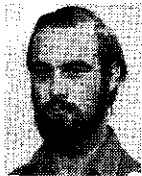


Zuivering van industrieel afvalwater d.m.v. membraan-processen

Inleiding

De zuivering van afvalwater is een onderwerp waarover al veel is geschreven. Afvalwater zelf kan worden ingedeeld naar z'n oorsprong, te weten huishoudelijk-, industrieel- of landbouwafvalwater [1]. Aan de bestudering van rioolwaterzuiveringsinstallaties is in Nederland al veel werk verricht.

Daarnaast zijn echter ook specifieke methoden voor de behandeling van industrieel afvalwater door bedrijven in eigen beheer van belang. In zijn recent verschenen leer-



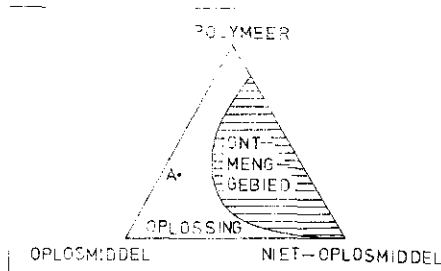
IR. P. M. VAN DER VELDEN
Laboratorium voor Colloid- en
Grensvlakchemie van de
Technische Hogeschool Twente



PROF. DR. C. A. SMOLDERS
Laboratorium voor Colloid- en
Grensvlakchemie van de
Technische Hogeschool Twente

boek over afvalwaterzuivering geeft Koot [2] een opsomming van stoffen die de industrie niet naar een rioolstelsel mag afvoeren, zoals giftige stoffen, kleurstoffen, aantasting veroorzakende agressieve stoffen (bijv. $\text{SO}_4^{2-} > 300 - 400 \text{ mg/l}$), zware metalen, stoffen die sterke algengroei kunnen veroorzaken of die het biologisch zuiveringsproces storen of zelfs onmogelijk maken.

Als de industrie haar afvalwater niet direct mag lozen, zal moeten worden gezocht naar mogelijkheden om de zuivering in eigen beheer te nemen: in dit verband worden vaak genoemd: neutraliseren, flocculatie, afzeven, bezinken, ontgiften of floteren. De eenzijdige samenstelling van industrieel afvalwater maakt het terugwinnen van de verontreinigingen relatief eenvoudig, terwijl verder het in eigen beheer behandelen van afvalwater — alhoewel het enig onderzoek en enige organisatie vereist — economisch gezien aantrekkelijk kan zijn. Het is dan ook om deze redenen dat de laatste jaren (naast biologische zuivering) meer aandacht wordt besteed aan afvalwater-zuiverings-technieken voor specifieke situaties. Een behandelingsmethode voor industrieel afvalwater is die met behulp van een membraanproces: ultrafiltratie of hyperfiltratie; dit zijn technieken die in dit verband nog zelden worden genoemd, maar die de laatste jaren uitvoerig onderzocht werden en welke sterk in opkomst zijn. Het gebruik van membranen voor de



Afb. 1 - Fasediagram voor een polymeer/oplosmiddel/niet-oplosmiddel-systeem.

bereiding van drinkwater werd al eerder door Kuiper [3] beschreven. Het is de bedoeling hier nader in te gaan op de mogelijkheden van membraanprocessen in het algemeen en ultrafiltratie en omgekeerde osmose (hyperfiltratie) in het bijzonder. Alvorens echter op de zuivering van industrieel afvalwater d.m.v. ultrafiltratie in te gaan, zullen eerst enige algemene membraanaspekten worden behandeld.

Membranen

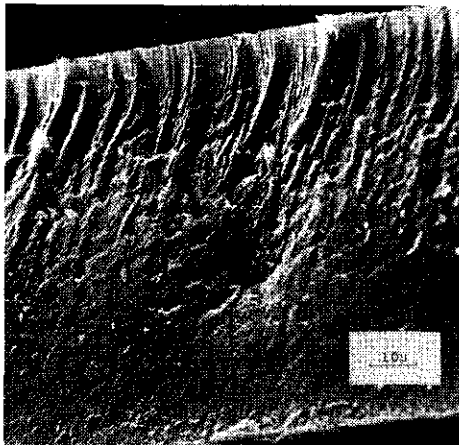
In het algemeen worden membranen gemaakt van polymeren. Bekende membraanmaterialen zijn o.a. cellofaan, polyacrylonitril, cellulose acetaat en verschillende polyamiden.

