



Albert Jansen, TNO Bouw en Ondergrond

Jan Willem Assink, TNO Bouw en Ondergrond

Jolanda van Medevoort, TNO Bouw en Ondergrond

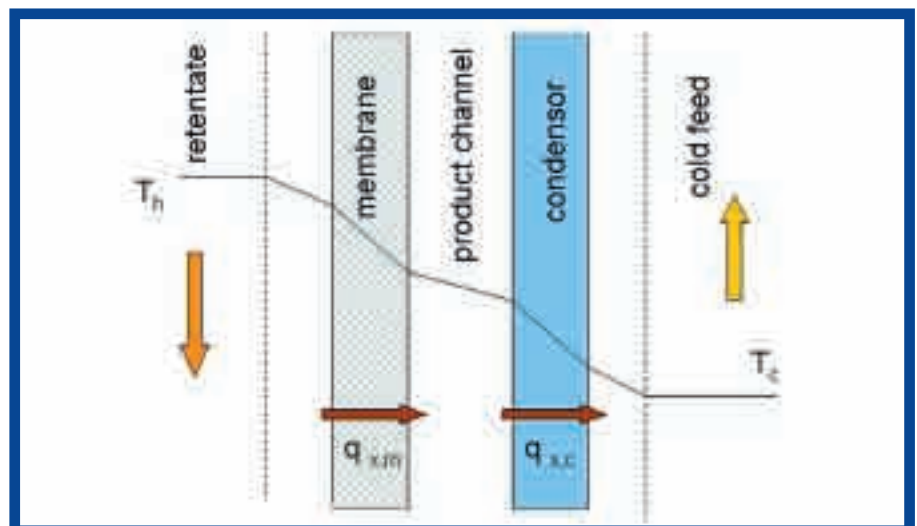
Jan Henk Hanemaaijer, i3 Innovative Technologies

# Membraandestillatie, de praktische haalbaarheid van Memstill

In de afgelopen tien jaar is uitgebreid onderzoek uitgevoerd naar membraandestillatie met bench-scale-opstellingen en praktijkproeven. Vele duizenden testuren toonden aan dat het zogeheten Memstill-concept geschikt is om een hoogwaardige kwaliteit water in één stap uit zeewater te winnen. Evaluaties voor grootschalige toepassingen duiden op een energieverbruik van 300 tot 400 MJ per kubieke meter en kosten die op de lange termijn niet meer dan 0,50 Amerikaanse dollar per geproduceerde kubieke meter water hoeven te bedragen, mits men laagwaardige restwarmte inzet. De verdere ontwikkeling van Memstill richt zich nu op andere toepassingen, zoals afvalwaterzuivering, en een nog lager energieverbruik.

Zeewater vormt een belangrijke bron voor de bereiding van drinkwater, met name in dichtbevolkte gebieden met een te geringe beschikbaarheid van regenwater, water uit rivieren of vergelijkbare bronnen. De wereldwijde dagelijkse capaciteit voor ontzouting van zeewater bedroeg in 2006 (de meest recente gegevens) 40 miljoen kubieke meter. Hoewel dit feitelijk niet meer is dan ongeveer één procent van de totale hoeveelheid geproduceerd water, wordt voor de ontzoutingsmarkt een jaarlijkse groei van circa tien procent verwacht en na 2015 zelfs meer<sup>1)</sup>.

De huidige bruikbare technieken voor de bereiding van zoet water uit zeewater of brak water zijn *multi-stage flashing* (MSF), *multi-effect destillatie* (MED) en omgekeerde osmose (RO). Bij brak water kan ook elektro-dialyse worden ingezet. Omgekeerde osmose is sinds het eind van de 20e eeuw zeer concurrerend geworden ten opzichte van andere technieken, onder meer omdat het energieverbruik sterk daalde. Tegenwoordig zijn waarden rond 3,1 kWh per kubieke meter niet ongebruikelijk. Er worden zelfs waarden onder 2 kWh gerapporteerd, dankzij de verbeterde energierugwinningsconcepten<sup>2)</sup>. Bovendien daalden de investeringskosten voor omgekeerde osmose drastisch dankzij de grote(re) omzetvolumes en de ver doorgevoerde standaardisatie. Nieuwe projecten zijn tegenwoordig meestal gebaseerd op



Afb. 1: Membraandestillatie volgens het Memstill-proces. De gestreepte lijnen geven het hydrologische grensvlak van de voedings- en retentastroom bij het condensoroppervlak en het membraan. Het membraan is gasgevuuld; het condensoroppervlak is ondoordringbaar voor gassen en vloeistof. Het temperatuurprofiel en de lokale warmtefluxen worden ter indicatie getoond. Spacers worden niet getoond.

omgekeerde osmose, tenzij de opdrachtgever veel goedkope restwarmte ter beschikking heeft voor de alternatieven MSF of MED. De kosten voor het geproduceerde water liggen in recente projecten vaak tussen 0,50 en 0,60 Amerikaanse dollar per kubieke meter.

