

# Lucht/waterspoeling bij ultrafiltratie

Afstudeerverslag

4 februari 2000

G.I.M. Worm

---





Ignaz

Technische Universiteit Delft  
Faculteit der Civiele Techniek en Geowetenschappen  
Vakgroep Waterbeheer, Milieu- en Gezondheidstechniek  
Sectie Drinkwater

## Lucht/waterspoeling bij ultrafiltratie

Student:  
G.I.M. Worm

Hoogleraar:  
Prof. ir. J.C. van Dijk

Examencommissie:  
Dr. ir. H. Futselaar (Stork Friesland)  
Ir. J.Q.J.C. Verberk (TU Delft)  
Dr. ir. J. de Koning (TU Delft)

Delft, 4 februari 2000

## Voorwoord

Voor u ligt het resultaat van bijna acht maanden afstuderen aan de faculteit der Civiele Techniek en Geowetenschappen, sectie Drinkwater. Dit onderzoek is een eerste stap geweest in het leren begrijpen van de veelbelovende lucht/water-spoeling bij ultrafiltratie.

De enthousiaste reacties die ik tijdens mijn afstuderen kreeg van geïnteresseerden uit de drinkwaterwereld zijn erg stimulerend geweest.

Mijn dank gaat uit naar Jasper Verberk, voor de zeer intensieve begeleiding, professor van Dijk, Harry Futselaar en Johan Heiszwolf. Verder wil ik Cees Boeter en Tonnie Schuit bedanken voor de praktische ondersteuning tijdens het (ver)bouwen van de proefopstelling.

Ignaz Worm  
Delft, 4 februari 2000



## Samenvatting

Membranfiltratie is een fysisch scheidingsproces dat een semi-permeabel membraan gebruikt om verontreinigingen van een vloeistof te scheiden. Bij de onderzochte dead-end ultrafiltratie wordt het te filtreren ruwwater in buisvormige membranen geperst met een diameter van 1 tot 15 mm. Het membraan laat water door en vangt deeltjes groter dan 10 nm af.

Om het achtergebleven vuil te verwijderen bestaan drie conventionele reinigingstechnieken: backflush, forward flush en chemisch reinigen. Bij de forward flush wordt de bovenzijde van het membraan opengezet en wordt de buis doorstroomd met ruwwater om zo het vuil weg te spoelen.

In dit onderzoek is een nieuwe techniek onderzocht: de lucht/waterspoeling. Het is een forward flush met lucht en water. Belangrijkste reden om lucht toe te voegen is dat zo op eenvoudige wijze de lokale watersnelheid wordt verhoogd en daarmee de

turbulentie en reinigende kracht van het water. Uit eerder onderzoek is gebleken dat de lucht/waterspoeling tot 95% chemicaliebesparing kan leiden, en kan zorgen voor hogere opbrengsten.

Om inzicht te krijgen in het fenomeen lucht/waterspoeling zijn drie experimenten uitgevoerd. De eerste had als doel het visualiseren van de verschillende belpatronen. Een literatuurstudie is uitgevoerd en in het lab van Gezondheidstechniek is een opstelling gebouwd met glazen buizen. Het blijkt dat de belvorm afhangt van de lucht- en watersnelheid en de buisdiameter.

Daarna is de reinigende kracht van de belvormen onderzocht in een opstelling waarbij, door het filtreren van spoelwater, een vaste massa vuil op het membraan is aangebracht. De hoeveelheid droge stof in de afgevoerde vuilstroom werd daarbij als maat voor de reinigende kracht aangehouden.

Er zijn drukvalmetingen uitgevoerd en er is een theoretische onderbouwing van de meetresultaten gevonden. Verhoging van de lucht- en/of watersnelheid leidt tot een toename van de drukval tgv wrijving. Een verhoogde drukval tgv wrijving betekent betere reiniging, zo wordt aangenomen. Bovendien neemt bij verhoging van de luchtsnelheid het hydrostatische drukverlies af.

Geconcludeerd wordt dat de lucht/waterspoeling vijf maal beter reinigt dan een forward flush met gelijke watersnelheid. Het praktijkadvies luidt een watersnelheid van 0.2 m/s en een luchtsnelheid van 0.3 m/s te hanteren. Het bijbehorende belpatroon is een helm/slug flow.



# Inhoud

	7.4.3 Resultaten	27
	7.5 Mét of zonder lucht?	30
	7.6 Conclusies	31
<b>1. Inleiding</b>	<b>1</b>	
<b>2. Membraanfiltratie</b>	<b>2</b>	
2.1 Historie	2	
2.2 Typen membraanfiltratie	2	
2.3 Debiet, flux en recovery	4	
<b>3. Reiniging</b>	<b>5</b>	
3.1 Vervuiling van de membranen	5	
3.2 Conventionele reinigingstechnieken	5	
3.3 Airflush	6	
<b>4. Probleemanalyse</b>	<b>8</b>	
4.1 Probleemstelling	8	
4.2 Doelstelling	8	
4.3 Opzet van het onderzoek	8	
<b>5. Bellenpatronen</b>	<b>9</b>	
5.1 Probleem, doel, aanpak	9	
5.2 Literatuurstudie		
5.2.1 Parameters	9	
5.2.2 Belvormen	11	
5.2.3 Instellingen	12	
5.3 Experimenten		
5.3.1 Opstelling	14	
5.3.2 Beschrijving van de proeven	15	
5.3.3 Resultaten	15	
5.4 Conclusies	17	
<b>6. Koeklaagproeven</b>	<b>18</b>	
6.1 Probleem, doel, aanpak	18	
6.2 Begrippen	18	
6.3 Experimenten		
6.3.1 Opstelling	18	
6.3.2 Beschrijving van de proeven	19	
6.3.3 Resultaten	20	
6.4 Conclusies	21	
<b>7. Drukvalen</b>	<b>23</b>	
7.1 Probleem, doel, aanpak	23	
7.2 Theorie één fase stroming	23	
7.3 Theorie twee fasen stroming	25	
7.4 Experimenten		
7.4.1 Opstelling	26	
7.4.2 Beschrijving van de proeven	27	
<b>8. Conclusie en aanbevelingen</b>	<b>32</b>	
8.1 Conclusies	32	
8.2 Aanbevelingen vervolgonderzoek	32	
<b>Literatuur</b>	<b>34</b>	
	Bijlage 1: Luchtdebiet omrekenfactor Krohne	
	Bijlage 2: Afmetingen proefopstelling (alle proeven)	
	Bijlage 3: Belpatronen in Ø 15 mm	
	Bijlage 4: Belpatronen in Ø 5 mm	
	Bijlage 5: Belpatronen in Ø 1 mm	
	Bijlage 6: Aanvullende belpatroon proeven	
	Bijlage 7: Belpatroondiagram Ø 1 mm	
	Bijlage 8: Meetformulier koeklaagproeven	
	Bijlage 9: Meetresultaten koeklaagproeven	
	Bijlage 10: Meetresultaten drukvalproeven glazen buis Ø 5 mm	

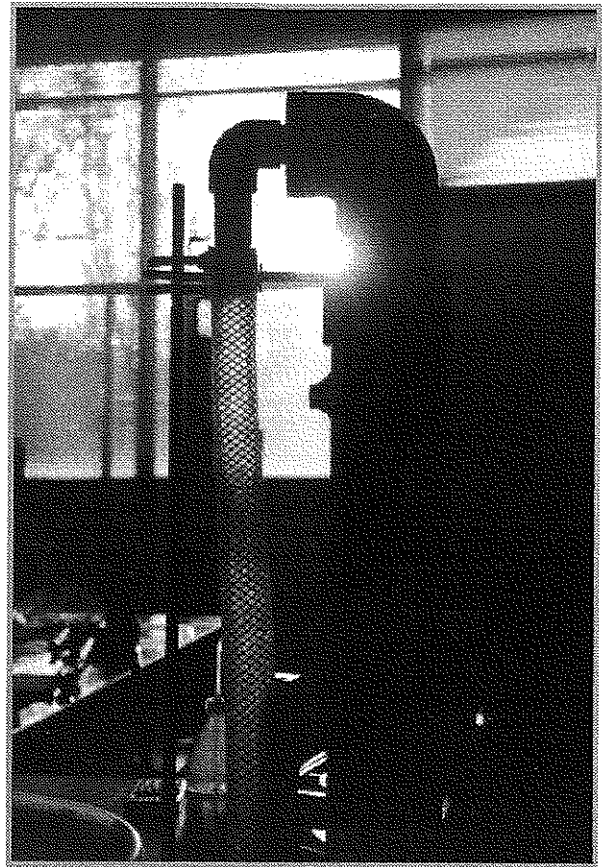
## 1. Inleiding

Na succesvolle proeven van Stork Friesland, DHV Water en Nuon Water (voorheen Waterleiding Friesland) is bij pompstation Spannenburg een ultrafiltratie installatie gebouwd, waarin het mogelijk is lucht/waterspoeling toe te passen. Uit de proeven bleek dat de lucht/waterspoeling een veelbelovende manier van reiniging van membranen is, doordat chemicaliebesparing tot circa 95% mogelijk is en, in technische zin, hogere opbrengsten haalbaar zijn [vd Meer].

Om inzicht te verkrijgen in het fenomeen lucht/waterspoeling is op 1 mei 1999 dit onderzoek gestart. Het is uitgevoerd op de TU Delft, faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, sectie Drinkwater, in samenwerking met Stork Friesland en Nuon Water. Het onderzoek heeft bestaan uit experimenten, uitgevoerd in het laboratorium van Gezondheidstechniek van de TU Delft, uit literatuuronderzoek en een theoretische beschouwing. Dit laatste met hulp van Dr. Ing. J.J. Heiszwolf van de sectie Industriële Katalyse, faculteit Technische Natuurwetenschappen.

Dit verslag bestaat uit acht hoofdstukken. Hoofdstuk twee en drie behandelen membraanfiltratie in het algemeen en de verschillende reinigingstechnieken. In hoofdstuk vier wordt de probleemanalyse behandeld. De drie hoofdstukken daarna beschrijven de drie hoofdexperimenten van dit onderzoek, respectievelijk onderzoek naar belpatronen, de koeklaagproeven en drukvalmetingen. In het laatste hoofdstuk worden de verbanden tussen de drie proeven blootgelegd en worden de hoofdconclusies en aanbevelingen gepresenteerd.

De door Stork Friesland gedeponeerde naam voor de lucht/waterspoeling is airflush.



## 2. Membraanfiltratie

Om een indruk te krijgen wat ultrafiltratie inhoudt wordt in dit hoofdstuk membraanfiltratie behandeld. Een kort historisch overzicht, de verschillende typen membraanfiltratie en enkele belangrijke begrippen zullen de revue passeren.

### 2.1 Historie

Jaarlijks wordt in Nederland circa 1250 miljoen kubieke meter drinkwater geproduceerd (bron: Vewin). Bijna tweederde van het drinkwater heeft grondwater als bron. Het overige deel vindt zijn oorsprong in oppervlaktewater. Membraanfiltratie is een zuiveringstechniek die de afgelopen jaren steeds meer in de belangstelling is komen te staan. Membraanfiltratie is een fysisch scheidingsproces dat een semi-permeabel membraan gebruikt om water van verontreinigingen te scheiden [Mulder]. De techniek wordt sinds 1960 in de VS ingezet voor de ontzouting van zeewater ten behoeve van de drinkwatervoorziening. In 1970 werd voor het eerst in Nederland met membraanfiltratie geëxperimenteerd. Inmiddels kent membraanfiltratie vele (industriële) toepassingen. Technologische ontwikkelingen hebben er toe geleid dat membraanfiltratie tegenwoordig ook in de drinkwaterzuivering in Nederland wordt toegepast.

Om de verdrogingsproblematiek in Nederland aan te kunnen pakken wordt in toenemende mate oppervlaktewater als ruwwater gebruikt ipv grondwater. Door het voorkomen van uiteenlopende deeltjesgroottes in het oppervlaktewater is voor zuivering een fysische (voor de grote deeltjes) en een

chemische (voor kleine en opgeloste deeltjes) zuiveringsstap nodig. Membraanfiltratie kan deze twee stappen vaak in één keer realiseren.

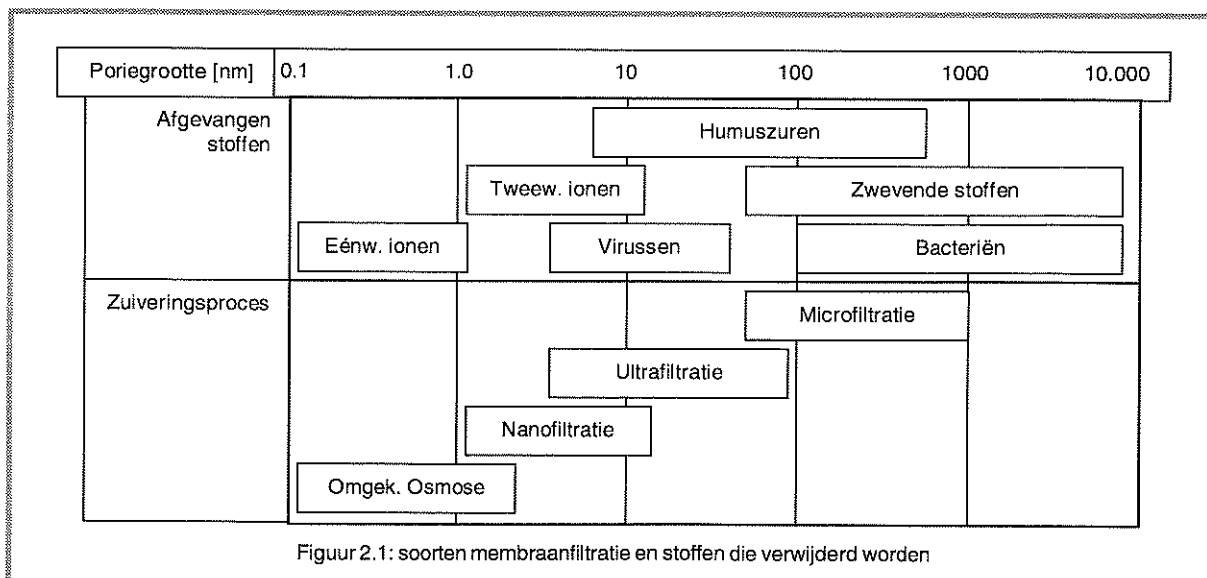
### 2.2 Typen membraanfiltratie

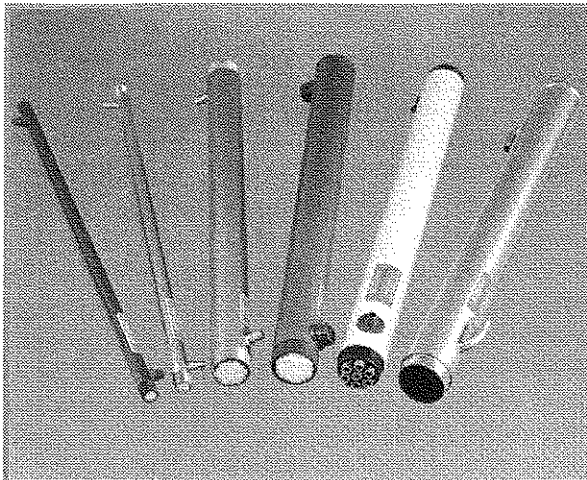
Er zijn vier soorten membraanfiltratie. Met afnemende poriegrootte van het filtermateriaal zijn dat microfiltratie, ultrafiltratie, nanofiltratie en omgekeerde osmose, zie figuur 2.1. Bij microfiltratie worden zwevende stoffen en bacteriën tegengehouden, maar virussen en humuszuren doorgelaten. Deze worden wel door ultrafiltratie afgevangen. Nanofiltratie houdt alle eerder genoemde stoffen en daarnaast tweewaardige ionen tegen, zoals calcium of magnesium, zodat bijvoorbeeld water onthard kan worden. Omgekeerde osmose (RO) vangt zelfs éénwaardige ionen af (natrium, chloride), zodat deze techniek ingezet kan worden voor het ontzouten van (zee)water en het verwijderen van bestrijdingsmiddelen. In dit onderzoek wordt alleen naar gekeken naar een toepassing voor ultrafiltratie.

#### Filtermateriaal, dimensies

Er zijn verschillende producenten van ultrafiltratiemembranen, die allemaal hun eigen specifieke modules bouwen. Een module bestaat uit een buis (vaak uitgevoerd in PVC), twee eindkappen, een aantal membranen en één of twee aansluitpunten om voor de afvoer van het gefiltreerde water. De modules zijn leverbaar in diameters variërend van 1 tot 12 inch (1 inch = circa 2.4 cm).

In één module bevinden zich enkele tot tienduizenden membranen, afhankelijk van de gekozen diameter van de module en de membranen. De





Figuur 2.2: 1 inch en 3 inch modules [bron: Stork]

lengte van de modules varieert van één tot drie meter, maar het meest voorkomend zijn modules van één meter.

In de membranen vindt de daadwerkelijke scheiding plaats. Hier worden buisvormige membranen besproken leverbaar in diameters variërend van 0.5 tot 25 mm en met verschillende eigenschappen. Zo kunnen de membranen zelfdragend of samengesteld worden uitgevoerd. Een samengesteld membraan ontleent zijn sterkte en stijfheid aan een (goed doorlatend) dragermateriaal, terwijl de scheidingsfunctie door een dun laagje filtermateriaal wordt verzorgd. Bij zelfdragende membranen zorgt het filtermateriaal zelf voor de stijfheid. Membranen met een binnendiameter kleiner dan circa drie millimeter worden meestal zelfdragend uitgevoerd, met een grotere diameter samengesteld.

#### Crossflow en dead-end

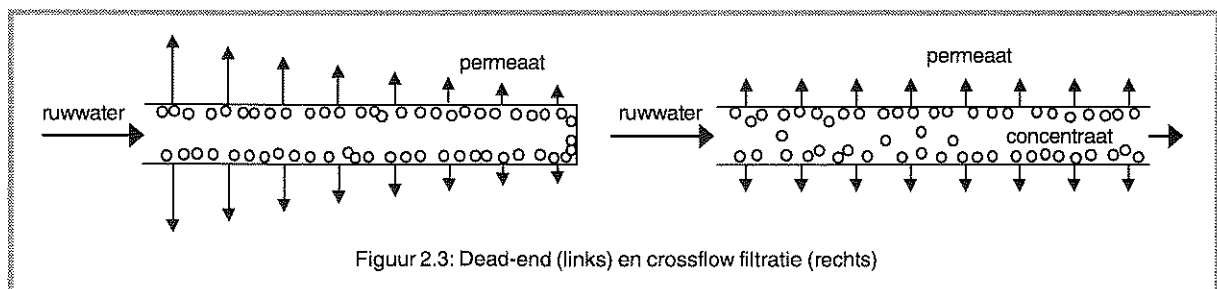
Ultrafiltratie kan crossflow of dead-end bedreven worden, zie figuur 2.3. Bij crossflow filtratie stroomt een deel van het ruwwater (bijvoorbeeld 10%) door het filter naar de permeaatzijde en stroomt de rest (in dit geval 90%) van het ruwwater met het grootste deel van het afgescheiden vuil aan de concentraatzijde naar buiten.

water rondgepompt, hetgeen niet alleen energie kost, maar ook de aanleg van extra leidingwerk nodig maakt. Door de hoge watersnelheid wordt opbouw van een koeklaag verstoord en wordt deze niet te dik.

Bij dead-end filtratie verlaat al het instromende water als permeaat het systeem. Gevolg is dat al het vuil achterblijft in de membranen, waardoor de hoeveelheid gefiltreerd water per tijdseenheid afneemt. De (chemische) reiniging die dan wordt toegepast verwijdert het vuil, maar tast ook de membranen aan. De toegenomen chemische bestendigheid van de membranen maakt dat dit nadeel echter steeds minder belangrijk wordt. Een ander voordeel van een dead-end tov een crossflow systeem is de grotere opbrengst en de energiebesparing door het kunnen toepassen van steeds lagere drukken. In Nederland wordt daarom dead-end filtratie verkozen boven de crossflow bedrijfsvoering. In dit onderzoek wordt dan ook dead-end filtratie als uitgangspunt genomen.

#### Verticaal en horizontaal

De modules kunnen horizontaal of verticaal geplaatst worden. Dat de modules tot een aantal jaar geleden altijd horizontaal werden geplaatst heeft een historische reden. Voor het ontzouten van zeewater zijn RO-installaties gebouwd, waarin drukken rond zestig bar gerealiseerd worden. Om investeringskosten te besparen zijn lange modules gebruikt (zes meter) en om bouwhoogten van gebouwen te beperken zijn deze buizen horizontaal geplaatst. Bij toepassing van lagere drukken kunnen de modules in PVC uitgevoerd worden en korter worden. Door de intrede van lucht/waterspoeling worden de modules tegenwoordig bij voorkeur verticaal geplaatst. Proeven in een horizontaal geplaatste module bij Stork Friesland in Gorredijk hebben het vermoeden bevestigd dat door ontmenging van lucht en water in de eindkap vooral de hoogst gelegen rietjes met lucht gespoeld worden en de membranen onderin de module vooral met water, zie figuur 5.13 [vd Meer].



Figuur 2.3: Dead-end (links) en crossflow filtratie (rechts)

### 2.3 Debiet, flux en recovery

Debiet, flux en recovery zijn drie belangrijke begrippen in de wereld van membraanfiltratie.

Een debiet is een volume (bijvoorbeeld water) dat per tijdseenheid passeert, uitgedrukt in kubieke meters per uur:

$$Q = \frac{V}{t}$$

met:  $Q$  = debiet [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]  
 $V$  = volume [ $\text{m}^3$ ]  
 $t$  = tijd [h]

De flux is de hoeveelheid water die per tijdseenheid door één vierkante meter filtermateriaal stroomt. Hij hangt af van het drukverschil over het membraan (de transmembraandruk), de viscositeit van de gefiltreerde vloeistof en de weerstand over het membraan, volgens:

$$J = \frac{Q}{A} = \frac{\text{TMD} \cdot 3600}{\mu \cdot R \cdot 1000}$$

met:  $J$  = flux [ $\text{l}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ]  
 $Q$  = debiet [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]  
 $A$  = membraanoppervlak [ $\text{m}^2$ ]  
 $\text{TMD}$  = transmembraandruk [Pa]  
 $\mu$  = dynamische viscositeit [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ]  
 $R$  = weerstand [ $1/\text{m}$ ]

De weerstand is opgebouwd uit vijf delen, zie hoofdstuk drie. Een typische ultrafiltratieflex is  $100 \text{ l}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$  bij een TMD van  $5000 \text{ Pa}$  ( $0.5 \text{ bar}$ ). Voor de dynamische viscositeit kan  $1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$  worden aangehouden.

De recovery is de verhouding tussen de hoeveelheid water dat als permeaat de module verlaat en de hoeveelheid voedingswater. In formulevorm:

$$\gamma = \frac{Q_{\text{Permeaat}}}{Q_{\text{Aangevoerd}}} \cdot 100\%$$

met:  $\gamma$  = recovery [%]  
 $Q_{\text{permeaat}}$  = permeaatdebiet [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]  
 $Q_{\text{permeaat}}$  = debiet voedingswater [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

Als een recovery van 95% gehaald wordt betekent dat dus, dat 95% van het ruwwater uiteindelijk schoon de module weer uitstroomt en dat het ruwwater twintig keer geconcentreerd wordt. Bij

dead-end ultrafiltratie zijn recovery's van 95% en hoger haalbaar.

### 3. Reiniging

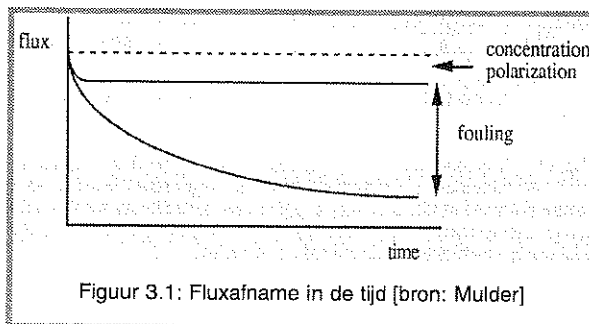
Een consequentie van dead-end filtratie is dat de weerstand van het membraan steeds verder toeneemt, waardoor de opbrengst afneemt. Na een bepaalde tijd is de opbrengst zo laag dat het membraan gereinigd moet worden. In dit hoofdstuk worden eerst de verschillende manieren waarop het membraan vervuild raakt besproken, daarna de verschillende (conventionele) reinigingsmethoden en tenslotte wordt ingegaan op de lucht/waterspoeling of airflush.