Waarom juist deze polymeren met succes als membraanmateriaal zijn gebruikt is niet precies aan te geven; wel kunnen twee belangrijke factoren voor de geschiktheid van een polymeer als membraanmateriaal worden genoemd.

Allereerst is de hydratatie van het polymeer van belang, d.w.z. de hoeveelheid water die het polymeer gebonden houdt door middel van z'n polaire en/of ionogene groepen. De hydratatie hangt af van de chemische structuur van het polymeer — de aard en samenstelling van de polaire en ionogene

Afb. 2 - REM-foto van een dwarsdoorsnede van een cellulose acetaat membraan gemaakt van een gietstroop met 22% CA, 39% aceton en 39% formamide.

(foto: M. A. de Jongh/M. H. V. Mulder).



groepen — en heeft consequenties voor de mechanische sterkte van de polymeerfilm in water. De hoeveelheid membraanwater kan worden beïnvloed door chemische crosslinking of door het gebruik van polymere mengsels (blends) of copolymeren. Een tweede factor welke van belang is voor de bruikbaarheid van een polymeer als membraanmateriaal is de mogelijkheid om het membraan asymmetrisch in plaats van homogeen te maken. Asymmetrische membranen zijn belangrijk omdat ze veel meer permeabel zijn voor water dan een homogeen membraan van dezelfde dikte. Goede poreuze membranen blijken alleen door middel van coagulatie te kunnen worden verkregen. Onder coagulatie wordt hier verstaan het op een gecontroleerde, gedefinieerde manier neerslaan van een polymeer uit z'n oplossing.

Dit laatste gebeurt door gebruik te maken van een voor dit doel geschikt polymeer/oplosmiddel/niet-oplosmiddel-systeem.

In afb. 1 is een fasediagram voor zo'n systeem afgebeeld. Voor de membraanbereiding gaat men uit van een polymeeroplossing (gietstroop), welke eventueel naast het polymeer en het oplosmiddel ook voor een gering deel het niet-oplosmiddel kan bevatten. In afb. 1 wordt de samenstelling van zo'n hypothetische gietstroop aangegeven door het punt A. Wanneer nu de samenstelling van de polymeeroplossing verandert kan de oplossing ontmengen. Deze verandering van samenstelling kan plaatsvinden hetzij door verdamping van het oplosmiddel, hetzij doordat het gestreken membraan in een coagulatiebad met niet-oplosmiddel wordt gebracht.

Het resultaat bestaat uit een matrix van de continue fase (i.c. polymeer) met daartussen ruimte gevuld met niet-oplosmiddel; aan de kant van het coagulatiebad bevindt zich vaak een wat compacte, uiterst dunne laag (de 'skin'). Op deze wijze is dan een permselectief asymmetrisch membraan ontstaan met een fijn kanaalsysteem van poriën (afb. 2).

Onder ultrafiltratie wordt nu verstaan een membraanproces waarbij relatief grote molekulen en ionen (eiwitten, koolhydrater e.d.) door het membraan worden tegengehouden.

Alle commercieel interessante ultrafiltratie membranen zijn bereid d.m.v. coagulatie. In het algemeen zal echter als gevolg van deze coagulatie een membraanstructuur ontstaan welke niet in staat is om opgeloste zouten tegen te houden. Om zout tegen te houden moet de membraan-huid veel selectiever werken, zodat een goed ultrafiltratie membraan in het algemeen geen goede hyperfiltratie-membraan is, en omgekeerd. Cellulose acetaat was bijv. al vele jaren bekend als membraanmateriaal, maar