Membraandestillatie is een lang bekend alternatief voor bovengenoemde technieken,

maar is nooit doorgebroken door tegenvalende prestaties. De relatief hoge kosten voor het membraan en het hoge energiegebruik speelden daarbij een rol. In de jaren 60 is membraandestillatie voor het eerst omschreven<sup>3)</sup>. In tegenstelling tot gangbare membraanprocessen, zoals omgekeerde osmose en ultrafiltratie, gebruikt membraandestillatie een gasgevuuld membraan.

Water verdampt aan de ene zijde van het membraan, gaat als damp door het membraan en condenseert aan de andere zijde. Een temperatuurverschil, i.e. een dampdrukverschil, vormt de drijvende kracht bij dit proces.

Belangrijke voordelen van membraandestillatie zijn de zeer korte afstand tussen verdampend en condenserend oppervlak (namelijk de dikte van het membraan), waardoor in vergelijking met MSF en MED zeer kleine modules volstaan, en de volledige segregatie van voeding en product, waardoor in principe een zeer goede zoutre- tentie kan worden bereikt. Andere voordelen zijn de afwezigheid van corrosie (door gebruik van kunststof), de beperkte totemperatuur (waardoor het proces geschikt is voor restwarmte of zonnepwarmte), de geringe drukval in het proces (geen dure druk- of vacuümcomponenten nodig), de eenvoudige voorbehandeling van het water (geen ultrafiltratie of additieven nodig om scaling of biofouling te voorkomen) en tenslotte de zeer beperkte indikking van het voedingswater (waardoor de lozing van het residu zelden een milieuprobleem is).

Hierdoor is membraandestillatie in potentie een sterke concurrent voor de huidige bestaande technieken voor ontzouting. Een Nederlands consortium van acht partijen, aangevuld met een apparatenbouwer uit België, stelde zich tot doel het membraandestillatieproces te ontwikkelen tot een commercieel aantrekkelijk alternatief. Centraal stond daarbij een aantal vernieuw-ingen in het proces, waardoor een substan- tiële kostenreductie mogelijk werd. Het Memstill-concept is in het laboratorium op bench-scale en in de praktijk met drie pilots uitvoerig getest.

In Memstill wordt gebruik gemaakt van vlakke membranen, die aan weerszijden de membraankanalen in de module omsluiten. Tussen de membraankanalen liggen condensorkanalen die door een vloeistof- en gasdicht condensormateriaal worden omsloten. Het condensoroppervlak ligt direct tegen het membraan. Het gebruikte condensormateriaal is innovatief en



Modules voor gebruik in de eerste pilot.

geleidt de warmte goed. Het voedingswater stroomt eerst door het condensorkanaal in tegenstroom met de te verdampen waterstroom in het membraankanaal. Door de condensatie van het gasvormig destillaat warmt het voedingswater geleidelijk op. Het water dat via het membraankanaal stroomt, komt uit de condensorkanalen, maar het wordt eerst enkele graden verder opgewarmd, bijvoorbeeld met restwarmte. Deze waterstroom koelt door de verdamping geleidelijk af. Het water gaat als damp door het membraan. Het destillaat vormt zich na condensatie tussen membraan en condensor en wordt zo snel en volledig mogelijk afgevoerd. Hierdoor blijft de warmteweer- stand van het gevormde waterfilmje laag. De condensatiewarmte gaat volledig naar de vloeistof achter de condensorwand. Een goede geleiding van warmte betekent dat de productiecapaciteit per m<sup>2</sup> membraanop- pervlak toeneemt, wat vanuit economisch oogpunt belangrijk is.

Als gebruikelijke temperatuurranges worden gehanteerd (een ingaande watertemperatuur van 15 tot 20°C en een toptemperatuur van 80 tot 85°C) kan via de overall warmte- balans worden berekend dat per cyclus tot maximaal twaalf procent productwater kan worden gewonnen. Door warmteverliezen ligt dit getal in praktijk echter iets lager, dicht bij tien procent.

**Theorie**

Warmte- en massatransport door het membraan zijn in membraandestillatie op zowel micro- als macroschaal volledig gekoppeld. Als water aan het membraan- oppervlak verdampt, daalt daardoor lokaal de temperatuur. Het water condenseert aan de andere zijde van het membraan, waarbij de condensatiewarmte wordt afgegeven aan de vloeistof in het condensorkanaal. Hierdoor ontwikkelt zich een temperatuurprofiel (zie afbeelding 1). De massa- en temperatuurba- lansen kunnen numeriek of analytisch worden opgelost, als alle parameters bekend zijn.

