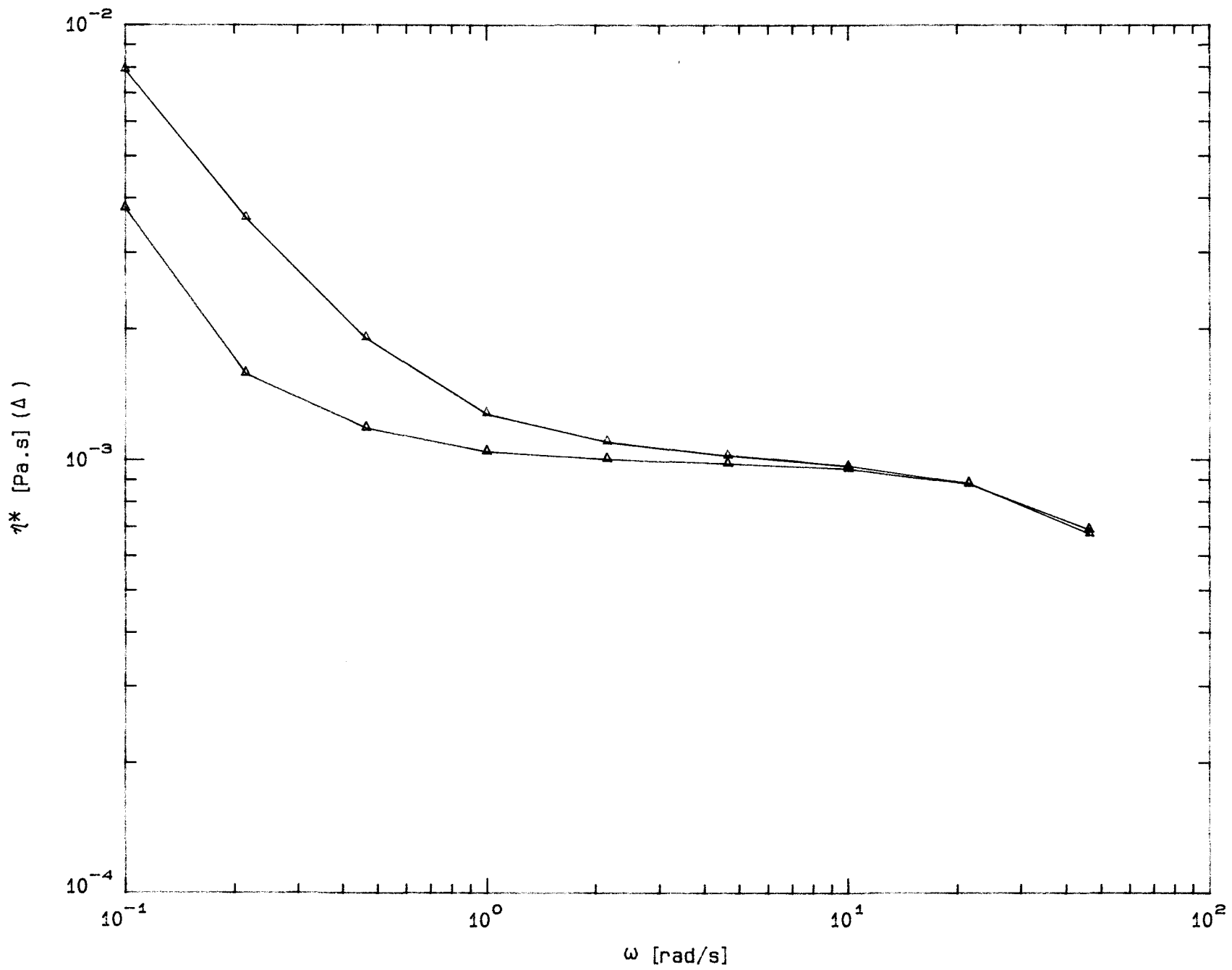
De afdichting van de pulspomp zuiger dient nog verder verbeterd te worden waardoor het storende schokgedrag achterwege blijft en de stroming niet meer nadelig beïnvloed wordt. Waarschijnlijk zal een ander type afdichtring gebruikt moeten worden.