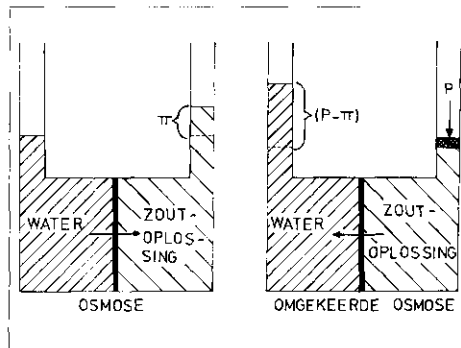
desalinettemin werd het niet voor hyperfiltratie-doeleinden gebruikt. De ontdekking door Loeb en Sourirajan [4, 5] in 1960 van de gietstroop cellulose acetaat/acetone/formamide en water in het coagulatiebad maakte het echter mogelijk membranen met een hoge flux én hoge zoutretentie te maken. Deze cellulose acetaat membranen bezitten een uiterst dunne compacte toplaag van ongeveer 2000 Ångstrom dik, welke in staat is opgeloste zouten tegen te houden. Deze 'skin' ontstaat door een snelle initiële verdamping van acetone aan het grensvlak met lucht. Onder de toplaag bevindt zich een poreuze schuimstructuur welke gemakkelijk water doorlaat en welke voor de mechanische sterkte van het membraan zorgt.

Het is bovengenoemde combinatie van factoren die uiteindelijk beslist in hoeverre van een bepaald polymeer commercieel interessante membranen kunnen worden gemaakt. De ontwikkeling van nieuwe membranen wordt dan ook niet zozeer geremd door een tekort aan verschillende soorten membraanmateriaal als wel door het uitgebreide onderzoek dat vereist is voor de keuze en optimalisatie van nieuwe polymeer/oplosmiddel/niet-oplosmiddel-systemen.

Membranprocessen

Membranen worden op verschillende wijzen toegepast en gebruikt. Enige membraanprocessen zijn bijv.: nierdialyse, piezodialyse, elektrodialyse, ultrafiltratie en hyperfiltratie (omgekeerde osmose). Op de elektrodialyse na is bij al deze processen de druk de drijvende kracht. De grootte van deze toegepaste druk kan echter verschillen van enige centimeters kwikdruk (nierdialyse) tot ruim honderd atmosfeer (hyperfiltratie). Voor de zuivering van afvalwater zijn van de genoemde processen alleen de ultrafiltratie en hyperfiltratie van belang. Onder ultrafiltratie wordt, zoals gezegd, een membraanproces verstaan waarbij relatief grote molekulen en ionen (eiwitten, koolhydraten, e.d.) door het membraan worden tegengehouden, terwijl bij hyperfiltratie ook opgeloste zouten worden tegengehouden. Indien een zoutoplossing door een voor zout impermeabel membraan van water is gescheiden, bestaat er een osmotisch drukverschil over het membraan ($\Delta\pi$), waardoor osmose zal optreden, d.w.z. er vindt een watertransport plaats van de waterfase naar de zoutoplossing. Wanneer echter de zoutoplossing onder een druk Δp wordt gebracht, welke groter is dan $\Delta\pi$ zal, door omkering van de drukgradient, ook de transportrichting van het water worden omgekeerd (afb. 3).

In het algemeen geldt dat de flux (J_w),



Afb. 3 - Principe van hyperfiltratie (omgekeerde osmose).

d.w.z. de hoeveelheid water die het membraan per tijdseenheid passeert ($\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{uur}$) evenredig is met het effectieve drukverschil ($\Delta p - \Delta\pi$) over het membraan (5-7):

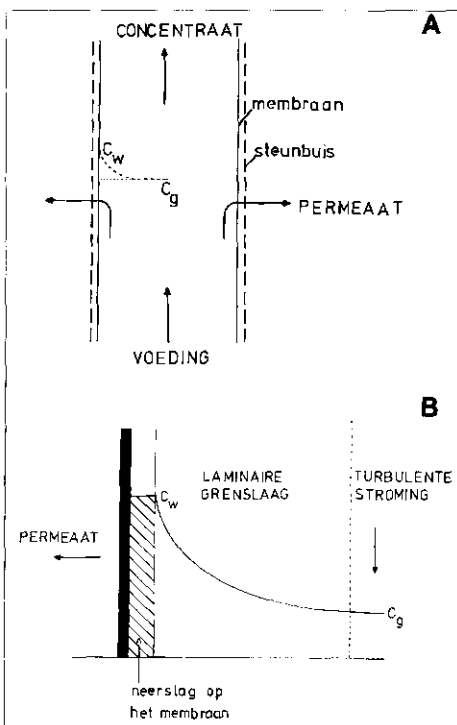
$$J_w = K (\Delta p - \Delta\pi) \quad (1)$$

De grootte van K hangt onder meer af van het membraanmateriaal, de membraandikte (hoe dunner het membraan des te groter wordt K) en of het membraan asymmetrisch dan wel homogeen is.