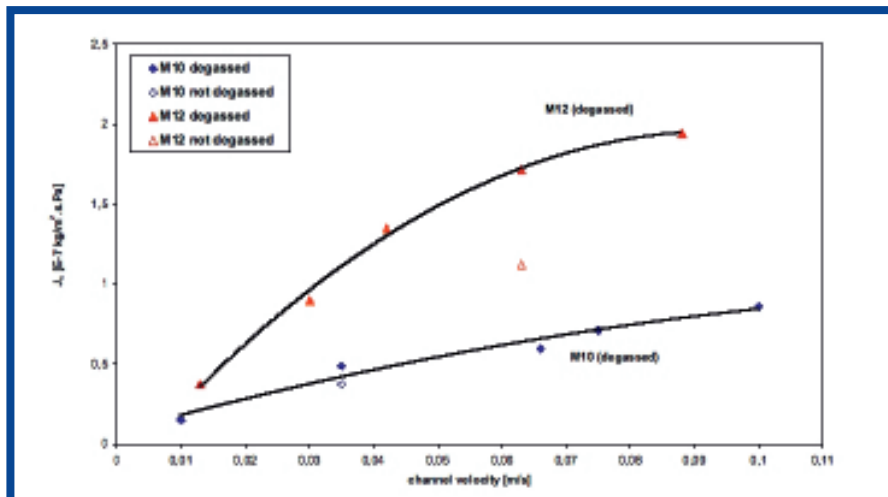
De massaoverdracht is gebaseerd op verschillen in partiële dampdruk over het membraan ( $\Delta P_m$ ):

$$J = K_m \cdot \Delta P_m \quad [1]$$

De factor  $K_m$  is gerelateerd aan specifieke membraanparameters en beschrijft het gastransport in het membraan door convectie en diffusie. Die laatste parameter bestaat hoofdzakelijk uit termen voor Knudsendiffusie en moleculaire diffusie. Het mag duidelijk zijn dat het damptransport door inerte gassen, zoals lucht, kan worden gehinderd. Ontgassen van het voedings- water kan een belangrijke prestatieverbe- tering opleveren en is daarom onderzocht.

De prestatie van membraandestillatie wordt gewoonlijk uitgedrukt als specifieke flux  $J_p$ ,

Afb. 2: Specifieke flux versus vloeistofsnelheid (membraankanaal) van de modules M10 en M12, met gebruik van verschillende spacers en een wel of niet ontgaste voeding.



die als volgt gerelateerd is aan de waterdampdruk:

$$J_s = \frac{dM}{A \cdot dt} \cdot \frac{1}{\Delta P_{in}} \quad [2]$$

A is het totale membraanoppervlak (m<sup>2</sup>), d.w.z er is geen correctie uitgevoerd voor oppervlakte dat niet bijdraagt aan het watertransport; dM/dt is de geproduceerde hoeveelheid water (kg/s) en ΔP<sub>in</sub> is het logaritmische gemiddelde van de waterdampdrukverschil over het membraan.

De warmteoverdracht bij het membraan is gebaseerd op het temperatuurverschil:

$$Q = (K_h / \delta) \Delta T_m \quad [3]$$

Hierin is K<sub>h</sub> de warmtegeleidbaarheid, die de som is van de geleidbaarheid van het gas en van het membraanmateriaal (i.e. K<sub>h</sub> = ε K<sub>g</sub> + (1-ε) K<sub>m</sub>, met ε voor de porositeit van het membraan), δ de dikte van het membraan en ΔT<sub>m</sub> het temperatuurverschil over het membraan.

Een belangrijk aspect dat hier niet onvermeld mag blijven, is de relatie tussen temperatuurpolarisatie en specifieke flux. De temperatuurpolarisatie θ is gedefinieerd als de verhouding tussen het temperatuurverschil over sec het membraan en het temperatuurverschil tussen de twee vloeistofstromen:

$$\theta = \frac{T_{hm} - T_{pm}}{T_h - T_p} \quad [4]$$

Hierin is T<sub>h</sub> de temperatuur van de relatief hete stroom (i.e. het retentaat) en T<sub>p</sub> de temperatuur van het koude stroom (waarvoor in Memstill het condensorkanaal met het voedingswater dient te worden genomen, omdat de destillaatfilm te verwaarlozen is). Schofield<sup>(4)</sup> heeft aangegeven dat θ in goed ontworpen systemen tussen 0,4 en 0,7 ligt. Lage waarden moeten worden vermeden, wat immers zou betekenen dat de specifieke flux lager is dan wat mogelijk is. Lage waarden kunnen worden vermeden door een hogere vloeistofsnelheid in de kanalen te gebruiken of door spacers in te zetten die de warmteoverdracht in het vloeistofkanaal bevorderen. Er is echter een limiet aan de vloeistofsnelheid, omdat een hogere snelheid ook tot een steeds sneller oplopende drukval in de module leidt. Een groter temperatuurverschil tussen de voedingsstroom en het retentaat zal in een grotere waterflux resulteren, zodat met een kleiner membraanoppervlak kan worden volstaan. Een groter temperatuurverschil betekent echter ook dat meer warmte aan de waterstroom moet worden toegevoegd. Daarom zijn de modulegrootte en het energiegebruik parameters waarop, bij een gegeven moduleconcept en binnen gegeven randvoorwaarden, kan worden geoptimaliseerd.

Ten slotte wordt opgemerkt dat de flux exponentieel toeneemt met de temperatuur, maar dat daarbij ook de temperatuurpolarisatie toeneemt (i.e. een afnemende θ) waardoor de specifieke flux juist afneemt. Een lage specifieke flux hoeft dus niet te betekenen dat de absolute flux laag is.

Er zijn in de membraanmodule, met name bij het Memstill-concept, verschillende punten waarop geoptimaliseerd kan worden: het type membraan (materiaal, dikte, porositeit, poriegrootte), type condensormateriaal (dikte, warmtegeleiding), het type spacer (ondersteunt de warmte- en stofoverdracht), de hydraulische diameter van de kanalen (bepaalt de drukval en warmteoverdracht) en de dikte van de destillaatwaterlaag. Memstill is gebaseerd op commercieel beschikbare membranen, zodat hiervoor geen speciale ontwikkelkosten benodigd zijn.

Het proces kan als een serie warmteweerstand worden opgevat, waarbij het liefst geen van die weerstanden erg groot of dominant is. De warmte stroomt van de warme stroom, via het membraan (waar het water als damp doorheen gaat) naar de koude waterstroom. De optimalisatie van membraandestillatie moet gericht zijn op maximale overdracht van warmte in de vloeistofkanalen, een minimale weerstand tegen dampoverdracht in het membraan en tegelijkertijd een minimaal verlies van voelbare warmte via het membraan.

De prestaties van het proces zijn afhankelijk van de totale configuratie van de module. Omdat de laag met destillaat tussen de warme en koude waterstroom in ligt, moet deze laag zo dun mogelijk moet blijven om de warmteweerstand van het destillaat te minimaliseren. In de praktijk wordt dit bereikt door de juiste drukken in de verschillende kanalen te handhaven. In het Memstill-proces wordt een soort 'melkeffect' bereikt: het destillaat stroomt elke twee tot vijf seconden in kleine hoeveelheden uit de membraanmodule, waardoor de dikte van de laag virtueel nul is.

Het membraan moet voor een volledige ontzouting alle zouten tegenhouden (retentie = 100 procent). Dit houdt in dat het membraan homogeen moet zijn (dus geen grote poriën of lekjes mag bevatten) en niet snel door oppervlakteactieve stoffen bevochtigd mag worden. Door daarnaast het drukverschil over het membraan klein te houden, bij voorkeur minder dan 1 bar, wordt voorkomen dat het membraan snel doorslag van zouten gaat vertonen. Drioli *et al*<sup>(5)</sup> heet

aangetoond dat een nominale poriegrootte van 0,2 μm of kleiner nodig is om volledige retentie te verkrijgen. Dit is te verklaren met de LaPlace-vergelijking:

$$\Delta P = \frac{4\gamma}{d} \cos \varphi \quad [5]$$

De rejectie van zouten wordt nadelig beïnvloed door een hoog drukverschil over het membraan (ΔP), een grote poriediameter (d) en een lage oppervlaktetension van de vloeistof (γ). De cosinus van de bevochtigingshoek (cos φ) moet bij voorkeur sterk negatief zijn. Eerder geteste membranen hebben een nominale poriediameter tussen 0,1 en 1 μm<sup>(6/7)</sup>.

Het aantal poriën in het membraan boven de berekende Laplace-diameter is ook van belang. Deze pinholes worden immers relatief eenvoudig bevochtigd en hebben een negatief effect op de kwaliteit van het destillaat.

