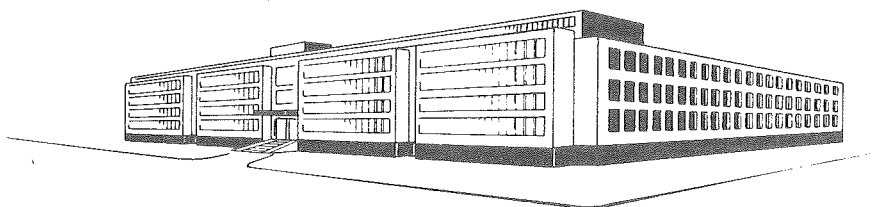


TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

STOFOVERDRACHT IN EEN TURBULENTE VLOEISTOF-
VLOEISTOF DISPERSIE IN EEN GEROERD VAT

W. M. M. DEKKERS
AFSTUDEERVERSLAG
juni 1968



Laboratorium voor Technische Natuurkunde
LORENTZWEG
DELFT

TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

STOF- OVERDRACHT IN EEN TURBULENTE VLOEISTOF-
VLOEISTOF DISPERSIE IN EEN GEROERD VAT.

goed geschreven δ
werk δ à q

praten over:

met methode injectie
oplosbaarheid
 $\lambda \div c$
interpretatie met fase
thema

afstudeerverslag W.M.M. Dekkers

juni 1968

Laboratorium voor Fysische Technologie

<u>Inhoud</u>	<u>blz.</u>
Samenvatting	
1. Inleiding	1
2. Keuze van het systeem	2
3. Meetmethode	4
a) de gemiddelde druppeldiameter \bar{d}	4
b) de momentane caprylzuurconcentratie	5
4. Meetopstelling	7
5. Meetprocedure en verwerking	10
6. Resultaten en interpretatie	13
7. Discussie en conclusies	19
Appendix A	23
Appendix B	27
Symbolenlijst	31
Literatuur	33

Samenvatting

Volume

Onderzocht is het stofoverdrachtsproces in een vloeistof-vloeistof dispersie in cilindrische vaten met vlakke bodem, voorzien van vier keerschotten en geroerd met een rushtonturbine. Benzeen wordt gedispergeerd in water en caprylzuur wordt overgedragen. De diameters van de vaten variëren een faktor 10, het toerental per vat varieert een faktor 2, de fraktie benzeen is steeds ongeveer 0.008 en de verhouding roerder - vatdiameter is steeds 0.3. De vathoogte is gelijk aan de vatdiameter. Het specifiek grensvlak is volgens een bekende methode gemeten en de resultaten bevestigen een eerder gevonden relatie.

Voor de stofoverdrachtsmeting is een meetmethode ontwikkeld die gebaseerd is op de geleidbaarheidsmeting van de continue fase. Bij de berekeningen moet rekening gehouden worden met de dissociatie van het caprylzuur. De verwachting dat de energiedissipatie per massa-eenheid bepalend zal zijn voor het stofoverdrachtsproces, wordt door onze resultaten niet bevestigd.

We vinden dat het produkt van stofoverdrachtscoëfficiënt en specifiek grensvlak evenredig is met $(ND)^{2.4}$. Een fysische verklaring hiervoor hebben we niet kunnen geven.

1. Inleiding

Het doel van het onderzoek is het bepalen van het stofoverdrachtsmechanisme bij geroerde vloeistof-vloeistof dispersies, om aan de hand daarvan hanteerbare schaalvergrotingsregels op te stellen.

Tot dusver zijn alleen door Rushton, Rooney en Nagata [1] stofoverdrachtsmetingen aan vloeistof-vloeistof dispersies in geroerde vaten verricht. Zij bepaalden het produkt van stofoverdrachtscoëfficiënt en stofuitwisselend oppervlak.

Voor een mechanisme-onderzoek is het uiteraard nodig beide grootheden afzonderlijk te bepalen. Als eerste studieobject is het gewenst een systeem te kiezen waarbij de weerstand voor stofoverdracht geheel in de continue fase ligt. Om het stofoverdrachtsproces te kunnen volgen, moet de concentratie van de over te dragen stof in de continue fase continu meetbaar zijn. Ten gevolge van de aanwezigheid van een groot stofuitwisselend oppervlak in vloeistof-vloeistof dispersies zal het stofoverdrachtsproces snel verlopen. Er zal derhalve gebruik moeten worden gemaakt van een snelle meetmethode.

2. Keuze van het systeem

Een vloeistof-vloeistof dispersie kan men verkrijgen door twee niet mengbare vloeistoffen in een vat te roeren. De ene vloeistof zal dan de continue fase vormen, terwijl de andere vloeistof de discontinue fase vormt. Het ligt voor de hand voor de continue fase water te kiezen; de hiermee niet mengbare vloeistoffen zijn voornamelijk organische verbindingen. Bij dit onderzoek hebben we uit de reeks van mogelijkheden benzeen gekozen. De over te dragen stof moet voldoen aan de in de inleiding genoemde eisen:

a) stofoverdrachtsweerstand geheel in de continue fase.

b) concentratie moet continu meetbaar zijn.

ad a) Aan deze eis wordt voldaan wanneer de verdelingscoëfficiënt van de over te dragen stof, gedefinieerd als de concentratie in de benzeenfase gedeeld door de concentratie in de waterfase bij evenwicht, groot is.

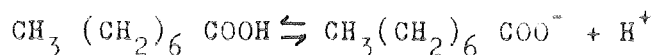
ad b) Denkend aan eenvoudige continue meetmethoden, zoals pH-meting en geleidbaarheidsmeting, is het gewenst dat de over te dragen stof in de continue fase gedeeltelijk in ionen gesplitst is. Bovendien moet deze stof nog redelijk oplosbaar zijn in water, omdat een te lage concentratie nauwkeurig meten onmogelijk maakt.

Aan dit voorwaardenpakket wordt het best voldaan door het eenwaardige organische zuur: caprylzuur [1]. De verdelingscoëfficiënt is groter dan honderd en de oplosbaarheid in water is $4 \cdot 10^{-3}$ kmol/m³ bij 20°C. Een over te dragen stof die beter oplosbaar is in water, zal vrijwel steeds een te lage verdelingscoëfficiënt hebben, terwijl een stof met hogere verdelingscoëfficiënt slechter in water oplosbaar zal zijn.

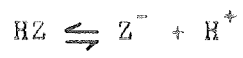
*dit slechter
de water*

Bij de beschrijving van het stofoverdrachtsproces zullen we er wel rekening mee moeten houden dat het caprylzuur gedeeltelijk gedissocieerd is in het water.

Deze dissociatie wordt beschreven door:



In de verdere notatie wordt dit geschreven als:



De dissociatieconstante van caprylzuur $K_z = \frac{[\text{Z}^-][\text{H}^+]}{[\text{HZ}]}$
is $1.28 \cdot 10^{-5} \text{ kmol/m}^3$.

analyse!

3. Meetmethode

Het stofoverdrachtsproces kan beschreven worden met een materiaalbalans voor de over te dragen stof (caprylzuur) in de continue fase.

Deze materiaalbalans luidt:

$$\phi_{\text{mol in}} - \phi_{\text{mol uit}} = \frac{dc}{dt} V_c \quad (1)$$

Hierin is c de concentratie caprylzuur in de continue fase met een volume V_c . De uitgaande molenstroom $\phi_{\text{mol uit}}$ is het aantal molen caprylzuur dat per tijdseenheid ten gevolge van het stofoverdrachtsproces uit de continue fase verdwijnt en $\phi_{\text{mol in}}$ is de in de continue fase geïnjecteerde hoeveelheid molen caprylzuur per tijdseenheid. $\phi_{\text{mol uit}}$ is het produkt van stofoverdrachtscoëfficiënt k , stofuitwisselend oppervlak A en de drijvende kracht. Als we de concentratieverandering met de tijd meten, kunnen we uit vergelijking (1) $\phi_{\text{mol uit}}$ bepalen, omdat ook $\phi_{\text{mol in}}$, die we zelf kiezen, bekend is. We kennen dan het produkt kA . Het totaal grensvlak is het produkt van het volume disperse fase (V_d) en het specifiek oppervlak (A^*).

Er geldt:

$$A^* = \frac{6}{d} \quad (2)$$

waarbij \bar{d} gedefinieerd is als $\Sigma d^3 / \Sigma d^2$.

Voor de bepaling van de stofoverdrachtscoëfficiënt en het totaal grensvlak zijn de gemiddelde druppeldiameter \bar{d} van het gedispergeerde benzeen en de verandering van de caprylzuurconcentratie in de continue fase per tijdseenheid te meten grootheden, immers ook V_c en V_d liggen na keuze vast.

a) De gemiddelde druppeldiameter \bar{d}

Voor de bepaling van de gemiddelde druppeldiameter wordt een door Hoevenaar [2] ontwikkelde methode gebruikt. Van een monster uit de dispersie dat door zeep is gestabiliseerd, worden door een microscoop fotoopnamen gemaakt. Door opmeten van de foto's kan bij bekende vergroting de gemiddelde druppeldiameter

worden bepaald.

b) De momentane caprylzuurconcentratie

Het caprylzuur dissocieert gedeeltelijk in H^+ en Z^- ionen. Bij aanwezigheid van deze ionen is het mogelijk concentraties te meten door:

- 1 pH-meting
- 2 geleidbaarheidsmeting

ad 1 De pH-meting is traag t.o.v. het stofoverdrachtsproces.

Het is moeilijk om de meting storingvrij te krijgen.

De verandering in de pH-waarde is gering. Duidelijk blijkt dat er een verschil is tussen de waarden die de pH-meter aanwijst bij wel of niet roeren en dat dit verschil afhankelijk is van het pH-niveau en van het toerental. Dit betekent dat per vat voor ieder toerental een ijkgrafiek zal moeten worden gemaakt.

ad 2 De meting van de geleidbaarheid van de continue fase is

snel en bij goed gekozen elektroden wordt gemiddeld over een groot deel van het vat.