grafiek 1
viscositeit water zonder bescherm laag
 $T=20^{\circ}\text{C}$

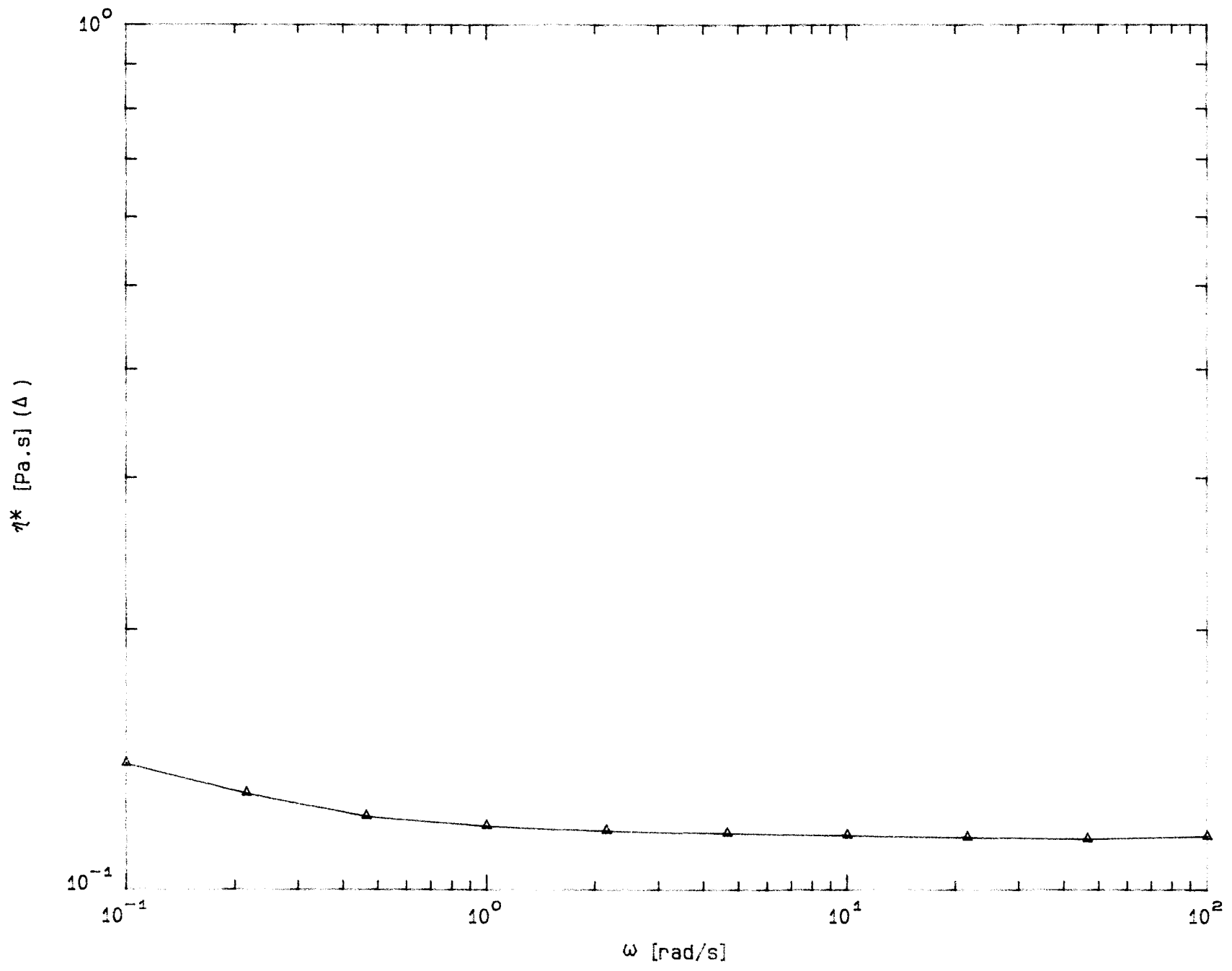