De energie-efficiëntie is van groot belang voor de economische haalbaarheid van het proces. Deze is gedefinieerd als de verhouding tussen warmteoverdracht via waterdamptransport (latente warmte Q<sub>i</sub>) en de totale warmteoverdracht (latente warmte Q<sub>i</sub> plus warmteoverdracht via geleiding Q<sub>c</sub>; warmtegeleiding via convectie kan worden verwaarloosd). De energie-efficiëntie η moet zo dicht mogelijk bij 100 procent liggen.

$$\eta = \frac{Q_i}{Q_i + Q_c} \quad [6]$$

Een lage waarde voor η resulteert in een hoog energiegebruik per kubieke meter destillaat en zal daardoor de economische haalbaarheid van het proces onder druk zetten. Hoge waarden voor η kunnen alleen worden bereikt als het membraan de warmte slecht geleidt, zoals al eerder is opgemerkt.

## Resultaten

Tot eind 2008 zijn drie pilots uitgevoerd. Bij de eerste pilot is verontreinigd zeewater uit de straat van Johor (Singapore) behandeld. Bij de tweede pilot is brak zeewater bij de energiecentrale van E.on op de Maasvlakte behandeld. En bij de laatste pilot is brak havenwater gebruikt bij AVR in Rotterdam. Deze locatie wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van silt en verontreinigingen,

Tabel 1: Waterkwaliteit tweede proef (monstername 1 september 2006), capaciteit één kubieke meter per uur.

	voeding	destillaat
Na (mg/l)	7.900	0.110
Cl (mg/l)	13.900	0.130
SO <sub>4</sub> (mg/l)	1.280	< 0.020
Ca (mg/l)	300	0.039
Mg (mg/l)	960	0.017
HCO <sub>3</sub> (mg/l)	150	3.5
Silica (mg/l)		0.275
zwevende stof (mg/l)	9.2	< 1.0
pH	8.03	6.63
geleidbaarheid (μS/cm)	34.500	0.75

Tabel 2: Effect van ontgassing op specifieke flux.

modulespecifieke flux  $J_s$ , ( $\cdot 10^{-7}$  kg/(m<sup>2</sup>.s.Pa))  $T_{gem}$  effect van ontgassing op specifieke flux

	niet ontgast	ontgast		
M10	0.373	0.485	40 C	+ 30%
M12	1.12	1.72	40 C	+ 54%
M19	0.70	1.05	55 C	+ 50%
M21	0.74	0.70	55 C	- 5%
M22 (1e test)	0.98	0.99	55 C	+ 1%
M22	0.55	0.60	70 C	+ 9%
M22 (2e test)	0.94	0.98	55 C	+ 4%
M28	0.71	1.94	40 C	+173%
M28	0.50	0.85	70 C	+ 70%
M30	0.92	1.00	55 C	+ 9%
M31	1.60	3.10	40 C	+ 94%

\*) gemiddelde temperatuur in vloeistofkanaal (membraanzijde).

waaronder mogelijk oppervlakteactieve stoffen. Het water voor deze pilot werd alleen op 80 µm gefilterd, terwijl de andere pilots een uitgebreidere voorbehandeling gebruikten (fijn filtratie en bij de eerste pilot ook kooladsorptie).

Bij de tweede pilot zijn het influent en destillaat op een aantal parameters geanalyseerd. De belangrijkste resultaten zijn in tabel 1 opgenomen. Hieruit blijkt dat de pilot een uitstekende reductie van zouten heeft. De geleidbaarheid neemt af met een factor 46.000, terwijl de concentraties natrium en chloride met tenminste een factor 70.000 afnemen. De resterende geleidbaarheid (0,75 µS/cm) is voor een belangrijk deel toe te schrijven aan opgelost kooldioxide (als bicarbonaat aanwezig). De zoutreductie van Memstill is aanzienlijk beter dan van bestaande grootschalige ontzoutingstechnieken, zoals omgekeerde osmose en MSF. Het destillaat voldoet aan de internationale eisen voor gedestilleerd water. Met deze pilot is tevens bewezen dat het membraan, ook na alle bouw- en andere handlingstappen, hoegenaamd geen microlekjes vertoont. Ook de inwendige waterdichtheid van de module langs de afdichtnaden is hiermee aangetoond.

De drie proeven zijn gebaseerd op uitkomsten van het onderzoek met bench-scale-modules in het laboratorium. Deze modules hebben dezelfde lengte- en hoogteafmetingen als de derde pilot, maar veel minder membraankanalen. Als model voor zeewater is in het laboratorium gewerkt met een 0,60 M NaCl-oplossing in leidingwater. Doel van het onderzoek was om een optimale configuratie te vinden voor de membranen, spacers en condensormaterialen. Ook bleek veel onderzoektijd nodig om een bruikbare constructiewijze te vinden waarmee een langdurige, inwendige en uitwendige waterdichtheid van de modules kon worden bereikt. Het onderzoek richtte zich, naast het vinden van de optimale moduleconfiguratie, op het verzamelen van gegevens over de effecten

van de temperatuur, de stroomsnelheid, optredende drukval over de module en het effect van voorafgaande ontgassing van de voeding op de (specifieke) flux. In tabel 2 zijn enkele resultaten als voorbeeld opgenomen. De modules zijn vanaf M1 genummerd.

