

Het omgekeerde osmoseproces, van ontzouting naar zuivering

Inleiding

Het omgekeerde osmoseproces is ontwikkeld als een ontzoutingsproces voor brak water. Het is in feite een filtratieproces waarbij water onder druk door een geschikt membraan wordt geperst. Dit membraan laat het opgeloste zout niet of bijna niet door. Maar ook andere stoffen worden door het membraan tegengehouden zoals hardheidsbepalende zouten, zware metalen, radioactieve isotopen, organische stoffen, waaronder bestrijdingsmiddelen en humuszuren, bacteriën en virussen. Dit houdt de mogelijkheid in om het proces niet alleen als ontzoutingstechniek maar ook als een zuiveringsmethode te gebruiken. Toegepast op het Nederlandse oppervlaktewater zou dit proces drinkwater kunnen leveren van zeer hoge kwaliteit. Bij gebruik van al of niet voorgezuiverd oppervlaktewater is echter gebleken dat vooral de organische stoffen in het water de membranen vervuilen en verstopen. Wil men derhalve het omgekeerde osmoseproces als filtratie bij de waterzuivering gebruiken, dan is het van essentieel belang dat er methoden worden ontwikkeld om de vervuilde membranen te reinigen of om de vervuiling van de membranen te voorkomen. In het kader van de werkzaamheden van de Werkgroep Omgekeerde Osmose van het KIWA wordt de vervuiling van de membranen en de reiniging daarvan uitvoerig onderzocht met behulp van een aantal proefinstallaties. In deze installaties wordt Rijnwater in verschillende stadia van voorzuivering als voeding gebruikt. Gezien de voorlopige resultaten van dit onderzoek lijkt het enerzijds niet mogelijk om de vervuiling van de membranen door een geschikte voorzuivering voldoende te voorkomen, anderzijds lijkt het niet uitgesloten dat er voor de praktijk bruikbare methoden kunnen worden ontwikkeld om de vervuilde membranen te reinigen. Daartoe zullen de zuiveringsmethoden die met behulp van de proefinstallaties zijn onderzocht en die goede resultaten opleverden moeten worden verfijnd en geoptimaliseerd. Als dit volgens verwachting zal lukken zal het omgekeerde osmoseproces als zuiveringsmethode voor vervuild oppervlaktewater kunnen worden toegepast.

Een probleem bij het onderzoek is dat nauwelijks op enige ervaring kan worden gesteund. Ondanks de uitgebreide onderzoeksprogramma's in het buitenland, vooral in de Verenigde Staten, op het terrein van de omgekeerde osmose, zijn tot nu toe geen duidelijke resultaten gepubliceerd over toepassing van het proces voor de zuivering van oppervlaktewater.

TEN GELEIDE

Van het in KIWA-verband in uitvoering zijnde, niet op de keuringen gerichte fundamentele en toegepaste speurwerk ten behoeve van de Nederlandse drinkwatervoorziening vormt de evaluatie van de ontzoutingstechnieken reeds gedurende enige jaren een belangrijk onderdeel.

Omdat het door het Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening in het kader van de opstelling van de basisplannen voor de toekomstige drink- en industriewatervoorziening eveneens noodzakelijk werd geacht verregaande aandacht te besteden aan de mogelijkheden die ontzoutingstechnieken voor de voorziening in de toenemende waterbehoefte bieden, hebben RID en KIWA in onderling overleg een speurwerkprogramma voor genoemde onderwerp opgesteld dat voor gezamenlijke rekening wordt uitgevoerd. De uitvoering van het programma dat de bestudering en mogelijke evaluering van drie bekende ontzoutingstechnieken n.l. flashverdamping, electrolyse en omgekeerde osmose omvat, berust bij het KIWA.

RID en KIWA hebben voor elk der drie technieken een zgn. stuurgroep ingesteld met als taak het werk dat door projectleider dr. ir. D. Kuiper en zijn medewerkers wordt gedaan, te begeleiden.

Ir. G. Wijnstra

Wel is een en ander bekend over onderzoek naar de toepassing als derde trap bij de afvalwaterzuivering, hetgeen derhalve ook een toepassing beoogt van het proces als zuiveringstechniek en niet als ontzoutingstechniek. Uiteraard doen zich daarbij vergelijkbare vervuilingproblemen voor als bij de oppervlaktewaterbehandeling.

Voor de werkelijke toepassing van het proces voor de drinkwatervoorziening of de afvalwaterzuivering zal nog veel ontwikkelingswerk moeten worden uitgevoerd, speciaal wat betreft de optimalisatie van de reinigingsmethoden en de daaraan eventueel verbonden procescondities en voor- en nabehandelingsmethoden.

De kosten van het proces zijn momenteel niet concreet te bepalen. Daarvoor

zijn twee redenen. In de eerste plaats hebben de nog niet voldoende ontwikkelde reinigingsmethoden een essentiële invloed op een aantal kostprijsbepalende aspecten van het proces. In de tweede plaats is een kostprijs gebaseerd op de (hoge) prijzen van momenteel verkrijgbare apparatuur en de bijbehorende membranen niet reëel omdat deze apparatuur is ontwikkeld voor relatief zeer geringe capaciteiten. Een ontwerp voor een installatie met grote capaciteit zal relatief belangrijk goedkoper zijn. Er bestaan aanwijzingen dat in de Verenigde Staten de laatste tijd de ontwikkeling in de richting van installaties met grote capaciteiten is begonnen.

In dit artikel zal na een beschrijving van de principes van het proces nader worden ingegaan op de drie belangrijkste aspecten: de vervuiling, de kwaliteit van het productwater en de mogelijke kosten.

Het omgekeerde osmoseproces

Principe

Bij het omgekeerde osmoseproces wordt een membraan gebruikt dat het water doorlaat en het daarin opgeloste zout niet, een zogenaamd semi-permeablemembraan. Als een dergelijke membraan de scheiding vormt tussen water met een hoog zoutgehalte en water met een laag zoutgehalte, dan treedt osmose op: het water heeft de neiging om door het membraan te diffunderen van de zijde met het lage zoutgehalte naar het hoge zoutgehalte. Deze osmotische stroom wordt opgeheven als het water met het hoge zoutgehalte onder een bepaalde druk wordt gebracht: de osmotische druk. Als de druk extra wordt verhoogd stroomt water in de omgekeerde richting, tegen de natuurlijke osmotische druk in, en dit wordt „omgekeerde osmose” genoemd.