#### 3.1 Vervuiling van de membranen

Fouling en concentratie polarisatie worden gedefinieerd als processen die leiden tot prestatievermindering van het membraan als gevolg van gesuspendeerde of opgeloste stoffen op het membraanoppervlak, rond de porie-openingen of in de membraanstructuur.

##### Concentratie polarisatie

Als gedurende het scheidingsproces een waterige oplossing bij het poreuze membraanoppervlak komt zal het water, onder invloed van de drijvende kracht, door het membraan dringen en zullen bepaalde stoffen op het membraan achterblijven. In een grenslaag bij het membraan zal de concentratie toenemen. Deze concentratie polarisatie is omkeerbaar en zal verdwijnen als de drijvende kracht verdwijnt. Concentratie polarisatie leidt tot snelle afname van de flux, maar zal in de tijd niet verder toenemen, zie figuur 3.1.



##### Fouling

Afname van de flux op langere termijn vindt plaats door het optreden van fouling. Fouling wordt gedefinieerd als het proces waarbij tegengehouden (gesuspendeerde) deeltjes, colloïden, macromoleculen en zouten zich afzetten op of in het membraanoppervlak. Dit kan reversibel of

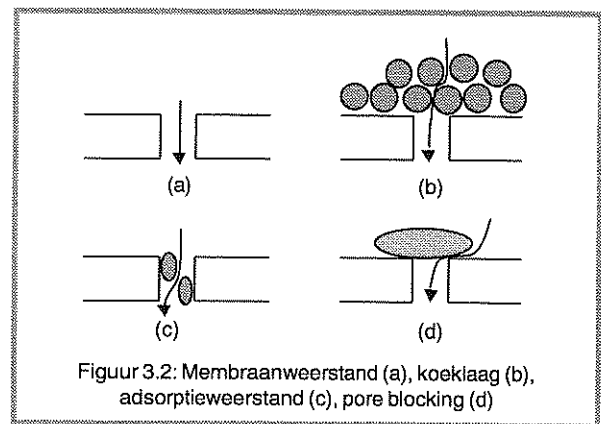
irreversibel zijn en hangt af van verschillende factoren zoals membraanmateriaal, temperatuur, druk, soort en concentratie van de voedingsstroom. Door fouling neemt de weerstand over het membraan toe waardoor de flux (bij gelijke voedingsdruk) afneemt.

Verder kan biofouling optreden. Dit gebeurt als micro-organismen zich te goed doen aan afgezet organisch materiaal.

##### Membraanweerstand

De totale weerstand  $R$  (zie vorige hoofdstuk) over het membraan is opgebouwd uit vijf delen:

- De membraanweerstand. De weerstand die het water ondervindt bij stroming door een schoon membraan (figuur 3.2a).
- Weerstand als gevolg van concentratiepolarisatie.
- Weerstand als gevolg van de vorming van een koeklaag op het membraan door afgezette deeltjes (figuur 3.2b).
- Adsorptieweerstand. Een deeltje plakt vast in een porie, maar sluit deze niet geheel af (figuur 3.2c).
- Weerstand als gevolg van pore blocking. Eén of meerdere deeltjes sluiten een porie geheel af (figuur 3.2d).



##### Koeklaag

Over eigenschappen als dikte en opbouw van de koeklaag zoals die werkelijk optreden in de membranen is weinig bekend. Het beeld dat het woord koeklaag oproept hoeft dan ook niet letterlijk te kloppen.

#### 3.2 Conventionele reinigingstechnieken

Voor verwijdering van de membraanvervuiling bij dead-end filtratie bestaan globaal drie reinigingsmethoden, namelijk forward flush, backflush en chemisch reinigen. Forward flush houdt een crossflow spoeling in met ruwwater. Het water doorstroomt de membranen met een snelheid van 0.10 tot 0.15

m/s en neemt alle losse deeltjes en een deel van de deeltjes die op het membraan zijn afgezet mee. De deeltjes die zich in de poriën hebben afgezet worden niet weggespoeld. Deze deeltjes worden wel verwijderd met de backflush. Backflush, ook wel backwash genoemd is eigenlijk het omgekeerde filtratieproces. Permeaat wordt van buiten de membranen naar binnen geperst met een debiet van circa 2.5 maal het filterdebiet. Dit leidt tot een stroomsnelheid in het membraan van maximaal 0.05 m/s. Spoelen dmv backflush kost meer energie dan dmv een forwardflush, maar er wordt minder water verbruikt. Een ander nadeel is dat bij de backflush permeaatwater wordt gebruikt, terwijl de forward flush met ruwwater wordt uitgevoerd.

Als de flux zich na forward flush en backflush onvoldoende heeft hersteld kunnen de membranen nog chemisch gereinigd worden. De module wordt dan volgezet met een oplossing van chloorbleekloog, zoutzuur of waterstofperoxide of met een speciaal daarvoor ontwikkelde oplossing zoals Memclean. Na een inweektperiode van een aantal minuten, wordt een forward flush uitgevoerd en wordt al het opgeloste vuil weggespoeld. Belangrijkste nadelen van dit chemisch reinigen zijn de kosten van de chemicaliën en het ontstaan van een chemisch verontreinigende afvalstroom. Naast deze periodieke chemische reiniging die in de procesvoering is opgenomen moet na een bepaalde tijd de installatie uit bedrijf genomen worden om haar grondig chemisch te reinigen of de membranen te vervangen.

### 3.3 Airflush

Lucht/waterspoeling of airflush is een forward flush met lucht en water. In meer technische termen kan de airflush omschreven worden als een meestroom twee fasen stroming, eigenlijk altijd gerealiseerd in een verticale opstelling in opwaartse richting. De lucht wordt bij voorkeur in de wateraanvoerbuis geïnjecteerd om een goede menging tussen lucht en water te verkrijgen. In de onderste eindkap waarin deze uitstroomt ontstaat een turbulent lucht/watermengsel dat door de membranen omhoog stroomt, zie figuur 3.3.

#### Voordelen

De airflush kent een aantal voordelen in vergelijking met de forward flush en backflush. Als de airflush wordt toegepast is minder vaak chemische reiniging nodig [vd Meer]. Dit betekent een lagere milieubelasting, maar vooral een kostenbesparing door de vermoedelijk langere levensduur van de membranen. Bovendien kan met minder back-

flushen worden volstaan, hetgeen tot een lager permeaatgebruik leidt. Lucht zorgt nu immers voor een hogere turbulentie met een kleiner waterdebiet in vergelijking met een even goed reinigende forward flush. Verder gaat (met name door het verminderen van inweektijd) minder produktietijd verloren.

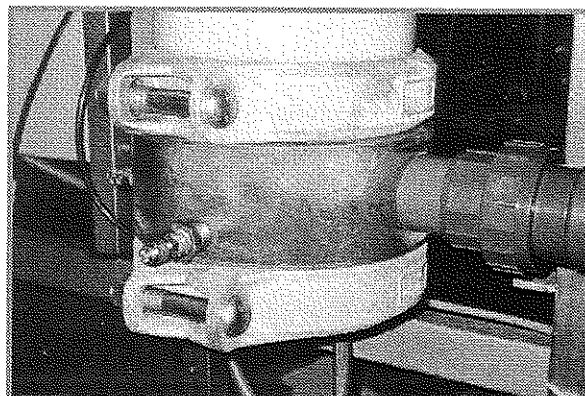
#### Nadelen

Er zijn ook nadelen te noemen. Om te kunnen airflushen is een compressor of blower nodig en moet de installatie van extra luchtleidingen en een injectiepunt worden voorzien. Voor het laten werken van de compressor is energie nodig. Verder is het gedrag van lucht in de onderste eindkap nog niet optimaal. Het lijkt erop dat niet alle membranen een gelijke portie lucht en water krijgen toebedeeld. De membranen boven het uitstroompunt van de aanvoerleiding krijgen een grotere hoeveelheid lucht voor de kiezen dan verder weg gelegen rietjes.

#### Airflushen in praktijk

Op 9 april 1998 zijn door Stork Friesland en DHV Water proeven gedaan aan 8 inch modules met  $\varnothing$  1.5 mm en 5.2 mm membranen. Na deze proef, waarbij gebruikt werd gemaakt van doorzichtige eindkappen (figuur 3.3) om lucht- en waterverdeling goed te kunnen observeren, werd geconcludeerd dat spoeling met lucht in een verticale opstelling goed mogelijk is. In een uitgebreider onderzoek, uitgevoerd bij Nuon Water zijn in een verticale opstelling verschillende reinigingsregimes vergeleken. Airflush leidt tot een lager chemicaliënverbruik en een hogere recovery [Hoekstra]. Verder treedt de optimale reiniging op bij een lucht/waterverhouding RQ (zie hoofdstuk 5) van 1 tot 5 voor  $\varnothing$  5.2 mm tubularen [vd Meer] en verwacht DHV Water dat dit voor  $\varnothing$  1.5 mm membranen rond 2 ligt.

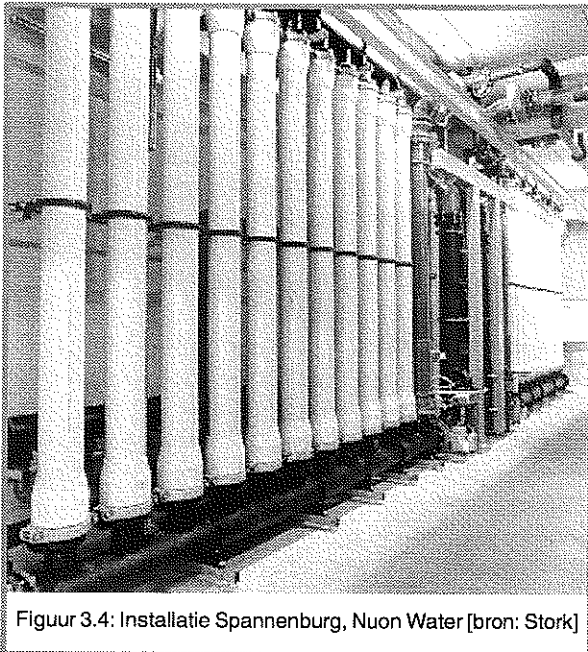
Inmiddels is bij Nuon Water een installatie gebouwd



Figuur 3.3: Lucht/watermengsel in eindkap [bron: DHV]



met 44 verticale ultrafiltratie modules van drie meter lengte om spoelwater te concentreren, zie figuur 3.4. De lucht- en watersnelheden liggen volgens producent Stork Friesland tussen 0.1 en 0.5 m/s. De modules worden per groep van elf gespoeld. Mocht één van de modules sterker vervuild zijn dan de tien andere zal deze tijdens een airflush door de toegenomen weerstand ook met minder lucht en water doorstroomd worden en dus minder goed gereinigd worden.



Figuur 3.4: Installatie Spannenburg, Nuon Water [bron: Stork]

## 4. Probleemanalyse

Wat gebeurt er nu precies in de membranen bij de verschillende lucht- en waterdebieten? Welke stromingspatronen treden op en welk patroon heeft de grootste reinigende kracht? Hoe is de grootste wrijving tussen het lucht/water mengsel en de wand te realiseren? Dat zijn de vragen waarop in dit onderzoek naar antwoorden wordt gezocht.

Om de opbrengsten van dead-end ultrafiltratie (in technische zin) voldoende hoog te laten zijn is periodiek chemisch reinigen noodzakelijk. De chemicaliën die daarbij gebruikt worden tasten de membranen aan, kosten geld en leiden tot een chemisch beladen afvalstroom. Bovendien kost het laten inweken van de chemicaliën tijd, die anders voor produceren gebruikt had kunnen worden.

Omdat de techniek echter veelbelovend is, wordt gezocht naar mogelijkheden deze nadelen zo veel mogelijk weg te nemen. Mede door de jarenlange positieve ervaring met lucht/waterspoeling van snelfilters [Lathouder] is gestart om deze manier van reinigen ook bij dead-end ultrafiltratie te gaan toepassen. Lucht is niet agressief, in ruime mate beschikbaar en, omdat het niet vervuult, makkelijk loosbaar.

### 4.1 Probleemstelling

Het probleem wordt als volgt geformuleerd. Er is weinig theoretische kennis aanwezig over het fenomeen airflush. Er is geen basis om instellingen voor de lucht/waterspoeling in dead-end ultrafiltratie installaties te ontwerpen.

### 4.2 Doelstelling

De doelstelling van dit onderzoek is het inzicht verkrijgen in het fenomeen airflush voor gebruik in verticale dead-end ultrafiltratie membranen, resulterend in ontwerpgrondslagen.

### 4.3 Opzet van het onderzoek

De opzet van het onderzoek is een tamelijk fundamentele. Er is voor gekozen het gedrag van lucht en water in één enkel membraan te onderzoeken. Hiermee worden verstoringen zoals die bij "echte" modules in de eindkap optreden vermeden. Het heeft ook tot gevolg dat de resultaten niet direct vertaalbaar zullen zijn naar de praktijk. Toch is gemeend dat, om het fenomeen echt te kunnen

doorgronden, eerst duidelijk moet zijn wat er in één membraan gebeurt, alvorens het gedrag van lucht en water in een module met enkele tot tienduizenden membranen te kunnen begrijpen. Er wordt wel een begin gemaakt met onderzoek naar de gevoeligheid van de resultaten voor opschaling naar modules met meerdere membranen.

Het onderzoek richt zich grotendeels op verticaal geplaatste modules. Dit omdat airflush in verticaal opgestelde buizen makkelijker bedreven kan worden. De huidige standaard is om die reden verticaal.

Het onderzoek is in drie fases opgedeeld, die hierna kort zullen worden besproken.

#### *Bellenpatronen*

Eerst wordt een literatuurstudie uitgevoerd naar welke stromingspatronen kunnen optreden in buisjes van  $\varnothing$  1 tot 15 mm en wordt gezocht naar de omstandigheden waarbij deze patronen optreden. In een proefopstelling van glazen buizen zijn de verschillende belvormen gevisualiseerd en is een aantal randeffecten onderzocht. Er zijn drie buisdiameters onderzocht:  $\varnothing$  1, 5 en 15 mm.

#### *Koeklaagproeven*

In een module met één enkel membraan is bekeken welke instellingen tot de beste reiniging leiden. Er is door het filteren van spoelwater, steeds een zelfde massa vaste stof aangebracht en deze is met de instellingen die in de eerste fase zijn aangehouden, gepoogd te verwijderen. De opstelling moest voor dit doel uitgebreid worden met een aanvoersysteem voor het spoelwater, extra afsluiters en reinigingsmogelijkheden. Er is aan een  $\varnothing$  5.2 mm membraan gemeten.

#### *Drukvalen*

Een deel van het drukverschil over een doorstroomde buis wordt veroorzaakt door wrijving. Deze wrijving, zo wordt aangenomen, leidt tot reiniging. Er zijn drukvalen gemeten in een glazen buis, maar ook in een één membraan module met eindkappen. Een uitgebreide literatuurstudie is verricht naar drukvalen bij twee fasen stroming en een theoretische model wordt gepresenteerd. Ook dit onderzoek heeft zich beperkt tot de  $\varnothing$  5 mm buis en het  $\varnothing$  5.2 mm membraan.

Uiteindelijk zullen de resultaten van de drie fases met elkaar vergeleken worden om te kijken of deze elkaar ontcrachten of juist in één lijn liggen.

## 5. Bellenpatronen

Om een eerste indruk te krijgen hoe lucht en water zich in de membranen gedragen, is een opstelling gebouwd met glazen buizen, die qua afmetingen lijken op membranen. Er blijken zich verschillende belvenpatronen in te stellen, die op de gevoelige plaat zijn vastgelegd.

### 5.1 Probleem, doel, aanpak

#### *Probleemstelling*

Het probleem voor dit gedeelte kan als volgt worden geformuleerd: het is onduidelijk wat er in een membraan gebeurt als een airflush wordt toegepast. Welke stromingspatronen bestaan er en wanneer treden ze op?

#### *Doelstelling*

Als doelstelling voor dit deel van het onderzoek is gesteld: het visualiseren van de verschillende stromingspatronen als functie van de lucht- en watersnelheid en de buisdiameter.

#### *Aanpak*

Begonnen is met het uitvoeren van een literatuurstudie naar het voorkomen van verschillende belvormen. Verder moest duidelijk worden welke parameters van invloed zijn op de belvorm en welke instellingen globaal gehanteerd moesten worden om een gewenste belvorm in te kunnen stellen. Daarna is een opstelling gebouwd met glazen buizen, waarin verschillende lucht- en watersnelheden ingesteld konden worden en waarin het mogelijk was foto's van de optredende belven te maken. De opstelling kon verticaal en horizontaal geplaatst worden. Enkele aanvullende tests zijn uitgevoerd om eventueel versturende effecten te onderzoeken.

### 5.2 Literatuurstudie

#### 5.2.1 Parameters

Meer fasen stroming is het onderdeel van de vloeistofmechanica dat stromingspatronen in een medium beschrijft die bestaan uit twee of meer onmengbare fasen (gas, vloeistof of een vaste stof). In de petroleum- en chemische industrie wordt meer fasen stroming op zeer grote schaal toegepast, bijvoorbeeld voor het transport van olie en gas door pijpleidingen. In dit onderzoek is het medium een glazen buis met een doorsnede van 1, 5 of 15 mm, is de gasfase lucht en de vloeistoffase water. Twee

fasen stroming in dit soort kleine buisjes wordt ook toegepast bij warmtewisselaars in kernreactoren en in monolietreactoren. Voor deze industriële toepassingen wordt uitgebreid onderzoek gedaan naar twee fasen stroming.

Bij het beschrijven en bestuderen van twee fasen stroming komen de volgende parameters veelvuldig voor: de (superficiële) watersnelheid  $U_{Liq}$ , de (genormaliseerde superficiële) luchtsnelheid  $U_{Gas}$  en de lucht/waterverhouding  $\varepsilon$  (de holdup).

#### *Superficiële snelheden*

In de literatuur wordt bij twee fasen stroming vaak het begrip superficiële snelheid gebruikt. Dit is het debiet van één fase gedeeld door het doorstroomde oppervlak van het medium. Het is geen werkelijk optredende snelheid, omdat ook de andere fase door dat oppervlak wordt gepompt. Dit is te vergelijken met een snelfilterbed: het debiet gedeeld door de oppervlak van de bak is de filtratiesnelheid ( $\approx$ superficiële snelheid), terwijl de werkelijke optredende snelheid van het water hoger ligt door de aanwezigheid van de zandkorrels waar het water langs moet stromen. Alle in dit verslag genoemde snelheden zijn superficieel.

$$U_{Liq} = \frac{Q_{Liq}}{A}$$

met:  $U_{Liq}$  = superficiële watersnelheid [m/s]  
 $Q_{Liq}$  = waterdebiet [m<sup>3</sup>/s]  
 $A$  = doorstroomd oppervlak [m<sup>2</sup>]

$$U_{Gas} = \frac{Q_{Gas}}{A}$$

met:  $U_{Gas}$  = superficiële gassnelheid [m/s]  
 $Q_{Gas}$  = gasdebiet [m<sup>3</sup>/s]  
 $A$  = doorstroomd oppervlak [m<sup>2</sup>]

$$A = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2$$

met:  $A$  = doorstroomd oppervlak [m<sup>2</sup>]  
 $d$  = buisdiameter [m]

Alle in dit verslag genoemde diameters zijn binnendiameters.

*Lucht/water verhouding*

Verder is de lucht/waterverhouding van belang. De lucht/waterverhouding kan op twee manieren gedefinieerd worden, namelijk door de RQ en de holdup  $\epsilon$ . De holdup wordt gebruikt bij het beschrijven van twee fasen stroming, de RQ is een maat die in de drinkwaterwereld gehanteerd wordt bij beluchting van water. De holdup beschrijft het percentage gas of vloeistof in een mengsel, volgens:

$$\epsilon_{\text{Liq}} = \frac{U_{\text{Liq}}}{(U_{\text{Liq}} + U_{\text{Gas}})}$$

met:  $\epsilon_{\text{Liq}}$  = vloeistof holdup [-]

$$\epsilon_{\text{Gas}} = \frac{U_{\text{Gas}}}{(U_{\text{Liq}} + U_{\text{Gas}})}$$

met:  $\epsilon_{\text{Gas}}$  = gas holdup [-]

$$RQ = \frac{U_{\text{Gas}}}{U_{\text{Liq}}}$$

met: RQ = lucht/waterverhouding [-]

De holdup varieert in grootte van 0 tot 1, de RQ heeft geen maximum waarde. Omdat de airflush

*Voorbeeld 1*

$A = 0.1 \text{ m}^2$   
 $Q_{\text{Liq}} = 72 \text{ m}^3/\text{h} = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{\text{Gas}} = 216 \text{ Nm}^3/\text{h} = 0.06 \text{ Nm}^3/\text{s}$

$$U_{\text{Liq}} = \frac{Q_{\text{Liq}}}{A} = \frac{0.02}{0.1} = 0.2 \text{ m/s}$$

$$U_{\text{Gas}} = \frac{Q_{\text{Gas}}}{A} = \frac{0.06}{0.1} = 0.6 \text{ m/s}$$

$$\epsilon_{\text{Liq}} = \frac{U_{\text{Liq}}}{(U_{\text{Liq}} + U_{\text{Gas}})} = \frac{0.2}{(0.2 + 0.6)} = 0.25$$

$$\epsilon_{\text{Gas}} = \frac{U_{\text{Gas}}}{(U_{\text{Liq}} + U_{\text{Gas}})} = \frac{0.6}{(0.2 + 0.6)} = 0.75$$

$$\epsilon_{\text{Liq}} + \epsilon_{\text{Gas}} = 1$$

$$RQ = \frac{U_{\text{Gas}}}{U_{\text{Liq}}} = \frac{0.6}{0.2} = 3$$

een typisch twee fasen stroming fenomeen is en niet zozeer een vorm van beluchting, wordt de voorkeur gegeven aan de holdup als maat voor de lucht/waterverhouding. Omdat bij eerder onderzoek naar de airflush de RQ is gebruikt zal deze maat in dit hoofdstuk naast de holdup gebruikt worden. Zie voorbeeld 1.

*Genormaliseerde luchtdebieten*

Een debiet is een volume gas of water dat per tijdseenheid passeert. Luchtdebieten worden uitgedrukt in genormaliseerde kubieke meters per uur ( $\text{Nm}^3/\text{h}$ ). Dit is het luchtdebiet dat bij een vaste voedingsdruk en temperatuur wordt afgelezen. Voor de in dit onderzoek gebruikte debietmeters geldt een standaarddruk van 1.013 bar en een temperatuur van 20°C. Afwijkende omstandigheden dienen te worden verrekend door het afgelezen debiet te vermenigvuldigen met de factoren  $F_T$  en  $F_p$ , zie voorbeeld 2. Het afgelezen debiet kan worden omgerekend naar een normaaldebiet met:

$$Q_{\text{Normaal}} = Q_{\text{Afgelezen}} \cdot F_T \cdot F_p$$

met:  $Q_{\text{Normaal}}$  = genorm. luchtdebiet [ $\text{Nm}^3/\text{h}$ ]  
 $Q_{\text{Afgelezen}}$  = afgelezen luchtdebiet [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

waarin:

$$F_T = \frac{T_{\text{Bedrijf}}}{T_{\text{Normaal}}}$$

met:  $F_T$  = omrekenfactor voor temperatuur [-]  
 $T_{\text{Bedrijf}} = 293 \text{ K}$   
 $T_{\text{Normaal}}$  = heersende temperatuur [K]

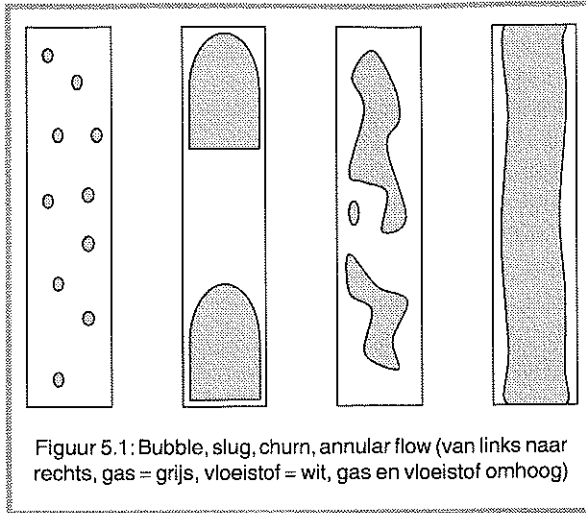
en

$$F_p = \frac{T_{\text{Normaal}}}{T_{\text{Bedrijf}}}$$

met:  $F_p$  = omrekenfactor voor druk [-]  
 $p_{\text{Normaal}} = 1.013 \text{ bar}$   
 $p_{\text{Bedrijf}}$  = heersende druk [bar]

Krohne Persenaire, leverancier van luchtdebietmeters, adviseert de wortel te trekken uit de beide verhoudingsgetallen, omdat dit de werkelijke debieten beter zou benaderen (zie bijlage). In dit onderzoek is dit gedaan (!).