De meting is goed ongevoelig te maken voor storingen van buitenaf. De uitslag van de geleidbaarheidsmeting blijkt niet te worden beïnvloed door de elektromotor van de roerder, ook is de uitslag onafhankelijk van de aanwezigheid van disperse fase, althans bij de hier gebruikte hoeveelheden. Daar de geleidbaarheid rechtvenredig is met de ionenconcentratie is een grotere nauwkeurigheid haalbaar dan bij meting van de pH die evenredig is met de logaritme uit de ionenconcentratie. Per vat behoeft men maar één ijkgrafiek te maken (in elk vat werden andere elektroden gebruikt) en daar de geleidbaarheid rechtvenredig is met de ionenconcentratie, is het vrij simpel deze ijking in het computerprogramma, dat noodzakelijk is voor de verdere berekeningen, te verwerken.

Uit het bovenstaande is duidelijk dat aan de geleidbaarheidsmeting de voorkeur is gegeven.

Nu zijn we dus in beginsel in staat stofoverdrachtsmetingen uit te voeren, we kennen immers alle variabelen uit vergelijking (1)

altijd?

of kunnen ze meten en vervolgens de gevraagde stofoverdrachtscoëfficiënt uit ϕ_{mol} uit berekenen. Het enige wat nog rest is er voor te zorgen dat er inderdaad een stofoverdrachtsproces plaatsvindt, m.a.w., we moeten een afwijking van het evenwicht creëren. Bij dit onderzoek worden hiertoe twee methoden gebruikt. In beide gevallen gaan we uit van een ingestelde dispersie, waarin zich nog geen caprylzuur bevindt.

- 8.0.10
water
- 1) ϕ_{mol} in is nul tijdens de proef. Bij het begin van de proef injecteren we snel een bekende hoeveelheid aan caprylzuur verzadigd water. Het stofoverdrachtsproces neemt nu een aanvang. Hierbij is het zaak ervoor te zorgen dat de injectietijd korter is dan de mengtijd van het vat.
 - 2) ϕ_{mol} in is ongelijk aan nul. Bij het begin van de proef nu geen snelle injectie, maar één waarvan we het debiet kennen en konstant houden. Dit debiet moeten we zó kiezen, dat tijdens het injecteren het gehele vat redelijk homogeen gemengd is en dat er in het vat geen evenwicht is.

In beide gevallen voegen we niet meer dan 0.1 maal de vatinhoud toe en de noodzakelijke evenwichtsgegevens (verdelingscoëfficiënt van caprylzuur tussen benzeen en water) verkrijgen we na voldoende lange tijd wachten.

Toevoegen van 0.1 maal de vatinhoud is noodzakelijk omdat anders de caprylzuurconcentraties waarbij gewerkt wordt, te klein zijn om nauwkeurig meten mogelijk te maken.

In grote vaten wordt de mengtijd groot t.o.v. de tijdconstante van het stofoverdrachtsproces. We kunnen pas meten wanneer het vat redelijk gemengd is. Bij gebruik van een snelle injectie levert dit moeilijkheden op, terwijl de methode met constant debiet nog wel bruikbaar is.

dit
vullen

4. Meetopstelling

De cilindrische vaten hebben een vlakke bodem en zijn voorzien van vier keerschotten (0,1 H breed), ze worden geroerd met rushtonturbineroerders ($D = 0,3 H$) die zich steeds in het midden van het vat bevinden en waarvan het toerental regelbaar is met een variator op of een variac voor de elektromotor. Op een tachometer wordt de waarde van het toerental afgelezen. De vaten zijn voorzien van een bemonsterkraan in de bodem en een systeem om de discontinue fase midden onder in het vat te voeren. Enkele vaten zijn voorzien van een koelmantel waardoorheen uit een thermostaatbak water van 20°C wordt rondgepompt.

Voor de injectie van aan caprylzuur verzadigd water is, afhankelijk van de te volgen methode, of een trechter of een glazen pijp in het vat gemonteerd. De trechter dient voor de snelle injectie; de pijp voor een geleidelijke invoer, staat via een rotameter en regelkraan in verbinding met een voorraadvat, waarin het water aan caprylzuur wordt verzadigd.

Figuur 1 is de principe-schets van alle vaten en in tabel 1 is de geometrie per vat weergegeven; deze tabel bevat derhalve ook alle gegevens over de gebruikte elektroden.

Vatvolume in liters	H in cm	D in cm	koelmantel aanwezig	injektie systeem	aard elektrode	tegen elektrode
1.56	12.5	3.75	ja	trechter	roerder (as geïsoleerd)	middengedeelte van de keerschot- ten (rest geïsoleerd)
14.4	26	7.8	ja	trechter	vat	koperstaaf ge- deelte op halve hoogte in het vat gemonteerd ter plaatse van de trechter
70	45	13.5	neen	trechter	vat	zie hierboven
1360	120	40	neen	pijp	roerder	koper plaatje midden op keer- schotten

Tabel 1. De geometrie van het vat, roerder, injectiesysteem en elektroden.

De elektroden zijn verbonden met de corresponderende aansluitingen op de geleidbaarheidsmeter. De verandering in de geleidbaarheid (dus in de caprylzuurconcentratie) met de tijd wordt geregistreerd met een "Honeywell elektronik 19" -recorder.

De toerentallen, waarbij kan worden gewerkt, zijn beperkt. De ondergrens wordt bepaald door het toerental waarbij het homogeen dispergeren nog juist mogelijk is. Het maximale toerental is in beginsel dat, waarbij nog juist geen lucht wordt aangezogen. De bovengrens zal in grote vaten zeer moeilijk te bereiken zijn, omdat het dan onmogelijk zal worden de vereiste hoeveelheid caprylzuuroplossing binnen de gestelde tijdslimiet te injecteren. Genoegen nemen met lagere concentraties, dus minder te injecteren, is meettechnisch niet haalbaar. De oplosbaarheid van caprylzuur in water bij 20°C is immers slechts $4 \cdot 10^{-3}$ kmol/m³ en een over te dragen stof die beter oplosbaar is in water en ook aan de andere eisen voldoet, zal een te lage verdelingscoëfficiënt hebben.

5. Meetprocedure en verwerking

Het vat wordt voor 9/10 gevuld met gedestilleerd water en bij aanwezigheid van een koelmantel wordt het circulatiepompje aangezet. Na het instellen van het toerental op de gewenste waarde wordt ongeveer 1 volume procent thiofeenvrije benzeen onder in het vat toegevoerd. Hiertoe moet het benzeen eerst in de kolf onder het vat gelaten worden en vervolgens door water, dat via een rotameter met regelkraan stroomt, in het vat gedreven worden. Bij het 1360 litervat wordt het benzeen rechtstreeks onder in het vat gelaten.

De geleidbaarheidsmeter en de recorder worden gecalibreerd en aangesloten.

Na drie kwartier mag volgens Hoevernaar [2] ondersteld worden, dat de druppelgrootteverdeling zich heeft ingesteld. Is deze tijd verlopen, dan wordt via de bemonsterkraan een monster uit de dispersie opgevangen in een oplossing van natriumlaurylsulfaat.

Natriumlaurylsulfaat stabiliseert de dispersie. Daar bij dit onderzoek met erg kleine frakties disperse fase (0.01) wordt gewerkt, is het noodzakelijk het zeep (natriumlaurylsulfaatoplossing) aan benzeen te verzadigen en ongeveer een deel zeep op twee delen monster te nemen. Deze extra voorzorgen zijn noodzakelijk omdat de benzeendruppels anders gedeeltelijk in oplossing gaan, men meet dan een te kleine diameter. In water lost bij 20°C ongeveer 0.2 gewichtsprocent benzeen op.

Door een microscoop worden opnamen van de benzeendruppels en de standaardmillimeter gemaakt (zie fig. 2). De projectie van de negatieven op een scherm kunnen de aantallen bolletjes, vallend in een bepaalde klassegrootte geteld worden. Teneinde dit tellen te vereenvoudigen is door Ruemkens e.a. [3] een methode ontwikkeld, waarbij gebruik wordt gemaakt van een aan telefoontellers gekoppelde lineaal (zie fig. 3). De meegefotografeerde millimeter voorkomt elk misverstand over de uiteindelijk verkregen vergroting, immers met een lineaal kan men deze vergroting direkt meten. Uit de gegevens verkregen van 500 à 1000 druppels wordt middels een computer de gemiddelde diameter berekend.

Onmiddellijk na de monstername voor het bepalen van de gemiddelde diameter wordt de recorder, die reeds op het benodigde bereik en de gewenste gevoeligheid is ingesteld, op de juiste papiersnelheid ingeschakeld. Vervolgens wordt afhankelijk van de te volgen methode, of zeer snel een tiende vatvolume met aan caprylzuur verzadigd water via de trechter toegevoegd, of met constant debiet via de pijp en de rotameter met regelkraan uit het voorraadvat geïnjecteerd, totdat in totaal weer een tiende van het vatvolume is toegevoegd.

Na het bereiken van het evenwicht wordt een gedeelte van de vatinhoud in een scheitrechter overgebracht om na fasenscheiding de fraktie dispense fase te bepalen.