De effectieve druk van het omgekeerde osmoseproces is dus niet de werkdruk, maar het verschil tussen de werkdruk en de osmotische druk. Voor brak water is de osmotische druk zeer laag (kleiner dan 1 atm.) vergeleken bij de werkdruk (40 atm.) en heeft dus weinig invloed. Bij zeewaterontzouting, waarvoor echter nog steeds geen geschikte membranen zijn ontwikkeld, is de osmotische druk ca. 25 atm. en dus veel belangrijker.

Als het water door de membraan wordt geperst blijven de in het water opgeloste stoffen achter waardoor aan het oppervlak van het membraan een veel hogere zoutconcentratie ontstaat dan de gemiddelde concentratie in de uitgangsvloeistof. Dit wordt concentratie polarisatie genoemd. De hoog geconcentreerde grenslaag heeft een extra osmotische druk tot

gevolg die ook bij licht brak water al een belangrijke invloed kan hebben. Dit verschijnsel kan grotendeels worden vermeden door het voedingwater met een hoge snelheid, turbulent, langs het membraan te voeren.

De gebruikte membranen bestaan in de meeste gevallen uit cellulose-acetaat en worden op speciale manieren vervaardigd. Reeds bij de eerste succesvolle experimenten met omgekeerde osmose (1) werd cellulose-acetaat gebruikt en ondanks zeer veel onderzoek is dit materiaal nog steeds het beste gebleken. Een tweede materiaal dat recent is ontwikkeld en dat goede eigenschappen blijkt te hebben is een aromatische polyamide, een soort nylon, dat vooral voor de zogenaamde hollow-finefibers (HFF) wordt gebruikt.

De kwaliteit van het membraan wordt bepaald door de flux en de zoutretentie die het heeft bij een bepaalde druk en temperatuur. De zoutretentie wordt uitgedrukt in het percentage zout dat door het membraan wordt tegengehouden, en kan variëren van enige procenten tot bijna 100 %.

Voor zeewaterontzouting in één trap is een zoutretentie van ca. 99 % nodig, voor brak water met ca. 1000 ppm aan opgeloste zouten is afhankelijk van de bedrijfsvoering een zoutretentie van 75 tot 90 % in principe voldoende. De flux wordt meestal uitgedrukt in m^3/m^2 membraanoppervlak per dag ($m^3/m^2 \cdot d$) of in gallons/sq. ft per dag (GFD). Voor brakwatermembranen is een flux haalbaar van 0,7 tot 1 $m^3/m^2 \cdot d$, hetgeen overeenkomt met een „filtratiesnelheid” van ca. 3 à 4 cm/uur. De geringe filtratiesnelheid ten opzichte van bijvoorbeeld zandfilters, heeft tot gevolg dat een relatief groot filtratie — dus membraan — oppervlak nodig is. Dit is echter technisch geen bezwaar omdat een groot membraanoppervlak in een klein volume kan worden ondergebracht waardoor installaties zeer compact kunnen worden gebouwd en zeer weinig grondoppervlak behoeven.

Membraansystemen

Uitgangspunt bij de constructie van de verschillende membraansystemen is dat het membraan moet worden ondersteund door een materiaal dat het productwater doorlaat en dat bestand is tegen de hoge werkdruk. Voorts gaat men er in de regel vanuit dat de constructie zodanig moet zijn dat het voedingwater met hoge snelheid langs het membraan kan worden gevoerd.

Er zijn vier belangrijke systemen te onderscheiden die technisch worden toegepast.

Buisvormige membranen

Deze membraanvorm is het eerst op enigszins grote schaal gebruikt door Loeb (2) in Coalinga en is thans nog een van de meest belovende. De membranen worden gemaakt in diameters van $\frac{1}{2}$ of

1" en in lengten van 3 of 6 m. Ze worden tegelijk met de fabricage aan de buitenzijde voorzien van een poreuze laag papier of kunststof. Deze combinatie wordt in een steunbuis geplaatst die voorzien is van een groot aantal gaatjes waardoor het water dat in de steunbuis wordt aangevoerd en dat onder hoge druk door de poriën in het membraan wordt geperst naar buiten treedt. Een groot aantal buizen is meestal in een pijpenbundel samengevoegd tot één module. Deze membraanvorm heeft in het algemeen het voordeel dat de vervuiling het gemakkelijkste is te verwijderen.

Vlakke membranen

Bij deze vorm wordt een zogenaamd „plate and frame” constructie gebruikt die veel lijkt op een filterpers. De membranen worden aan beide zijden van een steunlaag aangebracht. Een aantal van deze lagen wordt op korte afstand van elkaar bevestigd aan een centraal afvoerkanaal en het geheel wordt in een drukvat geplaatst.

Spiraalgewonden membranen

Bij deze constructie wordt een lang vlak membraan op een steunlaag gelegd en daarop een soort nylongaas, een „spacer”, voor de voedingwaterstroom. Het geheel wordt spiraalsgewijs opgerold om een centrale afvoerbuis. De rol wordt in een drukkuis geplaatst. Dit systeem is zeer compact en lijkt relatief makkelijk te vervuilen.

Holle vezels, Hollow Fine Fibers (HFF)

Deze membraanvorm wijkt vrij sterk af van de hiervoor vermelde systemen. De membranen worden als zeer dunne holle vezels gesponnen. Wegens de geringe diameter zijn de vezels bestand tegen de

hoge druk en behoeven geen ondersteuning. Het water wordt van buiten naar binnen door de vezelwand geperst. De vezels kunnen zowel gemaakt zijn van cellulose-acetaat als van een soort nylon, een aromatisch polyamide. De flux is veel minder dan bij de andere typen membranen maar er kunnen zeer veel vezels in een beperkte ruimte worden ondergebracht zodat de productie per volume toch nog groot is.

