



Verdeling van lucht en water over een membraanmodule

IR. J. VERBERK, TU DELFT

ING. P. HOOGVEEN, X-FLOW

DR. IR. H. FUTSELAAR, NORIT MEMBRANE TECHNOLOGY

PROF. IR. J. VAN DIJK, TU DELFT

Hydraulica speelt een belangrijke rol in het ontwerp en de bedrijfsvoering van zuiveringsinstallaties. Zo is bekend dat een gelijkmatige verdeling van water en lucht erg belangrijk is bij het terugspoelen van snelfilters. Ook bij membraanfiltratie blijkt dit zo te zijn. Door de TU Delft wordt in samenwerking met X-Flow onderzoek verricht naar gecombineerde lucht-water spoeling bij membraanfiltratie, ook wel AirFlush genoemd. Eerder is reeds gerapporteerd over de invloed van snelheden van water en lucht in individuele membranen op de reiniging. In dit artikel wordt ingegaan op de verschillende processen die bepalend zijn voor de gelijkmatige verdeling van water en lucht over een membraanmodule.

Een direct gevolg van de toepassing van membraanfiltratie voor de verwijdering van zwevende stoffen is een lagere productiviteit (uitgedrukt in de parameter flux in $l/(m^2 \cdot h)$) gedurende een productiecyclus. Dit wordt zowel waargenomen bij microfiltratie, ultrafiltratie, als ook bij capillaire nanofiltratie. Deze fluxdaling kan door verschillende factoren veroorzaakt worden, zoals adsorptie, porieverstopping en koeklaagvorming. Door al deze factoren neemt de weerstand tegen transport door de membranen toe. De mate waarin is afhankelijk van de waterkwaliteit en procescondities. Voor de verwijdering van vervuiling kunnen verschillende reinigingsmethoden gebruikt worden. Door terugspoelen (back flush) van het membraan worden in principe deeltjes uit de poriën verwijderd. Door langstroming parallel aan het membraanoppervlak (forward flush) wordt de koeklaag verwijderd, door een reiniging met chemicaliën wordt geadsorbeerd materiaal verwijderd. Recent is een nieuwe reinigingsmethode geïntroduceerd voor de verwijdering van de koeklaag. Aan de waterstroom parallel aan het membraan wordt hierbij lucht toegevoegd. Hierdoor wordt de turbulentie verhoogd en worden lokale snelheidsgradiënten in de watermassa gevormd¹⁾. Eerder onderzoek aan de TU Delft heeft zich gericht op de procescondities (lucht- en watersnelheden) om een optimale reiniging te krijgen in één enkel membraan^{2,3)}.

In het huidige onderzoek is onderzocht of elk membraan in een membraanmodule met dezelfde water- en luchtsnelheden door-

stroomd wordt. Bij een niet uniforme water- en luchtverdeling zal de reiniging per membraan verschillend zijn. Verschillende meetmethoden zijn beschikbaar voor het verkrijgen van informatie over de snelheden van water en lucht in een enkele buis. Echter bijna al deze meetmethoden zijn niet geschikt voor toepassing in een membraanmodule waarin enkele tot vele duizenden membranen aanwezig zijn. Momenteel is aan de TU Delft een detectieme-

thode in onderzoek gebaseerd op het verschil in elektrisch geleidingsvermogen tussen water- en luchtpakketjes. Met deze methode is het mogelijk onderscheid te maken tussen water- en luchtpakketjes en de stroomsnelheid van elk pakketje te berekenen. Hierover wordt later bericht. Hieronder komt een eenvoudige methode aanbod.