Door de recorder wordt het verloop van de geleidbaarheid als functie van de tijd geregistreerd. De af te lezen waarden van de geleidbaarheid na bepaalde tijdsintervallen moeten dan nog worden omgezet in concentraties caprylzuur. Uit de ijkings van de elektrodensystemen blijkt telkens dat de geleidbaarheid recht-evenredig is met de ionenconcentratie. Per vat is dan uiteraard, omdat de elektroden-oppervlakte en -afstanden verschillen, de richtingscoëfficiënt van de gevonden rechte verschillend. In het computerprogramma dat nodig is voor de berekening van k_A wordt deze richtingscoëfficiënt alsmede een punt van de lijn ingelezen. Voor dit oriëntatiepunt wordt steeds het evenwichtspunt gebruikt, de geleidbaarheid en de caprylzuurconcentratie van de continue fase bij evenwicht moeten dus worden ingelezen. Gebruik van de ijkcurve als zodanig, dus zonder telkens nieuw oriëntatiepunt, is niet aan te bevelen, omdat de nulgeleidbaarheid van het gedestilleerd water per proef zal kunnen verschillen. We mogen wel aannemen dat er geen ionen in het gedestilleerd water zitten die het dissociatieevenwicht van caprylzuur verstoren, de richtingscoëfficiënt van de ijklijn zal dus niet beïnvloed worden door de nulgeleidbaarheid. Ijken bij verschillende waarden van de nulgeleidbaarheid levert dan ook een stelsel evenwijdige lijnen op. Omdat de nulgeleidbaarheid dus een zuiver additieve grootte is, kan de ijkgrafiek wel gebruikt worden om de caprylzuurconcentratie in het oriëntatiepunt te bepalen, we moeten dan het verschil in

nulgeleidbaarheid bij ijking en proef in rekening brengen. Een andere methode hiervoor is, bij evenwicht een pH-meting uitvoeren bij stilstand van de roerder; de ionenconcentratie volgt dan uiteraard rechtstreeks uit de pH-waarde. Ideaal is natuurlijk beide onafhankelijke methoden te gebruiken voor een duplobepaling.

6. Resultaten en interpretatie

a) de gemiddelde druppeldiameter \bar{d}

Hoevenaar [2] toonde aan dat de gemiddelde druppeldiameter in een vloeistof-vloeistof dispersie van benzeen in water bij kleine frakties disperse fase (2 - 4%) voldoet aan de betrekking:

$$We = \rho N^2 D^{4/3} \bar{d}^{5/3} / \sigma = 10^{-2} \quad (3)$$

Dit getal van Weber is gedefinieerd als de verhouding van de traagheids- en oppervlaktespanningskrachten die op de druppel werken. De dichtheid van de continue fase is ρ en σ is de grensvlakspanning tussen benzeen en water. N is het toerental van de roerder met diameter D. De verhouding tussen roerder en vatdiameter is evenals in dit onderzoek steeds gelijk aan 0.3.

Bij dit onderzoek wordt met nog kleinere frakties disperse fase gewerkt. Om deze reden is nagegaan of vergelijking (3) ook in dit gebied geldt. Bij diverse stofoverdrachtsproeven wordt hiertoe de gemiddelde druppeldiameter \bar{d} gemeten en het getal van Weber berekend.

Het resultaat hiervan is weergegeven in tabel 2.

$10^2 D$	N	$10^{-4} A^* (A^* = 6/\bar{d})$	$10^3 \sigma$	$10^2 We$
3.75	10	7.09	22.7	0.90
3.75	13.7	8.49	28	1.01
3.75	16.7	12.0	22	1.07
3.75	19.2	13.8	24	1.04
3.75	22	17.9	20	1.06
7.8	6.7	8.36	22.5	0.82
7.8	8.3	9.81	22.5	0.98
13.5	5	9.46	23	0.78
40	1.1	3.02	24	0.98
40	1.1	3.03	23.5	0.99

Tabel 2. Resultaat diameterbepaling

Dit tabel 2 blijkt dat ook voor onze metingen steeds geldt: $We = 10^{-2}$. Om na te gaan of het stofoverdrachtsproces invloed heeft op de druppelgrootteverdeling, is bij één proef de gemiddelde diameter bepaald uit een monster wat voor toevoegen van caprylzuuroplossing is genomen en uit een monster wat tijdens het stofoverdrachtsproces is opgevangen. In het 1360 liter vat bij 65 toeren per minuut zijn de resultaten:

voor stofoverdracht: $\bar{d} = 1,99 \cdot 10^{-4} \text{ m}$

tijdens stofoverdracht: $\bar{d} = 1,98 \cdot 10^{-4} \text{ m}$

De druppelgrootteverdeling voor beide gevallen is weergegeven in fig. (4). Duidelijk blijkt dat het stofoverdrachtsproces geen invloed heeft op de druppelgrootte.

Voor de proeven, waarbij de gemiddelde diameter van de druppels niet is bepaald, wordt deze berekend uit vergelijking (3).

b) de stofoverdrachtscoëfficiënt k

Rushton o.s. (1) beschrijven het stofoverdrachtsproces van caprylzuur alsof al het caprylzuur in ongedissocieerde vorm (voortaan HZ genoemd) aanwezig is in de continue fase. Zij stelden op basis van de stofbalans voor HZ de volgende vergelijking op:

$$\log \frac{[HZ]_0 - [HZ]_*}{[HZ]_j - [HZ]_*} = \frac{kA [HZ]_0}{2,3V_c ([HZ]_0 - [HZ]_*)} (t - t_j) \quad (4)$$

Het is zonder meer aannemelijk dat in het benzeen alleen het niet geïoniseerde HZ oplost. In de waterfase kan het caprylzuur echter dissociëren tot Z^- en H^+ . De evenwichtsinstelling van het dissociatieevenwicht kan verondersteld worden oneindig snel plaats te vinden. Ook is het redelijk te veronderstellen dat om reden van elektronneutraliteit bij afwezigheid van andere ionen $[H^+]$ en $[Z^-]$ steeds aan elkaar gelijk moeten zijn.

De dissociatie zal invloed hebben op het stofoverdrachtsproces en wel op de drijvende kracht, als we het proces beschrijven met de gebruikelijke fysische stofoverdrachtscoëfficiënt. In deze situatie kunnen we ook spreken van een effectieve concentratie. In appendix A is het verband tussen deze C_{eff} en $[HZ]$ afgeleid.

We vinden dan:

$$C_{\text{eff}} = [HZ] + \frac{D_Z}{D_{HZ}} [Z] \quad (5)$$

invloed coëfficiënt dissociatie?

D_{HZ} is de diffusiecoëfficiënt van het ongedissocieerde caprylzuur en D_Z de diffusiecoëfficiënt van de caprylzuurionen.

De stofstroom per oppervlakteenheid is dan gelijk aan:

$$\phi_{HZ+Z}'' = k (C_{\text{coëff}} - C_{\text{ieff}}) \quad (6)$$

Vergelijking (6) is gesubstitueerd in vergelijking (1) en deze nieuwe vergelijking wordt gebruikt voor het opstellen van een computerprogramma voor de berekening van kA^* . In appendix B is dit programma gegeven voor proeven met een constante injectiesnelheid.

De resultaten van de stofoverdrachtsmetingen zijn weergegeven in tabel 3. De waarden van A^* en \bar{d} zijn berekend m.b.v. vergelijking (3) voor $\sigma = 23 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}^2$.

Tabel 3. Resultaten stofoverdrachtsmetingen.

$10^2 D$	n	kA^*	$10^{-4} A^*$	$10^5 k$	$10^5 d$	$Sh(= \frac{k d}{D \text{ Hz}})$
3.75	10	1.77	6.5	2.72	9.25	4.4
3.75	11.7	2.23	7.8	2.86	7.7	3.8
3.75	13.7	4.3	9.8	4.38	6.12	4.6
3.75	15	3.26	10.8	3.02	5.55	2.9
3.75	16.7	5.4	12	4.5	5	3.9
3.75	19.2	7.4	14.5	5.1	4.14	3.6
3.75	22.0	10.3	17	6.06	3.52	3.7
7.8	3.33	0.65	3.2	2.02	19	6.5
7.8	5	2.4	5.4	4.45	11.1	8.6
7.8	6.7	4.18	7.6	5.5	7.9	7.5
7.8	8.33	5.78	9.8	5.9	6.12	6.3
13.5	3.17	2.87	5.0	5.74	12	11.9
13.5	3.17	3.12	5.0	6.24	12	12.9
13.5	4.16	5.1	6.8	7.6	8.85	11.6
13.5	4.16	4.95	6.8	7.4	8.85	11.3
13.5	5	9.0	8.5	10.6	7.05	12.8
13.5	5	8.7	8.5	10.2	7.05	12.4
40	1	2.3	2.75	8.35	21.8	31
40	1.1	2.5	3.0	8.4	20	29
40	1.35	4.4	3.9	11.2	15.4	30

?

De Früsslingvergelijking [4] voor laminaire stroming om een bol luidt:

$$Sh = 2 + 0.6 (Re)^{1/2} (Sc)^{1/3} \quad (7)$$

Voor stofoverdracht van druppels met een vrij bewegend grensvlak geldt: (zie b.v. Beek e.a. [5])

$$Sh = 1.15 (Re)^{1/2} (Sc)^{1/3} \quad (8)$$

Het Re-getal uit vergelijking (7) en (8) is gedefinieerd als $v \bar{d} / \nu$. De kinematische viscositeit (ν) en het Schmidtgetal ($Sc = \nu / D_{HZ}$) zijn constant voor alle proeven. Uit vergelijking (3) volgt:

$$\bar{d} \div N^{-1.2} D^{-0.8} \quad (9)$$

Wanneer de druppels groter zijn dan de Kolmogoroffschaal, dan is de snelheid (v) van de druppel t.o.v. de omringende vloeistof volgens Kolmogoroff [6] slechts afhankelijk van de energiedissipatie per massa-eenheid en de druppeldiameter en niet van de viscositeit. De energiedissipatie per massa-eenheid is evenredig met $N^3 D^2$. Via dimensieanalyse verkrijgen we dan:

$$v \div N D^{2/3} \bar{d}^{1/3} \quad (10)$$

De Kolmogoroff-schaal komt ongeveer overeen met de afmetingen van de kleinste wervels. Voor deze kleinste wervels geldt dat het getal van Reynolds gelijk is aan één. Is de Kolmogoroff-schaal groter dan de druppeldiameter, dan speelt de viscositeit wel een rol.