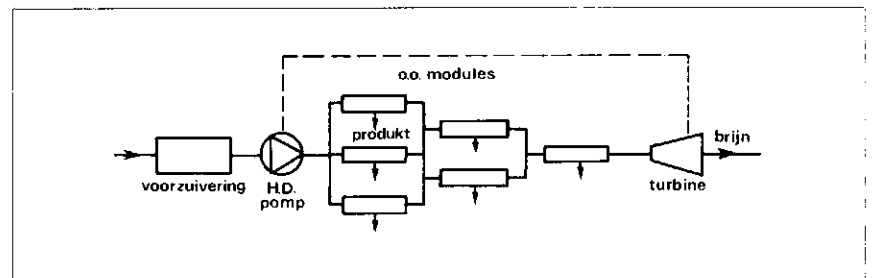
De vezels worden in bundels in een flens gegoten en in een drukvat gebracht. Het systeem lijkt aantrekkelijk, maar hoewel de vervuiling op het membraanoppervlak in vergelijking met andere typen misschien minder is wegens de geringe flux, zijn er toch aanwijzingen dat de bundel vezels snel verstopt raakt door gesuspendeerd materiaal in het water.

Installaties

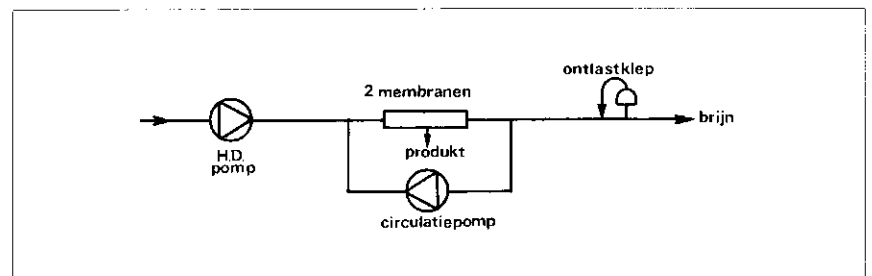
Een installatie voor het omgekeerde osmoseproces is zeer eenvoudig wat ontwerp en bediening betreft. In principe bestaat de installatie uit een hogedruk-pomp, een membraansectie en een ontlastklep voor de afvoer van de brine (het deel van het voedingwater dat achterblijft en geconcentreerd is). Bij grote installaties kan voor de ontlastklep een turbine geplaatst worden om energie terug te winnen. Een belangrijk facet is de opbouw van de membraansectie. Deze bestaat uit een aantal modules, afzonderlijke eenheden, waarin een groot membraanoppervlak is opgenomen.

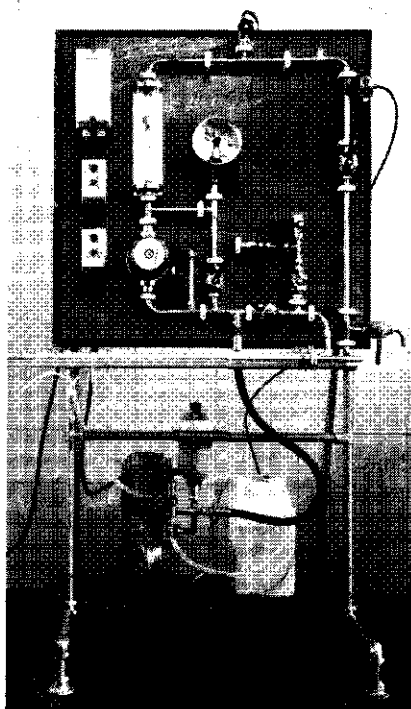
Zoals reeds in de inleiding is opgemerkt moet het voedingwater met hoge snelheid langs het membraan worden gevoerd. De verblijftijd in één module is daardoor zo kort dat slechts een gering deel van het water door het membraan wordt geperst: de indikking per module is dus gering. Om voldoende indikking te

Afb. 1 - Flow-sheet van een omgekeerde osmose installatie.



Afb. 2 - Flow-sheet van een KIWA-proefinstallatie voor omgekeerde osmose.





Afb. 3 - Kleine KIWA-proefinstallatie voor omgekeerde osmose, met circulatiesysteem en 2 membranen, volgens afb. 2.

krijgen wordt daarom een aantal modules in serie geschakeld.

Dit heeft echter tot gevolg dat de vloeistofsnelheid steeds geringer wordt omdat de hoeveelheid brine afneemt. In het algemeen zal een grote installatie daarom zijn opgebouwd zoals in de flowsheet van afb. 1 staat aangegeven. Door de aangegeven schakeling wordt in de laatste module nog een hoge vloeistofsnelheid gehandhaafd.

De indikingsgraad (recovery) wordt aangeduid als het percentage van de voeding dat als product wordt verkregen. Bij grote installaties wordt gedacht aan recovery's van 75 % of zelfs van 95 % als de brine-afvoer kostbaar is.

Het is duidelijk dat de vervuiling van de membranen het sterkste is in de laatste secties, waar de brine het meest geconcentreerd is. Dit is voor de opzet van proefinstallaties van belang omdat men daarbij doorgaans uitgaat van lage capaciteiten en een klein aantal membranen. Omdat de vloeistofsnelheid hoog moet zijn, betekent dit dat de recovery laag is, en er bijna geen indikking is. Deze proefinstallaties geven dus geen reëel beeld over de membraanvervuiling in grote installaties. Voor het onderzoek met Rijnwater is daarom bij het KIWA een paar jaar geleden een kleine proefinstallatie ontworpen waarbij zich dit probleem niet voordoet. De installatie staat schematisch in afb. 2 weergegeven. In het hogedruksysteem is een circulatiepomp opgenomen waarmee de circulatiesnelheid van de brine langs het membraan kan worden geregeld. Daarbij kan de

voeding zo laag worden ingesteld dat een hoge recovery wordt verkregen. Voor het in uitvoering zijnde onderzoek zijn een aantal van deze installaties in gebruik. Ze zijn voorzien van twee buisvormige membranen van „ware” afmetingen zodat nauwelijks een schaafeffect optreedt bij extrapolatie van de resultaten naar grote installaties. De membranen worden al naar gelang behoefte en doel van het experiment in het laboratorium van het KIWA vervaardigd of van een fabrikant betrokken. Naast de kleine proefinstallaties staat een aanzienlijk grotere proefinstallatie opgesteld op het pompstation van de Watertransportmaatschappij Rijn-Kennemerland te Jutfaas. Deze bevat ruim tweehonderd membranen en wordt gevoed met Rijnwater dat via coagulatie en filtratie eerst is voorgereinigd.