grafiek 2

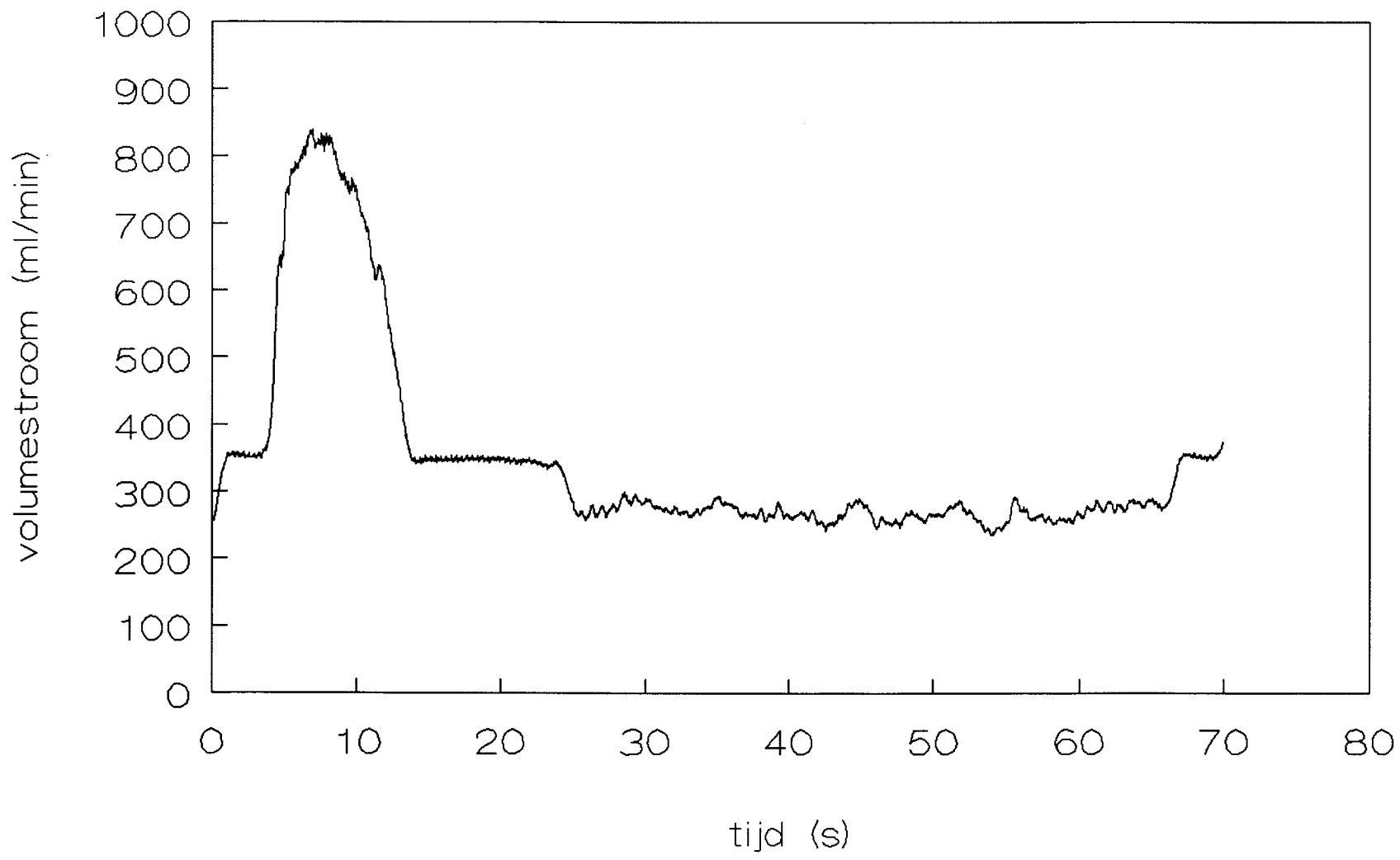
viskositeit water met bescherm laag

 $T=20^{\circ}\text{C}$ 

