Theorie en modellering van membraanfiltratie

Inleiding

Met de basisvergelijkingen (massa-balansen en vergelijkingen voor de water- en zoutflux) zijn de grondbeginselen van de membraanfiltratie vastgelegd. Door een nadere uitwerking van de theorie, met theoretische vergelijkingen voor diffusief massatransport (Wet van Fick) en hydraulische verliezen (Darcy-Weisbach) is een basis gelegd voor een model waarin de prestaties van een membraanfiltratie-installatie kunnen worden gesimuleerd.

IR. C. W. AEIJELTS AVERINK
TU Delft

IR. I. T. DIJKSTRA
TU Delft

PROF. IR. J. C. VAN DIJK
TU Delft

Samenvatting

In het kader van een afstudeerproject is een analytisch rekenmodel ontwikkeld waarmee de prestaties van een willekeurige membraanfiltratie installatie kunnen worden gesimuleerd. Het model is gebaseerd op theoretische basisvergelijkingen voor diffusief massatransport (Wet van Fick) en hydraulische verliezen (Darcy-Weisbach), waarbij de stofoverdracht in de laminaire grenslaag is gemodelleerd aan de hand van empirische Sherwood-Reynolds relaties. Het model is in eerste instantie gebruikt om de invloed van de brijn/produktverhouding in de module te simuleren. Deze blijkt een grote invloed te hebben op de prestaties (produktdebiet en concentratie in relatie tot de aangebrachte voedingsdruk).
Met het rekenmodel kan niet alleen de gebruikelijke 'kerstboom'-schakeling worden doorgerekend, maar ook alternatieven zoals het toepassen van een aanjager (booster) of recirculatie.
Het onderzoek in dit rapport is toegespitst op brakwaterontzouting. Een identiek onderzoek kan worden verricht op de processen van nanofiltratie en zeewater-ontzouting. Het voornaamste verschil tussen deze toepassingen is het membraan-type en de benodigde voedingsdruk.

Basisvergelijkingen:
Massa balans water:

$$Q_F = Q_B + Q_P$$

Massa balans zout:

$$Q_F\, C_F = Q_B\, C_B + Q_P\, Q_C$$

met:
Q = debiet [m^3/s]
C = concentratie [g/m^3]

Waterflux:

$$F_w = \frac{Q_s}{A_m} = \frac{K_w}{\mu}\,(\Delta P - \Delta\pi)$$

Zoutflux:

$$F_s = \frac{Q_s}{A_m} = K_s(t)\,\Delta C$$

met:
F_w = waterflux [$m^3/m^2\,s$]
F_s = zout flux [$g/m^2\,s$]
K_w = membraan-permeabiliteitconstante [m/s bar]
K_s = membraan-permeabiliteitconstante [m/s]
$\Delta\pi$ = osmotisch drukverschil [bar]
A_m = membraan-oppervlak [m^2]
μ = absolute viscociteit [Ns/m^2]

De water- en zoutflux zijn temperatuur-afhankelijk. De invloed van de temperatuur op de waterflux wordt bepaald door de viscositeit (hogere temperatuur -< hogere flux). De zoutflux wordt beïnvloed door de afhankelijkheid van de temperatuur van de diffusie-coëfficiënt (zie paragraaf diffusie-coëfficiënt).

Massatransport in membranen

Transport door diffusie is het belangrijkste mechanisme in het membraanfiltratie-proces. Met behulp van de diffusie vergelijkingen is het mogelijk om het proces te beschrijven en inzicht te krijgen in het verschijnsel concentratie-polarisatie.

Concentratie-polarisatie

Het massatransport wordt niet alleen bepaald door de eigenschappen van het membraan, maar ook door de hydraulica van de stroming.
Bij het membraanfiltratie-proces worden opgeloste zouten, onder invloed van de waterflux door het membraan, door convectie naar het membraanoppervlak getransporteerd. Door de selectiviteit van het membraan worden echter de meeste zouten tegengehouden. In de directe omgeving van het membraan is de vloeistofstroom laminair. Door de aanwezigheid van deze laminaire grenslaag is er vrijwel geen uitwisseling met de bulk van de vloeistof en neemt de concentratie aan de hoge druk zijde van het membraan sterk toe (afb. 1). Dit verschijnsel wordt concentratie-polarisatie genoemd.
Hoewel er geen convectief transport van zouten kan plaatsvinden zullen de zouten toch afgevoerd moeten worden. Dit transport van zouten van het membraan-oppervlak naar de bulk van de vloeistof moet door diffusie plaatsvinden. Om dit diffusief transport mogelijk te maken is er een drijvende kracht noodzakelijk. In dit geval is dat de concentratie-gradiënt die ontstaat door de concentratie-polarisatie.