De grootte van de benodigde druk hangt dus af van $\Delta\pi$, m.a.w. de hoeveelheid zout in de voeding.

Voor brak water (ongeveer 5000 ppm) bedraagt $\Delta\pi$ ongeveer vier atmosfeer, terwijl $\Delta\pi$ voor zeewater ongeveer 25 atmosfeer is. Bij ultrafiltratie kan $\Delta\pi$ daarentegen verwaarloosd worden, omdat

Afb. 4 - Concentratiegradiënt aan het grensvlak membraan/voeding: (A) concentratie polarisatie, (B) vervuiling.



de laag moleculaire stoffen vrij kunnen passeren, zodat daar bij lagere drukken gewerkt kan worden.

Alhoewel de toegepaste druk een belangrijke kostenfactor vormt, zijn de grootte van flux en retentie bepalend voor de efficiency van het proces. Onder de retentie ('rejection' in de Engelse literatuur) wordt verstaan het percentage opgeloste componenten welke door het membraan worden tegengehouden ('rejected'). Voor de meting hiervan wordt voor zouten meestal uitgegaan van de geleidbaarheid van voeding en filtraat. De grootte van de retentie is voor ieder zout weer verschillend, terwijl zowel de retentie als de flux toenemen als de druk toeneemt.

Zuivering van afvalwater door een membraanproces zal aantrekkelijker worden als de benodigde druk laag is en flux en retentie hoog zijn.

Een belangrijk voordeel van ultrafiltratie t.o.v. andere behandelingswijzen betreft het feit dat de afvalwaterstroom alleen wordt ingedikt. Waardevolle stoffen kunnen dus onveranderd worden teruggewonnen in tegenstelling tot bijv. technieken als flocculatie of technieken waarbij hogere temperaturen vereist zijn.

Concentratie polarisatie en vervuiling

Bij ontzouting door middel van een omgekeerd osmose proces passeert water met een lagere zoutconcentratie dan in de voeding het membraan. Als gevolg hiervan zal de zoutconcentratie aan het grensvlak membraan/voeding toenemen.

In de stationaire toestand bestaat een evenwicht tussen convectief zouttransport naar de wand en de terugdiffusie van het zout (afb. 4). Het optreden van concentratie polarisatie heeft in de praktijk drie nadelen:

1. Toename van de zoutconcentratie aan het membraanoppervlak zal een toename van het zouttransport door het membraan veroorzaken. Voor neutrale membranen is deze toename lineair met de oppervlakteconcentratie c_w ; voor ionogene membranen is deze toename van het zouttransport méér dan lineair.
2. Deze lokale concentratieverhoging kan tot verzadiging van één der opgeloste zouten leiden, hetgeen kan resulteren in een neerslag van die component op het membraanoppervlak. Als gevolg hiervan neemt de flux af. Dit verschijnsel, ook wel aangeduid met 'scale formation', treedt o.a. op in aanwezigheid van calcium of magnesium zouten. Door de pH van de voeding te verlagen wordt 'scale formation' tegengegaan.
3. De verhoging van de oppervlakteconcentratie resulteert ook in een toename van de osmotische druk, wat eveneens een afname van het watertransport door het membraan geeft.

Uit deze drie punten blijkt de efficiency van het membraanproces af te nemen als de mate van concentratie polarisatie toeneemt. De grootte van het verschijnsel concentratie polarisatie wordt uitgedrukt in de concentratie polarisatie modulus Θ , welke gedefinieerd is als de concentratie aan de wand gedeeld door de concentratie in de voeding. Hoe groot Θ is hangt af van verschillende parameters. Zo zal Θ toenemen als de retentie, de flux of de viscositeit van de oplossing toeneemt, óf als de diffusiecoëfficiënt van de opgeloste component afneemt.