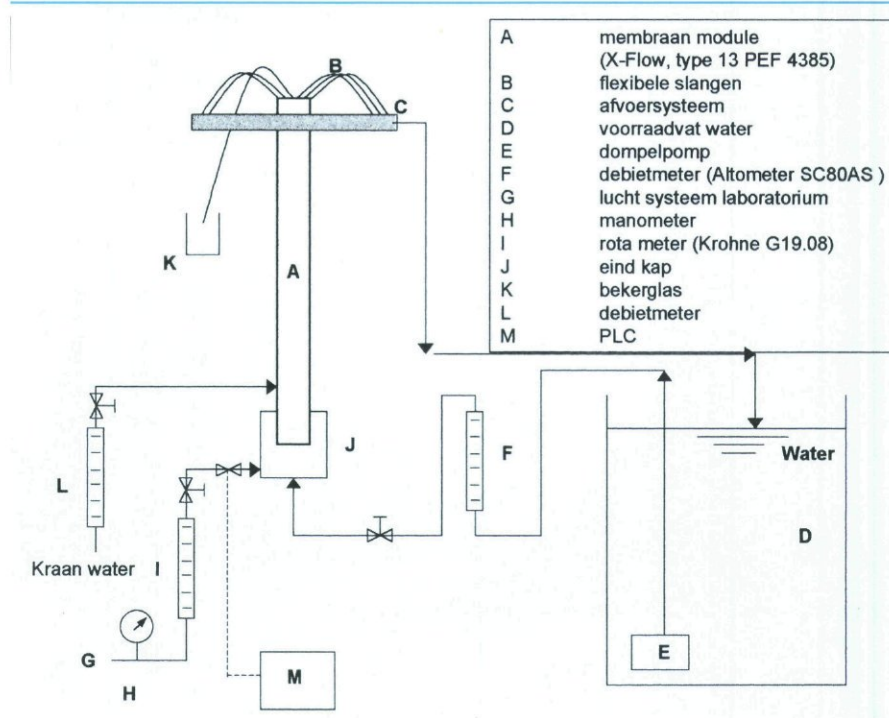
Beschrijving proefopstelling

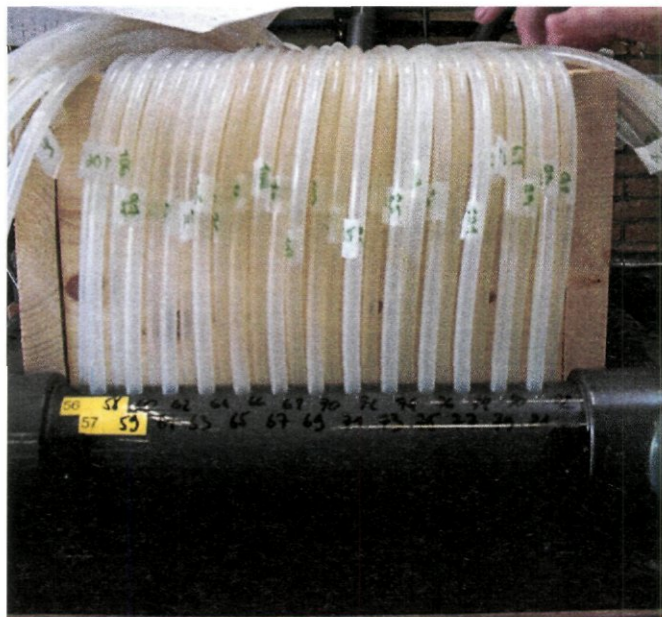
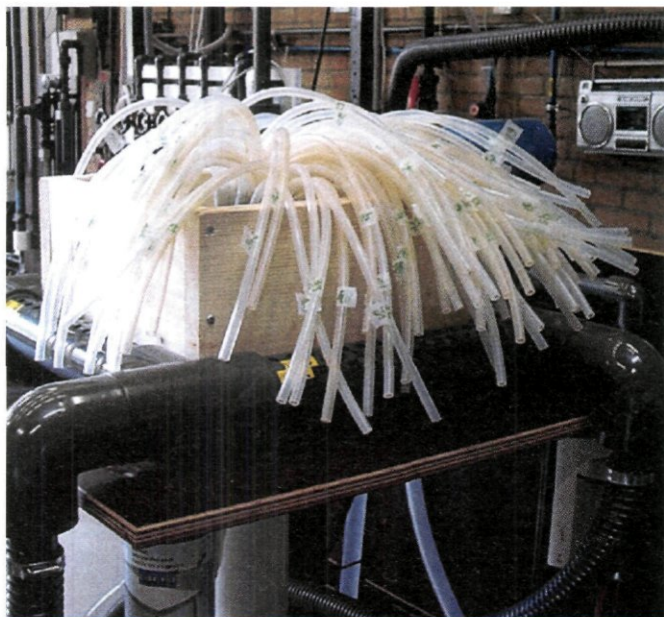
Het doel van de proeven is het bepalen van de water- en lucht verdeling over een membraanmodule als functie van bedrijfsvoeringsparameters en luchtinjectiemethoden. In afbeelding 1 wordt een schematisch overzicht gegeven van de gebruikte proefopstelling. Water en lucht stromen in meestroom opwaarts door de 109 membranen (diameter 5,2 mm) van een 3"-membraanmodule. Water wordt vanuit een voorraadvat verpompt, lucht wordt onttrokken aan het luchtsysteem van het laboratorium. Met behulp van debietmeters en afsluiters kan de grootte van zowel het water- als luchtdebiet geregeld worden. In de eindkap onderaan de module wordt de water- en luchtstroom gemengd en verdeeld over de membraanmodule.