grafiek 3
viskositeit olie met bescherm laag
T=20°C

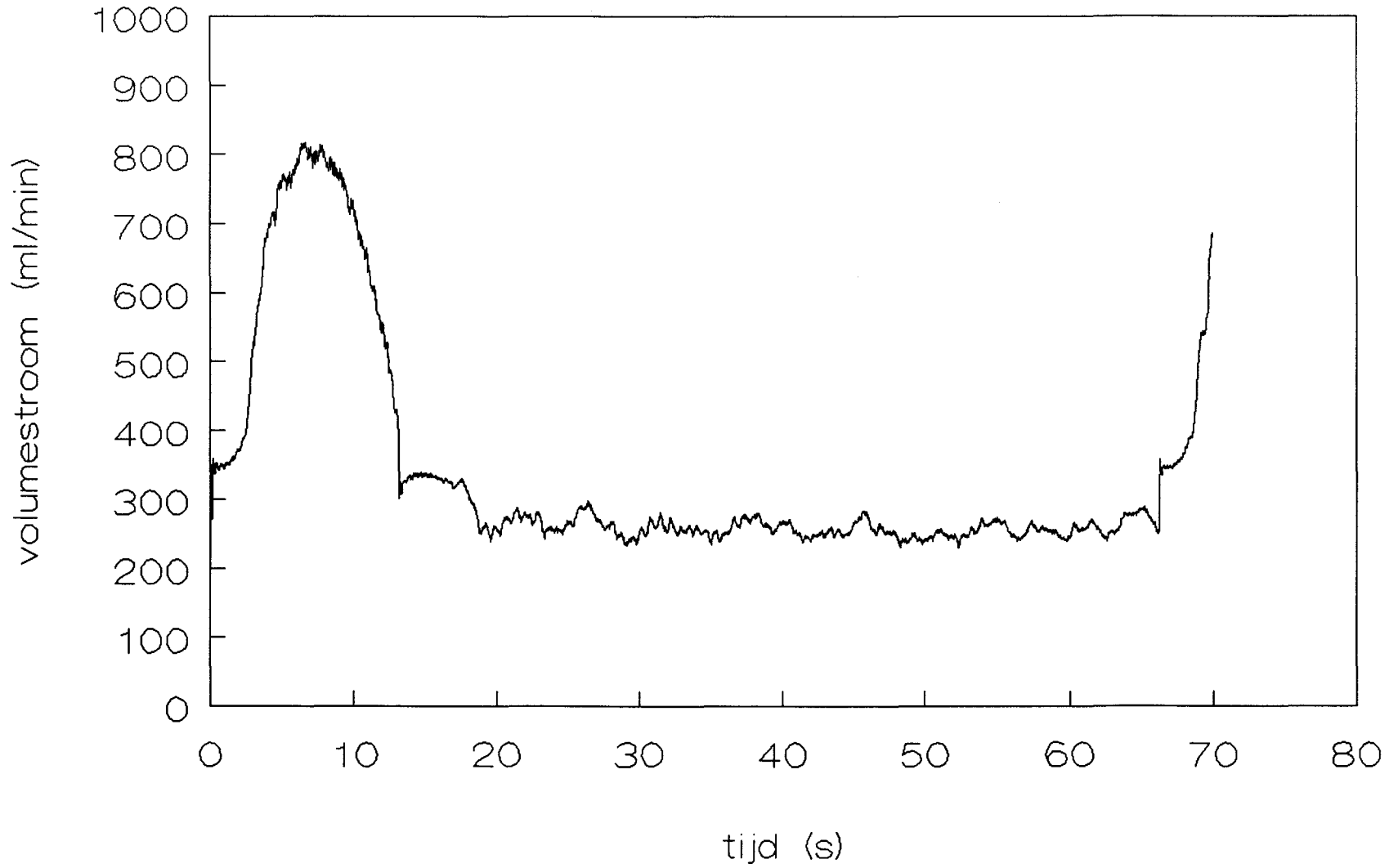


Stromingsverloop mechanische