Membraanvervuiling

Drinkwater

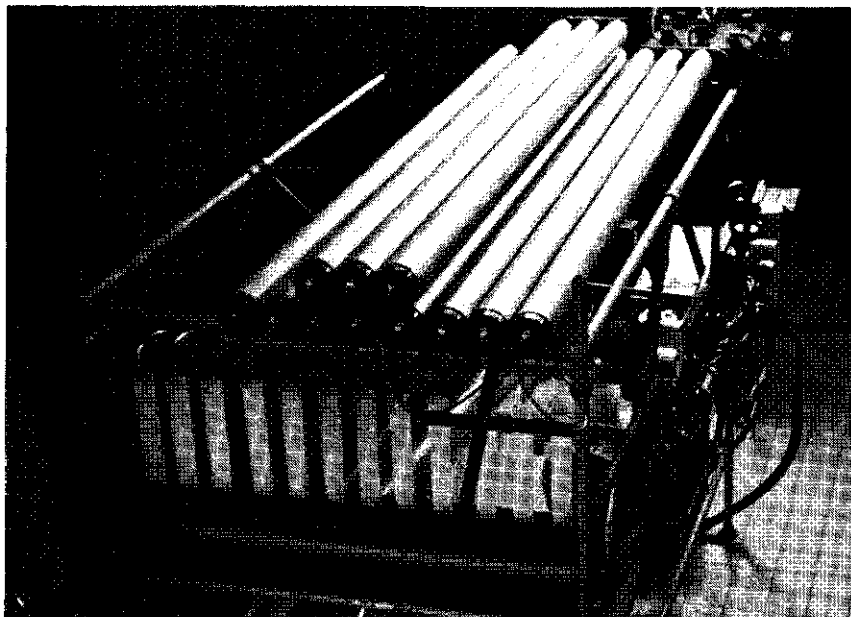
Bij het passeren van het membraan blijven de in het water aanwezige opgeloste stoffen in hoge concentratie aan het membraanoppervlak achter (concentratiepolarisatie). Voor een aantal stoffen wordt de concentratie hoger dan de oplosbaarheid en deze stoffen slaan op het membraan neer. Dit heeft tot gevolg dat de flux sterk daalt. De vorming van neerslagen kan voor een belangrijk deel, maar zeker niet volledig, worden voorkomen door het water met hoge snelheid langs het membraan te voeren. Bekend is uit verschillende onderzoeken dat ondanks hoge vloeistofsnelheden neerslagen worden gevormd van bijvoorbeeld calciumsulfaat, calciumcarbonaat en ijzerhydroxyde. Het calciumsulfaat slaat neer als kleine kristalletjes. Deze zijn te verwijderen door periodiek met hoge snelheid te spoelen. Bij de reeds eerder genoemde installatie van Loeb in

Coalinga waar ijzerhydroxydeneerslag werd geconstateerd, is gebleken dat dit neerslag kon worden verwijderd door de daar gebruikte buisvormige membranen te reinigen met een schuimplastic prop in combinatie met een zuurbehandeling. De ervaring leert dat het neerslag van calciumcarbonaat veel meer problemen geeft omdat het zich als een dichte gesloten laag op het membraan afzet. Gebleken is dat deze laag periodiek kan worden verwijderd door een behandeling met zuur. Ook is het mogelijk de vorming van het neerslag te voorkomen door b.v. aan de voeding polyfosfaten toe te voegen. Laatsgenoemde methode wordt weliswaar door verschillende fabrikanten van omgekeerde osmoseapparatuur aanbevolen, maar een bezwaar ervan is dat de polyfosfaten uiteindelijk via de brine in het oppervlaktewater terecht kunnen komen.

Het is duidelijk dat men in het algemeen zal trachten een te grote teruggang van de flux als gevolg van de membraanvervuiling te voorkomen door de neerslagen periodiek te verwijderen of vorming van de neerslagen tegen te gaan. Het onderzoek dat door het KIWA wordt uitgevoerd is dan ook voor een belangrijk deel gericht op het vraagstuk van de membraanvervuiling. Naast brak grondwater wordt daarbij veel aandacht besteed aan Rijnwater als voedingwater omdat het omgekeerde osmoseproces sterk in aanmerking kan komen als een onderdeel van een zuiveringsproces voor sterk verontreinigd oppervlaktewater.

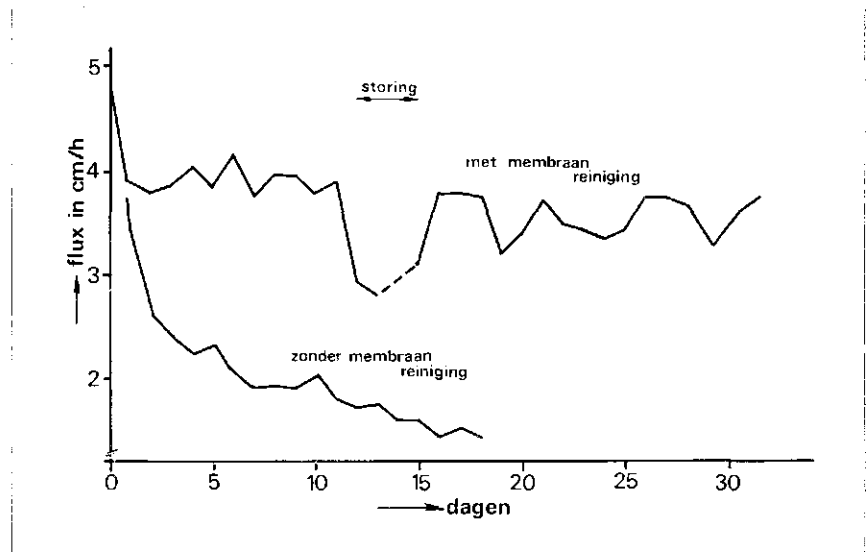
Het Rijnwater bevat naast de genoemde neerslagvormende anorganische zouten bovendien organische stoffen, in hoofdzaak humuszuren, die eveneens een neerslag op het membraan veroorzaken. Over de vervuiling van de membranen bij gebruik van oppervlaktewater is wei-