In het algemeen kunnen we zeggen dat Θ afneemt als de stofoverdrachtscoëfficiënt k_s toeneemt. Dit laatste kan bijv. worden bereikt door de langstroomsnelheid te vergroten, pulsgewijs te pompen of door toepassing van een gefluidiseerd bed. Bij ultrafiltratie-processen treedt eveneens concentratie polarisatie op, ditmaal echter zonder dat dit consequenties heeft voor de osmotische druk. Het gevaar van vervuiling, d.i. het ontstaan van een dun laagje organisch materiaal op het membraanoppervlak door neerslaan of coaguleren, is daarentegen veel groter.

Vervuiling kan ondermeer gebeuren als de oplosbaarheid van hoogmoleculaire stoffen (eiwitten e.d.) wordt overschreden.

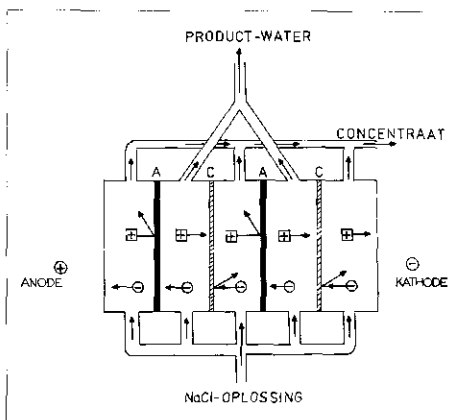
Het optreden van concentratie polarisatie en/of vervuiling betekent dat een stroom afvalwater niet onbeperkt d.m.v. een membraanproces kan worden ingedikt.

Ionogene polymeren

Als we praten over het gebruik van polymeren in verband met waterzuivering, dan moeten we ons realiseren dat ionogene polymeren ofwel polyelektrolieten in dit verband een eigen plaats innemen. Dit wordt met name veroorzaakt doordat de stabiliteit van de meeste in water aanwezige verontreinigingen haar oorsprong vindt in de aanwezigheid van ionen of ionogene groepen. We kunnen dan met name denken aan opgeloste zouten, zepen, aminozuren, eiwitten alsmede emulsies en colloïden. Het feit dat polyelektrolieten i.t.t. neutrale polymeren ook een elektrische interactie vertonen met de meeste opgeloste stoffen, heeft tot gevolg dat polyelektrolieten andere toepassingen op het gebied van de waterzuivering mogelijk maken dan ongeladen polymeren.

Polyelektrolieten worden al sinds vele jaren gebruikt, zowel bij de behandeling van industrieel en huishoudelijk afvalwater als bij het bereiden van goed drink- of proceswater.

De van oudsher bekendste groep wordt gevormd door de ionenwisselaars. Aan het begin van deze eeuw werd vooral klei —



Afb. 5 - Vloeistofstroming en ionentransport bij elektro-dialyse.

een natuurlijke zeoliet — gebruikt voor het ontharden van water. Later werden synthetische ionenwisselaars ontwikkeld, waarvan met name de gesulfoneerde- en de gequaterniseerde ammonium-polystyreen harsen bekend zijn geworden (8, 9). Beide typen harsen worden gebruikt bij het demineraliseren van water.

Het toepassingsgebied van deze groep wordt echter beperkt doordat de ionenwisselaarbedden geregeld geregenereerd moeten worden om weer in de oorspronkelijke staat te worden gebracht. Een tweede toepassing van polyelektrolieten bij het zuiveren van afvalwater wordt gevormd door de zogenaamde flocculanten. Gesuspendeerde materialen en colloïdale deeltjes kunnen d.m.v. coagulatie en sedimentatie uit het water worden verwijderd. In sommige gevallen gebeurt deze uitvloeking spontaan. Meestal echter worden deze deeltjes gestabiliseerd door een oppervlaktelading, of gaat de vlokking zeer langzaam. Wanneer nu bijvoorbeeld een emulsie of colloïd een negatieve oppervlaktelading bezit, zal door toevoeging van positief geladen (kationische) polymeren de flocculatie sterk versneld worden. De gevormde conglomeraten worden vervolgens door sedimentatie uit het afvalwater afgescheiden.