We vinden dan:

$$v \div N^{3/2} D d^{1/2} / \nu^{1/2} \quad (11)$$

In alle gevallen, waarin we onze afleiding baseren op de energiedissipatie per massa-eenheid, vinden we de combinatie $N^3 D^3$ terug.

We verwachten op grond van de vergelijkingen (7) tot en met (11) voor het gemeten produkt kA^* , wanneer de druppels groter zijn dan de microschaal van turbulentie:

$$kA^* \div (N^3 D^2)^{0.7} \quad (12)$$

wanneer de druppels kleiner zijn dan de microschaal van turbulentie:

$$kA^* \div (N^3 D^2)^{3/4} \quad (13)$$

In figuur (5) is kA^* uitgezet tegen N^3D^2 . Duidelijk blijkt hieruit, dat onze meetresultaten niet voldoen aan de betrekkingen (12) of (13). De afhankelijkheid van het toerental is per vat wel juist, doch de invloed van de roerderdiameter is groter dan verwacht werd.

Hieruit concluderen we, dat noch vergelijking (7), noch vergelijking (8) op ons systeem van toepassing zijn.

Uit figuur (6), waarin kA^* is uitgezet tegen ND , blijkt:

$$kA^* \div (ND)^{2.4} \tag{4}$$

Er bestaat echter geen enkel stofoverdrachtsmodel, dat deze afhankelijkheid kan verklaren.

de weinig
"vondstroomende" tekst;
geen betoog

7. Discussie en conclusies

a) De gemiddelde druppeldiameter

De gevonden resultaten zijn een bevestiging van de metingen van Hoevernaar [2].

b) De stofoverdrachtscoëfficiënt

Uit de gevonden relaties:

$$kA^x \div (ND)^{2.74}$$

$$\text{en } A^x \div N^{6/5} D^{4/5}$$

$$\text{volgt: } k \div N^{1.2} D^{1.6} \tag{15}$$

Uit tabel 3 is ook af te leiden:

$$Sh \div D^{0.85}$$

Invullen van \bar{d} levert dan:

$$k \div N^{1.2} D^{1.65} \tag{16}$$

De betrekkingen (15) en (16) moeten uiteraard identiek zijn; binnen de nauwkeurigheid waarmee men de gevraagde exponenten bepalen kan, klopt dit dan ook.

De relatieve snelheid van de benzeendruppel ten opzichte van de omringende vloeistof kan veroorzaakt worden door:

1. de stijgsnelheid van de druppels
 2. het turbulente veld
- ad 1. De stijgsnelheid volgt uit:

$$v_s = \frac{\Delta\rho g}{18\eta} \bar{d}^2 \tag{17}$$

Het relatieve dichtheidsverschil tussen benzeen en water: $\Delta\rho = 120 \text{ kg/m}^3$.

Voor een deeltje van bijv. 10^{-4} m vinden we dan:

$$v_s = 7 \cdot 10^{-4} \text{ m/s.}$$

De relaties (7) en (8) geven:

$$Sh \div (v\bar{d})^{\frac{1}{2}}$$

Daar $v_s \div \bar{d}$ levert dit:

$$Sh \div \bar{d}^{3/2} \div N^{-9/5} D^{-6/5}$$

Dit is sterk in tegenspraak met onze resultaten.

ad 2. Voor de energiedissipatie per massaeenheid buiten de stuwstraal van de roerder werd door van Heuven berekend:

$$\begin{aligned} \epsilon &= 3.6 \frac{N^3 D^7}{H^5} = 3.6 (0.3)^5 N^3 D^2 \\ &= 8.75 \cdot 10^{-3} N^3 D^2 \end{aligned} \quad (18)$$

Uit de theorie van Kolmogoroff volgt:

$$v \approx \epsilon^{1/3} \bar{d}^{1/3}$$

mits \bar{d} groter is dan de Kolmogoroff-schaal.

In hetzelfde als onder ad 1 beschouwde geval ($d = 10^{-4}$ m, $N = 5 \text{ s}^{-1}$, $D = 7.8 \cdot 10^{-2}$ m) vinden we dan:

$$v \approx 8.4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s.}$$

Deze snelheid is ruim een factor 10 groter dan de stijgsnelheid. De stijgsnelheid kan dus zeker niet bepalend zijn voor het stofoverdrachtsproces. In het vorige hoofdstuk hebben we gezien dat onze meetresultaten echter niet te correleren zijn op basis van energiedissipatie per massaeenheid.

De berekende snelheid invullen in het Re-getal geeft:

$$Re = v\bar{d}/\nu \approx 0.84$$

De gemiddelde druppeldiameter is dus in het beschouwde geval kleiner dan de Kolmogoroffschaal. De berekening van v is derhalve onjuist. In dit gebied geldt:

$$v = \epsilon^{1/2} \bar{d}^{1/2} / \nu^{1/2}$$

We vinden hieruit: $v \approx 7.6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ en $Re \approx 0.76$

Opvallend is dat de snelheid voor druppels kleiner dan de Kolmogoroff-schaal evenals het Re-getal in werkelijkheid sneller afneemt dan wanneer

we de berekening uitvoeren alsof de druppels groter zijn dan de Kolmogoroffschaal.

Het blijkt ook dat we in de buurt van $Re = 1$ zitten, het is daarom interessant het overgangsgebied nader te onderzoeken.

De Komogoroffschaal vinden we uit de betrekking

$$\lambda = \epsilon^{-1/4} \nu^{-3/4} \quad (\text{zie b.v. [6]}) \quad (19)$$

substitutie van vergelijking (18) geeft:

$$\lambda = N^{-3/4} D^{-1/2} 10^{-4} \quad (20)$$

De gemiddelde druppeldiameter volgt uit betrekking (3)

$$We = \rho N^2 D^{4/3} \bar{d}^{5/3} / \sigma = 10^{-2}$$

Voor $\sigma = 23 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}^2$ en $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ levert dit

$$N^2 D^{4/3} \bar{d}^{5/3} = 23 \cdot 10^{-8}$$

$$\bar{d} = N^{-6/5} D^{-4/5} (23 \cdot 10^{-8})^{3/5}$$

$$\bar{d} = N^{-6/5} D^{-4/5} 10^{-4} \quad (21)$$

Gelijk stellen van (20) en (21) geeft:

$\lambda = d$ voor:

$$(N^3 D^2)^{-1/4} = (N^3 D^2)^{-2/5}$$

$$N^3 D^2 = 1 \quad (22)$$

De druppels zijn dus groter dan de Kolmogoroffschaal voor $N^3 D^2 < 1$ en kleiner voor $N^3 D^2 > 1$.

Figuur 5 toont de ligging van het onderzochte gebied ten opzichte van $N^3 D^2 = 1$.

Inderdaad blijken dan in het kleinste vat alle meetpunten in het gebied te liggen waar $d < \lambda$ is en in het grootste vat daarentegen is steeds $d > \lambda$. Toch kan dit niet de volledige verklaring voor het gevondene zijn, immers dan nog moet in twee vaten, waarvan wel de diameters verschillen, maar de energiedissipatie per massa-eenheid gelijk is, dezelfde waarde voor kA^* verwacht worden. Er is geen enkele reden om aan te nemen, dat

de beweeglijkheid van het grensvlak toeneemt bij toenemende vatdiameter, uitsluitend de druppelgrootte zal hiervoor bepalend zijn.

Een eerste stap om het stofoverdrachtsmechanisme in het beschouwde gebied nader te analyseren zal het werken met vaste deeltjes moeten zijn. Hiervoor is het dan wel gewenst deeltjes met dezelfde dichtheid als benzeen te nemen, waarvan bovendien de afmetingen gelijk zijn aan die van de nu onderzochte druppeltjes. Vindt men hetzelfde resultaat, dan weet men dat de druppeltjes als volledig star te beschouwen zijn en de beweeglijkheid van het oppervlak geen rol speelt. Het eventuele niet star zijn van onze druppeltjes zal dan blijken door lagere waarden van de stofoverdrachtscoëfficiënten die voor vaste deeltjes gevonden zullen worden.

Appendix A

Afleiding van de effectieve drijvende kracht bij het beschouwde stofoverdrachtsproces

We kunnen de vloeistof-vloeistof dispersie voorstellen als een verzameling omstroomde bollen. Ter vereenvoudiging hebben wij bij de volgende afleiding een aangestroomde vlakke plaat als rekenmodel gekozen. Het penetratiemodel en het filmodel, die beide zeer vaak gebruikt worden voor stofoverdrachtsberekeningen, leveren voor de effectieve drijvende kracht hetzelfde resultaat.

De aanstroomsnelheid van de vloeistof is v_{∞} , de x-richting is gelijk aan de stromingsrichting en dus ook gericht langs de plaat, $x = 0$ in het aanstroompunt, de y-richting is loodrecht op de stromingsrichting en loodrecht op de plaat. De plaat ligt dus in het vlak $y = 0$. De continuïteitsvergelijkingen voor de diverse componenten leveren:

$$D_{HZ} \frac{\partial^2 [HZ]}{\partial y^2} - v_x \frac{\partial [HZ]}{\partial x} - v_y \frac{\partial [HZ]}{\partial y} + r_{HZ} = 0 \quad (A1)$$

$$D_Z \frac{\partial [Z]}{\partial y^2} - v_x \frac{\partial [Z]}{\partial x} - v_y \frac{\partial [Z]}{\partial y} + r_Z = 0 \quad (A2)$$

$$r_Z = -r_{HZ} \quad K = [Z]^2/[HZ]$$

Omdat $[H^+]$ en $[Z^-]$ op elke plaats gelijk zijn, kunnen we met bovenstaande vergelijkingen volstaan.