De ontgassing van het voedingswater is uitgevoerd met een separate membraanmodule waarin een absolute druk van 0,15 bar werd gehandhaafd. Het effect blijkt variabel te zijn en is eenmaal zelfs negatief, maar in de meeste gevallen is een duidelijk positief effect te ontdekken. Het effect is het grootst bij relatief lage temperaturen. Dit is conform de verwachting, omdat het effect van ontgassing op de relatieve dampspanning van water dan het grootst is. Het effect is duidelijk te zien bij module M28.

In totaal zijn er meer dan 30 modules gebouwd en getest in duurtesten. Module M32 bleek de beste prestatie te leveren: er werd een specifieke flux tussen 2,7 en 3,8  $10^{-7}$  kg/(m<sup>2</sup>.s.Pa) gemeten bij een kanaalsnelheid tussen 0,05 en 0,075 m/s. De drukval in beide vloeistofkanalen was daarbij nog steeds acceptabel, in totaal tussen 0,3 en 0,5 bar, en temperaturen lagen in deze testen dicht bij wat in commerciële installaties nodig is. De flux in deze module komt overeen met een latente warmtetransport tussen 3,3 en 4,6 kJ/(m<sup>2</sup>.s). Andere modules, zoals M28, M31 en M33, vertoonden een specifieke flux die circa 40 procent lager is dan die van M32; de prestaties daarvan komen overeen met die van eerder onderzoek, waarbij geen Memstill werd gebruikt (zie bijvoorbeeld Alkilaibi<sup>7)</sup> en Guijt<sup>8)</sup>). Dit betekent dat de overall prestatie van Memstill, ondanks de extra warmteweerstand van het destillaatwaterkanaal en de condensorlaag, op zijn minst gelijkwaardig is aan eerder onderzochte concepten. De relatief gunstige prestatie is mogelijk door het gebruik van geoptimaliseerde spacers, het gebruik van een verbeterd soort condensormateriaal (met lage warmteweerstand) en het 'melkeffect', waardoor een zeer dunne destillaatlaag in stand wordt gehouden.

De energie-efficiëntie varieerde bij de meeste testen en de twee eerste proeven tussen 50 en 75 procent, afhankelijk van de temperaturen en andere procescondities. In enkele testen werden echter dikkere membranen gebruikt (anderhalf maal de gebruikelijke dikte), waardoor een betere energieprestatie werd gevonden. In de derde pilot werd het dikkere membraan toegepast en een energie-efficiëntie gevonden tussen 70 en 90 procent (zie tabel 3).

De benodigde warmtetoevoer in de derde proef bedroeg gemiddeld 520 MJ per kubieke meter geproduceerd water. In de testen was tussen 850 en 2.400 MJ per kubieke meter water nodig. De lage warmtetoevoer kan worden verklaard door het dikkere membraan, dat de interne warmteverliezen minimaliseert, en het veel kleinere temperatuurverschil tussen membraan- en toevoerkanaal in de proef. Ongewenste warmteverliezen naar de omgeving zijn in een grotere installatie ook relatief minder groot.

Het blijkt moeilijk om eenduidige conclusies te trekken over de prestaties van de drie pilots. Een grote dataset is verloren gegaan als gevolg van een ongeautoriseerde reset van een datalogger. Andere resultaten bleken slecht onderling te vergelijken door de steeds wisselende en vaak ongewilde veranderingen in procescondities. Een belangrijke terugval in specifieke flux is niet geconstateerd in de eerste en laatste pilot. In de tweede pilot werd wel een sterke terugval gevonden gedurende de vier testmaanden. Mogelijk dat dit te wijten is aan de uitval van de de-aeratie-installatie, die daarna werd *gebypassed*, maar geheel zeker is dit niet. In de vier maanden van de laatste pilot werd een min of meer stabiele waarde voor de specifieke flux gevonden, hoewel opgemerkt moet worden dat de waarde de eerste paar dagen hoger leek te zijn. De specifieke flux varieerde tussen 1,1 en 1,44  $10^{-7}$  kg/(m<sup>2</sup>.s.Pa) bij relatief lage kanaalsnelheden (tussen 0,011 en 0,022 m/s).