speling pulspomp



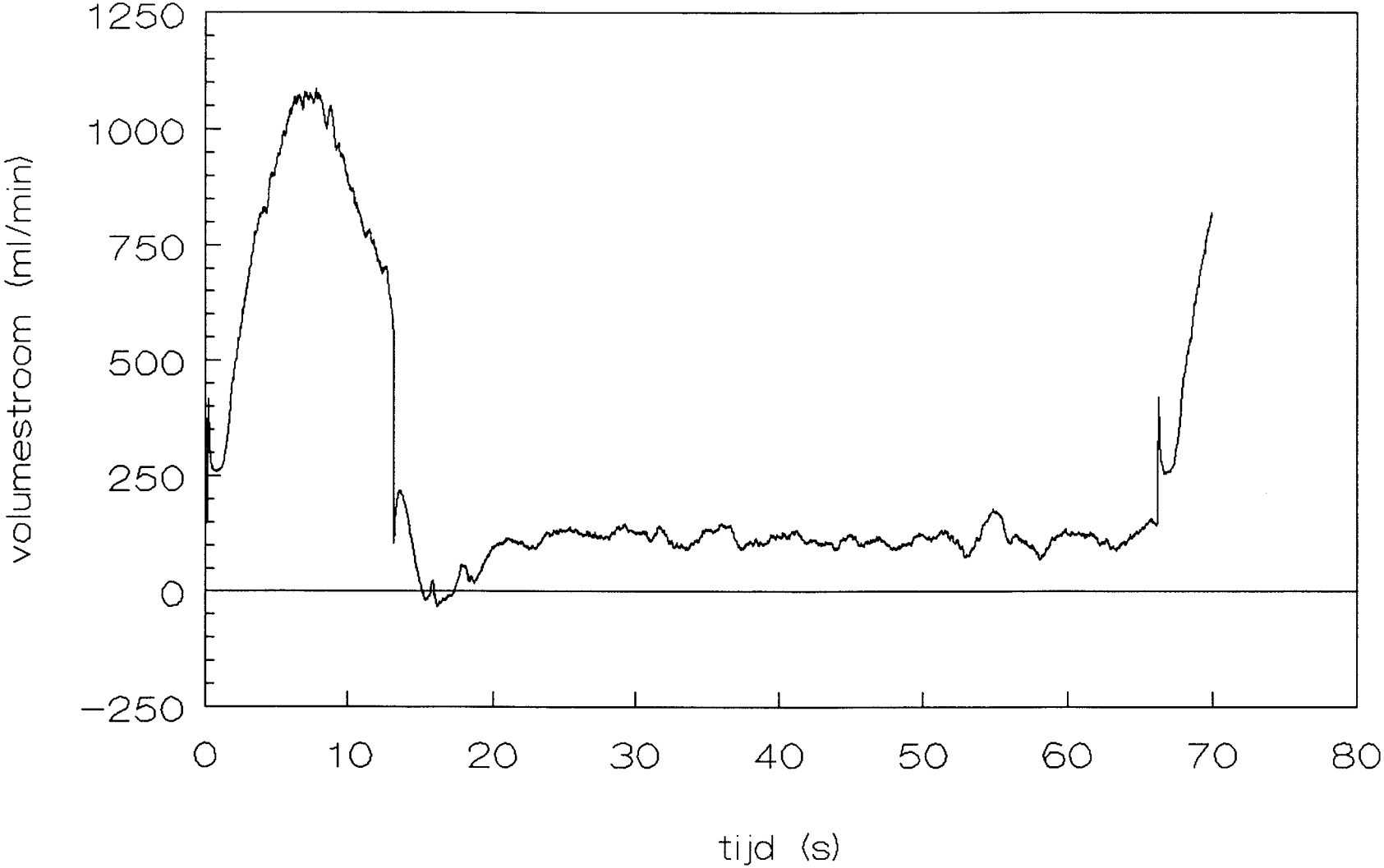
grafiek 4
stromingsverloop met speling van pulspomp