Kombinatie van (A1) en (A2) levert:

$$D_{HZ} \frac{\partial^2 [HZ]}{\partial y^2} + D_Z \frac{\partial^2 [Z]}{\partial y^2} - v_x \left(\frac{\partial [HZ]}{\partial x} + \frac{\partial [Z]}{\partial x} \right) - v_y \left(\frac{\partial [HZ]}{\partial y} + \frac{\partial [Z]}{\partial y} \right) = 0 \quad (A3)$$

Volgens Beek [5] geldt:

$$\begin{aligned} v_x &= c_x x^{-1/2} y \\ v_y &= c_y x^{-3/2} y^2 \end{aligned} \quad \begin{aligned} c_x &= 0.332 v_{\infty}^{3/2} v^{-1/2} \\ c_y &= 0.083 v_{\infty}^{3/2} v^{-1/2} \end{aligned}$$

$$\text{Stel: } \psi = 2 [\text{HZ}]^{\frac{1}{2}} K_Z^{-\frac{1}{2}}$$

$$\text{dan is } [\text{HZ}] = \frac{1}{4} \psi^2 K_Z \text{ en } [Z] = \frac{1}{2} \psi K_Z$$

Na substitutie en enig herleiden wordt (A3):

$$\begin{aligned} (\psi + \frac{\text{D}_Z}{\text{D}_{\text{HZ}}}) \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \right) - \frac{v_x}{\text{D}_{\text{HZ}}} (\psi + 1) \frac{\partial \psi}{\partial x} \\ - \frac{v_y}{\text{D}_{\text{HZ}}} (\psi + 1) \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (\text{A3a})$$

$$\text{Stel } \eta = x^{-\frac{1}{2}} y \text{ en } \frac{\text{D}_Z}{\text{D}_{\text{HZ}}} = p$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = x^{-\frac{1}{2}} \frac{\partial \psi}{\partial \eta}$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = x^{-1} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2}$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = -\frac{1}{2} x^{-3/2} y \frac{\partial \psi}{\partial \eta}$$

In (A3a) invullen en herleiden levert:

$$(\psi+p) \frac{d^2 \psi}{d\eta^2} + \left(\frac{d\psi}{d\eta} \right)^2 + \frac{-c + \frac{1}{2} c x}{\text{D}_{\text{HZ}}} (\psi+1) \eta^2 \frac{d\psi}{d\eta} = 0 \quad (\text{A3b})$$

Deze vergelijking is niet analytisch op te lossen, we zijn vooral geïnteresseerd in de oplossing voor $\eta = 0$. De invloed van de laatste term is dan erg gering, een kleine verandering hierin, namelijk $(\psi+p)$ in plaats van $(\psi+1)$ stellen, verandert derhalve niet het resultaat maar vereenvoudigt wel het mathematisch oplossen. De oplossing die we nu vinden blijkt in elk geval voor $\eta = 0$ aan (A3b) te voldoen, meer is hier ook niet van belang.

$$\text{Stel } (\psi+1) = (\psi+p) \text{ en } w = (\psi+p) \frac{d\psi}{d\eta}$$

Substitutie geeft:

$$\frac{dw}{d\eta} = \frac{c - \frac{1}{2} c x}{\text{D}_{\text{HZ}}} \eta^2 w$$

$$w = c_1 \exp\left(\frac{c - \frac{1}{2} c x}{3 \text{D}_{\text{HZ}}} \eta^3\right)$$

$$(\psi+p)d\psi = c_1 \exp\left(\frac{c_y - \frac{1}{2}c_x}{3D_{HZ}} \eta^3\right) d\eta$$

te schrijven als:

$$(\psi + p) d\psi = c_1 dI$$

na integratie:

$$\frac{1}{2}\psi^2 + p\psi = c_1 I + c_2$$

De randvoorwaarden zijn: $\psi = \psi_i, \eta = 0$
 $\psi = \psi_\infty, \eta = \infty$

hieruit volgt:

$$c_1 = \left(\frac{1}{2}\psi_\infty^2 + p\psi_\infty\right) - \left(\frac{1}{2}\psi_i^2 + p\psi_i\right) / (I_\infty - I_0)$$

Voor de molenstroom caprylzuur per oppervlakte-eenheid geldt:

$$\phi''_{HZ+Z} = D_{HZ} \frac{\partial [HZ]}{\partial y} \Big|_{y=0} + D_Z \frac{\partial [Z]}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (A4)$$

Substitutie van de ingevoerde variabelen ψ en η geeft:

$$\phi''_{HZ+Z} = \frac{1}{2} D_{HZ} K_Z x^{-\frac{1}{2}} (\psi+p) \frac{d\psi}{d\eta} \Big|_{\eta=0} \quad (A4a)$$

$$(\psi+p) \frac{d\psi}{d\eta} \Big|_{\eta=0} = w \Big|_{\eta=0} = c_1$$

dus

$$\phi''_{HZ+Z} = \frac{1}{2} D_{HZ} K_Z x^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{2}\psi_\infty^2 + p\psi_\infty\right) - \left(\frac{1}{2}\psi_i^2 + p\psi_i\right) / (I_\infty - I_0)$$

$$I_\infty - I_0 = \int_0^\infty \exp\left(\frac{-\frac{1}{2}c_x + c_y}{3D_{HZ}} \eta^3\right) d\eta = \left(\frac{1}{3}\right) \cdot \left(\frac{3D_{HZ}}{\frac{1}{2}c_x - c_y}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Nu alles uitdrukken in de oorspronkelijke variabelen

$$\begin{aligned} \phi''_{\text{HZ}+\text{Z}} &= \frac{(0.332)^{1/3}}{\left(\frac{1}{3}\right)! 3^{1/3}} v_{\infty}^{1/2} v^{-1/6} D_{\text{HZ}}^{2/3} x^{-1/2} ([\text{HZ}]_{\infty} + p[\text{Z}]_{\infty} - [\text{HZ}]_i - p[\text{Z}]_i) \\ &= k (c_{\text{eff}} - c_{\text{eff}}) \end{aligned}$$

Voor de effectieve concentratie geldt dus:

$$c_{\text{eff}} = [\text{HZ}] + \frac{D_{\text{Z}}}{D_{\text{HZ}}} [\text{Z}] \quad (\text{A5})$$

D_{HZ} wordt berekend met de door Othmer en Thaker [7] gegeven betrekking:

$$D_{\text{HZ}} = 14 \cdot 10^{-5} (v)^{-1.1} (v_L)^{-0.6} = 5.8 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{sec}$$

Hierin is v_L het molaire volume van het caprylzuur bij zijn normaal kookpunt. Dit bedraagt, berekend met behulp van tabel 3-4 [7]: $201 \text{ cm}^3/\text{gmol}$.

De waarde van D_{Z} wordt berekend met de relatie genoemd in [5]:

$$D_{\text{H}^+} = D_{\text{Z}^-} = 2RT/F \left(\frac{1}{u_{\text{O}^+}} + \frac{1}{u_{\text{O}^-}} \right).$$

De grootte van u_{O^+} bedraagt voor het H^+ -ion: $360 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/v \text{ sec}$. De karakteristieke snelheid u_{O^-} van het Z^- -ion in water wordt gevonden door extrapolatie van de door Dingemans [8] gegeven waarden voor de snelheden van eenwaardige ionen van organische zuren: voor het caprylzuur wordt de karakteristieke snelheid dan: $28.7 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/v \text{ sec}$. Na invullen wordt $D_{\text{Z}} = D_{\text{H}} = 1.34 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}$.

Appendix B

Algolprogramma's

Het produkt $k.A^x$ wordt berekend uit:

$$\phi_{\text{mol in}} - \phi_{\text{mol uit}} = \frac{dc}{dt} V_c \quad (1)$$

Hierin is

$$\phi_{\text{mol uit}} = kA^x V_d (c_{\infty \text{eff}} - c_{i \text{eff}}) \quad (6)$$

Vergelijking (1) is hiertoe in differentievorm geschreven en de concentraties caprylzuur worden uit de ingelezen waarden van de geleidbaarheid berekend.

Als voorbeeld is hier gegeven het programma voor proeven waarbij met constant debiet wordt geïnjecteerd.

Daarna volgt het programma voor de berekening van het specifiek grensvlak, het Webergetal, de oppervlakte- en volumeverdeling en de getallen van Reynolds, betrokken op de druppeldiameter en roerderdiameter.