De plaats van de debietmeter ten opzichte van de afsluiter is van belang voor het bepalen van de druk



Figuur 5.1: Bubble, slug, churn, annular flow (van links naar rechts, gas = grijs, vloeistof = wit, gas en vloeistof omhoog)

die in de debietmeter heerst. Bij het bouwen van een opstelling blijkt dit tot verwarring te kunnen leiden. Zie voorbeeld 2.

### 5.2.2 Belvormen

In de literatuur is gezocht naar belpatronen in een verticale meestroom opwaartse stroming in buisdiameters van 1 tot 15 mm. Meestroom wil zeggen dat gas en vloeistof in dezelfde richting stromen. Bij verticale stroming zijn globaal de volgende vier twee fasen stromingspatronen te onderscheiden: bubble flow (bellen stroom), slug flow (kogel stroom), churn flow (woelende stroom) en annular flow (ringvormige stroom). Welke vorm bellen ontstaat hangt af van de gekozen gas- en vloeistofsnelheden, vloeistofeigenschappen en de buisdiameter [Taitel]. De stromingspatronen zijn in figuur 5.1 afgebeeld met toenemende gassnelheid van links naar rechts en constante vloeistofsnelheid. De belvormen worden als volgt gedefinieerd:

#### Bubble flow

De gasfase is bij benadering uniform verdeeld over de vloeistoffase in de vorm van discrete belletjes [Taitel].

#### Slug flow

De grootste hoeveelheid gas bevindt zich in grote kogelvormige bellen met een diameter die maar net iets kleiner is dan de buisdiameter. Tussen de bellen en de wand stroomt een dunne vloeistoffilm naar beneden. De bellen bewegen uniform omhoog en worden gescheiden door vloeistof pakketjes die de buisdoorsnede geheel opvullen en soms kleine belletjes bevatten [Taitel]. Als de vloeistof pakketjes geen belletjes bevatten (dit treedt op bij capillairen [Fukano]) worden de kogels aangeduid als Taylor-bellen [Irandoust].

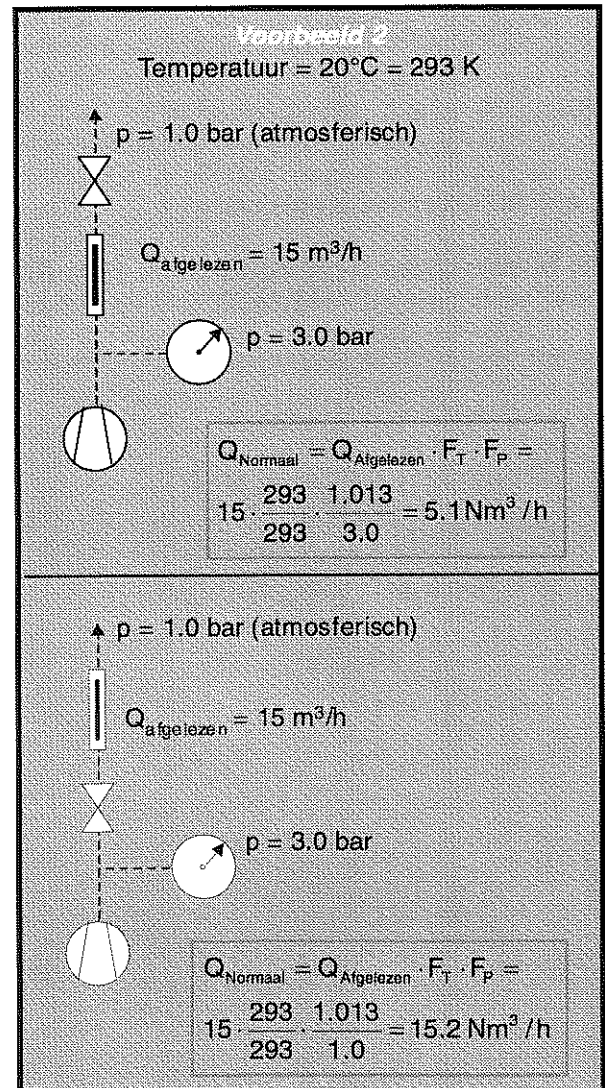
#### Churn flow

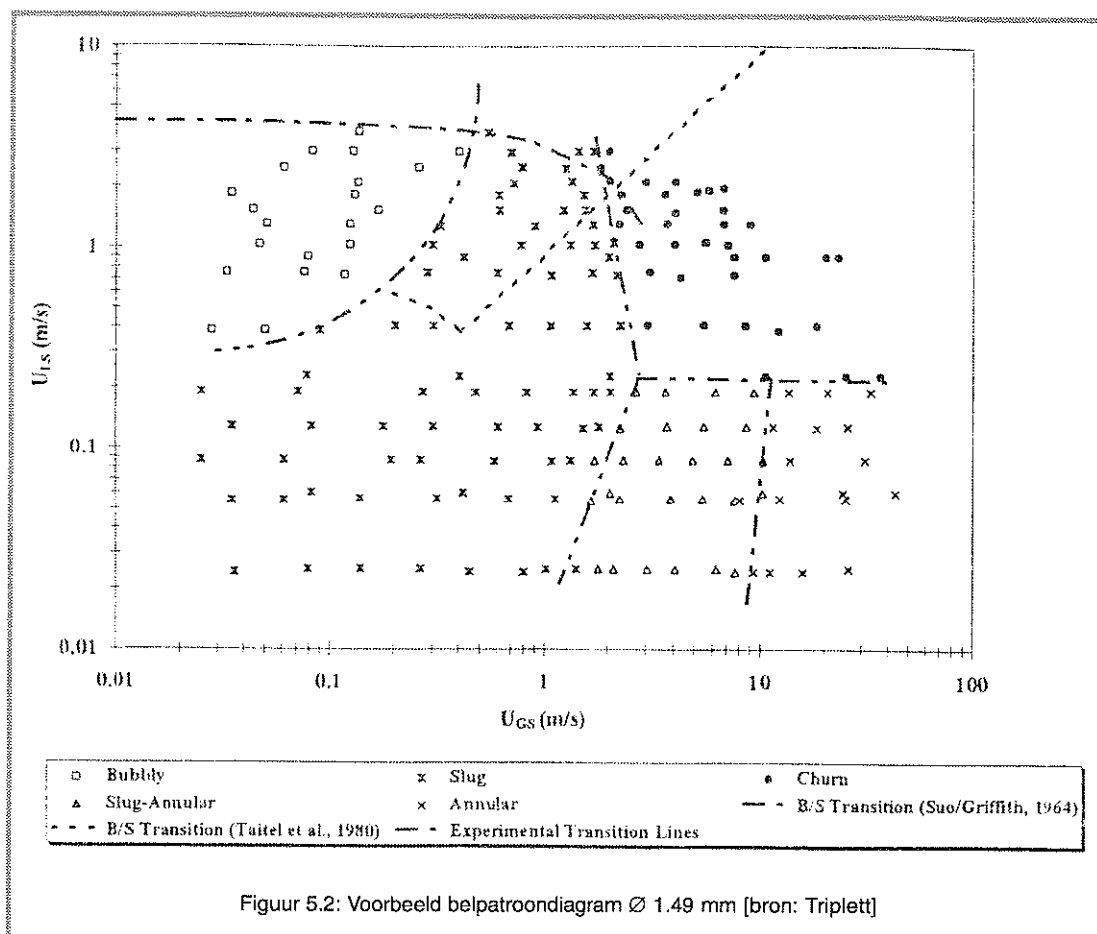
Churn flow is een meer chaotische schuimige en verstoorde slug flow. De kogelvorm is niet meer herkenbaar [Taitel]. De liquid slugs worden regelmatig uiteengeslagen door het gas, vallen naar beneden, hergroeperen zich en worden weer omhooggevoerd tot ze wederom uiteengeslagen worden [Chen].

#### Annular flow

Dit stromingspatroon wordt gekarakteriseerd door een aaneengesloten gasbuis in het hart van de buis. De vloeistof beweegt zich deels omhoog in een golfachtige vloeistoffilm langs de wand, deels als kleine druppeltjes in de gasbuis [Taitel].

In de literatuur worden de begrippen niet altijd eenduidig gebruikt. Bovendien hebben veel auteurs een eigen indeling die niet exact overeenkomt met bovenstaande indeling.





Figuur 5.2: Voorbeeld belpatroondiagram  $\varnothing$  1.49 mm [bron: Triplett]

### 5.2.3 Instellingen

De belvorm hangt dus af van de lucht- en watersnelheid, vloeistofeigenschappen en de buisdiameter. Om een opstelling te kunnen ontwerpen waarbij de belpatronen zichtbaar gemaakt kunnen worden, wordt aan de hand van een literatuurstudie een kwantitatieve schatting gemaakt van deze parameters.

#### Buisdiameter

Er is voor gekozen drie buisdiameters te onderzoeken, namelijk  $\varnothing$  15, 5 en 1 mm. Deze keuze is gebaseerd op de diameters van de membranen die Stork Friesland kan leveren ( $\varnothing$  14.4, 5.2, 1.5 en 0.7 mm) en de beschikbaarheid van glazen buizen. Andere producenten bieden membranen aan met vergelijkbare diameters.

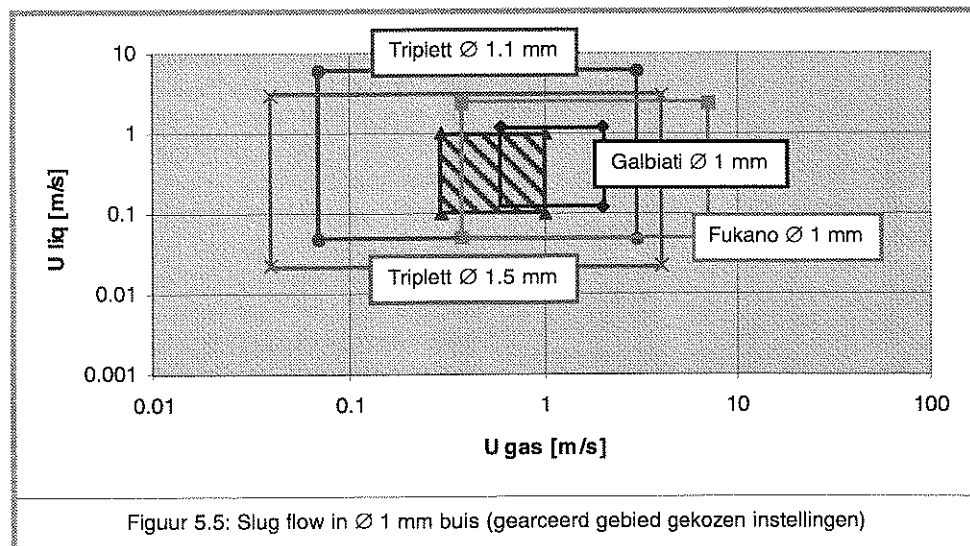
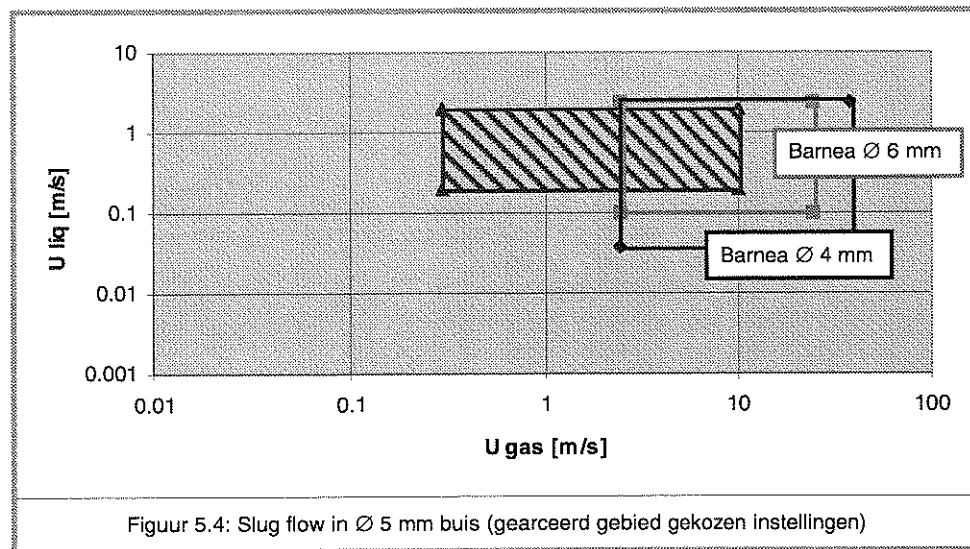
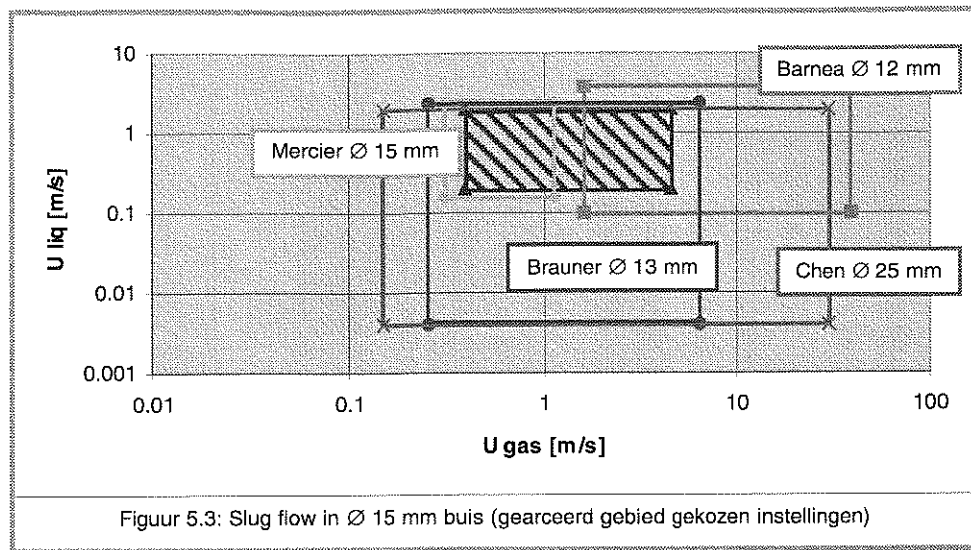
#### Vloeistofeigenschappen

Als vloeistof wordt (uiteraard) water gebruikt. Aangehouden wordt een dichtheid  $\rho$  van  $1000 \text{ kg/m}^3$  en een dynamische viscositeit  $\mu = 1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  bij  $20^\circ\text{C}$ . De oppervlaktespanning  $\sigma$  voor water is dan  $73 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ .

#### Lucht- en watersnelheden

Bij de beschrijving van de verschillende belvormen wordt veelal gebruik gemaakt van diagrammen zoals afgebeeld in figuur 5.2. Ze geven aan welk belpatroon optreedt bij een bepaalde lucht- en watersnelheid. Per buisdiameter wordt nu onderzocht welke instellingen in de literatuur genoemd worden om slug flow te realiseren. Slug flow is als uitgangspunt genomen omdat het vermoeden bestaat dat de reinigende kracht ervan groot is en omdat dit stromingstype tussen bubble en annular flow in ligt. Met iets minder of meer lucht dan de hierna gevonden instellingen kunnen dan ook die stromingspatronen in de opstelling gerealiseerd worden.

In de figuren 5.3, 5.4 en 5.5 wordt -per diameter-aangegeven welke lucht- en watersnelheden in eerdere onderzoeken gebruikt zijn om slug flow te realiseren. Er is per diameter een gebied gekozen van instellingen waarop de opstelling gedimensioneerd wordt. Daarbij zijn onwettelijk hoge luchtsnelheden (groter dan  $10 \text{ m/s}$ ) en watersnelheden (groter dan  $2 \text{ m/s}$ ) vermeden. Bij de  $\varnothing$  5 mm is de onderbouwing mager door het beperkt aantal referenties.



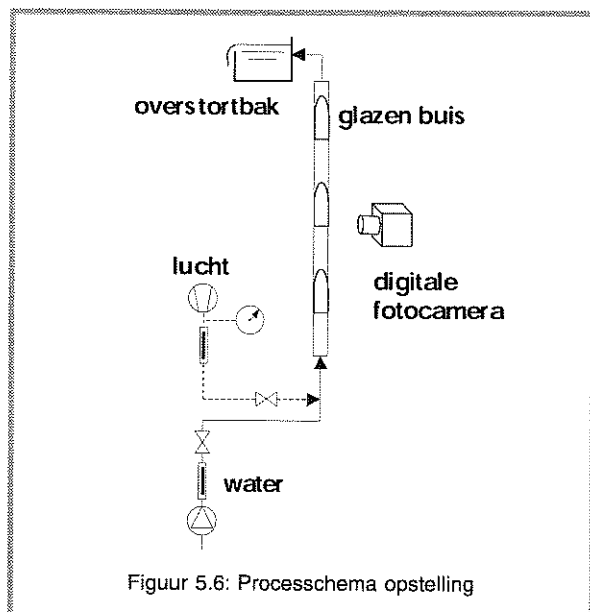


In de praktijk worden in  $\varnothing$  5.2 mm membranen van drie meter lengte luchtsnelheden van 0.20 tot 0.40 m/s gehanteerd. Voor  $\varnothing$  5.2 mm membranen van één meter lengte is dat 0.10 tot 0.30 m/s en voor de  $\varnothing$  1.5 mm membranen (lengte één meter) maximaal 0.65 m/s (bron: Stork). De airlush wordt nog niet in  $\varnothing$  15 mm membranen toegepast.

### 5.3 Experimenten

#### 5.3.1 Opstelling

In het laboratorium van Gezondheidstechniek aan de TU Delft is een proefopstelling gebouwd om de proeven te kunnen uitvoeren. Er is voor gekozen eerst een zeer simpele opstelling te bouwen en deze vervolgens te optimaliseren / uit te breiden. In figuur 5.6 is het processchema van de proefopstelling weergegeven.

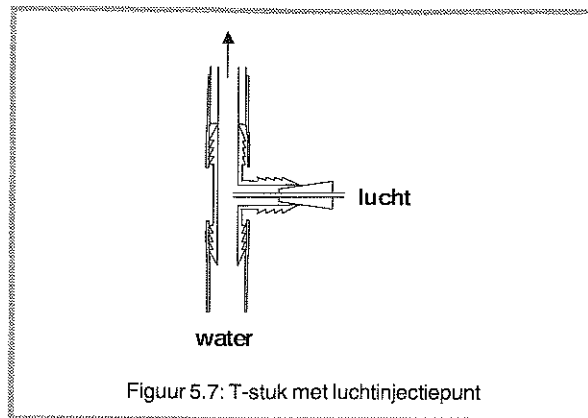


Figuur 5.6: Processchema opstelling

Om de belvorm vast te kunnen stellen, zijn de buizen in glas uitgevoerd. Vanuit een voorraadvat waarin de waterspiegel zich 6.8 m boven de onderzijde van de buis bevindt, wordt water in het systeem gebracht. Met afsluiters op de debietmeters kan het gewenste lucht- en waterdebiet worden ingesteld. Lucht wordt via een naald in een T-stuk gebracht juist voor het instromen van de buis, zie figuur 5.7.

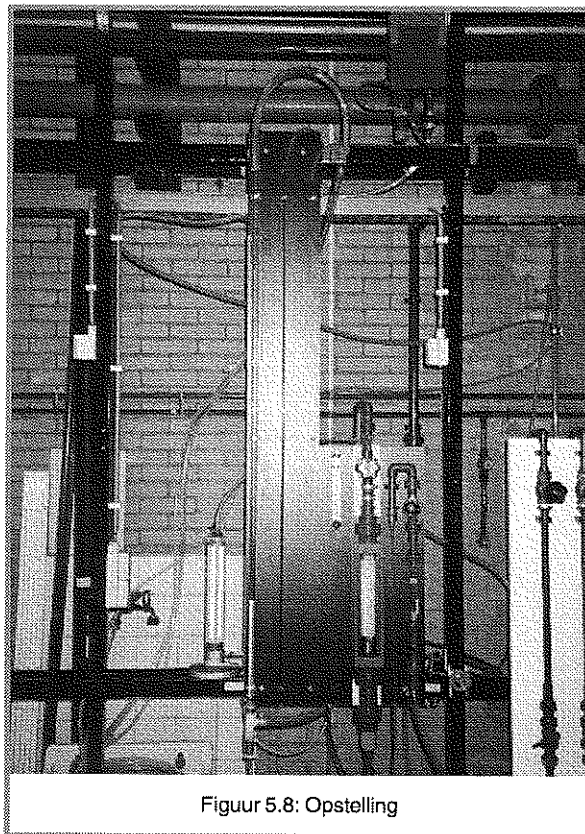
Het lucht/watermengsel stroomt uit in een overstortbakje dat circa 0.5 m boven de bovenkant van de buis hangt. Als het water is overgestort stroomt het weg naar de afvoer. De exacte afmetingen staan vermeld in de bijlage.

*Detectiemethoden*



Figuur 5.7: T-stuk met luchtinjectiepoint

Voor het vastleggen van de belpatronen is gebruik gemaakt van een digitale fotocamera. Digitaal vanwege de goede fotokwaliteit maar vooral vanwege de goede verwerkbaarheid van de foto's. Voor de belichting is gebruik gemaakt van een eenvoudige stroboscoop. Om bij het maken van de foto's het effect van de breking van het glas weg te nemen zijn vierkante acrylaat boxjes gemaakt die om de buizen heen geschoven konden worden. De ruimte tussen de doorzichtige wanden van de box en de buitenkant van de glazen buis is opgevuld met water. Met name bij de  $\varnothing$  15 mm bleek dit nuttig.



Figuur 5.8: Opstelling



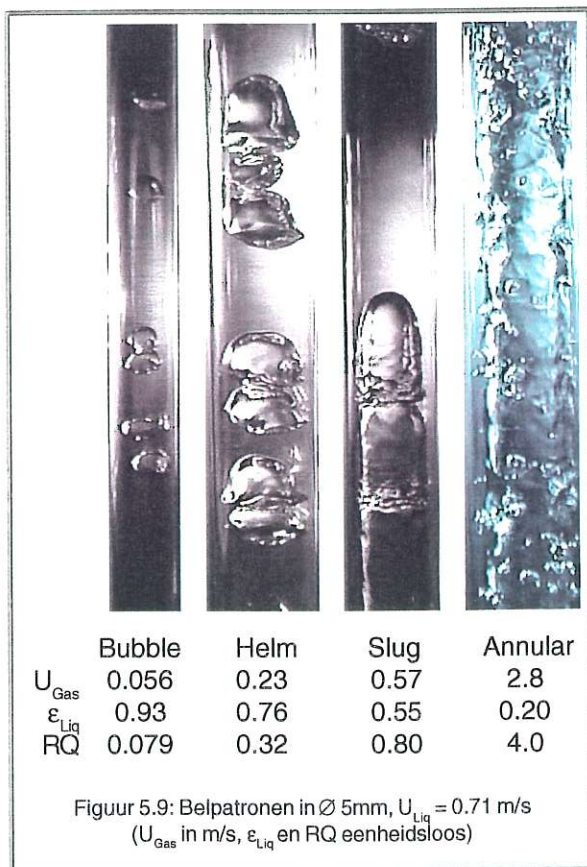
### 5.3.2 Beschrijving van de proeven

Aan de hand van de literatuurstudie en de in praktijk gehanteerde waarden voor lucht- en watersnelheden is besloten voor alle drie de buizen de (superficiële) watersnelheden 0.20, 0.40 en 0.70 m/s te gaan realiseren, maar wel zó dat de debietmeters op ronde waarden zijn af te lezen. Per ingestelde watersnelheid is nu bekeken welk belpatroon bij een bepaalde luchtsnelheid optreedt. Er is voor gezorgd dat het hele scala aan belpatronen (van bubble tot annular flow) de revue passeert. Bij elke instelling zijn steeds circa vijftien foto's gemaakt. Omdat de belichting plaatsvindt met een stroboscoop mislukte steeds circa de helft van de foto's. Per instelling zijn steeds luchtdebiet, luchttemperatuur en de (lucht)voedingsdruk bijgehouden ivm omrekenen naar normaaldebieten.