stromingsverloop korrektie voor speling



grafiek 5
stromingsverloop na spelingscorrectie

stromingsverloop opgevoerde pulshoogte

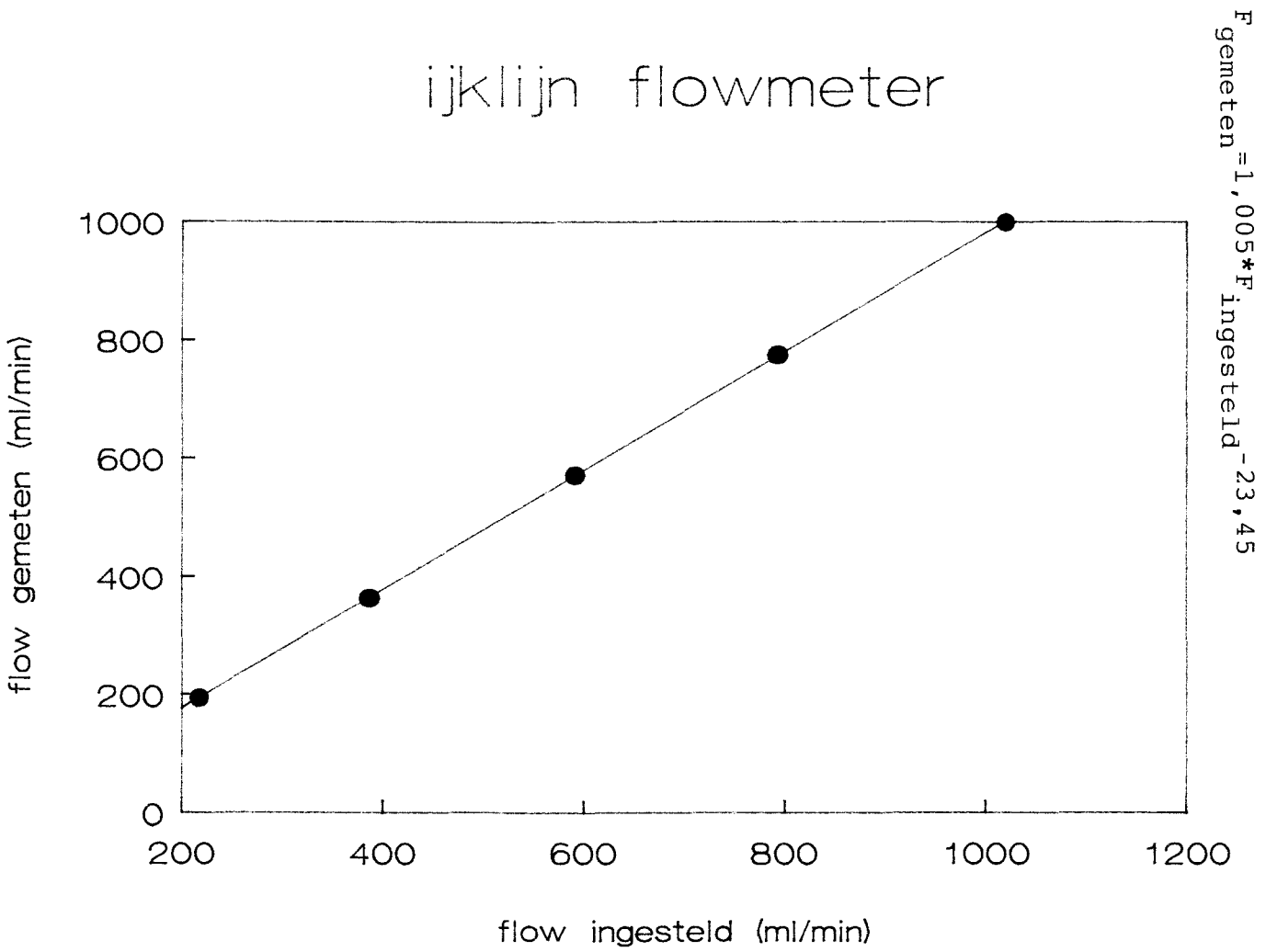


stromingsverloop opgevoerde pulshoogte

grafiek 6

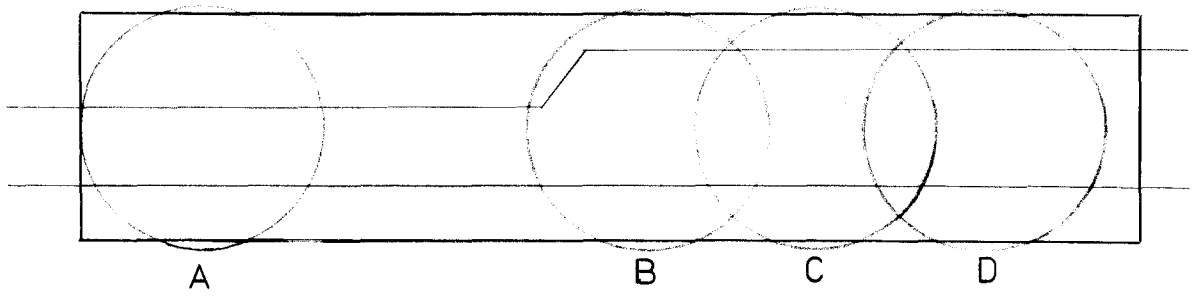
grafiek 7

ijkijng van gebruikte flowsensor



figuur A

lokaties van meetsektie



begintijd	eindtijd	omschrijving
0'00''	12'00''	
12'00''	27'04''	
27'04''	27'24''	opstelling
27'24''	27'35''	+tekst
27'35''	27'51''	+Re en α
27'51''	28'05''	aandachtsgebied
28'05''	28'09''	lineaal
28'09''	28'14''	stromingsverloop
28'14''	31'33''	A 3T z.a.
31'33''	37'09''	B 5T z.a.
37'09''	42'41''	C 5T z.a.
42'41''	48'16''	D 5T z.a.
48'25''	51'45''	A 3T b.a.
51'45''	57'17''	B 5T b.a.
57'17''	1.02'49''	C 5T b.a.
1.02'49''	1.08'17''	D 5T b.a.
1.08'17''	1.08'25''	einde fys.deel
1.08'27''	1.11'45''	A 3T z.a. o.p.
1.11'45''	1.17'16''	B 5T z.a. o.p.
1.17'16''	1.22'48''	C 5T z.a. o.p.
1.22'48''	1.28'19''	D 5T z.a. o.p.
1.28'23''	1.28'25''	eindevoorstelling

tabel 1

overzicht indeling video band

OVERZICHT GEBRUIKTE APPARATUUR

instationaire pomp: Vivitro Systems Inc. (VSI)
-motor, 33VM82 serial 3132102
-servo power amplifier SPA 3895Z
-lineair actuator SP3891 serial 33500
-pompkop, SPH5891B serial 214, cyl
area:38.200 cm².

stationaire pomp: Verder
-model 2135 manual, ser.nr.:140071
-pompkop, model 2150, ser.nr.:15550 CP

kunstzon: Philips
-type PVL 125 (500 W), lamptype PF128R

flowsensor: Skalar