==a7, 3 98 9, f, dekkers,

==a 2,

```
'begin'  'integer' l, t, n, r, p;  
        'real' ka, qv, vc, vd, kz, b, dh, dhz, zx, hzx, gx, ax, dt, m, ci,  
        c, ao, hzi, te, tang; read(t); l:=0;  
nell:   read(p, ao, zx, gx, dt, r, te, vc, vd, qv);  
'begin'  'array' g, hz, z, a[1:r]; read(g, tang);  
        kz:=1.2810-5; dh:=1.3410-9; dhz:=0.5810-9;  
'for' n:=1 'step' 1 'until' r 'do'  
'begin'  z[n]:=zx+(g[n]-gx)*tang;  
        hz[n]:=z[n]*z[n]/kz; a[n]:=z[n]+hz[n];  
'end';  
        hzx:=zx*zx/kz; ax:=hzx+zx; b:=sqrt(kz)*  
        dh/dhz;  
        print('proefnummer'); vasko(3, 0, p);  
        print('tijd ka');  
        m:=((qv*te*ao)-(vc+qv*te)*ax)/(vd*hz);  
'for' n:=1 2 'step' 1 'until' (r-1) 'do'  
'begin'  ci:=(qv*ao*n*dt-(vc+qv*n*dt)*a[n])/  
        (m*vd); ci:=ci+b*sqrt(ci); c:=hz[n]+b*sqrt(nz[n]);  
        ka:=(qv*dt*2*ao-(qv*n*dt+vc)*(a[n+1]-  
        a[n-1]))/(2*dt*vd*(c-ci));  
        write(' '); vasko(5, 5, n*dt, ka);  
'end';  
        print('m waarde:'); vasko(4, 2, m); npag;  
'end';  
        l:=l+1; 'if' l 'less' t 'then' 'go to' nell;  
'end';
```



```
==a1,
' begin' 'integer' p,t,l,n; 'array' geg,sys t[1:4,1:8];
      read(t); l:=0;
n ell:
      read(p, geg,sys t,n);
' begin' 'integer' i,aant;
      'real' kb,rtot,pi,atot,vtot,aster,m,q,rs ter,f,signa,we,
      roender,vat,fractie,rer,red;
      'array' d,averd,area,volume,xarea,yarea,xvol,yvol[1:n];
      read(kb,averd);
      pi:=3.1415926536;
      aant:=0; rtot:=atot:=vtot:=0;
      'for' i:=1 'step' 1 'until' n 'do'
' begin' - aant:=averd[i]+aant;
      d[i]:=i*kb-kb/2;
      rtot:=6*pi*d[i]*averd[i]+rtot;
      area[i]:=pi*d[i]*d[i]*averd[i];
      atot:=area[i]+atot;
      volume[i]:=d[i]*area[i]/6;
      vtot:=volume[i]+vtot;
' end' ;
      rs ter:=rtot/vtot; aster:=atot/vtot;
      m:=1/(1-(aster^2)/rs ter);
      q:=m+1;
      'for' i:=1 'step' 1 'until' n 'do'
' begin' xarea[i]:=aster*d[i]/6;
      yarea[i]:=3*(area[i]/vtot)/(aster^2)*2/kb;
      xvol[i]:=(q-1)*xarea[i]/q;
      yvol[i]:=3*q*(volume[i]/vtot)/((q-1)*aster)*2/kb;
' end' ;
      read(f,signa,roender,vat,fractie);
      we:=(f/60)^power(2*(10-2*roender)^power(4/3)*
      (6/aster)^power(5/3)*106/signa;
      rer:=10^2*(f/60)*roender*roender;
      red:=10^6*(f/60)*((roender/100)^power(2/3))*
      ((6/aster)^power(4/3));
      print('proefnummer:'); vasko(3,0,p);
      print('
      bizondem eden:', geg);
      print('systeem',sys t,' - fractie');
      vasko(0,5,fractie);
      print('vat in cm',vat,' roender in cm ',roender,' toe
ren per min');vasko(4,0,f);
      print('oppervl spanning in dyne/cm');vasko(3,1,signa);
      print('
      totaal oppervlak in m2 :',atot,
      ' totaal aantal bolletjes:'); vasko(4,0,aant);
```

```
print(' totaal volume in m3      :', vtot,
      ' totale diameter maal zes pi in m:', rtot);
print('
      specifiek oppervlak, as ter', as ter,
      ' specifiek e s traal, rs ter:', rs ter);
print('
      erlangverdelingsvariabele voor het oppervlak, m:'
);
type(m);
print(' erlangverdelingsvariabele voor het volume , q:'
);
type(q); print('
      klass ebreedte in mu:');
vasko( 4, 2, kb/10-6 );
print(' aantal klassen: '); vasko( 4, 2, n);
print(' het webergetal=', we, ' re roender=', rer, ' re oee
ltjes=', red);
print('
      aantal diameter-mu y-as oppervl x-as oppe
rvl y-as volume x-as volume
      ');
print(' per klasse v. d. klasse verdeling verdeli
ng verdeling verdeling
      ');
'for' i:=1 'step' 1 'until' n 'do'
'begin' vasko( 5, 5, averd[i], d[i]/10-6, yarea[i],
xarea[i], yvol[i], xvol[i]); write('
      ');
'end';
npag;
'end'; l:=l+1; 'if' l less' t' then' goto nell;
'end';
```

Symbolenlijst

<u>Symbol</u>	<u>Omschrijving</u>	<u>Dimensie</u>
A	totaal oppervlak van de discontinue fase	m^2
A^x	specifiek oppervlak van de discontinue fase	m^{-1}
c	concentratie caprylzuur	$kmol.m^{-3}$
d	diameter van een druppel	m
\bar{d}	gemiddelde druppeldiameter	m
D	diameter van de roerder	m
F	getal van Faraday	Coul./kgeq.
H	diameter (= hoogte) van het vat	m
k	stofoverdrachtscoëfficiënt	$m.s^{-1}$
K_Z	dissociatie-evenwichtsconstante	$kmol.m^{-3}$
l	lengte roerderblad	m
m	verdelingscoëfficiënt	-
N	toerental	s^{-1}
R	gasconstante	$J.kmol^{-1}K^{-1}$
Re	getal van Reynolds (= $\bar{v}d/\nu$)	-
Sc	getal van Schmidt (= ν/D_{HZ})	-
Sh	getal van Sherwood (= kd/D_{HZ})	-
t	tijd	s
u_o^+	karakteristieke snelheid van een positief ion	$m^2.v^{-1}.s^{-1}$
u_o^-	karakteristieke snelheid van een negatief ion	$m^2.v^{-1}.s^{-1}$
v	snelheid	$m.s^{-1}$
v_s	stijgsnelheid	$m.s^{-1}$
V_c	volume continue fase	m^3
V_d	volume disperse fase	m^3
v_L	molair volume	$m^3.kmol^{-1}$
We	getal van Weber	-

<u>Symbol</u>	<u>Omschrijving</u>	<u>Dimensie</u>
ϵ	energiedissipatie per massaeenheid	$m^2 \cdot s^{-3}$
Φ_{mol}	molenstroom per tijdseenheid	kmol
λ	Kolmogoroffschaal	m
ρ	dichtheid van de continue fase	$kg \cdot m^{-3}$
η	dynamische viscositeit van de continue fase	$N \cdot s \cdot m^{-2}$
ν	kinematische viscositeit van de continue fase	$m^2 \cdot s^{-1}$
σ	grensvlakspanning	$kg \cdot s^{-1}$
D	diffusiecoëfficiënt in de continue fase	$m^2 \cdot s^{-1}$

Indices

eff	effektief
H	van het H^+ -ion
HZ	van het ongedissociëerde zuur
i	aan het grensvlak
j	op tijdstip j
o	in de begintoestand
Z	van het Z^- -ion
*	bij evenwicht
∞	in de bulk

Literatuur

1. J.H. Rushton, S. Nagata and T.B. Rooney;
A.I.Ch.E. Journal, 10 (1964) 298.
2. J.C. Hoevenaar; afstudeerverslag,
Laboratorium voor Fysische Technologie, Delft 1967.
3. A.C.W. Leenards, J.J.M. Ruemkens; afstudeerverslag,
Laboratorium voor Fysische Technologie, Delft 1966.
4. N. Frössling; Beitr. Geophys., 52 (1928) 170.
5. W.J. Beek, H. Kramers, Collegedictaat Stofoverdracht zonder en met
chemische reactie, Delft 1960.
6. R. Shinnar, J.M. Church; Ind.Engng.Chem., 52 (1960) 253.
7. R.C. Reid, T.K. Sherwood; The properties of gases and liquids,
New York, 1966, blz. 87 en 550.
8. P. Dingemans; Electrochemie, Delft 1955, blz. 31.