Aan de bovenzijde van de membraanmodule is geen eindkap geplaatst, maar is aan elk membraan een flexibele slang bevestigd. Elke slang heeft dezelfde lengte. Alle slangen stromen uit in een speciaal gemaakt afvoersysteem, waarbij ervoor gezorgd is dat alle slangen op dezelfde hoogte uitstromen (zie afb. 2).

Van ieder membraan wordt de waterhoeveelheid die gedurende een vaste tijdsperiode

Afb. 1: Schematische weergave testopstelling.





Afb. 2: Proefinstallatie zoals gebruikt in beschreven experimenten. Op de linker foto zijn de slangen nog niet in het afvoersysteem bevestigd, op de rechterfoto wel.

door een membraan stroomt opgevangen en de massa hiervan bepaald. Hiermee wordt de gemiddelde snelheid berekend. Door de watersnelheden van de individuele membranen met elkaar te vergelijken wordt de verdeling van het water over de membraanmodule vastgelegd.

De parameters waarop de waterverdeling gekarakteriseerd zijn, zijn de distributiefactor γ en het percentage membranen zonder waterstroming. De distributiefactor γ is een parameter die informatie geeft over de uniformiteit van de stroming⁴). De hoeveelheid lucht die door de membranen stroomt was niet meetbaar, maar wel kon visueel waargenomen worden of er lucht stroomde. Verschillende proeven zijn met deze installatie uitgevoerd, waarbij gevarieerd is met het waterdebiet, luchtdebiet, wijze van luchtinjectie en combinaties van reinigingsmethoden. In tabellen 1

en 2 worden de resultaten van verschillende experimenten gegeven. In exp. 1 en 2 is de waterverdeling bij forward flush bekeken. In exp. 3, 4 en 5 is de grootte van het luchtdebiet gevarieerd. Verschillende manieren van luchtinjectie zijn onderzocht in exp. 6 en 7 en combinaties van reinigingsmethoden in exp. 8 en 9. Voor de water- en luchtsnelheden waarmee de experimenten zijn uitgevoerd, zijn standaard (tenzij anders vermeld) snelheden aangehouden overeenkomend met snelheden zoals in praktijk gebruikt. Voor de watersnelheid betekent dit 0.21 m/s (waterdebiet van 1.78 m³/h). Voor de luchtsnelheid 0.4 m/s (luchtdebiet van 3.49 m³/h). Daarnaast is lucht standaard geïnjecteerd in een conische eindkap door middel van puntinjectie (afb. 3 links). Naast berekening van de karakteristieke waterverdelingsgegevens worden de resultaten van de experimenten ook grafisch weergegeven. Zo worden in afb. 4 de