### 5.3.3 Resultaten

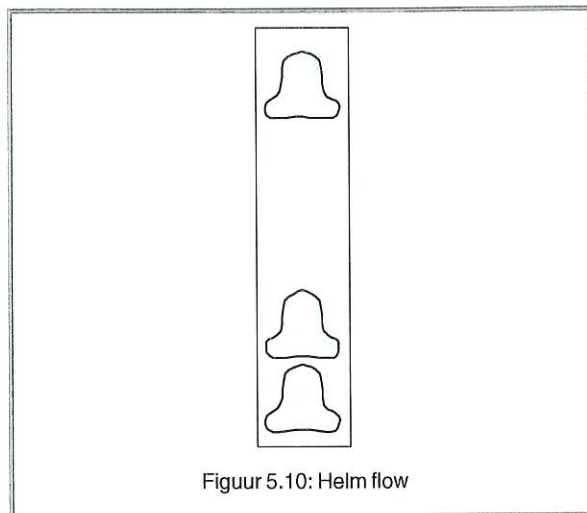
#### Verticale opstelling

In figuur 5.9 staan vier typische foto's, gerealiseerd in de  $\varnothing$  5 mm buis bij  $U_{Liq} = 0.71$  m/s. De verschillende belvormen zijn duidelijk te onderscheiden. Ook voor de lagere watersnelheden en de  $\varnothing$  15 mm en 1 mm buizen zijn foto's bij verschillende



karacteristieke instellingen gemaakt. Deze staan in de bijlage.

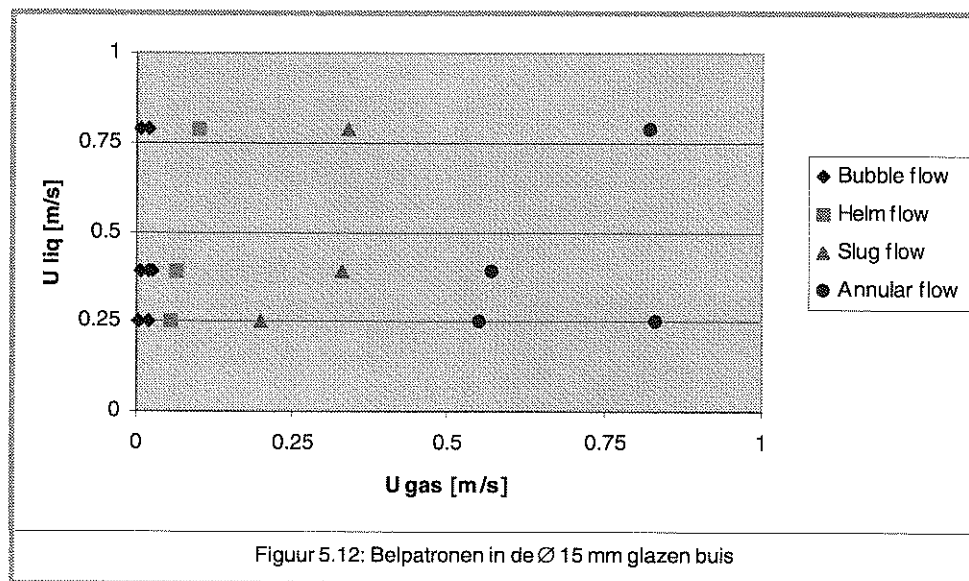
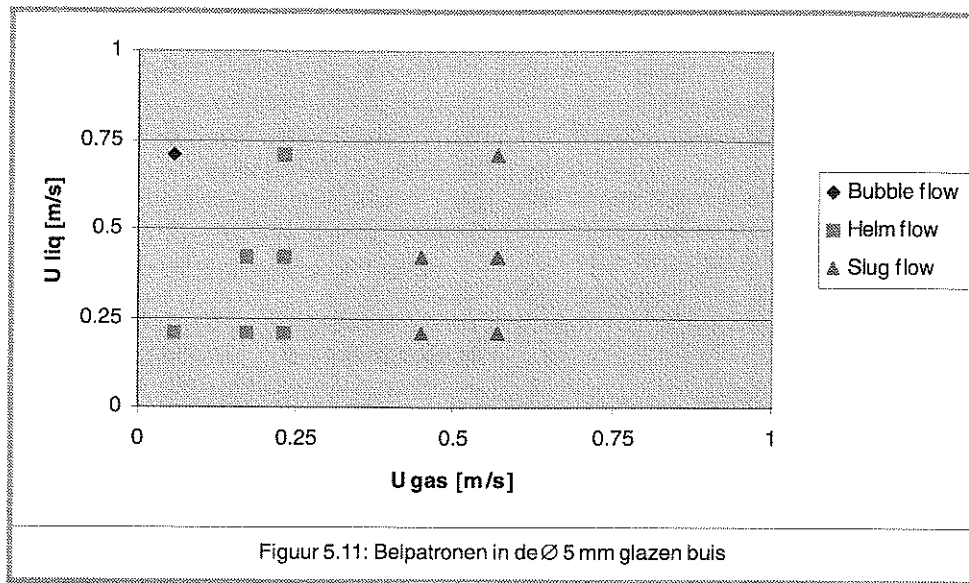
De in de literatuurstudie genoemde belvorm churn flow is niet aangetroffen. Waarschijnlijk treedt deze alleen in grotere buisdiameters op. Verder heeft zich een nieuwe belvorm voorgedaan tussen bubble en slug flow in. De helmvormige bellen hebben aan de achterzijde een diameter vrijwel gelijk aan de binnendiameter van de buis, de voorkant is smaller (figuur 5.10). De bellengte is maximaal anderhalf maal de binnendiameter. Deze vorm wordt, vanwege de vorm, "helm flow" gedoopt. In de literatuur wordt deze belvorm ook vermeld en wordt hij "cap flow" genoemd [Xu].



Bij de  $\varnothing$  15 en 5 mm buizen is goed te zien dat eerst een bubble flow ontstaat die, bij olopemde luchtdosering, verandert in helm flow, dan slug flow en uiteindelijk annular flow wordt. Er zijn ook overganggebieden te onderscheiden, waar twee opeenvolgende belvormen voorkomen.

Bij de  $\varnothing$  1 mm buis is alleen maar slug flow zichtbaar. Het bleek in de gebouwde opstelling niet mogelijk lagere luchtsnelheden in te stellen. Dit niet alleen omdat de benodigde luchtdebietmeter niet direct voorhanden was, maar ook omdat bleek dat bij de laagst gerealiseerde luchtsnelheden geen constante belstroom ontstond. Er leek zich in het T-stuk eerst wat lucht op te hopen, om vervolgens ineens door de buis omhoog te schieten.

Aan de hand van de foto's kunnen de belpatroon-diagrammen 5.11 en 5.12 worden samengesteld waarin te zien is welke belvorm optreedt bij een bepaalde lucht- en watersnelheid. Het diagram voor de  $\varnothing$  1 mm is in de bijlage opgenomen. In figuur 5.11 is de annular flow bij  $U_{Liq} = 0.71$  m/s,  $U_{gas} = 2.8$

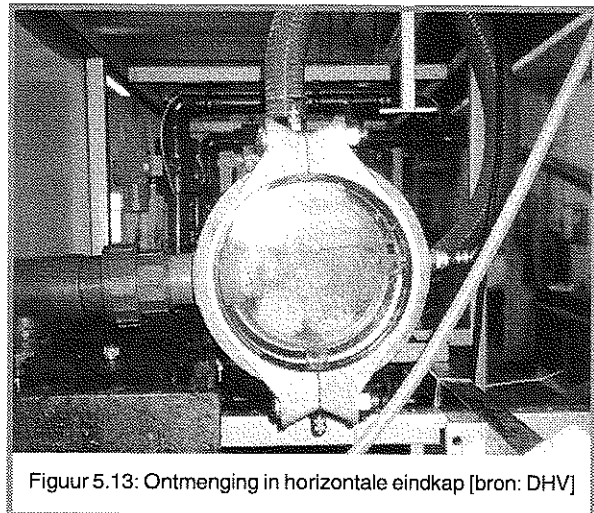


m/s niet afgebeeld. Ook instellingen waarbij twee belvormen voorkwamen zijn niet opgenomen.

De figuren vertonen grote overeenkomsten met figuren die in de literatuur worden gevonden [Taitel, Triplett, Mercier]. Het valt op dat voor de twee getoonde buisdiameters de overgang van de ene naar de volgende belvorm bij verschillende  $U_{\text{Gas}}$  optreedt. De belvorm hangt dus af van de binnendiameter van de buis.

#### Horizontale opstelling

Op 9 april 1998 zijn bij Stork Friesland proeven gedaan met een horizontaal geplaatste 8 inch module. Uit deze tests bleek dat de in de voedingsleiding geïnjecteerde lucht in de eindkap ontmengt (figuur 5.13). Het water stroomt alleen





door de onderste membranen in de module, lucht alleen door de bovenste. De airflush bleek dus met de bestaande eindkappen niet toepasbaar in horizontaal geplaatste module. In dit onderzoek is bekeken welke belvormen optreden in een enkel horizontaal buisje.

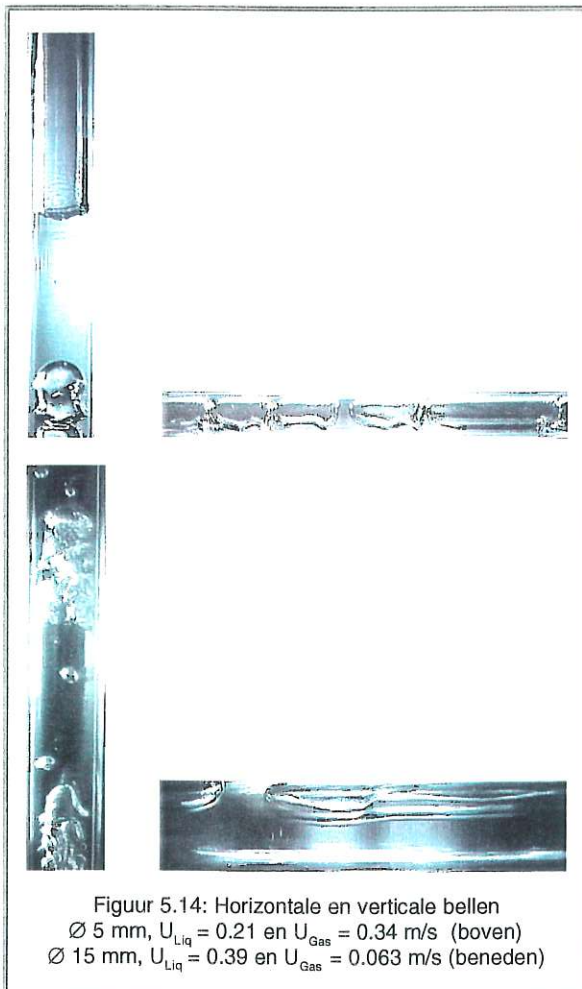
In figuur 5.14 zijn twee foto's weergegeven van bellen die gefotografeerd zijn in de horizontale  $\varnothing$  5 en de 15 mm buis. Ook is de belvorm afgedrukt die bij gelijke instelling in een verticale opstelling optreedt. In de bijlage zijn meer foto's van andere instellingen te vinden.

Het getal van Eötvös, een dimensieloze grootheid, geeft de verhouding van de invloed van de zwaartekracht en de oppervlaktespanning weer:

$$E\ddot{o} = \frac{(\rho_{\text{Liq}} - \rho_{\text{Gas}}) \cdot g \cdot d^2}{\sigma}$$

met:  $\sigma$  = oppervlaktespanning [N/m]

Voor  $E\ddot{o} = 1$  zijn de twee effecten in grootte aan



Figuur 5.14: Horizontale en verticale bellen  
 $\varnothing$  5 mm,  $U_{\text{Liq}} = 0.21$  en  $U_{\text{Gas}} = 0.34$  m/s (boven)  
 $\varnothing$  15 mm,  $U_{\text{Liq}} = 0.39$  en  $U_{\text{Gas}} = 0.063$  m/s (beneden)

elkaar gelijk. Als de bijbehorende diameter wordt bepaald blijkt  $d = 2.7$  mm. Globaal kan gezegd worden dat voor buisdiameters groter dan deze 2.7 mm de zwaartekracht dominant is over de oppervlaktespanning. Dit is in de  $\varnothing$  15 mm buis duidelijk zichtbaar. Bij de  $\varnothing$  5 mm is de vervorming van de bellen al een stuk minder door de toegenomen invloed van de oppervlaktespanning.

#### Overige tests

Verder is uit experimenten gebleken dat het verschil in wandruwheid tussen de glazen buis en het membraan verwaarloosbaar is en dat de bellengte toeneemt met de hoogte in de buis, door afnemende druk. Foto's in de bijlage.

#### 5.4 Conclusies

- Bij de op dit moment in de praktijk gehanteerde instellingen treedt helm of slug flow op.
- Voor slug flow is twee maal zo veel lucht nodig als voor het realiseren van helm flow.
- Bij een grotere buisdiameter treedt bij lagere lichtsnelheden al slug flow op.
- Bubble, churn en annular flow zullen in de praktijk niet voorkomen. Bubble flow niet omdat deze alleen bij zeer lage lichtsnelheden optreedt, annular flow juist alleen bij zeer hoge lichtsnelheden. Churn flow treedt in de beproefde buisdiameters überhaupt niet op.
- In buizen met diameters kleiner dan 3 mm is de belvorm onafhankelijk van horizontale of verticale opstelling.
- In capillairen (circa  $\varnothing$  1 mm) treedt alleen slug flow op.

## 6. Koeklaagproeven

Nu bekend is welke belpatronen optreden wordt geprobeerd de reinigende kracht van de verschillende belvormen te bepalen en onderling te vergelijken. Dit gebeurt door het aanbrengen van een vervuiling in een membraan en die weg te spoelen met verschillend ingestelde airflushes.

### 6.1 Probleem, doel, aanpak

#### Probleemstelling

Er is bekend welke belvorm optreedt bij bepaalde instellingen, maar er is niets bekend over de reinigende kracht van de belpatronen.

#### Doelstelling

Het doel is het bepalen van de reinigende kracht van de lucht/waterspoeling bij verschillende instellingen.

#### Aanpak

In een 1 inch module met daarin één enkel membraan is een standaard vervuiling aangebracht. Daarna is een airflush toegepast, en is bekeken hoe goed er gereinigd is. Dit laatste is in eerste instantie gedaan door het flux-herstel te meten, later door de hoeveelheid droge stof in het concentraat te bepalen en een massabalans op te stellen. Verschillende instellingen van de airflush zijn vergeleken.

### 6.2 Begrippen

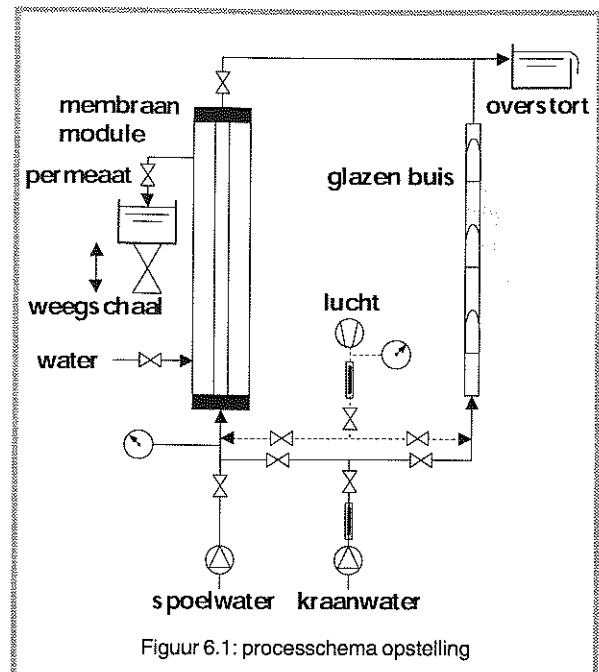
Zoals reeds in hoofdstuk 2 is vermeld is de flux de hoeveelheid water die per tijdseenheid door één vierkante meter membraanoppervlak stroomt. De schoonwaterflux (SWF) is de flux die gemeten wordt bij filtratie van demiwater. In dit onderzoek wordt voor de SWF gefiltreerd met kraanwater. Het gefiltreerde water wordt permeaat genoemd. De geconcentreerde vuilstroom die aan de bovenzijde de module verlaat wordt concentraat genoemd.

### 6.3 Experimenten

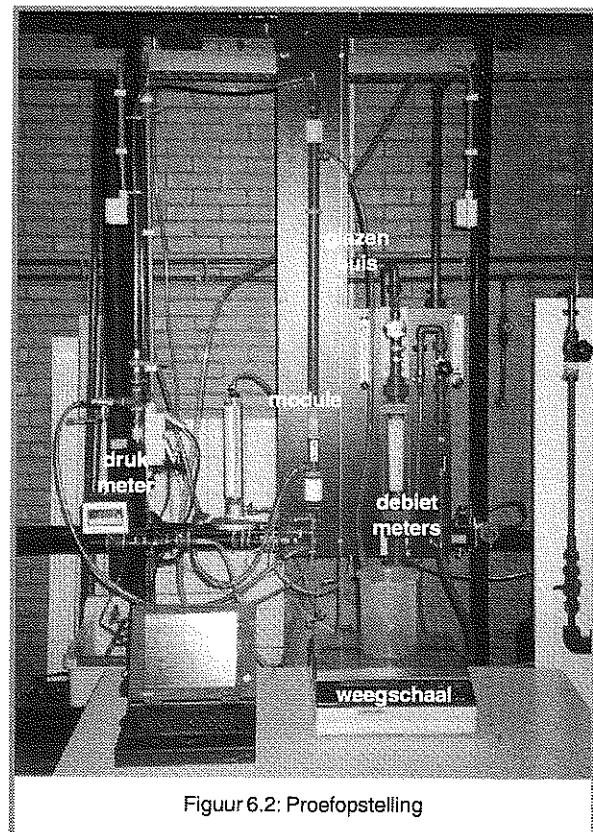
#### 6.3.1 Opstelling

Om het onderzoek te kunnen uitvoeren is de opstelling uitgebreid met een één meter lange 1 inch module, waarin zich één  $\varnothing$  5.2 mm Stork membraan bevindt.

De module wordt gevoed met spoelwater, kraanwater of met een lucht/watermengsel. Het permeaat

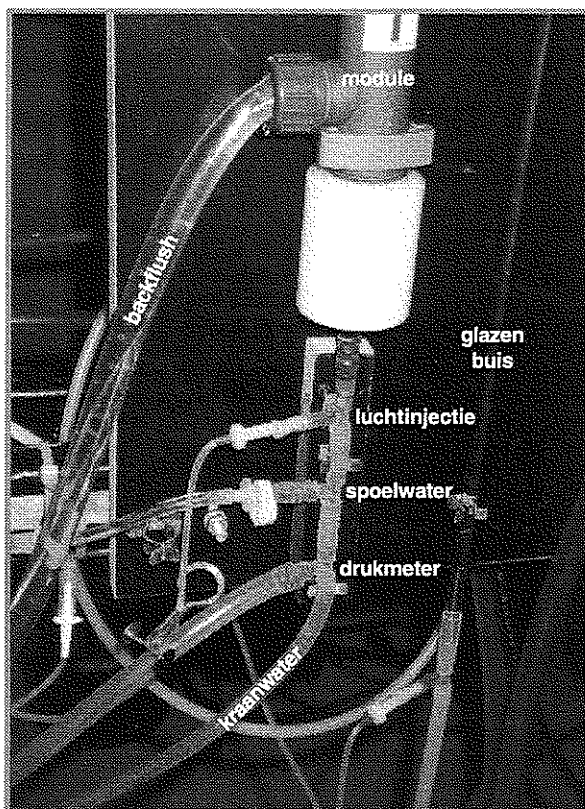


wordt opgevangen in een bekerglas op een weegschaal. De weegschaal is met de PC verbonden, zodat de gewichtstoename in de tijd gemeten kan worden, waaruit eenvoudig het debiet te berekenen is. Aan de zijkant van de module is een backflush optie geïnstalleerd en verder is een



afsluiter geplaatst om de installatie dead-end of cross-flow te kunnen bedienen. Onder een afsluiter wordt een tweeweg- of drieweg kogelkraantje verstaan. Het spoelwater komt uit een geroerd vat dat op 6.8 m boven de onderzijde van de module geplaatst is en stroomt via een dunne ( $\varnothing$  2 mm) leiding naar de module. Er is voor een kleine diameter gekozen om de stroomsnelheid in de leiding hoog te houden om zo te proberen bezinking te voorkomen. Zie ook figuur 6.1 en 6.2. In de bijlage is een overzicht van afmetingen van de verschillende onderdelen opgenomen.

Op de detailfoto van de onderzijde van de module (figuur 6.3) is te zien hoe de verschillende aanvoerleidingen bij elkaar komen. Rechts op de foto is de glazen buis zichtbaar met aanvoerleiding voor kraanwater en het luchtinjectionpunt.



Figuur 6.3: Detail onderzijde module

#### Spoelwater

Aan het spoelwater wordt als eis gesteld dat het na circa tien minuten tot een fluxdaling leidt. Omdat het verschil in schoonwaterflux voor en na vervuiling en airflush als maat voor de reiniging wordt aangehouden, is het belangrijk dat er eerst een afname van de flux zichtbaar wordt. Als geen fluxdaling te zien is, is het zeer waarschijnlijk dat

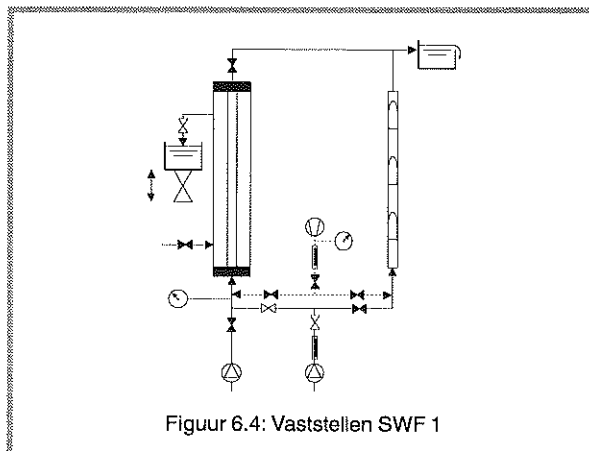
het verschil in schoonwaterflux nihil is en dus geen onderscheid gemaakt kan worden tussen de verschillende lucht- en waterdebieten van de airflush. Eerst is een modelwater aangemaakt met Goudse klei, concentratie 800 mg/l (vergelijkbaar met spoelwater Nuon Water Friesland). Na 85 minuten bleek nog geen fluxdaling zichtbaar. Ook bij een drie maal hogere concentratie trad geen prestatievermindering op. De uniforme korrelverdeling van de kleideeltjes maakt de koeklaag waarschijnlijk goed doorlaatbaar. Uiteindelijk brengt spoelwater van de Waterleiding Maatschappij Limburg uitkomst. De zeer hoge droge stof concentratie (ca 10.500 mg/l) en de aanwezigheid van verschillende deeltjesgroottes doet de fluxcurve na circa 10 minuten afbuigen. Het hoge droge stof gehalte is waarschijnlijk veroorzaakt doordat uit de onderkant van een buffervat is getapt, waar al enige bezinking was opgetreden. Een tweede batch bleek een droge stof gehalte van circa 2850 mg/l te hebben.

#### 6.3.2 Beschrijving van de proeven

Een proef bestaat vijf stappen. Per proef wordt een uitgebreid meetformulier bijgehouden (zie bijlage). Bij elke stap zal in een figuur, afgeleid van figuur 6.1, worden aangegeven welke afsluiters open en dicht staan. Een zwarte afsluiter zit dicht, een witte staat open.

#### Vaststellen schoonwaterflux (SWF 1)

Begonnen wordt met een schoonwaterflux meting. Gedurende twee minuten wordt kraanwater dead-end gefiltreerd en het permeaat opgevangen en gewogen. De voordruk is constant 0.6 bar.