Gedurende de proeven is geen probleem ontstaan met biofouling of scaling. Verder zij opgemerkt dat bij de derde proef meer dan 30 maal opnieuw opgestart moest worden. Dit had tot gevolg dat slib kon uitzakken en de membraanmodule vervuilde. Door de beperkte voorbehandeling nam de drukval over de module met de tijd toe, waardoor een relatief lage stroomsnelheid moest worden gebruikt.

Tijdens de laatste proef traden tevens meerdere lekkages op, hetgeen werd veroorzaakt door een nieuwe, geautomatiseerde constructiemethode, waar op dat moment nog nauwelijks ervaring mee was. De lekkages konden echter eenvoudig worden verholpen door een externe reparatie van de betreffende kanalen.

## Evaluatie

Bij relatief dikke membranen is een energie-efficiëntie tussen 70 en 90 procent gevonden. Bij een relatief dun membraan, met een hogere lekkage van voelbare warmte, zijn de

resultaten minder gunstig. Op basis van de experimenten is berekend dat voor de grootschalige productie van water een warmte-invoer van 300 tot 400 MJ per kubieke meter destillaat benodigd is. Dit is vergelijkbaar met grootschalige MSF- en MED-technieken (200-400 MJ/m<sup>3</sup>). In een recente evaluatie bij TNO is echter aangetoond dat de energie-behoefte nog sterk kan dalen, waarbij theoretisch waarden van 36 MJ per kubieke meter mogelijk zijn. Dit is gebaseerd op de maximale energie-efficiëntie en een laag energieverlies via het effluent (opwarming van 1 K). Praktisch gezien zijn echter waarden onder 300 MJ per kubieke meter, vermoedelijk zelfs onder 100 MJ per kubieke meter, haalbaar. Dit is belangrijk in toepassingen waarbij de benodigde warmte voor het proces opgewekt moet worden en zal onderwerp zijn van toekomstige studies.

Een relatief hoge energieprestatie wordt gevonden bij relatief hoge temperatuur aan de warme zijde van de module. De flux neemt immers sterk toe met deze 'toptemperatuur', terwijl het verlies aan voelbare warmte ongeveer constant blijft. Een belangrijk voordeel van restwarmte-gebruik is dat geen additionele brandstof nodig is, zodat het ontzoutingsproces géén extra bijdrage levert aan klimaatverandering via de uitstoot van kooldioxide. We richten ons in toekomstig onderzoek op verbeterde energie-efficiëntie maar ook op nieuwe applicaties, zoals afvalwaterbehandeling en een variant waarbij volledige indikking en kristallisatie van zouten wordt verkregen, en op hogere werktemperaturen (via nieuwe materialen).

Membraandestillatie heeft goede toekomstperspectieven, ondanks een aantal mogelijke nadelen:

- een relatief hoog energiegebruik bij de huidige stand van ontwikkeling (hoewel de energiebron, i.e. restwarmte, een laagwaardige kwaliteit heeft);
- de gevoeligheid voor oppervlakte-actieve stoffen, die tot bevochtiging van het membraan en doorslag kunnen leiden;
- en een mogelijk benodigde nabehandeling om vluchtige stoffen uit het destillaat te verwijderen (indien aanwezig).

Het proces heeft geen dure hardware nodig. De kostbaarste onderdelen zijn de membraanmodules en de infrastructuur om het proces te verbinden met de waterbron en restwarmtebron. Het proces kan kleinschalig worden ingezet en kan op een schaal van 100 kubieke meter per dag of zelf nog minder, economisch concurrerend zijn. Het kan bijvoorbeeld worden gebruikt om in een enkele stap een hoogwaardige kwaliteit demiwater te maken uit brak water of zeewater.

Het onderzoek heeft een configuratie opgeleverd die de resultaten uit eerder onderzoek naar membraandestillatie overtreft, zowel qua bereikte flux als qua schaal van de modules. De pilots gebruikten modules met maximaal 300 m<sup>2</sup> aan membraanoppervlak, waarbij aangetoond is dat problemen met interne of externe

Tabel 3: Energie-efficiëntie van enkele praktijkmodules en de derde pilot, bij lage vloeistofsnelheden in de kanalen.

module	membraan-dikte	kanaal-snelheid (m/s)	T <sub>top</sub> (C)	flux (g.m <sup>-2</sup> .s) energie-efficiëntie (%)	specifieke flux J <sub>s</sub> (*10 <sup>-7</sup> kg.m <sup>-2</sup> .s.Pa)
M28	100%	0,035	74,3	69,5	0,98
M31	100%	0,027	51,2	67,8	0,68
M32	100%	0,034	77,0	70,8	1,05
	100%	0,023	69,0	55,9	0,54
3e pilot	150%	0,022	77,9	89,4	0,78

lekkages konden worden voorkomen, dan wel worden opgelost.