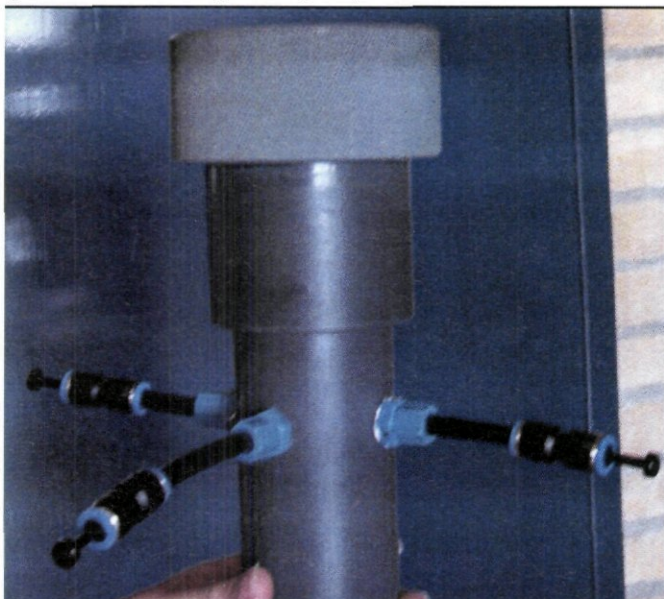
resultaten van experiment 5 grafisch getoond. De cirkel is de buitenomtrek van een membraanmodule. Binnenin de cirkel zijn 109 vierkanten aanwezig die ieder één enkel membraan voorstellen. Aan de hand van de kleur van een vierkant wordt de stroomsnelheid van het water bepaald.

Resultaten proeven

Waterverdeling bij forward flush

Als eerste is de waterverdeling bepaald wanneer de membraanmodule alleen met water doorstroomd wordt (forward flush). In tabel 1 zijn enige resultaten van uitgevoerde experimenten weergegeven waarbij gebruik is gemaakt van een conische eindkap en een eindkap met spuit. Resultaat van de experimenten is dat de waterverdeling goed is; de distributiefactor γ is hoog en alle membranen worden doorstroomd met water.

Afb. 3: Conische eindkap en eindkap met spuit



Exp	Q _{water} (m ³ /u)	u _{water} (m/s)	Eindkap	Distributie factor γ(-)	Percentage membranen zonder water(%)
1	1.78	0.21	Conische	0.963	0
2	1.78	0.21	Spruit	0.939	0

Tabel 1 - Waterverdeling bij forward flush uitgedrukt in diverse maatgevende parameters

Waterverdeling bij AirFlush

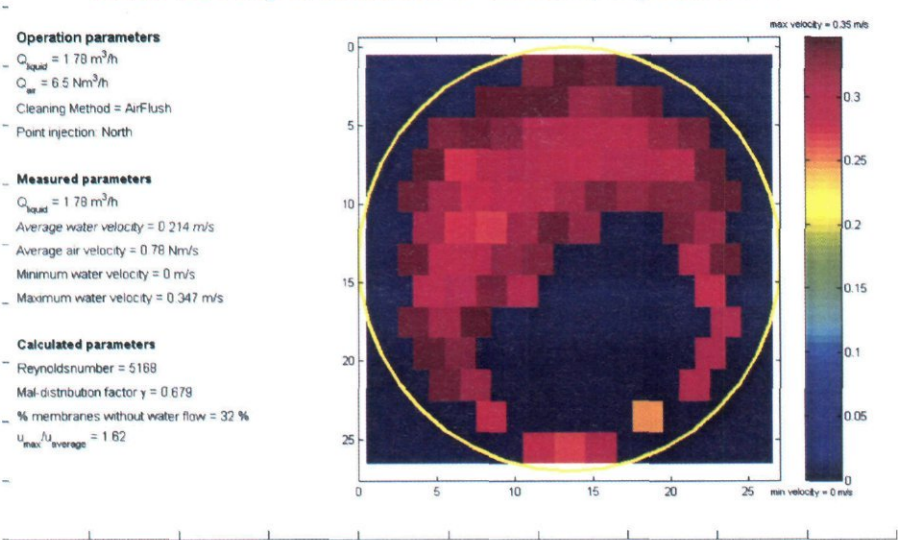
Uit de verschillende experimenten blijkt dat de verdeling van water over de membraanmodule op experiment 9 na niet gelijkmatig is. Sommige membranen worden met water en lucht doorstroomt, andere membranen worden in het geheel niet doorstroomd met water. Ook stroomde door deze membranen geen lucht. Dit is gecontroleerd door de flexibele slang in een bekglas met water onder te dompelen. Indien er lucht door de membraan stroomt zouden luchtbelln waarneembaar zijn, hoe klein de gasstroom ook is.