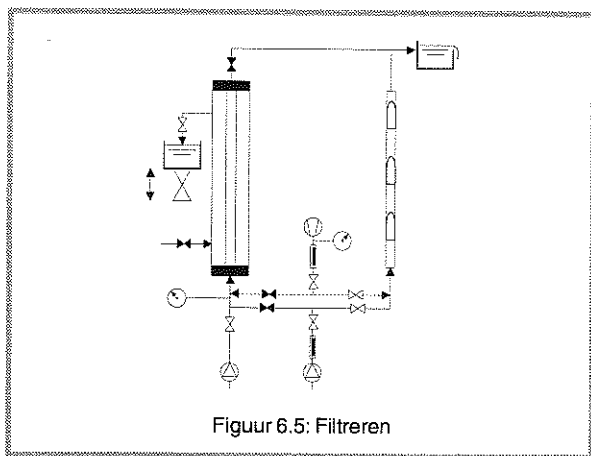


Figuur 6.4: Vaststellen SWF 1

#### Filtreren

Door te filtreren met spoelwater wordt gedurende circa tien minuten een vervuiling aangebracht aan de binnenzijde van het membraan. Tijdens het

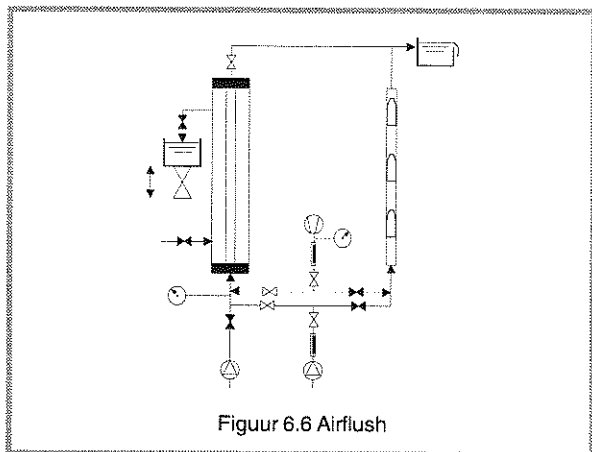
filtreren neemt de weerstand over het membraan toe en treedt uiteindelijk een fluxdaling op. Er wordt steeds een halve liter spoelwater met vaste vuilconcentratie gefiltreerd om ervoor te zorgen dat de hoeveelheid ingebracht vuil constant is en de resultaten van de reiniging onderling goed te vergelijken zijn. Tegelijkertijd wordt in de parallel geplaatste glazen buis het bellenpatroon ingesteld dat onderzocht gaat worden. Zoals vermeld komt het spoelwater uit een hoog geplaatst geroerd vat, zodat de voordruk constant is (0.4 bar). Zie figuur 6.5.



Figuur 6.5: Filtreren

#### Airflush

De aanvoer van spoelwater is stopgezet. De afsluiter boven op de module wordt opengezet, zodat crossflow gespoeld kan worden. Door het omzetten van twee drieweg kranen (één voor lucht en één voor water) wordt het lucht/water mengsel momentaan door de module geperst in plaats van door de glazen buis. Na een vastgestelde tijdsduur worden de kranen weer teruggedraaid. In de loop van de proevenserie is besloten het concentraat op te vangen in een bekersglas om het volume en het droge stof gehalte te bepalen. Omdat de hoeveel-

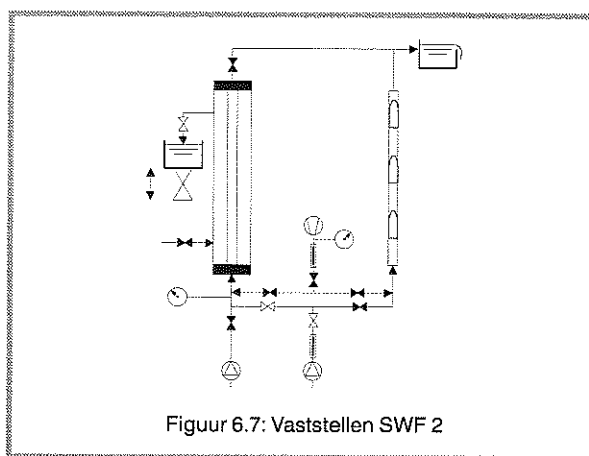


Figuur 6.6 Airflush

heid ingebracht vuil ook bekend is kan een massabalans worden opgesteld.

#### Vaststellen schoonwaterflux (SWF 2)

Nu wordt weer een SWF-meting uitgevoerd. Gedurende twee minuten wordt kraanwater dead-end gefiltreerd en het permeaat opgevangen en gewogen. De voordruk is 0.6 bar. Bij een goede reiniging zou SWF 2 in grootte niet veel mogen verschillen met SWF 1. Als niet al het vuil is weggespoeld zou SWF 2 lager moeten zijn dan SWF 1, omdat er een grotere weerstand over het membraan is.



Figuur 6.7: Vaststellen SWF 2

#### Nareiniging

Om eventueel achtergebleven vuil zo veel mogelijk te verwijderen voordat een andere instelling getest wordt, wordt nog uitgebreid gereinigd met backflush, forward flush en airflush of wordt een chemische reiniging toegepast. Deze chemische reiniging bestaat uit tien minuten laten inweken van 250 ppm Chloorbleekloog ( $\text{NaOCl}$ ) en uitspoelen met backflush, forward flush en airflush. Een aantal maal is daarna nog een schoonwaterfluxmeting uitgevoerd (SWF 3).

### 6.3.3 Resultaten

Begonnen is met de proeven waarbij het SWF-herstel als maat voor de reiniging is aangehouden. In tabel 6.1 zijn de resultaten samengevat. De duur van de airflush is hier zestig seconden. Ten eerste valt op dat de filtratieflex voor twee van de drie metingen hoger is dan de schoonwaterflux. Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt door het temperatuurverschil tussen het spoelwater en het gebruikte kraanwater. Daarnaast is het SWF-herstel voor de proeven heel behoorlijk. Er is besloten ook het droge stof gehalte van het concentraat te gaan bepalen.



Tabel 6.1: SWF-herstel en airflush instellingen

SWF1	Filtr. flux	$U_{Liq}$	$U_{Gas}$	SWF2
[l/m <sup>2</sup> -h-bar]	[l/m <sup>2</sup> -h-bar]	[m/s]	[m/s]	[l/m <sup>2</sup> -h-bar]
527	425	0.71	0.57	452
442	445	0.28	0.57	433
445	488	0.71	0.57	424

Na een volgende proevenserie kon tabel 6.2 worden samengesteld.

De droge stof concentratie in het concentraat is bij  $U_{Gas} = 0$  m/s (een forward flush dus) duidelijk lager dan de situatie met lucht.

SWF 1 loopt gedurende alle proeven van 527 terug naar 233 l/m<sup>2</sup>-h-bar. Er lijkt dus een blijvende (irreversibele) vervuiling op te treden, die ook met chemisch reinigen niet te verwijderen is.

Tabel 6.2: Droge stof bepaling (d.s.) concentraat

SWF1	Filtr. flux	$U_{Liq}$	$U_{Gas}$	SWF2	d.s.
[l/m <sup>2</sup> -h-bar]	[l/m <sup>2</sup> -h-bar]	[m/s]	[m/s]	[l/m <sup>2</sup> -h-bar]	[mg/l]
406	413	0.42	0.23	389	9344
364	390	0.42	0.57	386	8744
374	389	0.42	1.2	371	7860
361	373	0.42	0		3412

Naast de concentratie droge stof wordt nu ook het volume van het concentraat gemeten om zo een massabalans op te kunnen stellen. De tijdsduur van de airflush is steeds zo gekozen dat 50 ml kraanwater gebruikt wordt tijdens de spoeling en de recovery dus rond 90% ligt. De resultaten staan in tabel 6.3. Omdat de hoeveelheid ingebracht vuil bekend is (2850 mg/l) kan het verwijderingspercentage bepaald worden (zie voorbeeld 3). Weer is te zien dat de airflush beter reinigt dan de

*Voorbeeld 3 bij tabel 6.3*

Opgebracht vuil = 0.500 l · 2850 mg/l = 1425 mg

Hoeveelheid concentraat = 0.0766 l

Droge stof concentratie 13.360 mg/l

Verwijderd 0.0766 l · 13360 mg/l = 1023 mg

Verwijderingsperc. =  $\left(\frac{1023 \text{ mg}}{1425 \text{ mg}}\right) \cdot 100\% = 72\%$

forward flush ( $U_{Gas} = 0$  m/s). Verklaring hiervoor is dat de toevoeging van lucht leidt tot meer turbulentie, waardoor meer vuil 'oplost' in de vloeistof. De verwijderingspercentages liggen rond 80%. De hoogste massa droge stof in het concentraat wordt gerealiseerd voor  $U_{Liq} = 0.2$  m/s en  $U_{Gas} = 0.3$  m/s.

Vreemd genoeg blijkt uit visuele waarnemingen dat bij de nareiniging nog steeds veel vuil wordt verwijderd, hetgeen niet leidt tot verder flux herstel. Het is des te vreemder als bedacht wordt dat de module, bijvoorbeeld bij een airflush van 12 sec en  $U_{Liq} = 0.2$  m/s en  $U_{Gas} = 0.4$  m/s al zeven keer doorspoeld is.

Opvallend is dat bij deze meetserie de SWF weer rond de 450 l/m<sup>2</sup>-h-bar ligt. De vermoede irreversibele vervuiling blijkt dus niet geheel irreversibel te zijn. Wellicht is door stilstand de 'koeklaag' enigszins uitgedroogd en verbrokken.

In de bijlage zijn de meetresultaten van alle proeven opgenomen.

Tabel 6.3: SWF-herstel, droge stof bepaling (d.s.), volume concentraat, verwijderingspercentage (verw.) en recovery (rec.)

$U_{Liq}$	$U_{Gas}$	d.s.	volume	d.s.	verw.	rec.
[m/s]	[m/s]	[mg/l]	[l]	[mg]	[%]	[%]
0.2	0	2640	0.0483	128	9	90
0.2	0.3	25695	0.0410	1053	74	92
0.2	0.4	13360	0.0766	1023	72	85
0.1	0.4	16385	0.0704	1154	81	86
0.2	0.3	22565	0.0534	1205	84	89
0.3	0.2	24935	0.0413	1030	72	92
0.4	0.1	13735	0.0712	978	69	86
0.5	0	7545	0.0545	411	29	89

### 6.4 Conclusies

- Het verwijderingspercentage bij een spoeling met lucht/waterspoeling is circa vijf maal hoger dan bij een forwardflush met gelijke  $U_{Liq}$ .
- Het hoogste verwijderingspercentage treedt op bij  $U_{Liq} = 0.2$  m/s en  $U_{Gas} = 0.3$  m/s.

#### Verbeteringen proefopstellingen

De proefopstelling zou op de volgende punten verbeterd kunnen worden.

- Als een airflush wordt toegepast stroomt eerst schoon water in de concentraat opvangbak. Dit water staat namelijk in de slang die loopt van de bovenzijde van de module naar de opvangbak. Dit water verdunt het concentraat. De slang dient

daarom zo kort mogelijk gemaakt te worden.

- De proeven bestaan uit een zeer groot aantal handelingen, waardoor de kans op menselijk falen aanzienlijk is. De proeven met twee man doen of een aantal procedures automatiseren verkleint de kans op mislukken van proeven.
- De duur van de airflush wordt handmatig bepaald en is dus niet heel erg constant. Bovendien lijkt de opstelling soms even tijd nodig te hebben om op gang te komen. Dit instellen kan één à twee seconden duren. Automatische afsluiters zouden hier uitkomst kunnen bieden.
- Het blijkt lastig een constante concentratie bij het instroompunt te realiseren, waardoor ook de exacte aangebrachte hoeveelheid vuil varieert. Een kortere aanvoerleiding en voeding dmv een drukvat dicht bij de opstelling zullen waarschijnlijk tot verbetering leiden.
- Er kan een deeltjesteel op de concentraatleiding worden aangesloten. Zo kan het verloop van de vuilconcentratie tijdens de airflush gemeten worden.



## 7. Drukvalle

Het drukverschil tussen twee punten dat optreedt bij stroming van water door een buis bestaat uit een hydrostatisch- en een wrijvingsdeel. Het wrijvingsdeel zorgt voor reiniging en hoe groter het drukverschil tgv wrijving hoe beter de reiniging. Dat is de gedachtengang die de basis vormt van dit hoofdstuk. Er zijn drukvalmetingen gedaan en er is naar een theoretische onderbouwing van de meetresultaten gezocht.

### 7.1 Probleem, doel, aanpak

#### Probleemstelling

Het is niet bekend hoe groot de drukval (= drukverschil) is over de lengte van een membraan bij doorstroming van een lucht/water mengsel. Ook is niet bekend welk deel van het drukverschil voor rekening komt van de wrijving.

#### Doelstelling

Doel is het meten van drukvalle bij twee fasen stroming in een  $\varnothing 5$  mm glazen buis en het vinden van een theoretische onderbouwing van de resultaten. Daarnaast wordt als doel gesteld te bepalen in hoeverre de theorie toepasbaar is in de praktijk, dwz in een module met eindkappen en meerdere membranen.

#### Aanpak

Begonnen wordt met het meten van drukvalle in een  $\varnothing 5$  mm glazen buis bij verschillende instellingen (dezelfde die in voorgaande hoofdstukken zijn gehanteerd). Daarna wordt gemeten in een 1 inch module met één membraan, waarbij de eindkappen worden opgevuld, zodat een ongestoorde doorstroming plaatsvindt. Uiteindelijk zal ook de 1 inch module met eindkappen worden aangepakt en de 3 inch module met 109 membranen. Daarnaast wordt een studie uitgevoerd naar drukvaltheorieën in één- en twee fasen stromingen en worden de meetresultaten met deze theorie vergeleken.

### 7.2 Theorie één fase stroming

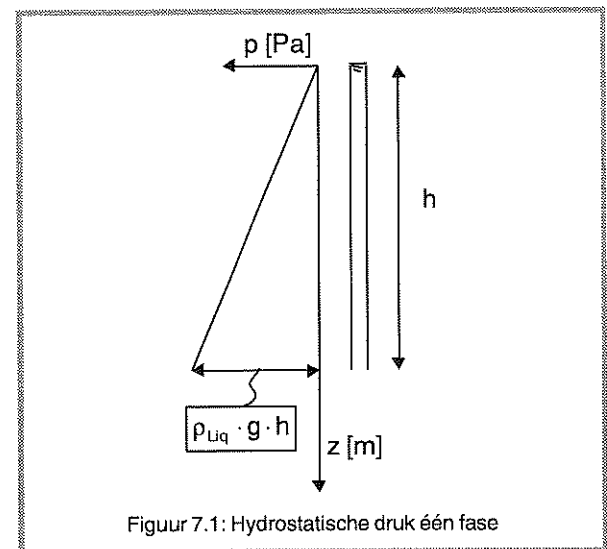
#### Hydrostatische druk

Eén fase stroming is stroming van alleen een vloeistof of een gas door een medium. In dit geval wordt een stroming van alleen water bedoeld en is het medium een ronde buis. In een verticale buis met stilstaand water is de druk onderin hoger dan bovenin. Dit drukverschil wordt een hydrostatisch

(hydro = water en statisch = stilstaand) drukverschil genoemd en is bijvoorbeeld voelbaar in het zwembad. De druk op de oren is bij de bodem hoger dan vlak onder het wateroppervlak. De druk aan het wateroppervlak is gelijk aan de atmosferische druk. De hydrostatische druk op diepte  $h$  wordt beschreven met (zie figuur 7.1):

$$p_{\text{Statisch}} = \rho_{\text{Liq}} \cdot g \cdot h$$

met:  $p_{\text{Statisch}}$  = hydrostatische druk [ $\text{N/m}^2$ ]  
 $\rho_{\text{Liq}}$  = dichtheid van water [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $g$  = zwaartekrachtversnelling [ $\text{m/s}^2$ ]  
 $h$  = diepte onder wateroppervlak [ $\text{m}$ ]



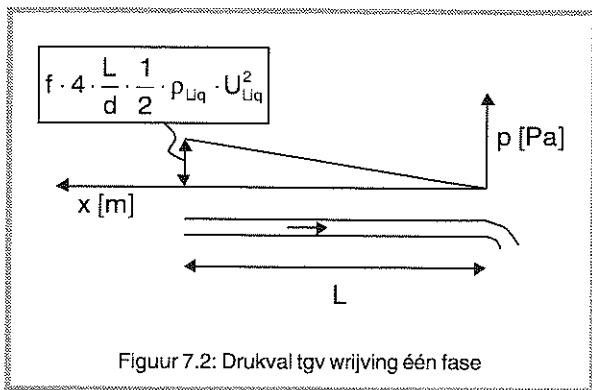
Figuur 7.1: Hydrostatische druk één fase

#### Wrijving

Als een buis met stilstaand water horizontaal gelegd wordt, is er geen hydrostatisch drukverschil tussen het begin en het einde van de buis. Als er wel een drukverschil is, zal het water gaan stromen van de kant met de hoge druk naar de kant met de lagere druk (in het uitstroompunt is de druk atmosferisch). De grootte van het drukverschil dat nodig is om het water een bepaalde snelheid te geven, wordt bepaald door de hoeveelheid wrijving die het water ondervindt. Dit wordt beschreven door [vd Akker]:

$$\Delta p_{\text{wrijving}} = f \cdot 4 \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{Liq}} \cdot U_{\text{Liq}}^2$$

met:  $\Delta p_{\text{wrijving}}$  = drukval tgv wrijving [ $\text{N/m}^2$ ]  
 $f$  = Fanning frictiefactor [-]  
 $L$  = leidinglengte [ $\text{m}$ ]  
 $d$  = buisdiameter [ $\text{m}$ ]  
 $U_{\text{Liq}}$  = watersnelheid [ $\text{m/s}$ ]



Figuur 7.2: Drukval tgv wrijving één fase

Voor turbulente stroming ( $Re > 4000$ ) is afgeleid:

$$f = 0.079 \cdot Re^{-0.25}$$

In figuur 7.3 wordt het verband aangegeven tussen de frictiefactor en het Reynolds getal voor stroming van water door een buis.

Als men een stroming van water door een verticale buis wil instellen zal de hydrostatische druk én de wrijving moeten worden overwonnen. De bijbehorende drukvalen moeten dan opgeteld worden. Zie figuur 7.4.

Er treden twee soorten wrijving op, de één veroorzaakt door schuifspanning tussen de wand en de vloeistof, de ander door schuifspanningen tussen vloeistofdeeltjes onderling. Deze laatste wordt verwaarloosbaar geacht tov de eerste.

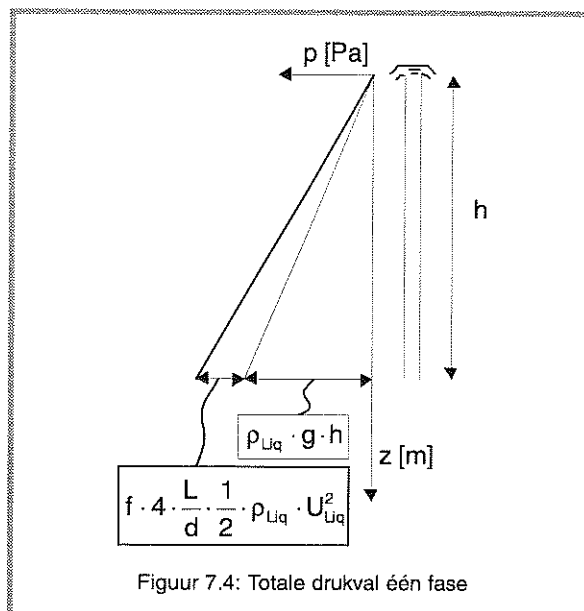
De Fanning frictiefactor  $f$  is een functie van het Reynolds getal  $Re$ :

$$Re = \frac{\rho_{Liq} \cdot U_{Liq} \cdot d}{\mu}$$

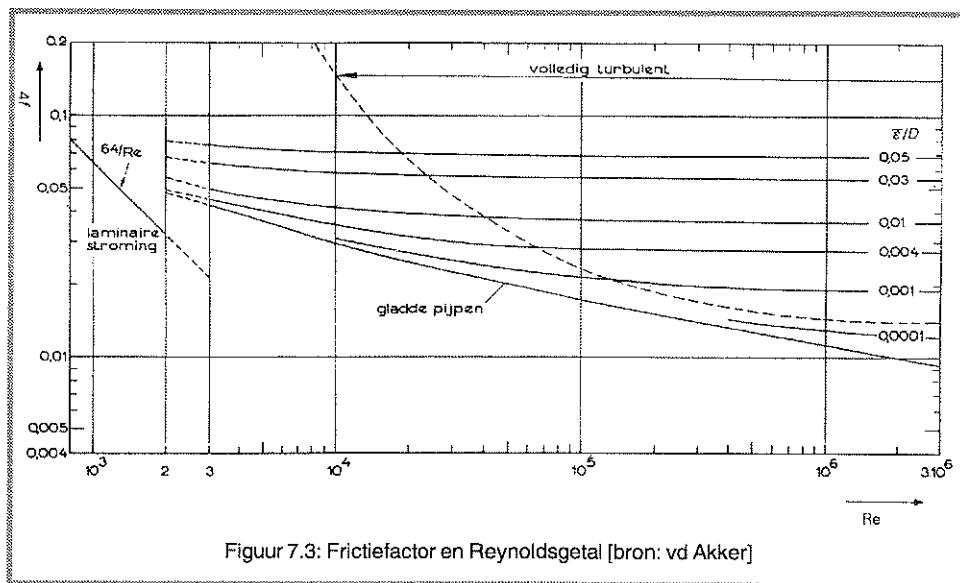
met:  $Re$  = Reynoldsgetal [-]  
 $d$  = buisdiameter [m]  
 $\mu$  = dynamische viscositeit [Pa·s]

Voor  $\mu$  wordt  $1.01 \times 10^{-3}$  Pa·s aangehouden. Voor laminaire stroming ( $Re < 2000$ ) geldt:

$$f = \frac{16}{Re}$$



Figuur 7.4: Totale drukval één fase



Figuur 7.3: Frictiefactor en Reynoldsgetal [bron: vd Akker]

### 7.3 Theorie twee fasen stroming

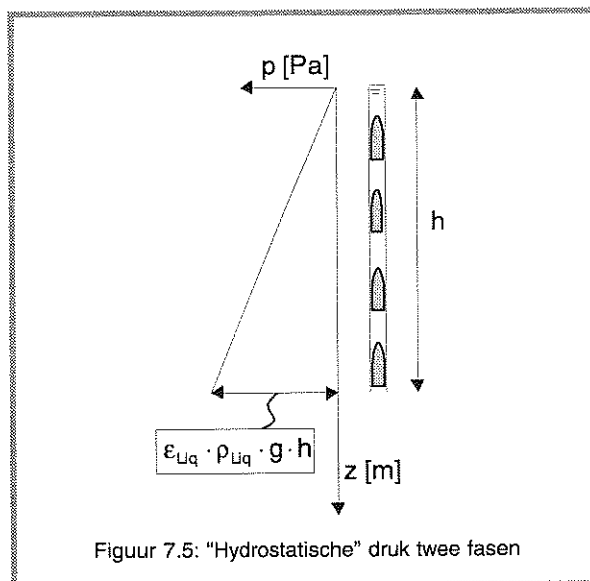
#### Hydrostatische druk

Als een lucht/water mengsel verticaal verpompt moet worden, zal de "hydrostatische" druk lager zijn dan wanneer de kolom met uitsluitend water gevuld is. Luchtballen nemen immers de plaats van water in. Zoals eerder beschreven is  $\epsilon_{Liq}$  de maat voor het percentage water in een lucht/watermengsel. Voor de "hydrostatische" druk in een verticaal lucht/water mengsel geldt:

$$p_{Statisch} = \epsilon_{Liq} \cdot \rho_{Liq} \cdot g \cdot h + (1 - \epsilon_{Liq}) \cdot \rho_{Gas} \cdot g \cdot h$$

Omdat de dichtheid van gas veel lager (circa 1000 x) is dan die van water, wordt de tweede term in het rechterlid verwaarloosd en geldt:

$$p_{Statisch} = \epsilon_{Liq} \cdot \rho_{Liq} \cdot g \cdot h$$



#### Wrijving

De drukval tgv wrijving kan beschreven worden met een homogene of een heterogene benadering. Bij het beschrijven van de drukverschil tgv wrijving bij twee fasen stroming wordt vaak het begrip mengsel-snelheid gebruikt. Deze snelheid is de som van de superficiële lucht- en watersnelheid [Delfos]:

$$U_{Meng} = U_{Liq} + U_{Gas}$$

#### Wrijving, homogene theorie

Bij de homogene theorie wordt het lucht/water mengsel gezien als een bijzonder soort één fase

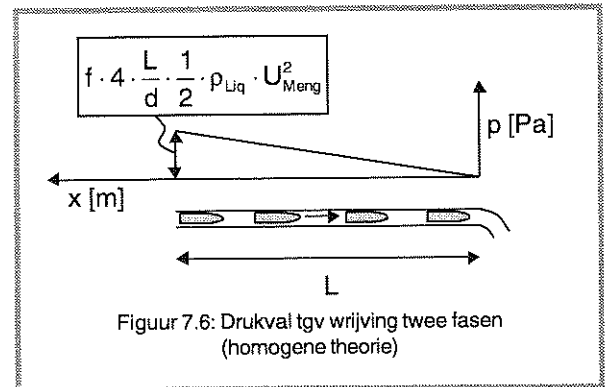
stroming. Er wordt van uitgegaan dat er continu water aan de wand is. De wrijving aan de wand wordt veroorzaakt door water en daarom wordt voor de dichtheid van het mengsel de dichtheid van water aangehouden.