-E.M. bloodflow sensor, extracorporeal
-lumen diameter:6 mm, ser.nr.:87024
-dynamic range: -2000/+2000 ml/min

adapter: Skalar
-transflow 601 system, type MDL 450
-ser.nr.:9100-402

flowmeter: Skalar
-bloodflow & velocity meter
-transflow 601 system, type MDL 401
-ser.nr.:B089117

versterker: Tektronix
-differential amplifier, model AM502
-serial:B128304

PCM2 kast: -nummer I

LITERATUUROPGAVE

- 1 K. Balasubramanian,
An experimental investigation of steady flow at an arterial bifurcation,
1979, thesis Georgia Institute of technology Atlanta.
- 2 M. van Dongen,
stencil behorende bij college humane stromingsleer,
1990, TU Eindhoven.
- 3 R. Kuipers,
Stromingsdubbele breking,
1991, afstudeerverslag TU Eindhoven, WFW 91.066.
- 4 D. Liepsch,
Strömungsuntersuchungen an Modellen menschlicher Blutgefäßsysteme,
1987, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 7 nr 113.
- 5 D. Palmen,
Vloeistofverstoringen achter stenoses in de carotid artery bifurcation,
1991, intern rapport TU Eindhoven, WFW 91.036.
- 6 G. Peters,
Reometrie van polymeren smelten en oplossingen,
1990, intern diktaat TU Eindhoven.
- 7 P. Reuderink,
Analysis of the flow in a 3D distensible model of the carotid artery bifurcation,
1991, proefschrift TU Eindhoven.
- 8 F. van de Vosse,
Numerical analysis of carotid artery flow,
1987, proefschrift TU Eindhoven.
- 9 G. Vossers,
Fysische transportverschijnselen voor W,
1986, collegediktaat TU Eindhoven nr:3438