In experimenten 3, 4 en 5 is de grootte van het luchtdebiet gevarieerd. Het blijkt dat een verhoging van het luchtdebiet een lichte verbetering geeft van de waterverdeling. In experimenten 4, 6 en 7 is de manier van luchtinjectie gevarieerd. Geen van de luchtinjectie methoden geeft een gelijkmatige waterverdeling. Zelfs niet wanneer lucht op meerdere plaatsen onderin de eindkap geïnjecteerd wordt.

In experiment 8 is een gecombineerde Air-Flush en backflush, overeenkomend met praktijkwaarden, uitgevoerd. Deze gecombineerde reinigingsmethode resulteert niet een betere waterverdeling. De gedachte achter deze combinatie van reinigingsmethoden is dat door de back flush een geforceerde opwaartse stroming in de membranen plaatsvindt. Door deze geforceerde stroming wordt ingebrachte lucht meegezogen en vindt een meer gelijkmatige verdeling van water over de membraanmodule

plaats. Echter ook bij dit experiment blijkt de waterverdeling niet goed te zijn. In experiment 9 is de AirFlush met een forward flush gecombineerd. Deze combinatie van reinigingsmetho-

Water velocity distribution 3"-module, experiment 5



Afb. 4: Grafische weergave van de waterverdeling bij injectie met lucht met conische eindcap, waterdebiet = 1.78 m³/h, luchtdebiet = 3.48 Nm³/h.

den wordt uitgevoerd door het frequent openen en sluiten van een klep in de toevoerleiding van de lucht. Als de klep openstaat dan wordt een AirFlush uitgevoerd, is de klep dicht dan vindt een forward flush plaats. In de uitgevoerde experimenten is een sluitingstijd van de klep van telkens 5 seconden aangehouden. Het blijkt dat bij deze manier van bedrijfsvoering alle membranen met water doorstroomd worden en

dat de distributiefactor hoog is.

Discussie

Een gelijkmatige verdeling van lucht en water over de membraanmodule is belangrijk om dezelfde reiniging in ieder membraan te bereiken. Uit de diverse experimenten blijkt dat een gelijkmatige verdeling van water over de module niet altijd bereikt wordt. De reden voor deze ongelijkmatige verdeling wordt duidelijk wanneer de hydraulische theorie van twee-fasen stroming bekeken wordt. Deze theorie is verder uitgewerkt in het kader op de volgende pagina.

Het eerste gedeelte van de vergelijking voor de drukval van een twee fase mengsel is het hydrostatische drukverschil, het tweede gedeelte het drukverlies als gevolg van wrijving. Met deze vergelijking kan het drukverschil in een enkele buis berekend worden. In tabel 3 is dit drukverschil berekend voor verschillende water- en luchtsnelheden. Duidelijk is dat wanneer de watersnelheid toeneemt het benodigde drukverschil toeneemt. Bij een hogere luchtsnelheid neemt het benodigd drukverschil echter af.