Afb. 4 - Grote KIWA-proefinstallatie met 12 modules van 18 membranen, geschakeld volgens principe van afb. 1.



nig bekend. Ondanks de uitgebreide onderzoeken die in de Verenigde Staten door de Office of Saline Water, de OSW, worden gesteund en gestimuleerd bestaan over de vervuiling van membranen door humuszuren geen duidelijke gegevens en rapporten. Omdat men zeker mag aannemen dat er installaties hebben gewerkt met oppervlaktewater, wekt dit het vermoeden dat vervuiling door humuszuren problemen geeft die nog niet voldoende zijn opgelost. Enkele uitlatingen in de literatuur bevestigen dit.

Wel worden steeds meer resultaten bekend gemaakt van de toepassing van membraanfiltratie voor verschillende soorten water waarin organische stoffen zijn opgelost, zoals afvalwater en proceswater uit de chemische-, voedingsmiddele- en farmaceutische industrie. Ook daarbij treedt vervuiling op door organische stoffen, maar deze wordt vooral veroorzaakt door zeer specifieke stoffen, die relatief gemakkelijk te verwijderen zijn. De bij deze toepassing ontwikkelde reinigingsmethoden kunnen echter van belang zijn bij het onderzoek naar de mogelijkheden van de verwijdering van humuszuren. Het is duidelijk dat de toepasbaarheid van het omgekeerde osmoseproces in de waterleidingsector zowel voor ontzouting van brak water of als een zuiveringstrap bij sterk verontreinigd oppervlaktewater sterk afhangt van de mate waarin het probleem van de membraanvervuiling kan worden opgelost. Eén van de eerste punten die op het programma van onderzoek van de Werkgroep Omgekeerde Osmose werd geplaatst was dan ook een onderzoek naar de vraag of vervuiling optreedt bij gebruik van voorgezuiverd oppervlaktewater en zo ja of deze door een verdere voorbehandeling is te voorkomen of met



Afb. 6 - Resultaten van omgekeerde osmose experimenten met snel filtraat uit Bergambacht. Recovery 75 %, druk 40 atm., temperatuur 25 °C.

behulp van bepaalde reinigingsmethoden is te verwijderen.

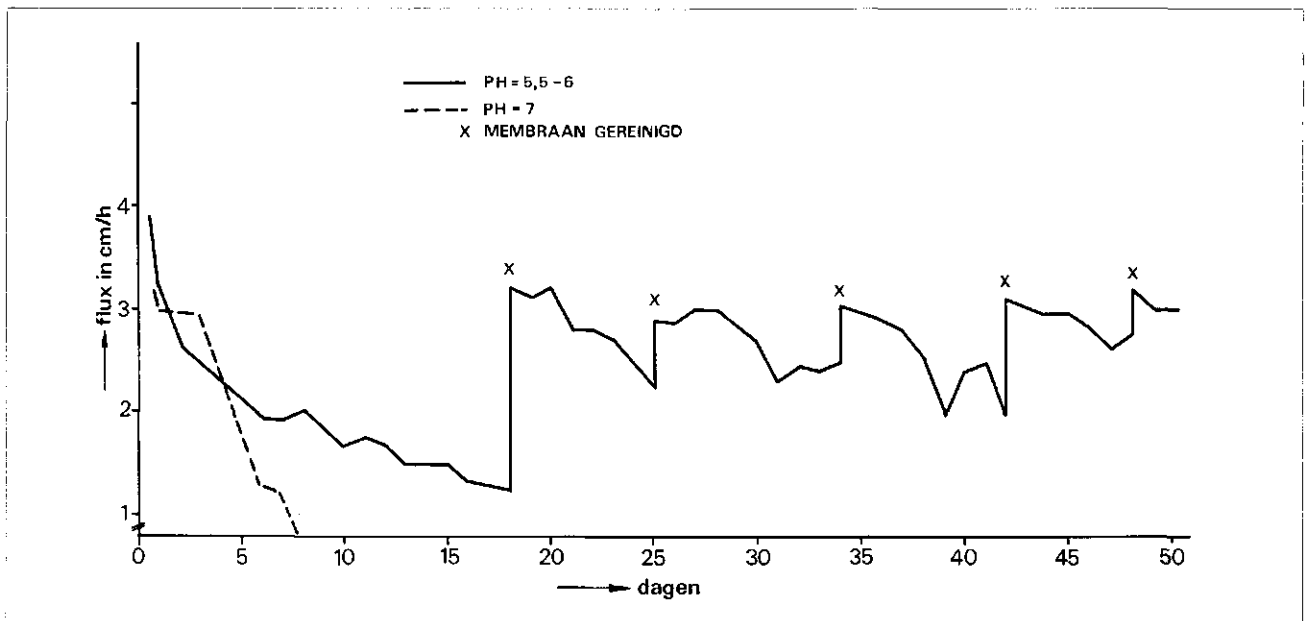
Zoals reeds in het vorenstaande is opgemerkt wordt het onderzoek met behulp van een aantal proefinstallaties uitgevoerd. Als voedingwater wordt ongezuiverd en chemisch gezuiverd Rijnwater gebruikt. Voor de verwijdering van de neerslag op de membranen worden een groot aantal potentiële mechanische en chemische reinigingsmethoden getest. Het gaat daarbij om het spoelen met hoge snelheden, het continu doseren van chemicaliën, het reinigen met schuimplastic ballen en de inwerking van geschikte chemicaliën. Hoewel het nog te vroeg is om reeds nu uitgebreid op de resultaten en toegepaste zuiveringsmethoden te kunnen ingaan zijn, om aan te tonen dat de vervuiling van de membranen inderdaad duidelijk optreedt, maar ook dat de

membranen te reinigen zijn, enkele verkregen resultaten in de afb. 5 en 6 vermeld.