De drukval tgv wrijving wordt beschreven met:

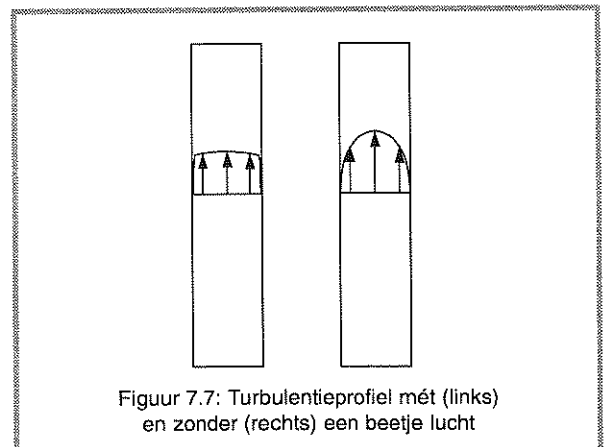
$$\Delta p_{Wrijving} = f \cdot 4 \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{Liq} \cdot U_{Meng}^2$$

Voor f wordt  $16/Re$  aangehouden, ook voor  $Re > 2000$ , met:

$$Re = \frac{\rho_{Liq} \cdot U_{Meng} \cdot d}{\mu}$$

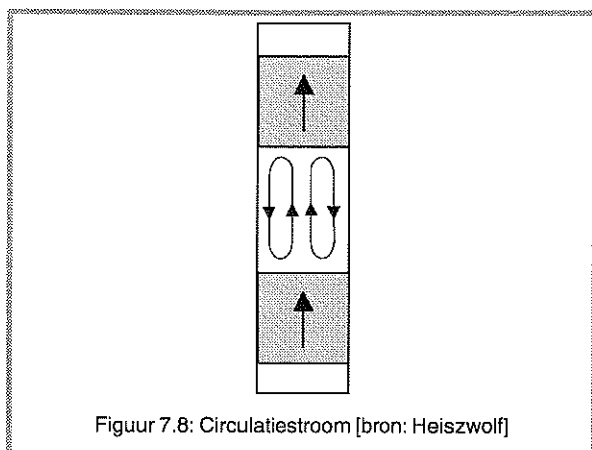


Bubble flow is een typisch voorbeeld van een lucht/water mengsel dat als bijzondere één fase stroom gezien mag worden en waarop de homogene theorie van toepassing is. Hoewel het Reynolds getal door toevoeging van de lucht niet veel zal stijgen ( $U_{Meng}$  zal niet veel groter zijn dan  $U_{Liq}$ ,  $U_{Gas}$  is immers klein) neemt de turbulentie aan de wand wel toe. De bellen zorgen namelijk voor een afvlakking van het snelheids- (en daarmee turbulentie-) profiel.



### Wrijving, heterogene theorie

Bij de heterogene aanpak is er een duidelijke scheiding tussen de lucht- en de waterpakketjes. Omdat het wrijvingsverlies tgv het passeren van de luchtpakketjes verwaarloosbaar klein is, treedt alleen wrijvingsverlies op bij het passeren van een waterpakketje. De wrijvingsterm wordt om die reden vermenigvuldigd met de vloeistof holdup. De voor- en achterzijde van de bellen wordt als vlak aangenomen en er is geen filmlaag tussen de luchtbel en de wand aanwezig. Bovendien wordt er extra wrijvingsverlies in rekening gebracht die optreedt in het waterpakketje [Heiszwolf, Kakac]. In onderstaand figuur wordt de circulatiestroom getekend waarvan is uitgegaan voor het opstellen van deze theorie.



Figuur 7.8: Circulatiestroom [bron: Heiszwolf]

De wrijvingsterm ziet er als volgt uit:

$$\Delta p_{\text{wrijving}} = f \cdot C_{\text{Circ}} \cdot 4 \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{1}{2} \cdot \epsilon_{\text{Liq}} \cdot \rho_{\text{Liq}} \cdot U_{\text{Meng}}^2$$

waarin:

$$C_{\text{Circ}} = 1 + 0.065 \cdot \left( \frac{L_{\text{Bel}}/d}{\text{Re}} \right)^{-0.66}$$

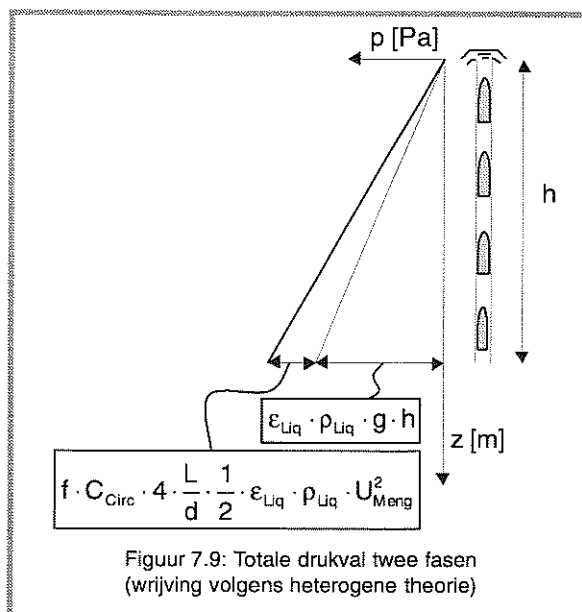
met:  $L_{\text{Bel}}$  = bellengte [m]

Voor  $L_{\text{Bel}}/d$  dient een waarde tussen drie en tien genomen te worden. Voor  $f$  wordt  $16/\text{Re}$  aangehouden, ook voor Reynoldsgetallen groter dan tweeduizend. Voor Reynolds geldt weer:

$$\text{Re} = \frac{\rho_{\text{Liq}} \cdot U_{\text{Meng}} \cdot d}{\mu}$$

Er bestaan stofoverdrachtformules (van de wand naar de vloeistof) die overeenkomsten vertonen met de hier gepresenteerde (heterogene) drukvalbeschrijving. Wellicht kan in de toekomst een eenvoudige link met het zogenaamde Sherwood getal [Heiszwolf] gelegd worden.

Zowel voor de homogene als de heterogene theorie geldt dat voor het realiseren van een verticale stroom de "hydrostatische" druk en de wrijving overwonnen moeten worden. De bijbehorende drukvalen worden dus bij elkaar opgeteld, figuur 7.9.

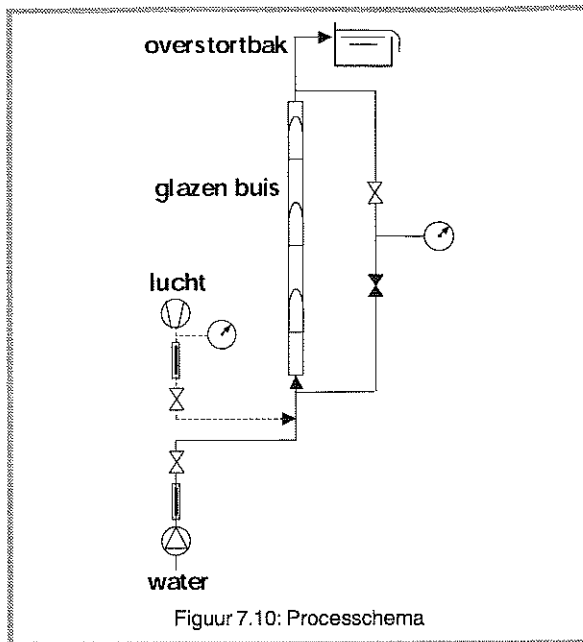


Figuur 7.9: Totale drukval twee fasen (wrijving volgens heterogene theorie)

## 7.4 Experimenten

### 7.4.1 Opstelling

Aan de boven- en onderzijde van de glazen buis zijn T-stukjes met een binnendiameter van 5 mm geplaatst (die dus mooi aansluiten op de glazen buis). Voor de metingen wordt één druksensor gebruikt. Op de sensor zitten twee afsluiters waaraan twee even lange  $\varnothing$  8 mm slangen zijn verbonden die naar de T-stukjes lopen. De T-stukjes bevinden zich 1.54 m van elkaar. De drukmeter ontvangt data van de druksensor en is via een Smartlink op de PC aangesloten. De PC leest deze signalen uit dmv een voor dit doel geschreven Test Point applicatie. In figuur 7.10 wordt de proefopstelling schematisch getoond.



#### 7.4.2 Beschrijving van de proeven

Alvorens te kunnen beginnen met meten wordt de Test Point applicatie gereset zodat de waarden in de PC en op het scherm van de drukmeter overeenkomen. Het programma is gekalibreerd aan de hand van een aantal stijghoogtemetingen.

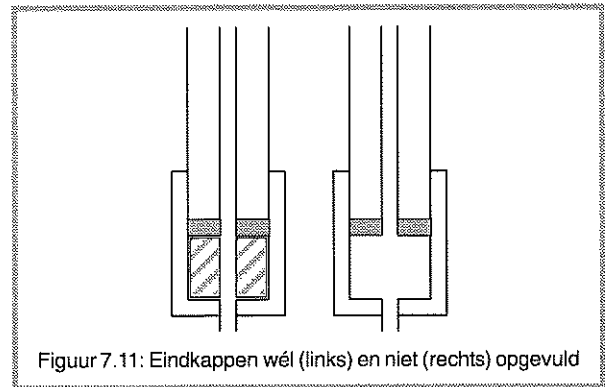
Als het debiet is ingesteld wordt dit afgelezen en opgeschreven. Dan worden de drukken in het onderste T-stuk gemeten en ingelezen. Er worden circa 150 metingen gedaan in 35 s. De meting wordt even stopgezet, het onderste T-stuk wordt afgesloten en de druksensor wordt met het bovenste T-stuk verbonden. Weer worden nu circa 150 metingen uitgevoerd. Deze procedure is herhaald voor alle verschillende instellingen. Vervolgens is van elke 150 metingen het gemiddelde genomen en de drukval uitgerekend.

De volgende proeven zijn uitgevoerd:

- Glazen buis  $\varnothing$  5 mm, alleen water
- Glazen buis  $\varnothing$  5 mm, lucht/watermengsel
- 1 inch module één membraan  $\varnothing$  5.2 mm, opgevulde eindkappen, lucht/watermengsel
- 1 inch module één membraan  $\varnothing$  5.2 mm met eindkappen, lucht/watermengsel
- 3 inch module 109 membranen  $\varnothing$  5.2 mm met eindkappen, lucht/watermengsel

De eerste meetsessie wordt met alleen water uitgevoerd om de opstelling te kalibreren. Bij de lucht/water proeven is er voor gekozen dezelfde debieten als de belLENpatronen- en koeklaagproeven aan te

houden ( $U_{Liq} = 0.21, 0.42$  en  $0.71$  m/s). Per watersnelheid zijn circa 15 gassnelheden (tussen 0 en 3.0 m/s) ingesteld. Om het effect van de eindkappen op de drukval te onderzoeken zijn deze opgevuld met een klosje, zie figuur 7.11.



#### 7.4.3 Resultaten

Met de theorie van de één fase stroming kunnen de druk- en debietmeters gekalibreerd worden. Hierbij is bij verschillende debieten de drukval gemeten en vergeleken met waarden uit de literatuur. Figuur 7.13 kon worden samengesteld. Daarin zijn de meetpunten weergegeven en twee lijnen die de theoretische waarde van  $f$  weergegeven als functie van het Reynolds getal. De schaalverdeling in het figuur is dubbellogaritmisch. Te zien is dat de gevonden waarden de theorie keurig volgen. Geconcludeerd wordt dan ook dat de drukvalmetingen en debietmetingen kloppen.

Vervolgens worden de metingen bij een twee fasen stroming bekeken. In het onderste T-stuk wordt, uitgaande van de homogene theorie, gemeten:

$$p_{Ond} = f \cdot 4 \cdot \frac{h_{Ond}}{d} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{Liq} \cdot U_{Meng}^2 + \epsilon_{Liq} \cdot \rho_{Liq} \cdot g \cdot h_{Ond}$$

met:  $h_{Ond}$  = hoogteverschil T-stuk/overstortbak [m]

In het bovenste T-stuk heerst dan:

$$p_{Bov} = f \cdot 4 \cdot \frac{h_{Bov}}{d} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{Liq} \cdot U_{Meng}^2 + \epsilon_{Liq} \cdot \rho_{Liq} \cdot g \cdot h_{Bov}$$

met:  $h_{Bov}$  = hoogteverschil T-stuk/overstortbak [m]

Het verschil tussen beide termen wordt  $\Delta p_{meting}$  genoemd. De volgende correctie wordt uitgevoerd om het effect van de met water gevulde drukleidingen

te vereffenen (uitgedrukt in drukval per meter):

$$\text{Drukval} = \frac{\Delta p_{\text{Meting}}}{L} + \rho_{\text{Liq}} \cdot g$$

met: Drukval [Pa/m]

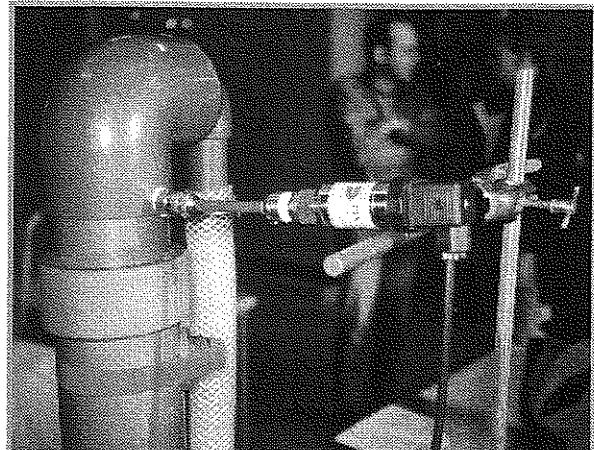
$\Delta p_{\text{Meting}}$  = gemeten drukverschil [Pa]

L = afstand bovenste en onderste T-stuk [m]

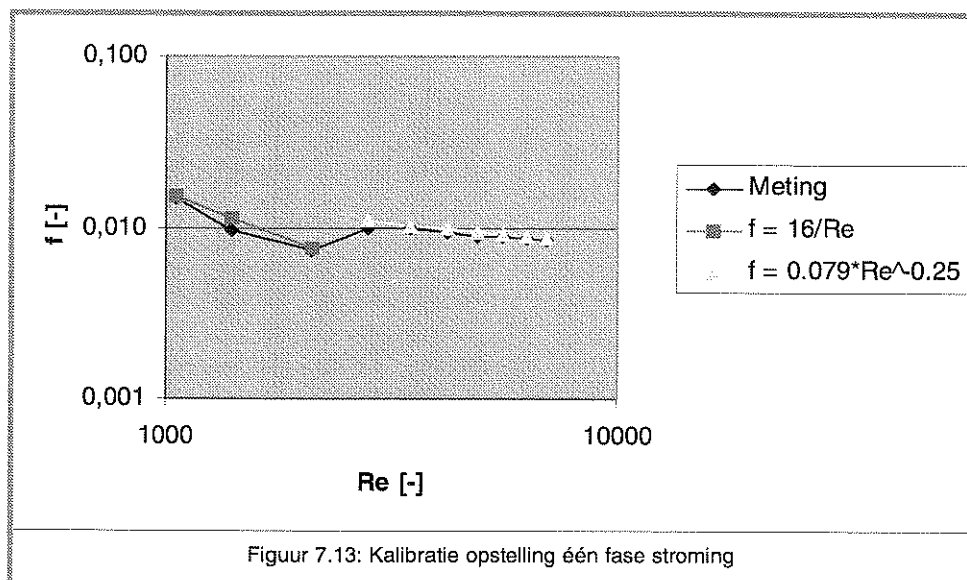
*Glazen buis*

In figuur 7.14 staan de bewerkte meetpunten en de homogene theorie geplot volgens:

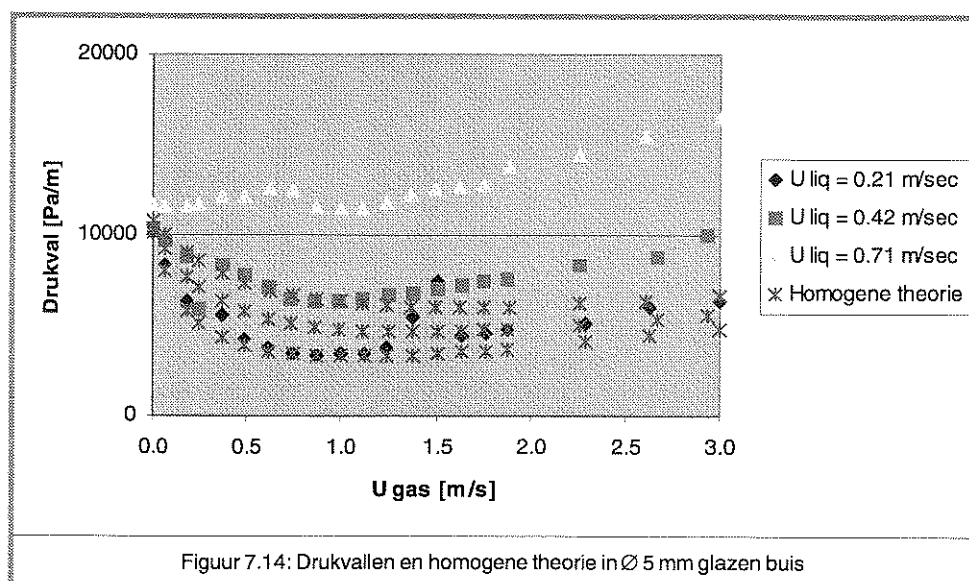
$$\Delta p = \frac{16}{\text{Re}} \cdot \frac{2}{d} \cdot \rho_{\text{Liq}} \cdot U_{\text{Meng}}^2 + \epsilon_{\text{Liq}} \cdot \rho_{\text{Liq}} \cdot g$$



7.12: Druksensor op 3 inch module



Figuur 7.13: Kalibratie opstelling één fase stroming



Figuur 7.14: Drukvalen en homogene theorie in  $\varnothing$  5 mm glazen buis

De heterogene theorie wordt in figuur 7.15 gepresenteerd volgens:

$$\Delta p = \frac{16}{Re} \cdot C_{Circ} \cdot \frac{2}{d} \cdot \epsilon_{Liq} \cdot \rho_{Liq} \cdot U_{Meng}^2 + \epsilon_{Liq} \cdot \rho_{Liq} \cdot g$$

met:

$$C_{Circ} = 1 + 0.065 \cdot \left( \frac{L_{Bel}/d}{Re} \right)^{-0.66}$$

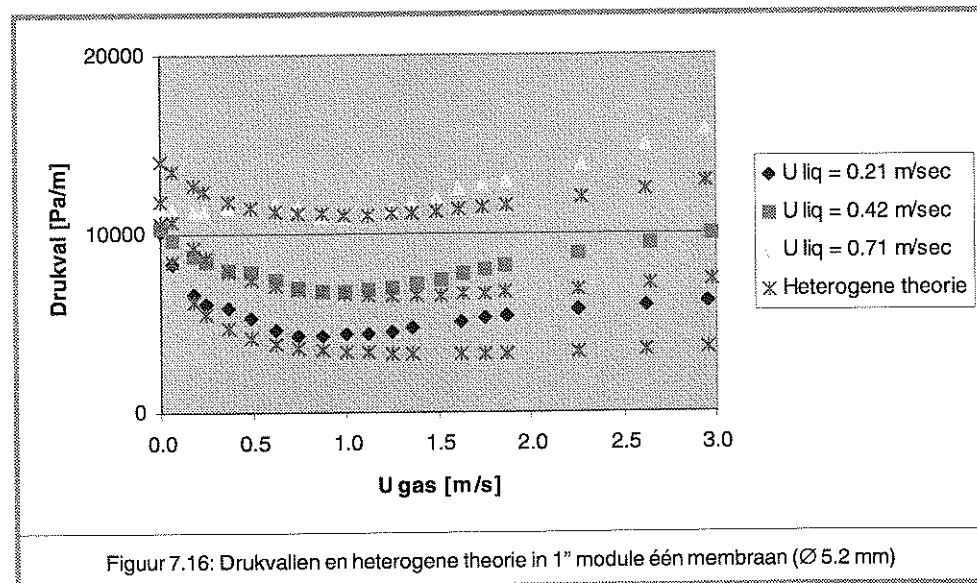
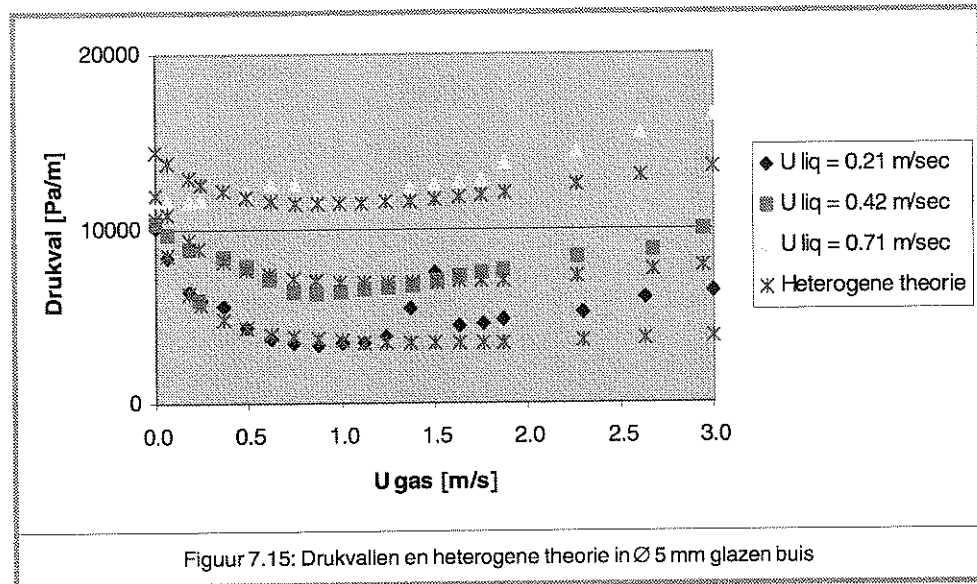
Voor  $L_{Bel}/d$  dient een waarde tussen drie en tien te worden aangehouden. Hier wordt de waarde zeven gekozen.

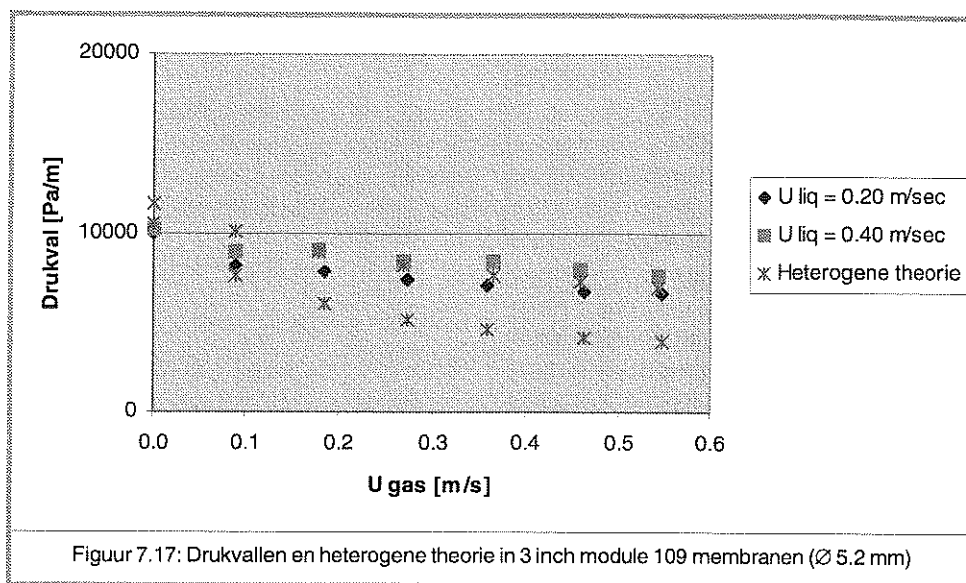
Te zien is dat de homogene theorie alleen op de metingen aansluit voor  $U_{Liq} = 0.21$  m/s. De heterogene theorie beschrijft de gemeten werkelijkheid erg goed voor  $U_{Liq} = 0.21$  en  $0.42$  m/s. Voor  $0.71$  m/s komen theorie en metingen alleen voor hogere gas-snelheden (boven circa  $0.3$  m/s) overeen.

#### 1 inch module één membraan

Voor de 1 inch module met één membraan ( $\varnothing 5.2$  mm) wordt de volgende drukval, zoals is weergegeven in figuur 7.16. In deze figuur is direct ook de heterogene theorie geplot.

Te zien is dat de (bewerkte) meetpunten de theorie weer even goed volgen als in de glazen buis. De eindkappen hebben geen noemenswaardig effect op de drukval.