De belangrijkste verschillen tussen een enkel membranen en membranen in een membraanmodule zijn de in- en uittredecondities. In een module worden alle membranen aangestroomd door dezelfde conische eindkap. In deze eindkap zijn geen drukverschillen mogelijk, zodat alle membranen dezelfde druk ondervinden. Zelfs wanneer de water en lucht snelheden tussen de verschillende membranen verschillen.

Wanneer lucht aan het water wordt toegevoegd, zal de totale drukval afnemen door de lagere dichtheid van het lucht-water mengsel.

Tabel 2: Waterverdeling bij AirFlush uitgedrukt in diverse maatgevende parameters

Exp	u _{water} average (m/s)	u _{gas} average (m/s)	Eindkap/ Luchtinjectie	Distributie factor (-)	Percentage membranen zonder water (%)
3	0.21	0.18	Conisch/Puntinjectie	0.541	46
4	0.21	0.40	Conisch/Puntinjectie	0.624	38
5	0.21	0.78	Conisch/Puntinjectie	0.679	32
6	0.21	0.40	Geperforeerde buis	0.500	50
7	0.21	0.40	Spruit/Luchtinjectie in voeding	0.551	39
8	0.21	0.40	Conisch/Puntinjectie	0.630	37
9	0.21	0.40	Conisch/Puntinjectie	0.941	0

Theorie twee fasen stroming⁵⁾

De drukval van een twee fase mengsel in een enkele buis wordt gegeven door

$$-\frac{dP}{dL} = \epsilon_{liq} \cdot \rho_{liq} \cdot g + \frac{2}{d} \cdot f_{liq} \cdot \epsilon_{liq} \cdot \rho_{liq} \cdot u_{mixture}^2$$

$$\epsilon_{liq} = \text{liquid hold-up [-]} = \frac{u_{LS}}{u_{LS} + u_{GS}}$$

- f_{liq} = wrijvingsfactor [-]
- d = buisdiameter [m]
- ρ_{liq} = dichtheid van water [kg/m³]
- $u_{mixture}$ = snelheid van twee fase mengsel [m/s]
- u_{LS} = superficiële watersnelheid [m/s]
- u_{GS} = superficiële gassnelheid [m/s]

De frictiefactor f_{liq} is voor laminare stroming gelijk aan

$$f_{liq} = \frac{16}{Re_{mixture}}$$

en voor turbulente stroming gelijk aan

$$f_{liq} = \frac{16}{\left(\log\left(\frac{Re_{mixture}}{7}\right)\right)^2}$$

Het Reynoldsgetal voor het twee fase mengsel wordt als volgt berekend:

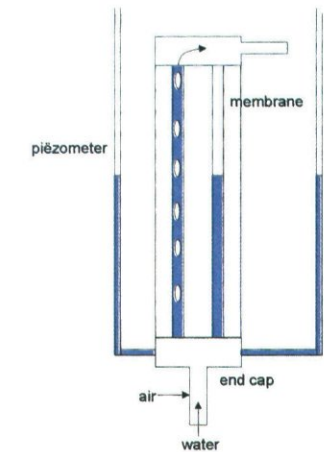
$$Re_{mixture} = \frac{\rho_{liq} \cdot u_{mixture} \cdot d}{\eta_{liq}}$$

$$\eta_{liq} = \text{viscositeit van water [Paxs]}$$

slechter verdeelde distributie (AirFlush). Wanneer de luchttoevoer wordt gesloten, verdeelt het water zich namelijk direct gelijkmatig over de module. Lucht stroomt namelijk met het water uit de membranen waardoor de drukval gelijk wordt en alle membranen met water doorstroomd worden.