De experimenten zijn uitgevoerd met kleine KIWA-installaties, voorzien van twee buisvormige membranen van 0,5" diameter en 1,5 m lang. De recovery was steeds 75 %.

In afb. 5 is het resultaat van een experiment met Haags leidingwater, uitgevoerd in het voorjaar van 1971 weergegeven. Bij pH = 7 neemt de flux sterk af; het neerslag op de membranen bevat veel calciumcarbonaat. Bij pH = 5,5 à 6 neemt de flux eveneens sterk af, maar het neerslag op de membranen is vrij van calciumcarbonaat. Na 18 dagen is begonnen met een periodieke reiniging van de membranen. Het blijkt dat de flux daardoor weer belangrijk toeneemt en gemiddeld op een constant niveau van

Afb. 5 - Resultaten van omgekeerde osmose experimenten met Haags leidingwater, Recovery 75 %, druk 40 atm., temperatuur 20 °C.



ca. 3 cm/uur kan worden gehandhaafd. Deze flux is niet hoog maar daar hoeft in deze fase nog geen grote waarde aan te worden gehecht.

In afb. 6 zijn de resultaten weergegeven van een experiment dat op het pompstation van de Duinwaterleiding van 's-Gravenhage met Rijnwater is uitgevoerd dat als enige voorbehandeling een snelfiltratie in Bergambacht had ondergaan. Ook daar is gebleken dat de flux snel afneemt als de membranen niet gereinigd worden. Uit de verkregen resultaten blijkt dat bij dagelijkse reiniging de flux constant op ca. 3,5 cm/uur blijft. Door externe oorzaken heeft zich gedurende enige dagen een storing voorgedaan, waardoor de flux sterk daalde. Interessant is dat na het opheffen van de storing de flux weer op hetzelfde niveau terugkwam.

Uit beide bovengenoemde grafieken blijkt voorts dat de flux niet meer op de oorspronkelijke beginwaarde terugkomt, maar op een lager niveau blijft. Dit wordt ten dele veroorzaakt door het samendrukken van het membraan. Verder bevat het membraan een aantal poriën, in feite imperfecties, die de eerste dagen verstopten en bij de reiniging verstopt blijven.

Op grond van de tot nu toe bereikte en in de grafieken weergegeven resultaten mag met de nodige voorzichtigheid worden geconcludeerd dat het niet onmogelijk lijkt om met geschikte reinigingsmethoden het omgekeerde osmoseproces in de naaste toekomst toe te kunnen passen voor de zuivering van Rijnwater.

Afvalwater

Naast de mogelijkheid om brak water via het omgekeerde osmoseproces te ontzouten is men, nadat de succesvolle fabricage van goede membranen (1 en 2) bekend werd, ook begonnen met onderzoeken voor toepassing bij de zuivering van afvalwater.

Bij de eerste experimenten bleek echter al dat de membranen sterk vervuilden en dat het moeilijk zou zijn een oplossing te vinden om de membranen te reinigen. Uitgebreid onderzoek heeft er toe geleid dat er gedurende de laatste jaren verschillende reinigingsmethoden zijn ontwikkeld. Volgens een recente bekendmaking (3) is in San Diego een proefinstallatie gedurende 7 maanden succesvol in bedrijf geweest met „raw sewage” als voedingwater. Daarbij wordt gebruik gemaakt van speciaal behandelde membranen en van zeer intensieve spoelmethoden.

In het algemeen heeft men, vooral in de Verenigde Staten, de verwachtingen dat het omgekeerde osmoseproces met succes bij de afvalwaterbehandeling zal kunnen worden toegepast. Hoewel er tot nu toe weinig concrete resultaten zijn gepubliceerd, zijn er op grond van de positieve verwachtingen een groot aantal proef-

installaties in bedrijf (4 en 5). Als speciale toepassing op afvalwaterzuivering wordt momenteel in de Verenigde Staten de mogelijkheid onderzocht om brak irrigatiewater te ontzouten en weer geschikt te maken voor hergebruik in de agrarische sector.

Industriële toepassingen

Naast de ontwikkeling van de toepassing van het omgekeerde osmoseproces voor de produktie van drinkwater en de behandeling van afvalwater biedt het proces ook interessante mogelijkheden voor industriële afvalwaterbehandeling, de concentreringsprocessen in de chemische, farmaceutische en voedingsmiddelenindustrie en voor de produktie van zeer zuiver water voor gebruik als ketelvoedingwater of als proceswater.

Als het er om te doen is industrieel afvalwater zover te zuiveren dat het hergebruikt kan worden, of om waardevolle produkten uit het water terug te winnen biedt de omgekeerde osmose goede mogelijkheden. Een zeer succesvolle toepassing is de afvalwaterbehandeling van de papierindustrie waar zeer grote hoeveelheden proceswater worden gebruikt (6). Een andere succesvolle toepassing is de indikking van melkwei waarbij waardevolle eiwitten en lactose worden teruggevoerd. Daarbij is het mogelijk gebleken de melkwei-oplossingen in te dikken tot een vaste stofgehalte van circa 30 %. Een groot aantal mogelijke toepassingen staat momenteel in de belangstelling, waaronder bijvoorbeeld het indikken van vruchtensappen en van farmaceutische produkten. Voor de produktie van ketelvoedingwater uit brak water zal het omgekeerde osmoseproces naar het zich laat aanzien ook met succes kunnen worden toegepast. In combinatie met een ionenwisselaarproces kan het economisch voordeliger zijn dan wanneer alleen ionenwisselaars gebruikt worden. Toepassingen voor de produktie van zeer zuiver water worden verder bijvoorbeeld gevonden in de elektronische industrie en in de foto-industrie.