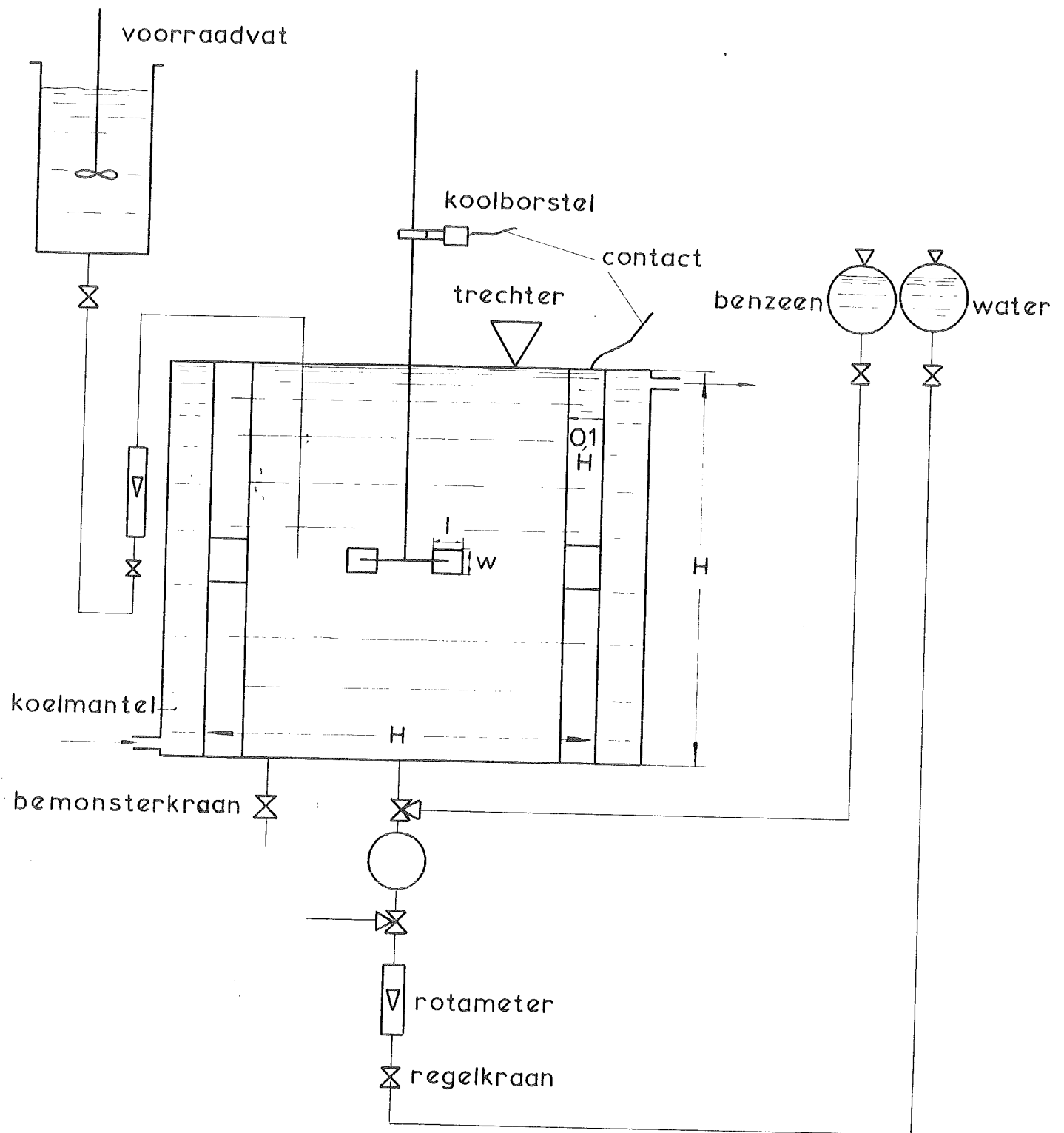
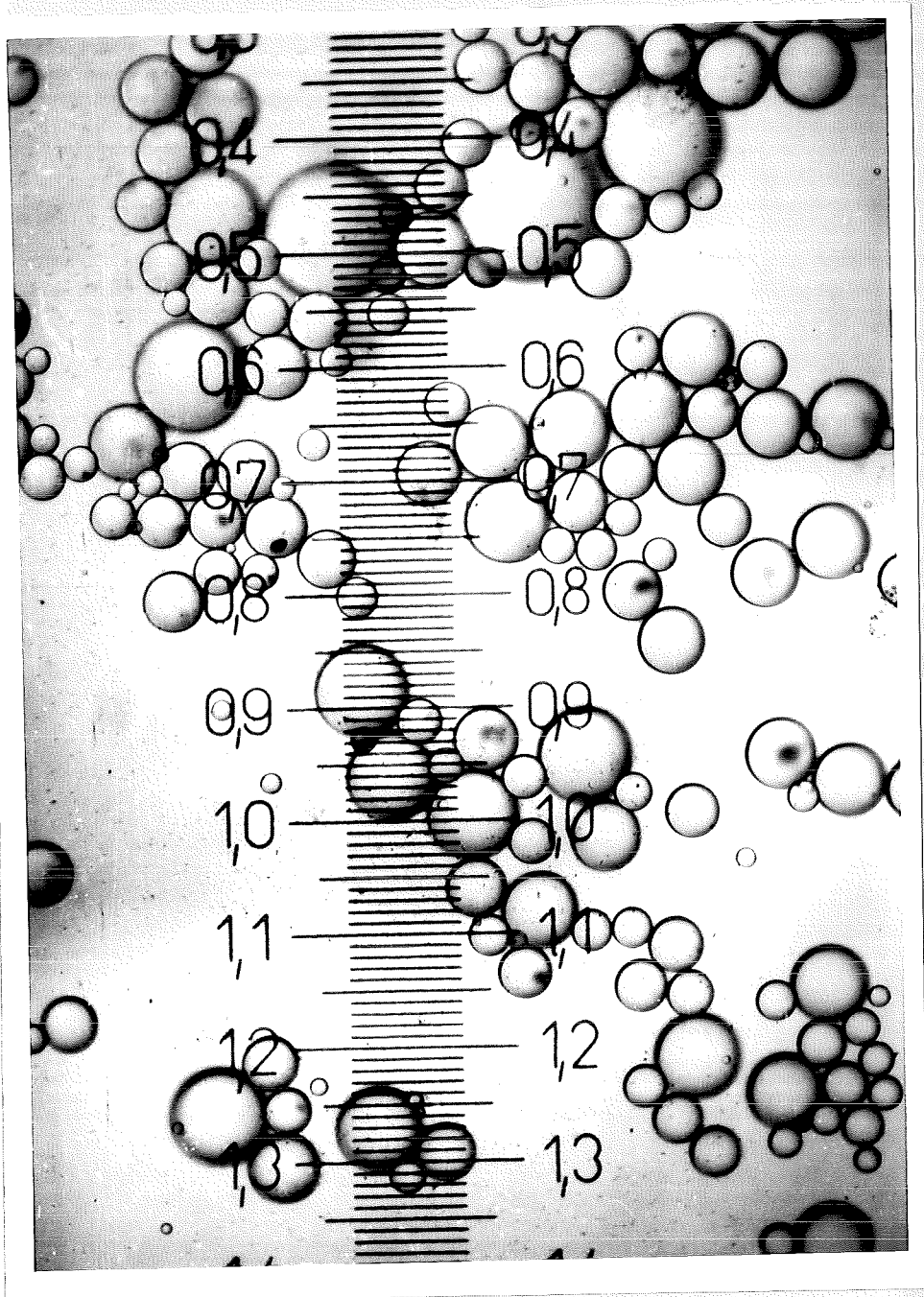


Fig. 1 Principeschets van de vaten
 $D/l = 4$; $D/w = 5$;



Figuur 2. Foto-opname door een microscoop van de door zeep
gestabiliseerde dispersie en van de standaard millimeter.

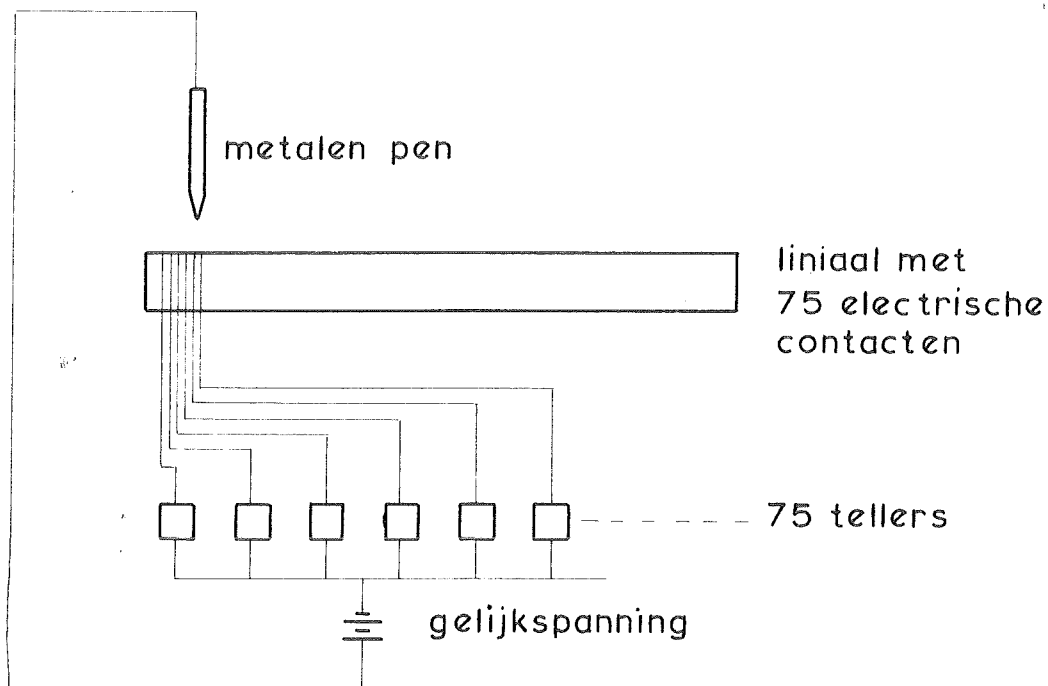


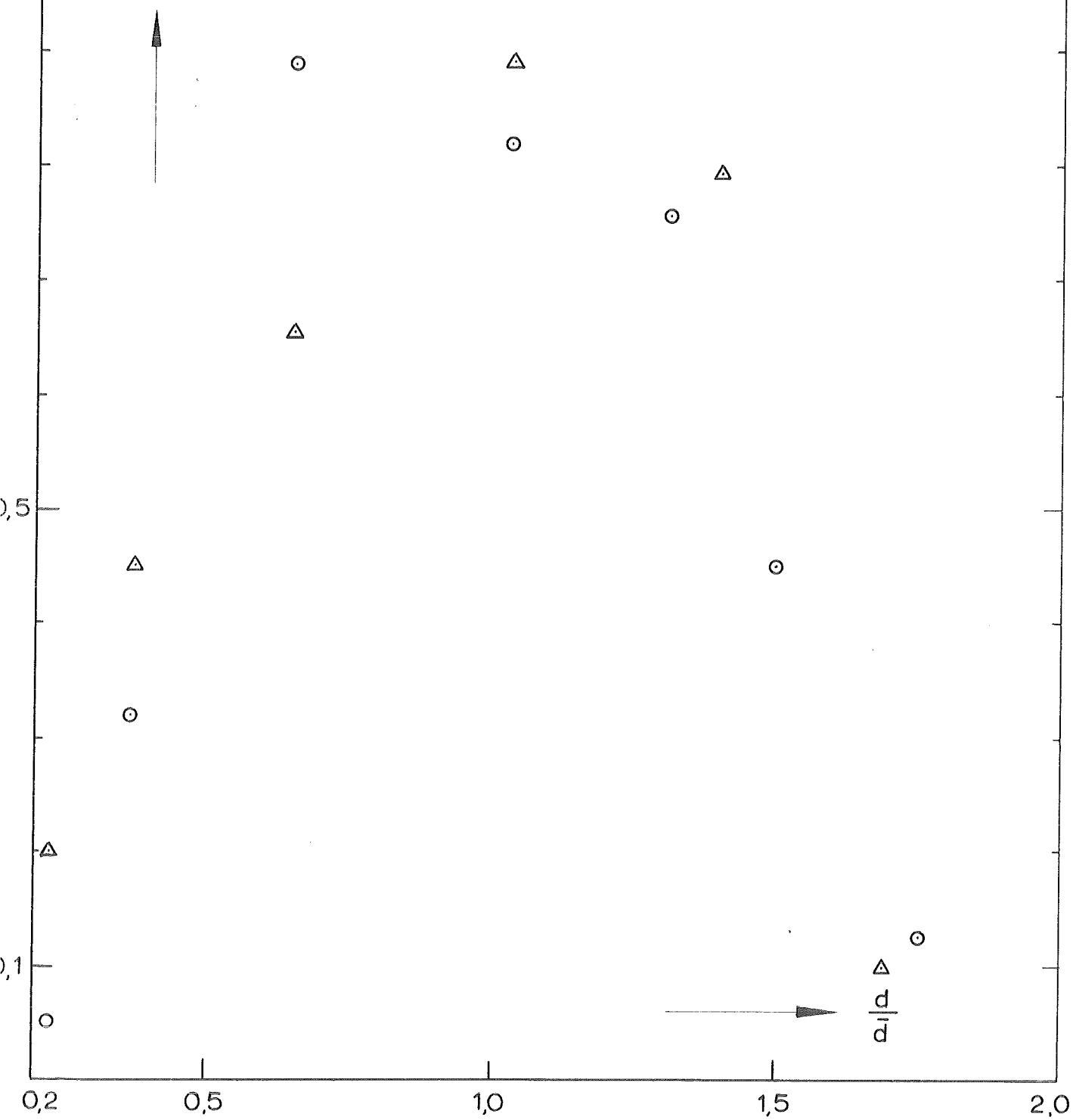
Fig. 3 Telapparatuur.