De laatste in opkomst zijnde toepassing van polyelektrolieten binnen het gebied van de afvalwaterbehandeling, zijn membranen. Ionogene membranen kunnen op drie verschillende manieren worden gebruikt:

1. Elektro-dialyse (7, 10)

Bij deze toepassing bewegen positieve en negatieve ionen zich onder invloed van een elektrisch veld in tegengestelde richting, waarbij elke ionsoort op zijn weg naar de elektrode een membraan met gelijke lading tegenkomt (afb. 5).

In Nederland wordt deze techniek o.a. nog toegepast bij de bereiding van natron-

loog uit een NaCl-oplossing. De hoge energiekosten en vervuilingsproblemen staan echter toepassing van elektro-dialyse voor zuivering van industrieel afvalwater op grote schaal in de weg.

2. Omgekeerde osmose en ultrafiltratie

Voor het gebruik van ionogene membranen voor ultrafiltratie en omgekeerde osmose geldt in grote lijn hetzelfde als voor ongeladen membranen.

Een belangrijk verschil betreft echter de wijze waarop het ontzoutingsmechanisme werkt. Ionogene membranen bezitten in de polymeer-matrix immobiele positieve of negatieve groepen. Als gevolg van het aangelegde drukverschil verdelen de mobiele ionen, dus de tegenionen én de overmaat zout zich niet homogeen over het membraan en de oplossing. Op het grensvlak membraan/voeding ontstaat hierdoor een potentiaalsprong ('DONNAN'-potentiaal) waardoor afhankelijk van de membraanlading, positieve of negatieve ionen het membraan niet kunnen binnendringen. Door de eis van elektroneutraliteit zullen nu ook de negatieve of positieve ionen in de voeding achterblijven. Door dit mechanisme kan een ionogeen membraan dus geladen deeltjes tegenhouden terwijl ongeladen deeltjes, mits klein, kunnen passeren. Ongeladen membranen werken daarentegen via een soort 'zeef'-mechanisme, waardoor naast de ionogene bestanddelen van het afvalwater óók de neutrale molekulen worden tegengehouden. Welk type membraan het best gebruikt kan worden zal dus afhangen van de samenstelling van het afvalwater.

3. Piezodialyse (11)

Piezodialyse is het nieuwste membraanproces en dateert van 1966. Piezodialyse membranen hebben in tegenstelling tot de onder 1) en 2) genoemde membranen twee verschillend geladen ionogene groepen in de polymeermatrix en wel zodanig, dat het membraan positief en negatief geladen domeinen bezit, die even groot zijn en zich over de hele dikte van het membraan uitstrekken.

Piezodialyse membranen zijn daardoor wé permeabel voor zouten, immers ieder domein is permeabel voor één ionsoort. Het gevolg van dit ontzoutingsmechanisme is dat de voeding steeds minder zout gaat bevatten.

Deze membranen zijn echter nog een laboratorium-curiositeit en lijken voorlopig nog niet op de markt te zullen komen.

Toepassingen

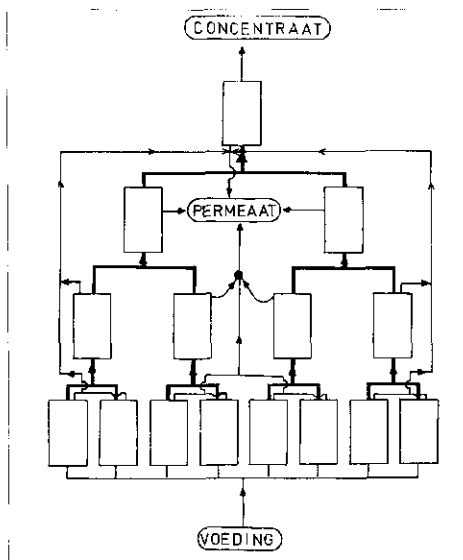
Omdat membranen bestaan uit een dunne polymeerfilm, welke onvoldoende sterkte