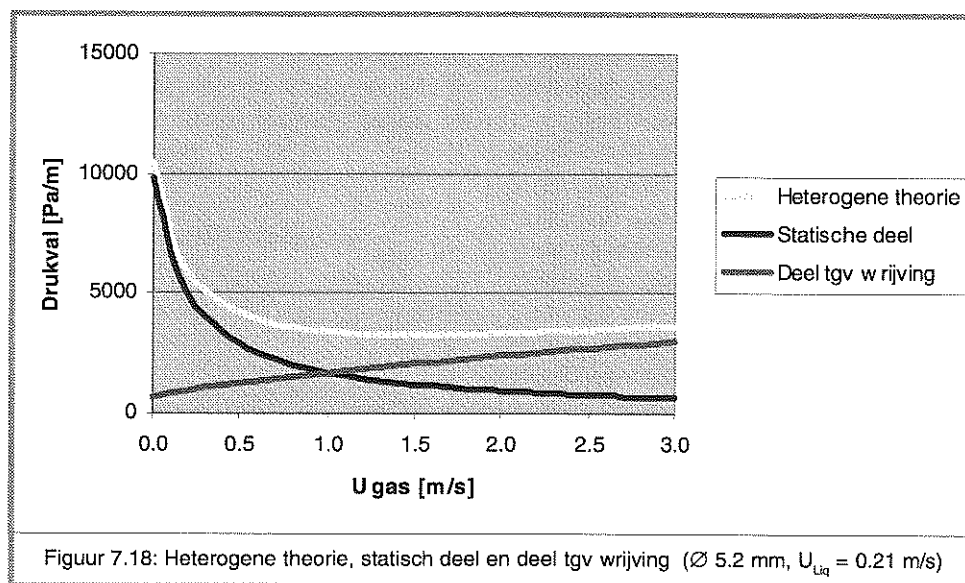
### 3 inch module 109 membranen

Om te onderzoeken of de heterogene theorie ook opgaat voor grotere modules met meerdere membranen zijn drukvalmetingen in een 3 inch module met 109 membranen gedaan. Dit is gebeurd in de Quick Scan Air van Stork. Belangrijkste verschil met de voorgaande metingen is dat de druksensor niet vast zit maar los op de opnamepunten geklikt wordt, zie figuur 7.12. In figuur 7.17 is te zien dat de metingen niet mooi aansluiten op de heterogene theorie. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de niet perfecte verdeling van het lucht/water mengsel over de membranen. Bij de hogere watersnelheid (0.4 m/s) sluit de theorie overigens beter aan op de metingen dan bij de lage. Wellicht ontstaat bij  $U_{\text{liq}} = 0.4$  m/s een turbulenter mengsel dat zich in de eindkap beter verdeelt over

de verschillende membranen dan bij de lagere vloeistofsnelheid.

### 7.5 Mét of zonder lucht?

Nu de heterogene theorie goed blijkt aan te sluiten wordt in figuur 7.18 het aandeel van de wrijving en het aandeel van van het hydrostatische drukverlies in de drukval weergegeven. Te zien is dat een hoge luchtsnelheid leidt tot een kleiner aandeel statische opvoerhoogte en een grotere drukval tgv wrijving. In onderstaande tabellen wordt voor een aantal waarden van de lucht- en watersnelheid de drukval gegeven en wordt het wrijvingsdeel en hydrostatische deel aangegeven. Tabel 7.1 behandelt drukvalen bij de forward flush, doorgerekend met de één fase theorie.





Tabel 7.1: Drukval bij forward flush

$U_{Liq}$	Drukval	Wrijving	Hydrostat.
[m/s]	[Pa/m]	[Pa/m]	[Pa/m]
0.2	10069	259	9810
0.3	10198	388	9810
0.4	10327	517	9810

Het hydrostatische drukverschil is onafhankelijk van de vloeistofsnelheid. Dit is logisch omdat de getransporteerde massa steeds gelijk is. De wrijvingsterm is zeer klein (maximaal 5% van het hydrostatische deel).

Drukvalen bij de airflush staan in tabel 7.2 en zijn berekend met de heterogene theorie.

Tabel 7.2: Drukval bij airflush

$U_{Liq}$	$U_{Gas}$	Drukval	Wrijving	Hydrostat.
[m/s]	[m/s]	[Pa/m]	[Pa/m]	[Pa/m]
0.2	0.4	4440	1170	3270
0.3	0.2	7486	1600	5886
0.3	0.4	6106	1902	4202
0.3	0.6	5445	2175	3270
0.4	0.4	7626	2721	4905

De totale drukval is beduidend lager dan bij de forward flush, met name bij lage liquid holdups, omdat de meegevoerde massa water lager is. Het drukverlies tgv wrijving is door de toevoeging van water een factor 4 tot 5 hoger in vergelijking met dezelfde spoeling zonder lucht.

## 7.6 Conclusies

- De drukval in een 1 inch module met één membraan met eindkappen is te beschrijven met een heterogeen drukvalmodel. De theorie is gebaseerd op slug flow, de in de praktijk voorkomende belvorm.
- Lucht/waterspoeling leidt tot vier maal hogere drukvalen tgv wrijving dan een zelfde spoeling zonder lucht.
- Voor de in de praktijk voorkomende luchtsnelheden geldt dat het toevoeren van meer lucht leidt tot een lagere drukval in totaal, maar tot een toenemende drukval tgv wrijving.
- Het verdubbelen van de watersnelheid tijdens de lucht/waterspoeling leidt tot een verdubbeling van de drukval tgv wrijving, terwijl het hydrostatische drukverlies gelijk blijft.

## 8. Conclusie en aanbevelingen

De resultaten van de koeklaagproeven en drukvalmetingen zullen in dit hoofdstuk gecombineerd worden. Als een aanwijzing voor optimale reiniging is gevonden zal ook de bijbehorende belvorm bepaald worden.

### 8.1 Conclusies

De hoofddoelstelling van dit onderzoek, het inzicht verkrijgen in het fenomeen lucht/waterspoeling is gehaald. Het doel ontwerpgrondslagen te formuleren is in zoverre gehaald dat een indicatie voor de optimale lucht- en watersnelheid is gevonden. Het aantal proeven is te beperkt om een algemeen geldende ontwerpregel te kunnen formuleren.

#### *Airflush en forward flush*

De airflush leidt tot een vijf maal hoger verwijderingspercentage dan een forward flush met vergelijkbare vloeistofsnelheid. Deze conclusie wordt door de drukvalmetingen onderschreven. Die toonden aan dat de drukval tgv wrijving bij de airflush vier maal groter is dan bij een forward flush met gelijke watersnelheid.

#### *Instellingen van de airflush*

Het hoogste verwijderingspercentage treedt op bij een watersnelheid van 0.2 m/s en een luchtsnelheid van 0.3 m/s. Het advies luidt dan ook deze instelling in de praktijk te gebruiken. Bij deze instelling treedt helm/slug flow op.

Uit de heterogene drukvaltheorie, waarvoor is gevonden dat deze de drukval in een 1 inch module met één membraan ( $\varnothing$  5.2 mm) goed beschrijft, kan geconcludeerd worden dat de luchtsnelheid zo hoog mogelijk gekozen zou moeten worden. Verhoging van de luchtsnelheid leidt namelijk tot verhoging van de drukval tgv wrijving terwijl het totale drukverlies afneemt.

### 8.2 Aanbevelingen vervolgonderzoek

Naar aanleiding van dit eerste verkennende onderzoek zijn globaal drie vervolgonderzoeken mogelijk.

#### *Eigenschappen koeklaag*

Om een optimaal reinigingsregime (combinatie forward flush, backflush, airflush en chemische reiniging) te ontwerpen, is het noodzakelijk eerst meer te weten over de eigenschappen van de koeklaag. Vragen daarbij zijn: hoe poreus is de

koeklaag, bevindt de vervuiling zich ook in het membraan, hoe bouwt de koeklaag zich op in de tijd en over de lengte van het membraan, hoe groot is de cohesie van de laag en is er überhaupt wel sprake van een koeklaag of valt deze direct van de membraanwand als, voor het spoelen, de druk van het systeem wordt afgehaald?

Het ontstaan van de koeklaag kan gesimuleerd worden door ruwwater te filteren over een vlak membraan. Vervolgens kan dan het ontstaan van de koeklaag onderzocht worden in een module met één membraan. Hierbij zou gebruik gemaakt kunnen worden van ultrasone of röntgen opname-apparatuur. Verder zou een mini camera ingebracht kunnen worden, of zouden autopsies op de membranen kunnen worden uitgevoerd, liefst bij dezelfde druk waarbij de koeklaag gevormd is.

Als op die manier meer bekend is geworden over de eigenschappen van de koeklaag kan een stof-overdrachtsmodel (Sherwood [Heiszwolf]) worden gekalibreerd, waarmee verwijdering van de koeklaag verder geoptimaliseerd kan worden.

#### *Upscaling*

Nu meer bekend is over het gedrag van de lucht/waterspoeling in één membraan moet onderzocht worden in hoeverre deze resultaten ook bruikbaar zijn in modules met meerdere membranen. Belangrijkste vraag daarbij is: hoe gedraagt het lucht/water mengsel zich in de eindkap en hoe kan ervoor gezorgd worden dat elk membraan de juiste hoeveelheid lucht en water krijgt.

Begonnen wordt met een literatuurstudie waarbij ook naar andere vakgebieden gekeken moet worden, bijvoorbeeld de gas- en olieindustrie.

Dan dient een proefopstelling met doorzichtige eindkappen gebouwd te worden, waarbij een aantal membranen met verschillende afstand tot de wand wordt voorzien van sensoren die de elektrische geleidbaarheid van het passerende lucht/watermengsel kunnen meten [vd Eijnden]. Zo kan vastgesteld worden wanneer een luchtbel of een waterpakketje passeert en hoe het mengsel zich dus in de eindkap verdeeld heeft.

Daarnaast dient een hydraulische modellering uitgevoerd te worden om zo te ontdekken welke factoren van invloed zijn op de verdeling in de eindkap.

Dit moet uiteindelijk leiden tot een bepaald type luchtinjectie en eindkap die alle membranen de juiste hoeveelheid lucht en water geeft.

#### *Lucht/waterspoeling in $\varnothing$ 1 mm membraan*

Omdat de productieprijs van capillairen (circa  $\varnothing$  1 mm) ongeveer de helft is van de prijs van

samengestelde membranen is het interessant te onderzoeken of de airflush ook in capillairen gerealiseerd kan worden. Het gedrag van een lucht/watermengsel in deze kleine buisjes verschilt wezenlijk van de in dit onderzoek onderzochte buisdiameter ( $\varnothing$  5 mm). De capillairen vinden toepassing bij omgekeerde osmose, nanofiltratie en ultrafiltratie.

Vragen zijn in hoeverre de in dit onderzoek gepresenteerde theorieën en resultaten voor de kleine buisdiameter geldig zijn en hoe de gewenste hoeveelheid lucht ingebracht kan worden. De wrijvingsweerstand in de kleine rietjes is namelijk erg hoog.

Een literatuurstudie dient te worden uitgevoerd waarbij met name naar parallellen met de wereld van monolietreactoren en warmtewisselaars in kernreactoren gezocht moet worden.

Daarna moeten een aantal manieren van lucht inbrengen ontworpen worden en dienen deze getest te worden in een Quick Scan.

## Literatuur

- H.E.A. van den Akker, R.F. Mudde, *Fysische transportverschijnselen I*, Delft, 1996
- D. Barnea, Y. Luninski, Y. Taitel, Flow pattern in horizontal and vertical two-phase flow in small diameter pipes, *Canadian Journal of Chemical engineering*, 61, 617-620, 1983
- N. Brauner, D. Barnea, Slug/churn transition in upward vertical flow, *Chemical Engineering Science*, 41, 159-163, 1986
- X.T. Chen, J.P. Brill, Slug to churn transition in upward vertical two-phase flow, *Chemical Engineering Science*, 52, 4269-4272, 1997
- R. Delfos, Experiments on air entrainment from a stationary slug bubble in a vertical tube, Delft 1996
- DHV Water, Verslag experiment luchtspoeling Stork 9 april 1998
- M.G. Eijnden, van den, Hydrodynamics of co-current two-phase flow in capillaries and monoliths, Delft, 1999
- T. Fukano, A. Kariyasaki, Characteristics of gas-liquid two-phase flow in a capillary tube, *Nuclear Engineering and Design*, 141, 59-68, 1993
- L. Galbiati, P. Andreini, Flow pattern transition for horizontal air-water flow in capillary tubes. A microgravity "equivalent system" simulation *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 21, 461-468, 1994
- J.J. Heiszwolf, L.B. Engelvaart, M.T. Kreutzer, D.J. Parrillo, F. Kapteijn, J. A. Moulijn, Hydrodynamics and mass transfer of co-current two-phase flow in monoliths, Delft, 1999
- O.J. Hoekstra, Ultrafiltratieproeven met spoelwater op locatie Spannenburg, 1999
- S. Irandoust, B. Andersson, Liquid film in Taylor flow through a capillary, *Industrial & Engineering Chemistry research*, 28, 1684-1688, 1989
- S. Kakac, R.K. Shah, W. Aung, *Handbook of single-phase convective heat transfer*, 1987
- A. Lathouder, de, Richtlijnen ten dienste van het ontwerpen en de behandeling van snelfilters, mededeling 9, Rijswijk, 1965
- W. van der Meer, R. Termeulen, P. de Moel, H. van Dalfsen, Luchtspoeling bij ultrafiltratie, *H<sub>2</sub>O*, 4, 20-22, 1999
- M. Mercier, C. Fonade, C. Lafforgue-Delorme, Influence of the flow regime on the efficiency of a gas-liquid two-phase medium filtration, *Biotechnology techniques*, 9, 853-858, 1995
- M. Mulder, *Basic principles of membrane technology*, Dordrecht, 1990
- Y. Taitel, D. Barnea, A. Dulker, Modelling Flow Pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes, *AIChE Journal*, 26, 345-354, 1980
- K.A. Triplett, S. M. Ghiaasiaan, S.I. Abdel-Khalik, D.L. Sadowski, Gas-liquid two-phase flow in micro-channels, Part I: two-phase flow patterns, *Multiphase Flow*, 25, 377-394, 1999
- J.L. Xu, P. Cheng, T.S. Zhao, Gas-liquid two-phase flow regimes in rectangular channels with mini/micro gaps, *International Journal of Multiphase Flow*, 25, 411-432, 1999

## Bijlagen

- Bijlage 1: Luchtdebiet omrekenfactor Krohne
- Bijlage 2: Afmetingen proefopstelling (alle proeven)
- Bijlage 3: Belpatronen in  $\varnothing$  15 mm
- Bijlage 4: Belpatronen in  $\varnothing$  5 mm
- Bijlage 5: Belpatronen in  $\varnothing$  1 mm
- Bijlage 6: Aanvullende belpatroon proeven
- Bijlage 7: Belpatroondiagram  $\varnothing$  1 mm
- Bijlage 8: Meetformulier koeklaagproeven
- Bijlage 9: Meetresultaten koeklaagproeven
- Bijlage 10: Meetresultaten drukvalproeven glazen  
buis  $\varnothing$  5 mm

## Bijlage 1: Luchtdebiet omrekenfactoren Krohne

KROHNE PERSENAIRE B.V.  
 Postbus 110 - 3300 AC DORDRECHT  
 Kerkepleat 12 - 3313 LC DORDRECHT  
 Tel.: 078-6306200 - Fax: 078-6306234

**KROHNE**

Persenaire

GASSEN

Factoren voor gassen zijn :  
 - druk  
 - temperatuur  
 - s.g.

Faktor voor temperatuur:

$$(a) \quad F_t = \sqrt{\frac{T \text{ bedrijfstemp.}}{T \text{ ijktemp.}}} \quad \text{in } ^\circ\text{K} \text{ zie tabel 1}$$

Faktor voor druk:

$$(b) \quad F_p = \sqrt{\frac{\text{norm.druk}}{\text{bedrijfsdruk}}} \quad \text{druk abs. zie tabel 2}$$

Faktor voor s.g.:

$$(c) \quad F_\rho = \sqrt{\frac{\rho \text{ medium}}{\rho \text{ lucht}}} \quad (\text{kg/Nm}^3) \quad \text{zie tabel 3.1 t/m 3.5}$$

$$(d) \quad t_{\text{tot}} = F_t \times F_p \times F_\rho$$

(a)   (b)   (c)

$$t_{\text{tot}} \times \text{doorstroomhoeveelheid medium} = \text{lucht Nm}^3/\text{h}$$

*in Nm<sup>3</sup>/h.*

voorbeeld:

medium = zuurstof                      druk = 5 bar abs.                      t = 100°C  
 Ø = 200 Nm<sup>3</sup>/h

$$F_t = \sqrt{\frac{373}{293}} = 1,128$$

$$F_p = \sqrt{\frac{1,013}{5}} = 0,450$$

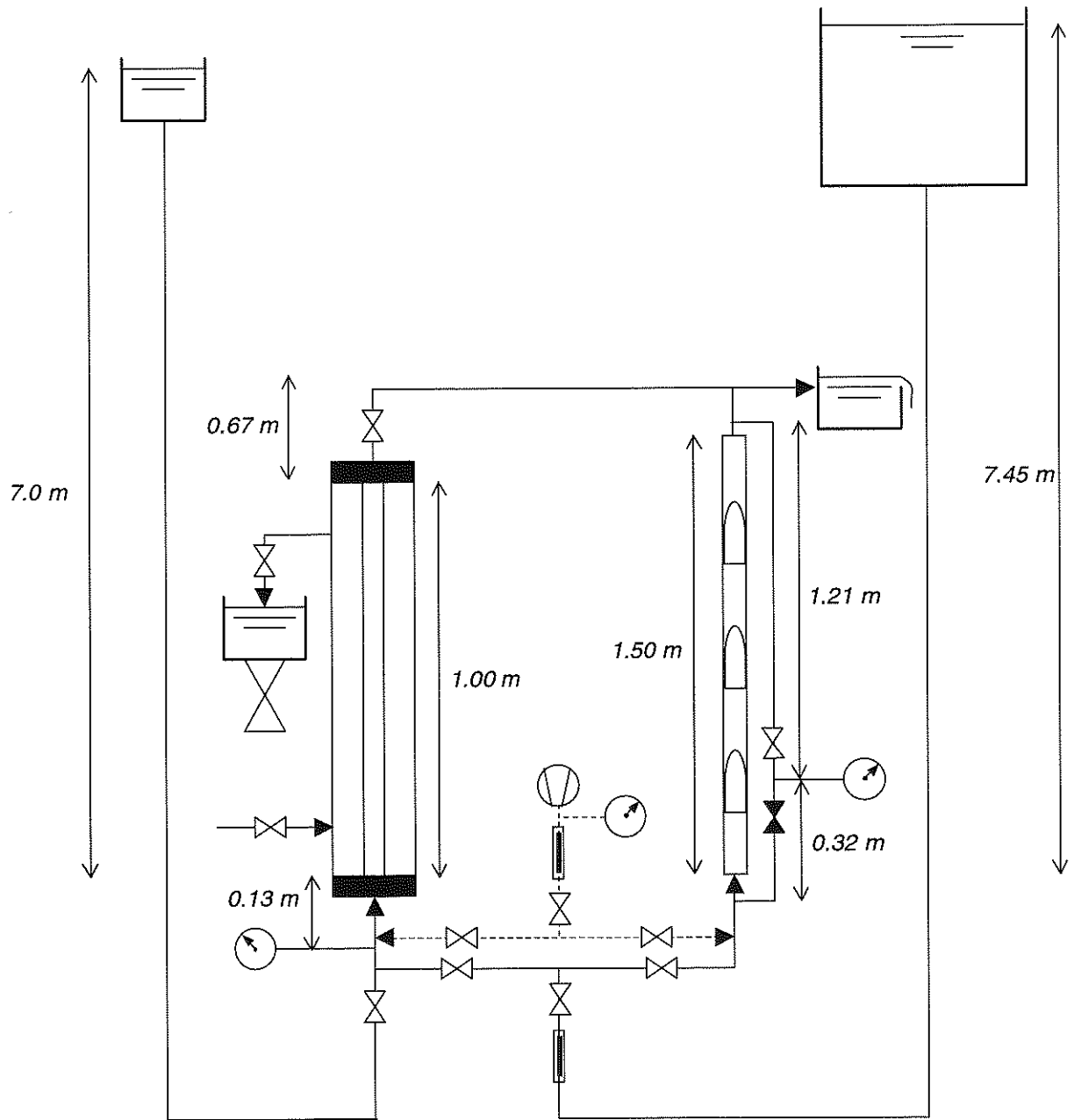
$$F_\rho = \sqrt{\frac{1,429}{1,293}} = 1,051$$

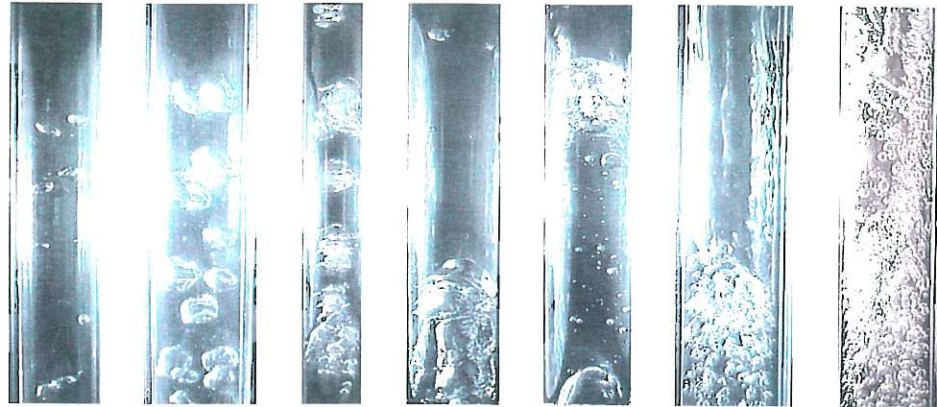
$$F_{\text{tot}} = 1,128 \times 0,450 \times 1,051 = 0,5335$$

$$\text{Hoeveelheid lucht Nm}^3/\text{h} = 0,5335 \times 200$$

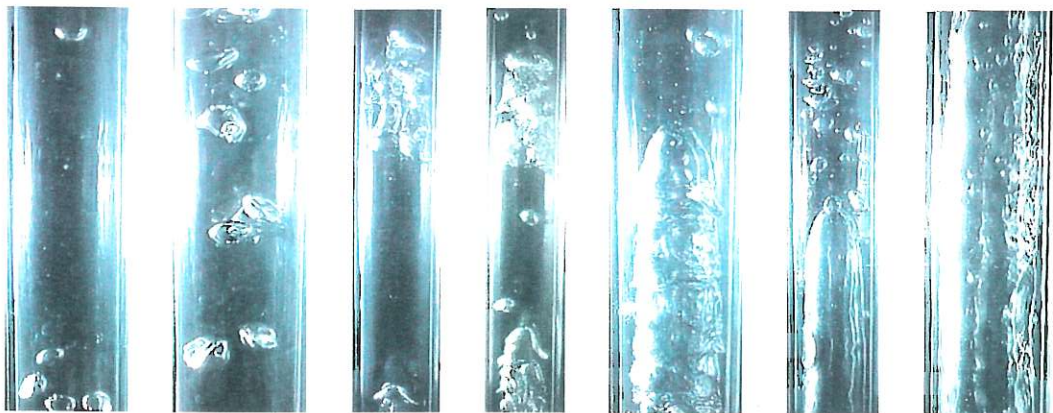


Bijlage 2: Afmetingen proefopstelling (alle proeven)

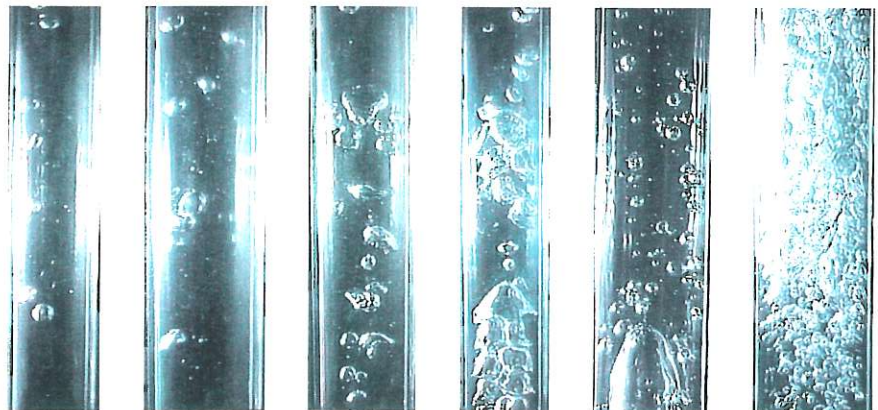


Bijlage 3: Belpatronen in  $\varnothing$  15 mm $U_{Liq} = 0.25$  m/s

$U_{Gas}$ [m/s]	0.0037	0.020	0.025	0.053	0.20	0.55	0.83
$\epsilon_{Liq}$ [-]	0.99	0.93	0.91	0.83	0.55	0.31	0.23
Flow	Bubble	Bubble	Bubble/helm	Helm	Slug	Annular	Annular