Bij al de genoemde toepassingen vervuilen de membranen in meer of mindere mate en er zijn verschillende methoden ontwikkeld om ze te reinigen. De algemene indruk is dat iedere toepassing een eigen aparte reinigingsmethode van de membranen vereist die experimenteel moet worden gevonden. De praktijk wijst uit dat dit onderzoek tamelijk uitvoerig moet zijn om bij toepassing op technische schaal niet voor onaangename verrassingen te komen te staan.

Kwaliteit van het produktwater

De kwaliteit van het produktwater hangt af van het gebruikte membraan. De fabricagecondities van het membraan kunnen zodanig gevarieerd worden dat het membraan de in het water aanwezige stoffen in meer of mindere mate tegenhoudt. Het is mogelijk membranen te maken met zoutretenties van meer dan

98 %. Een hoge zoutretentie gaat echter gepaard met een lage flux, en dus zal men in het algemeen geen membranen gebruiken die hogere zoutretenties hebben dan nodig is. Voor brak water zijn membranen met zoutretenties van 80 % tot 90 % van belang.

Niet alle zouten worden in dezelfde mate door het membraan tegengehouden. Voor de kationen geldt de volgende reeks van afnemende zoutretentie: Mg > Ca > Na > K > NH₄⁺. Zware metalen zoals bijvoorbeeld Zn, Pb, Cu, Sn, Cr, Ag, Au hebben hoge zoutretenties, maar de vorming van complexe verbindingen kan daarop van invloed zijn.

Bij de anionen neemt de retentie af in de volgorde: citraat > sulfaat > fosfaat > chloride > nitraat.

Bij gebruik van Rijnwater zijn bij de experimenten van afb. 6 de volgende retenties gevonden.

	Retentie (%)
Natrium	83
Kalium	80
Calcium	96
Magnesium	97
Chloride	85
Sulfaat	99
Organische stof (verbruik permanganaat)	97
Geleidbaarheid	87

Opvallend is de zeer goede retentie voor organische stof. Niet alle organische verbindingen worden echter volledig door het membraan tegengehouden. In het algemeen kunnen kleine organische moleculen het membraan passeren, vooral moleculen die gemakkelijk waterstofbruggen kunnen vormen zoals alcoholen esters en aldehyden.

Als zeer ruwe vuistregel wordt wel gesteld dat moleculen met een molecuulgewicht groter dan 200 à 300 het membraan niet passeren, en die met een lager molecuulgewicht wel. Stoffen met hoge retenties zijn bijvoorbeeld humuszuren, zepen, zoals ABS en LAS, bestrijdingsmiddelen, zoals DDT, linaan pp-DDT, kleurstoffen, dextrose en sucrose.

Lage retenties hebben bijvoorbeeld kleine alcoholen tot butanol en kleine aldehyden tot butyraldehyde, evenals fenol, en stoffen als methylformiaat en methylacetaat (7).

Uit deze gegevens volgt dat zeer veel stoffen door het membraan worden tegengehouden en dat derhalve het produkt water een zeer grote zuiverheid heeft.

Uit kwaliteitsoogpunt kunnen het beperkte aantal stoffen dat minder goed tegengehouden wordt zoals kleine organische moleculen, echter belangrijk zijn. Deze stoffen hebben gemeen dat ze klein zijn, relatief vluchtig en gemakkelijk te adsorberen aan actieve kool. Indien ze in te grote concentraties in het produktwater voorkomen kunnen ze daaruit door een eenvoudige nabehandeling worden verwijderd.

Productie in 10 ⁶ m ³ /jaar	TDS gehalte voeding	TDS gehalte produkt	Recovery (%)	Kostprijs produkt in ct/m ³
0,17	860	130	81	90
1,3	2560	130	43	53
1,4	3000	400	64	57
3,3	1390	415	79	40

De kosten van het omgekeerde osmoseproces

De kosten van het omgekeerde osmoseproces kunnen thans nog niet reëel worden bepaald voor installaties met een capaciteit van miljoenen m³ per jaar. De tot nu toe bestaande installaties zijn voor geringe capaciteiten gebouwd en bovendien zijn een aantal kostprijsbepalende procesvariabelen nog onvoldoende bekend. Dit wordt duidelijk bij een nadere beschouwing van de ontwikkeling van het proces.

De ontwikkeling van het proces is eigenlijk begonnen toen Loeb en Sourirajan (1) een methode vonden om een cellulose-acetaatmembraan te maken met een bruikbare flux. Het lukte Loeb (2) bovendien deze membranen in buisvorm te maken, waardoor het mogelijk werd een proefinstallatie te bouwen in Coalinga, met een capaciteit van ca. 15 m³/dag (8). Deze ontwikkeling was aanleiding voor een groot aantal industrieën en wetenschappelijke instellingen om het systeem eveneens te gaan onderzoeken, en vooral om eigen membraanconstructies te gaan ontwikkelen. Daarbij werd in Amerika zeer grote steun ondervonden van de Office of Saline Water (OSW) van de U.S. Department of the Interior. Bij het onderzoek richtte men zich in eerste instantie op de fabricage en ontwikkeling van installaties en membranen voor relatief geringe capaciteiten (5.000 à 100.000 m³ per jaar). Deze ontwikkeling werd extra in de hand gewerkt doordat bleek dat het proces toegepast kon worden op heel andere terreinen dan op dat van de drinkwaterbereiding, zoals de farmaceutische en voedingsmiddelenindustrie. Voor laatstgenoemde toepassingen kan men vaak met kleine apparaten volstaan en deze zijn aantrekkelijk uit commercieel oogpunt, omdat de produkten vaak honderd of duizend maal kostbaarder zijn dan drinkwater.