bezit om de procesdruk te kunnen weerstaan, worden ze op een poreuze drager aangebracht. Ten einde de installatie zo compact mogelijk te maken, zijn verschillende geometrieën onderzocht: tubulaire- of buisvormige systemen, vlakke membraansystemen, spiraalgewonden systemen en z.g. hollow fibers. De laatste bestaan uit fijne ongesteunde polymeervezels welke in bundels van miljoenen stuks bijeenliggen, waardoor een zeer groot membraanoppervlak per volume-eenheid ontstaat. Omdat deze vezels echter zeer dicht bij elkaar liggen en de langsstromingsnelheid van de voeding gering is, zou dit systeem bij gebruik voor afvalwaterzuivering zeer snel vervuilen; hetzelfde geldt voor de spiraalgewonden systemen. Deze twee systemen kunnen daardoor niet gebruikt worden voor afvalwaterzuivering. Tubulaire en (in mindere mate) vlakke systemen worden beide wél voor ultrafiltratie-processen gebruikt. Bij de buisvormige systemen wordt de voeding door de gesteunde membraanbuis geleid, zoals in afb. 4a is weergegeven. De membraan-buizen zitten in bundels van zeven stuks bij elkaar ('module'), kunnen tot zes meter lang zijn en hebben een diameter van ongeveer een centimeter. Ten einde het totale membraanoppervlak te vergroten worden een aantal modules in serie geschakeld. De snelheid van de voeding zal echter kleiner worden naarmate er meer water aan de voeding wordt onttrokken.

Om dit zoveel mogelijk te voorkomen worden membraaninstallaties in de vorm van een kerstboom opgebouwd (afb. 6). De toepassingsmogelijkheden van membraanprocessen kunnen het best worden geïllustreerd aan de hand van enige voorbeelden:

1. Zuivering van vruchtwater, d.i. afvalwater dat bij de verwerking van aardappels tot aardappelmeel ontstaat (12). Door het hoge BOD-getal (vooral door eiwitten) van dit vruchtwater zou bij directe lozing een enorme vervuiling van het oppervlaktewater ontstaan. Een speciaal facet betreft het feit dat dit vruchtwater alleen tijdens de aardappelrooi-periode (ongeveer vier maanden) wordt geproduceerd. Door gebruik te maken van een ultrafiltratie proces wordt het vruchtwater ingedikt, waarna dit concentraat via een sproeidroger wordt gedroogd. Het is daarnaast mogelijk het vruchtwater te behandelen m.b.v. flocculanten waardoor echter eiwit van veel mindere kwaliteit wordt verkregen.

2. Een ander groot afvalwaterprobleem betreft de lozing van wei, een afvalproduct van kaasfabrieken. Ultrafiltratieprocessen zijn ook voor deze toepassing uitgebreid



Afb. 6 - Schematische voorstelling van een ultrafiltratieproces op industriële schaal.

onderzocht (13-16). In Nederland onderzocht met name het Nederlands Instituut voor Zuivel Onderzoek (NIZO) sinds enige jaren de behandeling van wei d.m.v. een ultrafiltratie-proces.

3. Om te kunnen voldoen aan de toenemende vraag naar drinkwater zijn we in Nederland steeds meer aangewezen op oppervlaktewater (3). Onderzoek van het Keuringsinstituut voor Waterleiding-artikelen (KIWA) heeft uitgewezen dat met zuiveringsprocessen, welke een omgekeerde osmose installatie bevatten de kwaliteit van het drinkwater aanzienlijk kan worden verbeterd t.o.v. de bestaande technieken. Als we in de toekomst aangewezen zullen zijn op Rijn- of IJsselmeerwater voor onze drinkwaterbereiding, is dit een belangrijke konklusie, immers deze wateren bevatten naast normale zouten o.a. ook organische verontreinigingen, zware metalen, bacteriën, virussen, reuk- en smaakstoffen welke alle door een hyperfiltratie-proces worden verwijderd.

4. Buiten de bovengenoemde toepassingen kunnen nog vele andere worden genoemd, zoals het concentreren van eiwit (17), ontharden van water (13), zuivering van olie-emulsies e.a.