Conclusies

Een gelijkmatige verdeling van water en lucht over een membraanmodule is belangrijk om gelijke reinigingscondities in elk membraan te bereiken. In deze studie is gevonden dat water gelijkmatig verdeeld wordt over een membraanmodule wanneer een forward flush wordt uitgevoerd. Wanneer een AirFlush wordt uitgevoerd, worden sommige membranen doorstroomd met water en lucht, terwijl andere membranen een stagnant waterniveau hebben.



Afb. 5: Schematische representatie van stromende en stagnante membranen in een membraan module.

ben. Het principe van stromende en stagnante membranen kan verklaard worden met behulp van de theorie van twee fasen stroming. Een praktische oplossing om een gelijkmatige verdeling van lucht en water te verkrijgen is het intermitterend toedienen van lucht (combinatie van AirFlush? en forward flush).

LITERATUUR

1) Van der Meer, W.; Termeulen, R.; de Moel, P.; van Dalssen, H.; (1999) Luchtspoeling bij ultrafiltratie, H₂O nr. 4, pag 20 - 22
2) Worm, I.; Verberk, J.; van Dijk, J.; Futselaar, H.; (2000) Lucht/water spoeling bij ultrafiltratie, H₂O nr. 9, pag 23 - 25
3) Verberk J., Worm G., Futselaar H., Dijk J. van (in druk). Combined air water flush in dead-end ultrafiltration. Water Science and Technology: Water Supply
4) Heibel, A.; Spaid, M.; (1998) A new convertor concept providing improved flow distribution and space utilization; SAE 99FL-67
5) Grolman, E.; Edvinsson, R.; Stankiewicz, A.; Moulijn, J.; (1996) Hydrodynamic instabilities in gas-liquid monolithic reactors, Proceedings of ASME Heat transfer Division, volume 3, pag 171 - 178

Tabel 3 Drukverschil bij verticale opwaartse twee fase stroming in een buis met diameter 5,2 mm.

Door dit effect hebben membranen die door een ongelijkmatige luchtverdeling meer lucht ontvangen een lage drukval, membranen die weinig lucht ontvangen hebben een hoge drukval. Omdat drukverschillen in de eindkap niet kunnen bestaan, zullen de membranen die veel lucht krijgen automatisch meer water gaan transporteren dan de membranen die minder lucht krijgen. Dit zal uiteindelijk resulteren in een situatie waarbij er membranen zijn die met water en lucht doorstroomd worden en membranen die een stagnant waterniveau hebben ofwel geen transport van water en lucht. In afb. 5 is dit principe schematisch weergegeven voor een membraanmodule. De druk in de membranen kan in deze afbeelding bepaald worden aan de hand van (fictieve) piezometers. Door het lin-

ker membraan stromen water en lucht, resulterend in een lage drukval. In het rechter membraan, stromen geen water en lucht en het waterniveau is gezakt naar het niveau overeenkomend met de druk in de linker piezometer. De druk in beide membranen is hetzelfde.

Omdat water en lucht niet goed mengen zal een goede verdeling van lucht in water moeilijk bereikt worden. Met elke luchtinjectiemethode zal er een ongelijkmatige verdeling zijn van lucht resulterend in stromende en stagnante membranen (zie resultaten exp. 3 tot 8). Alleen in exp. 9 werd het water gelijkmatig over de module verdeeld. Deze gelijkmatige distributie bestaat uit twee delen: een goed verdeelde distributie (forward flush) en een

Tabel 3: Drukverschil bij verticale opwaartse twee fase stroming in een buis met een diameter van 5,2 mm.

u_{liq} (m/s)	u_{gas} (m/s)	ϵ_{liq} (-)	$P_{hydrostatisch}$ (Pa/m)	$P_{wrijving}$ (Pa/m)	P_{totaal} (Pa/m)
0.2	0	0	9810	237	10047
0.4	0	0	9810	473	10283
0.6	0	0	9810	1233	11043
0.2	0.2	0.5	4905	237	5142
0.2	0.4	0.33	3237	411	3648
0.2	0.6	0.25	2453	500	2953