De modules zijn nagenoeg volledig gebaseerd op kunststoffen. Economische evaluaties toonden aan dat de kosten voor deze modules beperkt kunnen blijven, vooral bij grootschalige productie van de modules. De investeringskosten zijn geschat op 165 euro per kubieke meter per dag aan productiecapaciteit, waarbij tevens een filtering op 40 µm en ontgassing als voorbehandeling zijn meegenomen<sup>9)</sup>.

Twee licentiehouders, Aquastill en Keppel Seghers, hebben in de afgelopen maanden meer praktijkervaring opgedaan met industriële pilots en veel aandacht gegeven aan het productieproces voor de modules, waarbij een constante kwaliteit en lagere kosten de primaire doelen waren. De licentiehouders zien de industriële markt en de (mariene) scheepvaart als belangrijke markten om de technologie te introduceren. De kosten van deze kleine installaties zullen aanzienlijk hoger zijn dan die van grootschalige installaties. Verwacht wordt dat op termijn het grootste omzetvolume wordt bereikt op de markt voor grootschalige ontzouting. Memstill zou in 2030 mogelijk tien procent van deze markt kunnen bedienen, i.e. een markt voor 7,5 miljoen kubieke meter per dag kunnen zijn.

### Conclusies

De hoge selectiviteit van membraandestillatie is bewezen in de pilottesten. De retentie van zout met commercieel verkrijgbare membranen lag boven een factor 10.000, waardoor een hoogwaardige kwaliteit destillaat werd verkregen. De configuratie is, deels via trial-and-erroronderzoek met bench-scale optellingen, dicht bij een optimaal punt uitgekomen. Er is een zeer goed flux gevonden in combinatie met een lage drukval over de module en een laag inwendig energieverlies.

Het effect van ontgassing is onderzocht en lijkt een positieve invloed te hebben op de flux, hoewel deze conclusie vooral voor relatief lage temperaturen lijkt te gelden. Bij hogere temperaturen is geen eenduidige conclusie te trekken.

Lage productiekosten voor ontzout water lijken mogelijk, omdat gebruikt wordt gemaakt van een eenvoudig productieproces en kunststoffen. Door de kunststoffen zijn geen corrosieproblemen met warm zeewater mogelijk. De belofte van lage waterkosten is aangetoond in meerdere economische

evaluaties. De kosten voor grootschalige installaties liggen typisch onder of rond 0.50 euro per kubieke meter. Voorwaarden hierbij zijn een voldoende hoge toptemperatuur in het proces (> 350 K) en het gebruik van goedkope afvalwarmte danwel warmte uit een speciaal te bouwen co-generatie-eenheid voor water en elektriciteit. Verder moet van een eenvoudige watervoorbehandeling (bijvoorbeeld zeven op circa 40 µm) gebruik worden gemaakt.

De ontwikkeling van Memstill is mogelijk gemaakt door het E.E.T. programma, dat gericht is op de ontwikkeling van doorbraaktechnologieën met betrekking tot zowel ecologische als economische doelen. Bij de ontwikkeling waren betrokken: TNO, Keppel Seghers, Hamers Engineering, E.on Benelux, Evides, Heineken International, Waternet, Universiteit Twente en Ecological Management Foundation.

### LITERATUUR

- 1) Media Analytics Limited (2006). [www.the-infoshop.com/report/gwi47246-desalination](http://www.the-infoshop.com/report/gwi47246-desalination).
- 2) Fritzmann C., J. Löwenberg, T. Wintgens en T. Melin (2007). State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination* nr. 216, pag. 1-76.
- 3) Findley M. (1967). Vaporization through membranes. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* nr 2, pag. 226.
- 4) Schofield R., A. Fell en C. Fell (1987). Heat and mass transfer in membrane distillation. *Desalination* nr. 64, pag. 231-243.
- 5) Drioli E., V. Calabrò en Y. Wu (1986) Microporous membranes in membranes distillation. *Pure & appl. Chem* nr. 12, pag. 1657.
- 6) Lawson K. en D. Lloyd (1997). Membrane distillation (review). *J. Membr. Sci.* nr. 124, pag. 1-25.
- 7) Alklaibi A. en N. Lior (2004). Membrane-distillation desalination: status and potential. *Desalination* nr. 171, pag. 111-131.
- 8) Guyt C. (2002). Influence of membrane and air gap on the performance of a membrane distillation module. Thesis Universiteit Twente.
- 9) Hanemaaijer J., J. van Medevoort, A. Jansen, C. Dotremont, E. van Sonsbeek, T. Yuan en L. De Ryck (2006). Memstill membrane distillation - a future desalination technology. *Desalination* nr. 199, pag. 175-176.