Lineaal gekoppeld aan telefoontellers

Fig. 4 Oppervlakteverdeling

○ voor stofoverdracht
△ tijdens — " —

oppervlak
(dimensieloos)



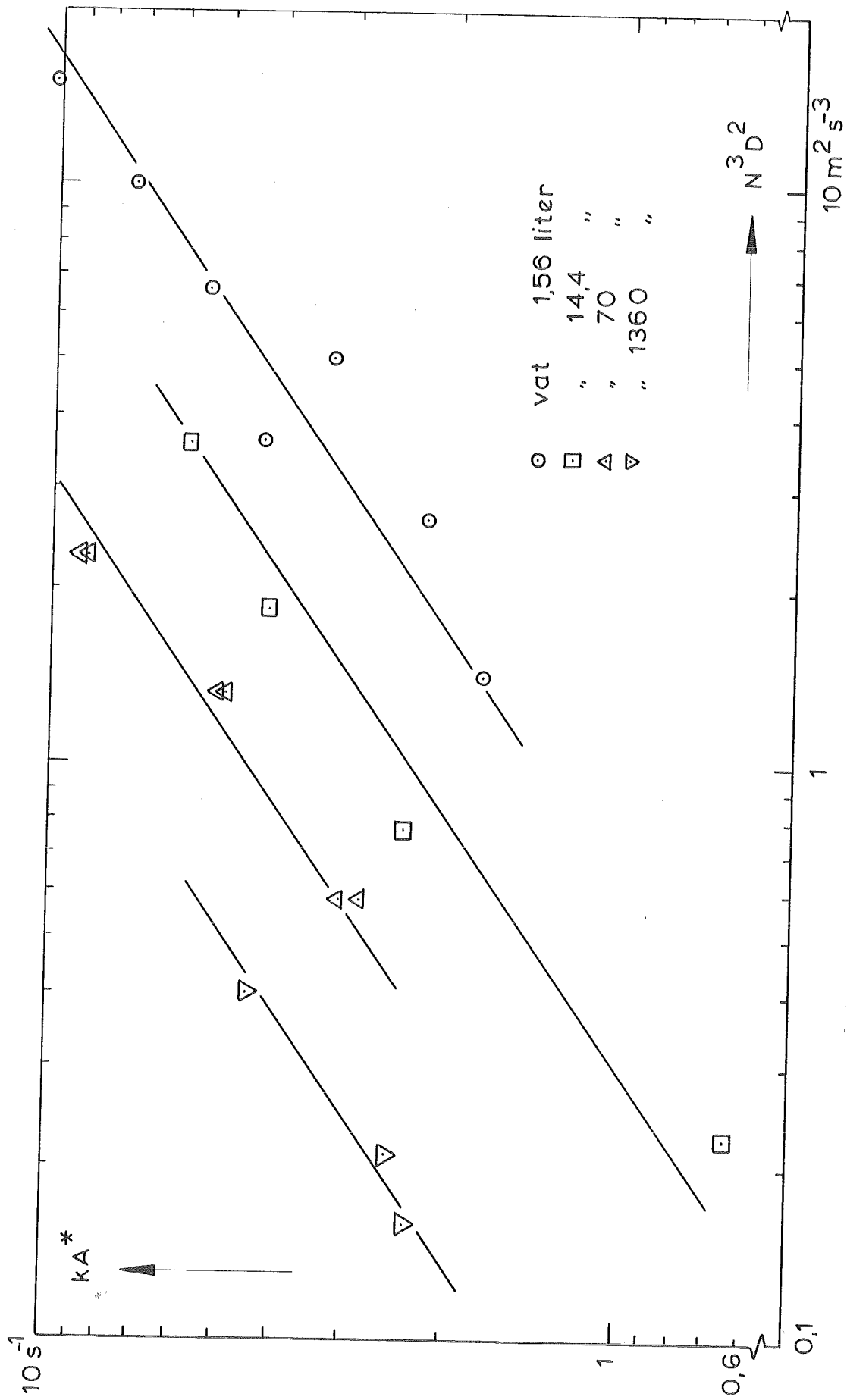


Fig. 5 kA^* als functie van $N^3 D^2$

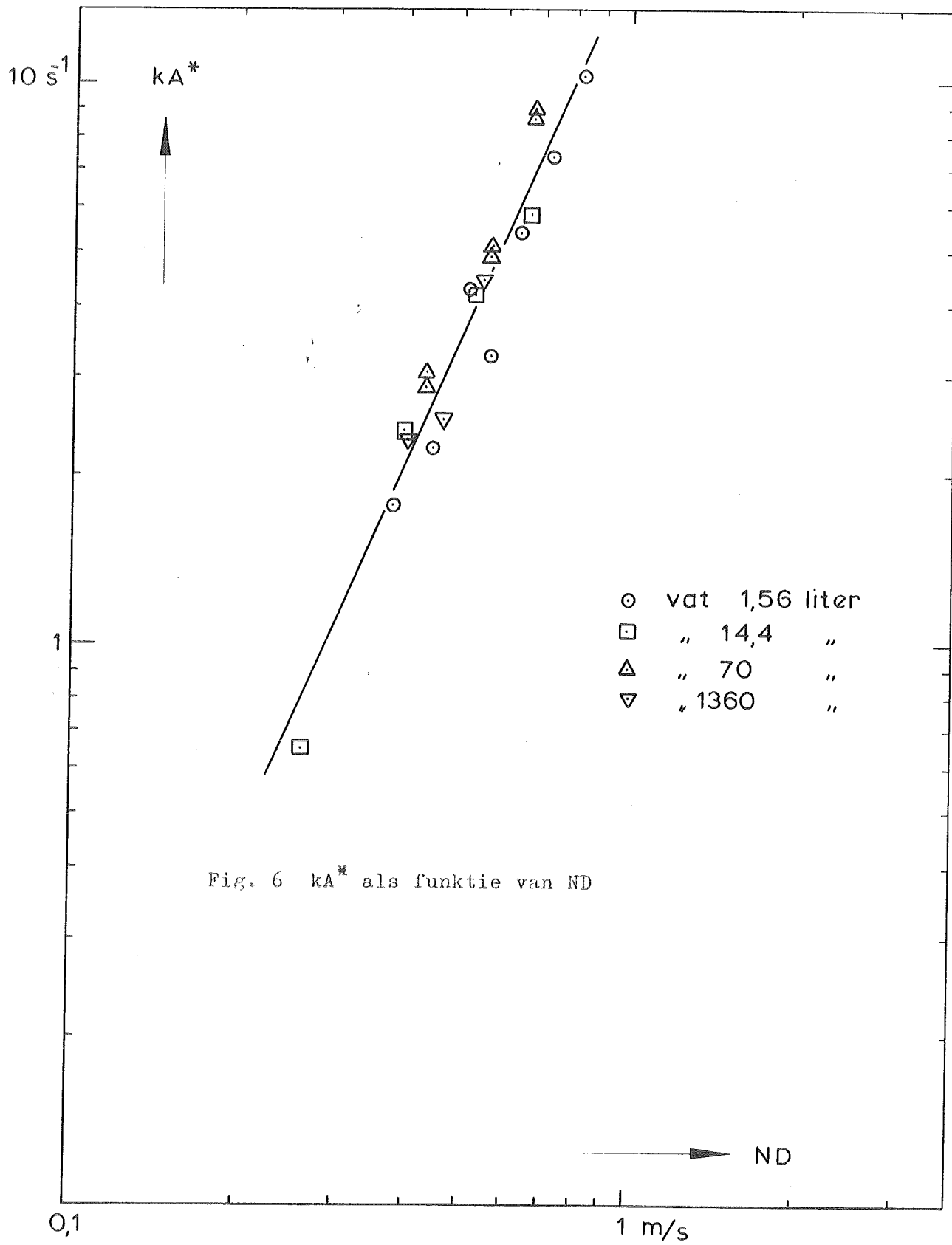


Fig. 6 kA^* als functie van ND