 $U_{Liq} = 0.39$  m/s

$U_{Gas}$ [m/s]	0.0063	0.019	0.025	0.063	0.17	0.33	0.57
$\epsilon_{Liq}$ [-]	0.98	0.95	0.94	0.86	0.70	0.54	0.41
Flow	Bubble	Bubble	Bubble	Helm	Helm/slug	Slug	Annular

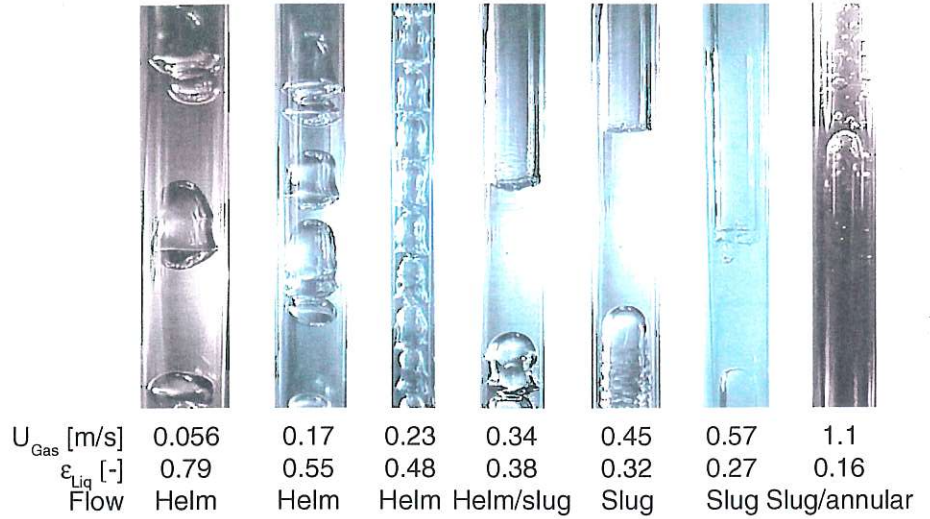
 $U_{Liq} = 0.79$  m/s

$U_{Gas}$ [m/s]	0.0063	0.019	0.035	0.10	0.34	0.82
$\epsilon_{Liq}$ [-]	0.99	0.98	0.96	0.88	0.70	0.49
Flow	Bubble	Bubble	Bubble/helm	Helm	Slug	Annular

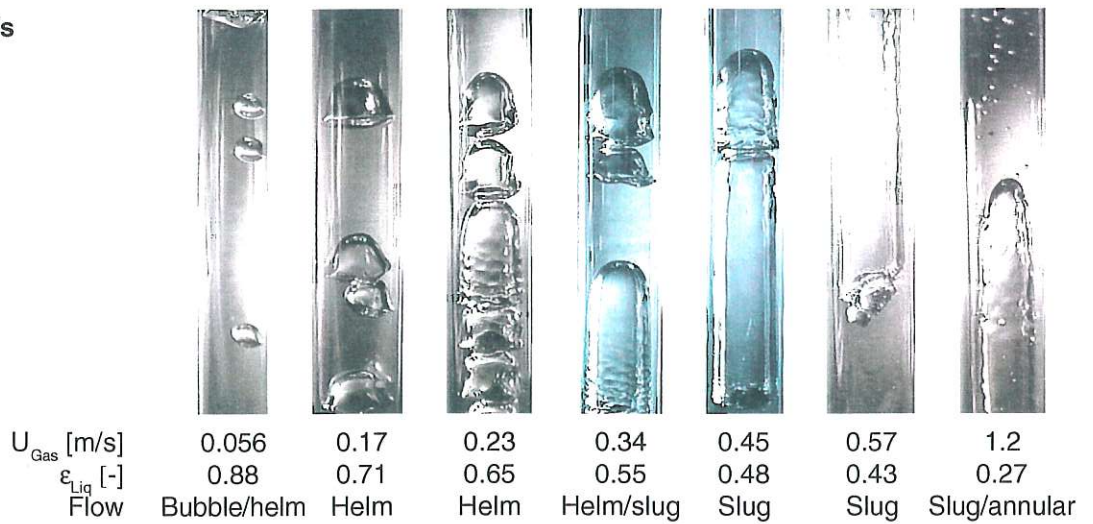


## Bijlage 4: Belpatronen in $\varnothing$ 5 mm

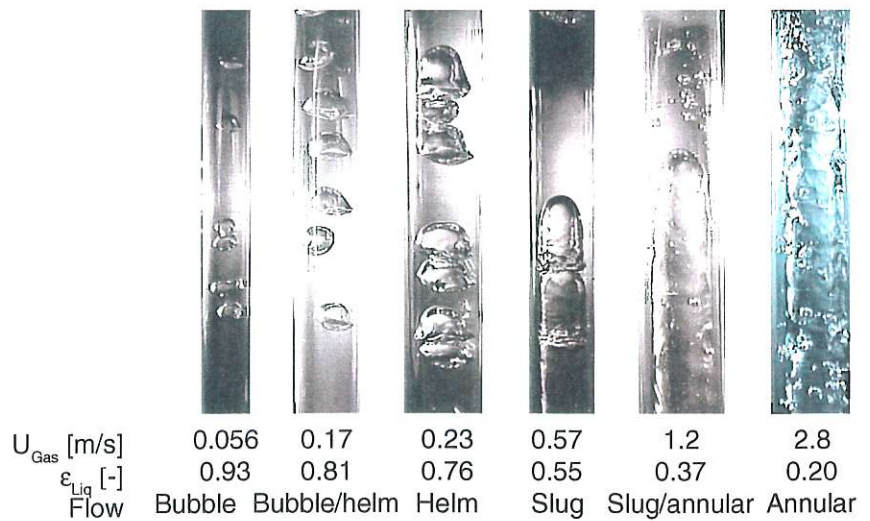
$U_{Liq} = 0.21$  m/s



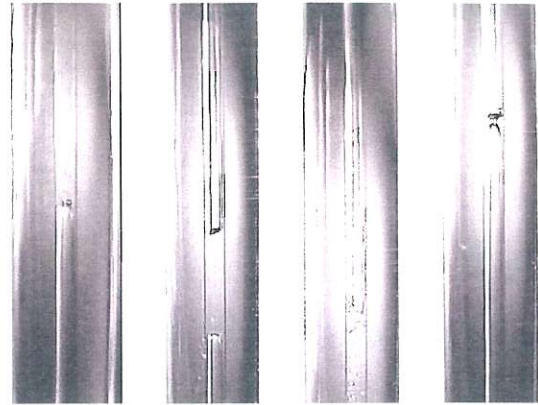
$U_{Liq} = 0.42$  m/s



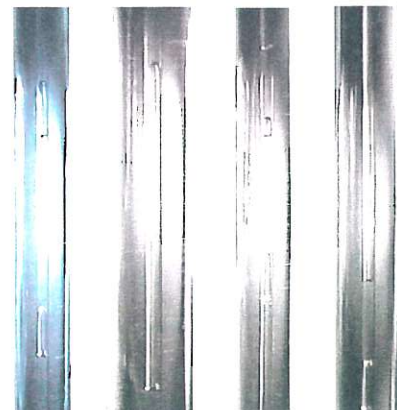
$U_{Liq} = 0.71$  m/s





Bijlage 5: Belpatronen in  $\varnothing$  1 mm $U_{Liq} = 0.18$  m/s

$U_{Gas}$ [m/s]	1.1	2.0	2.8	4.2
$\epsilon_{Liq}$ [-]	0.14	0.08	0.06	0.04
Flow	Slug	Slug	Slug	Slug

 $U_{Liq} = 0.35$  m/s

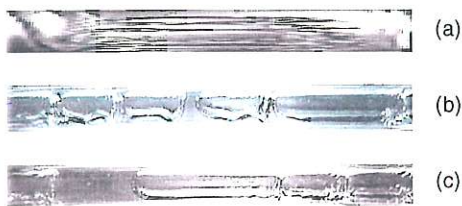
$U_{Gas}$ [m/s]	2.0	2.5	3.1	4.2
$\epsilon_{Liq}$ [-]	0.15	0.12	0.10	0.08
Flow	Slug	Slug	Slug	Slug

 $U_{Liq} = 0.71$  m/s

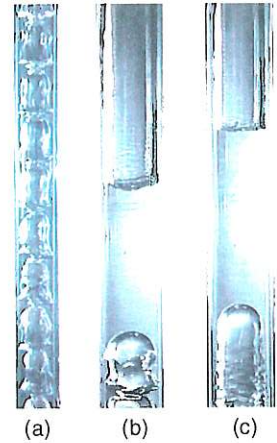
$U_{Gas}$ [m/s]	0.84
$\epsilon_{Liq}$ [-]	0.46
Flow	Slug

## Bijlage 6: Aanvullende belpatroon proeven

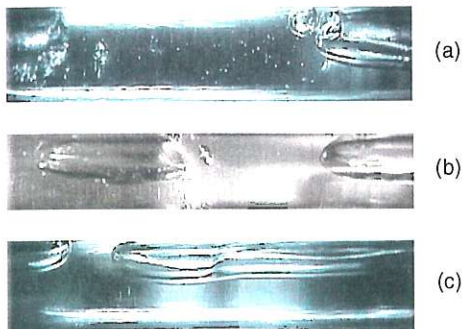
Ø 5 mm horizontaal/verticaal



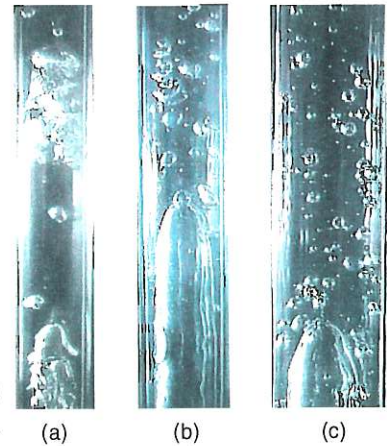
	(a)	(b)	(c)
$U_{Liq}$ [m/s]	0.21	0.21	0.21
$U_{Gas}$ [m/s]	0.23	0.34	0.45



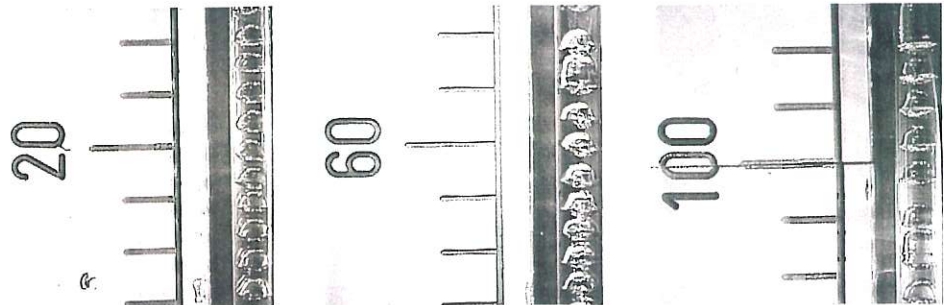
Ø 15 mm horizontaal/verticaal



	(a)	(b)	(c)
$U_{Liq}$ [m/s]	0.39	0.39	0.79
$U_{Gas}$ [m/s]	0.063	0.33	0.34

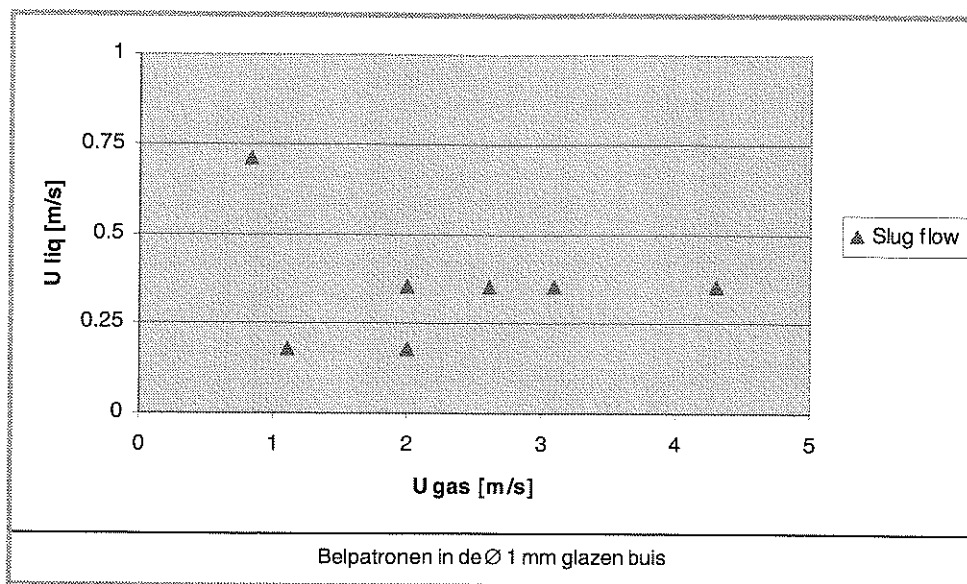


Ø 5 mm belvorm als functie van de hoogte



Getallen op meetlat = afstand tot onderkant buis in cm.

$U_{Liq} = 0.21$  m/s,  $U_{Gas} = 0.09$  m/s

Bijlage 7: Belpatroondiagram  $\varnothing$  1 mm



## Bijlage 8: Meetformulier koeklaagproeven

Diameter membraan:   
 Datum:   
 Nummer proef:   
 Naam bestand:

Meetschema 1 inch module

### De suspensie

Opmerkingen en monster #

materiaal		
datum geleverd		
datum in vat		
gewicht gedroogd filter	[gr]	
gewicht filter met residu	[gr]	
volume monster	[ml]	
zwevende stof voor aanvang	[mg/l]	
pH voor aanvang	[-]	

### SWF 1

voedingsdruk	[bar]	
watertemp	[gr. celsius]	
gefiltreerd volume na 2 minuten	[ml]	
Flux	[l/m <sup>2</sup> h bar]	

### Filtreren

voedingsdruk	[bar]	
begintijd fluxmeting		
eindtijd fluxmeting		
tijdsduur filtratie	[minuten]	
gefiltreerd volume	[ml]	
Flux	[l/m <sup>2</sup> h bar]	
watertemp permeaat	[gr. celsius]	
pH permeaat	[-]	
troebelheid permeaat	[NTU]	

### Lucht/waterspoeling

Q liquid	[l/uur]	
Q gas	[l/uur]	
P gas	[bar]	
luchttemp	[gr. celsius]	
duur airflush	[sec]	

### SWF 2

voedingsdruk	[bar]	
watertemp	[gr. celsius]	
gefiltreerd volume na 2 minuten	[ml]	
Flux	[l/m <sup>2</sup> h bar]	

### Concentraat

gewicht opvangbak voor	[gr]	
gewicht opvangbak na	[gr]	
recovery	[%]	
gewicht gedroogd filter	[gr]	
gewicht filter met residu	[gr]	
volume monster	[ml]	
zwevende stof	[mg/l]	
zwevende stof	[mg]	
pH	[-]	

### SWF 3

voedingsdruk	[bar]	
watertemp	[gr. celsius]	
gefiltreerd volume na 2 minuten	[ml]	
Flux	[l/m <sup>2</sup> h bar]	





## Bijlage 10: Meetresultaten drukvalproeven glazen buis Ø 5 mm

U liquid [m/sec]	U gas* [m/sec]	U meng [m/sec]	Drukval [bar]	Drukval [Pa]	Re [-]	Liq holdup [-]	Bewerkte drukval [Pa/m]	Homo theorie [Pa/m]	Hetero theorie [Pa/m]	Hetero wrijving [Pa/m]	Hetero hydrostat [Pa/m]
0.21	0.00	0.21	0.0040	400	1061	1.00	10070	10082	10567	757	9810
0.21	0.06	0.27	-0.0231	-2313	1362	0.78	8305	7989	8484	844	7640
0.21	0.18	0.39	-0.0527	-5266	1985	0.54	6384	5800	6297	1001	5297
0.21	0.25	0.46	-0.0599	-5986	2291	0.46	5915	5130	5622	1078	4544
0.21	0.37	0.58	-0.0650	-6503	2906	0.37	5579	4326	4798	1215	3582
0.21	0.49	0.70	-0.0855	-8547	3520	0.30	4249	3858	4300	1343	2957
0.21	0.62	0.83	-0.0935	-9346	4147	0.26	3729	3572	3975	1465	2510
0.21	0.74	0.96	-0.0985	-9849	4778	0.22	3402	3402	3761	1582	2179
0.21	0.87	1.09	-0.0999	-9987	5430	0.20	3313	3307	3614	1698	1917
0.21	1.00	1.21	-0.0986	-9863	6054	0.18	3393	3269	3523	1804	1719
0.21	1.12	1.33	-0.0981	-9812	6657	0.16	3426	3268	3466	1903	1564
0.21	1.24	1.45	-0.0928	-9284	7255	0.15	3770	3292	3433	1998	1435
0.21	1.37	1.59	-0.0673	-6727	7927	0.13	5433	3342	3415	2102	1313
0.21	1.50	1.72	-0.0363	-3625	8579	0.12	7451	3410	3413	2200	1213
0.21	1.64	1.85	-0.0829	-8294	9238	0.11	4414	3492	3423	2296	1127
0.21	1.76	1.97	-0.0804	-8043	9867	0.11	4577	3581	3441	2386	1055
0.21	1.87	2.08	-0.0781	-7812	10423	0.10	4728	3667	3463	2464	999
0.21	2.29	2.50	-0.0720	-7202	12516	0.08	5124	4036	3578	2746	832
0.21	2.63	2.84	-0.0591	-5912	14218	0.07	5963	4372	3695	2963	732
0.21	3.00	3.21	-0.0536	-5362	16040	0.07	6322	4755	3835	3186	649
0.42	0.00	0.42	0.0074	739	2122	1.00	10291	10353	11887	2077	9810
0.42	0.06	0.48	-0.0022	-221	2423	0.88	9666	9210	10808	2218	8590
0.42	0.18	0.61	-0.0159	-1587	3026	0.70	8777	7654	9361	2482	6879
0.42	0.24	0.67	-0.0599	-5986	3343	0.63	5915	7083	8841	2614	5228
0.42	0.37	0.79	-0.0223	-2232	3960	0.54	8358	6271	8116	2859	5257
0.42	0.49	0.91	-0.0305	-3046	4572	0.46	7828	5723	7642	3089	4553
0.42	0.61	1.04	-0.0410	-4099	5185	0.41	7143	5342	7324	3309	4015
0.42	0.74	1.16	-0.0520	-5205	5797	0.37	6424	5075	7112	3521	3591
0.42	0.86	1.29	-0.0543	-5427	6426	0.33	6279	4885	6970	3730	3240
0.42	0.98	1.41	-0.0532	-5319	7041	0.30	6350	4759	6885	3928	2957
0.42	1.11	1.54	-0.0514	-5138	7697	0.28	6467	4675	6838	4133	2705
0.42	1.25	1.67	-0.0490	-4900	8363	0.25	6622	4630	6825	4336	2489
0.42	1.38	1.80	-0.0466	-4660	9014	0.24	6778	4617	6837	4528	2309
0.42	1.51	1.93	-0.0426	-4263	9670	0.22	7036	4628	6870	4717	2153
0.42	1.63	2.05	-0.0395	-3946	10267	0.21	7243	4656	6913	4885	2028
0.42	1.75	2.18	-0.0360	-3602	10894	0.19	7466	4700	6969	5058	1911
0.42	1.87	2.30	-0.0345	-3445	11484	0.18	7568	4753	7031	5219	1813
0.42	2.26	2.68	-0.0230	-2301	13400	0.16	8313	4984	7273	5720	1554
0.42	2.67	3.10	-0.0161	-1611	15487	0.14	8762	5309	7583	6239	1344
0.42	2.94	3.36	0.0026	262	16824	0.13	9980	5544	7796	6558	1237
0.71	0.00	0.71	0.0282	2821	3537	1.00	11646	10715	14297	4487	9810
0.71	0.06	0.77	0.0266	2656	3839	0.92	11538	10020	13724	4686	9037
0.71	0.18	0.89	0.0270	2705	4447	0.80	11570	8940	12873	5072	7801
0.71	0.25	0.95	0.0289	2886	4764	0.74	11688	8502	12548	5265	7282
0.71	0.37	1.08	0.0356	3563	5378	0.66	12128	7828	12080	5628	6451
0.71	0.49	1.20	0.0347	3467	6001	0.59	12066	7318	11764	5983	5782
0.71	0.62	1.33	0.0424	4240	6640	0.53	12568	6925	11558	6333	5225
0.71	0.74	1.45	0.0411	4107	7261	0.49	12482	6637	11442	6663	4778
0.71	0.87	1.58	0.0277	2765	7898	0.45	11609	6415	11385	6992	4393
0.71	0.99	1.70	0.0244	2438	8503	0.42	11396	6257	11376	7295	4081
0.71	1.11	1.82	0.0254	2544	9081	0.39	11465	6145	11400	7579	3821
0.71	1.24	1.94	0.0301	3010	9721	0.36	11769	6058	11455	7886	3569
0.71	1.37	2.08	0.0371	3710	10391	0.34	12224	5999	11539	8200	3339
0.71	1.50	2.20	0.0414	4141	11014	0.32	12504	5970	11636	8486	3150
0.71	1.63	2.33	0.0437	4373	11668	0.30	12655	5961	11753	8780	2974
0.71	1.75	2.46	0.0458	4577	12293	0.29	12788	5969	11878	9056	2822
0.71	1.88	2.59	0.0603	6035	12955	0.27	13736	5995	12021	9343	2678
0.71	2.26	2.97	0.0708	7081	14839	0.24	14417	6137	12472	10134	2338

0.71	2.61	3.31	0.0864	8643	16572	0.21	15433	6336	12925	10832	2094
0.71	3.00	3.71	0.1021	10208	18548	0.19	16451	6619	13468	11598	1871
1.13	0.00	1.13	0.0673	6726	5659	1.00	14186	11259	19073	9263	9810
1.13	0.06	1.19	0.0713	7131	5965	0.95	14450	10834	18847	9540	9307
1.13	0.18	1.32	0.0784	7841	6580	0.86	14912	10122	18518	10081	8437
1.13	0.25	1.38	0.0827	8270	6886	0.82	15190	9824	18406	10345	8061
1.13	0.37	1.50	0.0958	9577	7507	0.75	16041	9317	18261	10866	7395
1.13	0.50	1.63	0.1105	11049	8142	0.70	16999	8903	18203	11384	6818
1.13	0.62	1.75	0.1238	12376	8751	0.65	17862	8584	18212	11869	6344
1.13	0.74	1.87	0.1356	13559	9369	0.60	18632	8324	18274	12349	5925
1.13	0.86	1.99	0.1350	13498	9971	0.57	18592	8120	18374	12806	5567
1.13	0.99	2.12	0.1333	13333	10587	0.53	18485	7954	18508	13265	5243
1.13	1.12	2.25	0.1326	13264	11245	0.50	18440	7815	18681	13744	4937
1.13	1.25	2.38	0.1370	13704	11914	0.47	18726	7710	18882	14222	4660
1.13	1.38	2.51	0.1426	14258	12539	0.45	19087	7637	19088	14661	4427
1.13	1.49	2.62	0.1523	15231	13107	0.43	19720	7591	19288	15053	4235
1.13	1.60	2.73	0.1617	16173	13668	0.41	20332	7561	19496	15434	4062
1.13	1.74	2.87	0.1690	16899	14349	0.39	20805	7542	19759	15890	3869
1.13	1.87	3.00	0.1733	17331	15005	0.38	21086	7541	20022	16323	3700
1.13	2.25	3.38	0.1913	19127	16917	0.33	22254	7612	20830	17548	3281
1.13	2.63	3.76	0.2158	21584	18794	0.30	23853	7765	21660	18706	2954
1.13	2.98	4.11	0.2364	23645	20556	0.28	25194	7963	22458	19757	2701

$L = 1.537$  [m]  
 $\rho_0 = 1000$  [kg/m<sup>3</sup>]  
 $d = 0.005$  [m]  
 $g = 9.81$  [m/s<sup>2</sup>]  
 $\mu = 1.0E-03$  [Pa s]

\* = U gas berekend zoals aangegeven in Bijlage 1: de wortel getrokken uit Ft en Fp (!)