Het lijkt dat het laatste halfjaar een kentering is gekomen in deze ontwikkeling en dat men zich meer gaat richten op grote installaties. De OSW steunde de laatste jaren het fundamenteel spuurwerk en het ontwikkelingswerk voor ontzoutingstechnieken in Amerika met een jaarlijkse begroting van 20 à 25 miljoen dollar. Ongeveer de helft werd besteed aan het omgekeerde osmoseproces. Voor de komende vijf jaar heeft de OSW een begroting ingediend van 240 miljoen dollar. De meeste aandacht zal de komende vijf jaar onder meer gericht zijn op de technologische ontwikkeling van installaties met grote capaciteiten (9). Recent

zijn aanwijzingen verkregen (10) dat het gevraagde bedrag van 240 miljoen dollar met een factor 2 à 3 zal worden verhoogd, zodat de komende vijf jaar per jaar minstens 100 miljoen dollar aan de ontwikkeling van ontzoutingstechnieken zal kunnen worden besteed. Een van de redenen hiervoor is dat men in Amerika verwacht dat de buitenlandse concurrentie sterk zal toenemen, vooral de Japanse (3), en men voor de ontzoutingstechnieken en zeker voor de omgekeerde osmose rekent op een „bright future”.

De OSW heeft vorig jaar plannen ontwikkeld voor een proefinstallatie voor de ontzouting van brak grondwater met een capaciteit van 250.000 m³ per jaar. Deze worden thans vervangen door plannen voor een soortgelijke installatie met een capaciteit van 3 miljoen m³ per jaar te Clinton, Okla (10). Bovendien worden plannen ontwikkeld voor een installatie van 10⁷ m³ per jaar voor de ontzouting van water van de Coloradorivier.

Uit de Amerikaanse gegevens wordt de indruk verkregen dat men daar thans op basis van verkregen kennis en ervaring, begint aan de ontwikkeling naar installaties met grote capaciteiten.

Een kostprijsbepaling op basis van bestaande apparatuur is daarom thans niet reëel. Wel is het mogelijk om aan de hand van gepubliceerde gegevens een globale indruk over de te verwachten toekomstige kostprijs te verkrijgen.

In 1968 heeft Miller (11) al een poging gedaan om de kostprijs voor installaties tot 10⁸ m³/jaar te berekenen. Laatstgenoemde berekende voor capaciteiten van 10⁶, 10⁷ en 10⁸ m³/jaar, uitgaande van brak water en zonder rekening te houden met een mogelijke membraanvervuiling, kostprijzen van 59, 38 en 30 ct per m³. Bij een ontwikkeling van membranen met zeer hoge flux, zou het laatste bedrag zelfs kunnen dalen tot 19 ct per m³. In een recente studie over afvalwaterbehandeling heeft de OSW (5) voor toepassing van het omgekeerde osmoseproces als tertiaire behandeling, kostprijzen van 35 en 25 ct per m³ uiterekend voor capaciteiten van 10⁷ en 5 × 10⁷ m³ per jaar. Deze berekeningsmethode lijkt redelijk betrouwbaar ook voor Europese omstandigheden en is gebaseerd op vergroting van de huidige systemen en niet op ontwikkeling van volledig nieuwe systemen. De invloed van de capaciteit blijkt duidelijk uit bijgaande tabel die is berekend voor een aantal bestaande situaties in de Verenigde Staten (12).

Voor de installatie van 3 × 10⁶ m³/jaar die in Clinton, Oklahoma zal worden gebouwd is een kostprijs van het water berekend van ca. 27 ct per m³ voor de ontzouting van brak water waarin niet een eventuele voorzuivering is begrepen. Uit een recente aankondiging (13) blijkt dat volgens het Saline Water Conversion Report 1970/1971, de kostprijs in 1980 voor de ontzouting van brak water, zonder voorbehandeling, bij een capaciteit van 10⁷ m³/jaar, ca. 25 ct/m³ zal zijn. Volgens een berekening van Banfield (14) voor Europese condities is de kostprijs voor de ontzouting van brak water bij een capaciteit van 10⁶ m³/jaar ca. 60 ct/m³. Een zeer groot deel van deze kosten wordt veroorzaakt door de kosten van membraanmodulus en de membraanvervangingskosten. Gezien de huidige ontwikkelingen lijkt het niet onwaarschijnlijk dat de berekende kostprijs bij grotere capaciteiten tot bijna de helft kan worden verlaagd.

De procescondities zijn eveneens onvoldoende bekend om thans reeds een concrete kostprijs te kunnen bepalen. De vervuiling speelt daarbij een belangrijke rol. Zo zal de vervuiling bepalend kunnen zijn voor de gewenste recovery en deze is weer bepalend voor het energieverbruik. Noodzakelijke reinigingsmethoden en/of voorzuiveringen kunnen de kosten belangrijk beïnvloeden; bovendien kunnen ze een invloed hebben op het noodzakelijke personeel. Verder kan de brine-afvoer mogelijk een probleem worden dat de kosten met zich mee kan brengen. Tenslotte zullen natuurlijk de energiekosten een belangrijke rol spelen.

Samenvattend lijkt het een reële verwachting dat de kosten van het omgekeerde osmoseproces, toegepast voor de ontzouting van brak water of als zuiveringstrap voor oppervlaktewater, in de toekomst binnen het economisch bereikbare zullen komen te liggen en vergelijkbaar zullen zijn met de kosten van andere zuiveringstechnieken.

Literatuur

- Loeb, S. en S. Sourirajan, Adv. Chem. Ser. 38 (1962) 117.
- Loeb, S., Desalination 1 (1966) 35.
- Desalting Digest, April-Mei 1971.
- Channabassappa, K. C., 'Water and Wastes Engineering', January '70, p. A-5.
- Bregman, J. I., Environmental Science and Technology 4 (april-1970) 296.
- Ammerlaan, A. C. F., B. F. Lueck, A. J. Wiley, Tappi 52 (jan. 1969) nr. 1.
- Hindin, E., P. J. Bennett, S. S. Nazayanan, Water and Sewage Works (Dec. 1969) 466.
- Loeb, S. en E. Selover, Desalination 2 (1967) 63.
- Desalting Digest, maart 1971.
- Desalting Digest, juni 1971.
- Miller, E. F., Chem. Eng. nov. 18, 1968.
- Miller, E. F., Annual Cont. AWWA, '71.
- Desalting Digest, juli 1971.