Een alternatief

Uit het bovenstaande zal duidelijk zijn dat ook de membraantechnologie geen pasklaar antwoord heeft op alle problemen die zuivering van afvalwater met zich mee kan brengen. Wel is duidelijk dat ultrafiltratie-processen enige belangrijke voordelen bezitten op andere methoden van waterzuivering. Een belangrijk punt betreft het feit dat ultrafiltratie een niet-destructieve-techniek is, m.a.w. waardevolle

opgeloste stoffen kunnen zonder waardeverlies (vgl. bijv. eiwit en gedenatureerd eiwit) worden teruggewonnen. Een tweede verschil betreft de flexibiliteit van de techniek als zodanig.

Membranprocessen zijn niet alleen interessant voor afvalwater omdat het milieu moet worden beschermd, maar doordat de membraantechnologie de laatste jaren steeds verder is ontwikkeld, kunnen membraanprocessen nu ook als onderdeel in het productieproces functioneren, bijv. bij de productie van drinkwater of wanneer een productstroom ingedikt moet worden. Voor thermisch instabiele verbindingen heeft een membraanproces het voordeel dat het proces bij kamertemperatuur kan plaatsvinden.

Ook kan het relatief kleine bedrijfsoppervlak dat nodig is voor een membraaninstallatie een belangrijk voordeel zijn.

Membranprocessen vormen een belangrijk alternatief voor ondernemingen die geen mogelijkheden hebben of krijgen om hun afvalwater biologisch te zuiveren. De aardappelmeelindustrie bijvoorbeeld zou uitgebreide en zeer kostbare investeringen moeten doen in de sector biologische zuivering om de piekbelasting gedurende vier maanden per jaar te kunnen verwerken, terwijl de installatie de rest van het jaar nauwelijks gebruikt zou worden en slechts ruimte in beslag neemt. Bovenstaande beschouwing moet leiden tot de konklusie dat membraanprocessen als alternatieve mogelijkheid voor afvalwaterzuivering beslist niet mogen worden vergeten. Vooral voor industriële toepassingen lijkt ultrafiltratie een uiterst geschikte techniek.

Literatuur

1. Fohr, P. G.; *Afvoer en zuivering van industrieel afvalwater*. In: Milieubalans van Nederland, J. J. Mulckhuysen, p. 171 e.v. Van Gorkum/Intermediair, Amsterdam (1972).
2. Koot, A. C. J.; *Behandeling van afvalwater*, uitgev. Waltman, Delft (1975).
3. Kuiper, D.; H₂O (6) 1973, p. 104.
4. Loeb, S. en Sourirajan, S.; UCLA Dept. of Engineering Report no. 60-60 (1960).
5. Sourirajan, S.; *Reverse osmosis*. Logos Press Ltd. (1970).
6. Kesting, R. E.; *Synthetic polymeric membranes*, McGraw-Hill Book Co., New York (1971).
7. Loeb, S. en Lacey, R. E.; *Industrial processing with membranes*, Wiley-Interscience, New York (1972).
8. Helffrich, F.; *Ion exchange*, McGraw-Hill Book Co., New York (1962).
9. Arden, T. V.; *Ion exchange in the treatment of water supplies*. In: Water treatment in the seventies. Proc. symp. organized by the Society for Water Treatment and Examination and the Water Research Association (1970).

• slot op pagina 458

Zuivering van industrieel afvalwater d.m.v. membraan-processen

10. Kobus, E. J. M. en Heertjes, P. M.; *H₂O*, 5 (1972), 220.
11. Leitz, F. B. and Shorr, J. 4th Int. Symp. on fresh water from the sea, Vol 4 (1973), 451.
12. Porter, W. L.; in: *Membrane science and technology*. J. E. Flinn, editor. Eastern Utilization research and development division, Philadelphia (1970).
13. Madsen, R. F.; *Reverse osmosis, a method of solving waste water problems*. International congress on industrial waste water, Stockholm (1970).
14. Peri, C., Pompei, C. en Rosi, F.; *J. Food Sc.* Vol. 38, 135-140 (1973).
15. McDonough, F. E. and Mattingly, W. A.; *Food technology* Vol 24, February, 88-91 (1970).
16. Proc. Int. Symp. separation processes by membranes, ion-exchange and freeze-concentration in food industry, Parijs (1975).
17. Lowe, E. Durkee, E. L. Merson, R. L., Ijichi, K. en Cimino, S. L.; *Food technology* Vol. 23, June, 45-54 (1969).