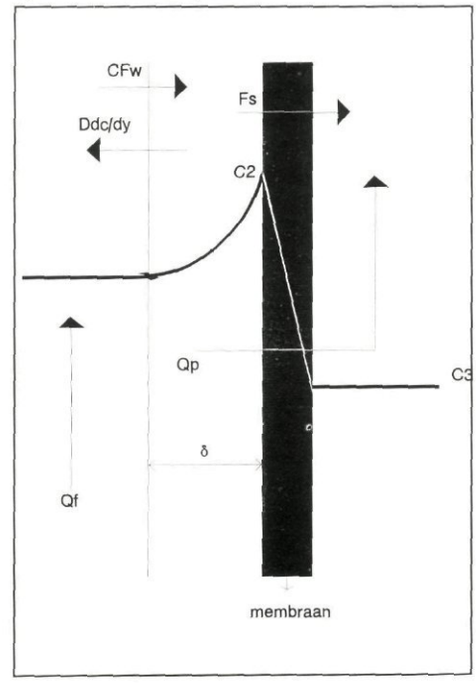
De verhoogde concentratie aan het membraanoppervlak beïnvloedt het filtratieproces op twee manieren:
- het drukverschil, de drijvende kracht in het membraanproces, wordt gereduceerd door de toename in osmotische druk. Dit leidt tot een afname in de waterflux;
- de zoutflux neemt toe door het toegenomen concentratie-verschil.

Bovenstaande verschijnselen zullen leiden tot een toename van de produktconcentratie.

Diffusie

Diffusie is transport van massa, waarbij de drijvende kracht een concentratie-gradiënt is. Dit wordt weergegeven door de *Wet van Fick*, waarin de flux (massadebiet per oppervlakte) evenredig is aan een concen-

Afb. 1 - Concentratie-polarisatie.



tratie-gradiënt vermenigvuldigd met een diffusiecoëfficiënt.

$$F_i = -D_i \frac{DC_i}{dy}$$

Uit afbeelding 1 kan eenvoudig de massabalans voor massa transport in membraanprocessen worden afgeleid.

$$F_s = F_w C - D \frac{dC}{dY}$$

De zoutflux is dus gelijk aan het verschil tussen de totale zoutstroom naar het membraanoppervlak en het aandeel van de zoutstroom dat naar de bulk van de vloeistof terugdiffundeert.

Weerstand van massatransport
Door integratie van de massabalans

$$F_s = F_w C - D \frac{dC}{dY}$$

wordt de volgende vergelijking voor de concentratie-polarisatie gevonden:

$$\frac{C_2 - C_3}{C_1 - C_3} = \exp\left(\frac{F_w \delta}{D_1}\right)$$

met ∂ de dikte van de grenslaag.
Met een massatransport coëfficiënt k waarvoor geldt

$$k = \frac{D_i}{\delta}$$

en verwaarlozing van C_3 (immers $C_3 << C_1 < C_2$) kan de vergelijking worden vereenvoudigd tot

$$\frac{C_2}{C_1} = \exp\left(\frac{F_w}{k}\right)$$

met C_2/C_1 als de concentratie-polarisatie. De factor C_2/C_1 wordt uitgedrukt als β. Met behulp van bovenstaande vergelijking kan β alleen berekend worden als F_W en k bekend zijn.
F_W kan voor een gegeven membraan worden bepaald als de condities (K_w, ΔP, $\Delta\pi$) bekend zijn.
De coëfficiënt k is te bepalen met de volgende vergelijking

$$k = \frac{Sh\ D_i}{d_h}$$

met:
Sh = Sherwood getal [-]
d_h = hydraulische diameter membraankanaal [m]

Het (dimensieloze) Sherwood getal geeft de verhouding aan tussen het convectief massatransport langs het membraan en het moleculair massatransport door het membraan. Voor het Sh-getal zijn er door verschillende auteurs empirische relaties opgesteld. Deze relaties hebben als overeenkomst dat het Sh-getal als een functie van het Reynolds- en Schmidt-getal is geformuleerd.

In het onderzoek zijn van zes auteurs de Sherwood-relaties onderling vergeleken en beproefd op een aantal bestaande membranen. Hieruit is gebleken dat de relatie zoals die door Schock & Miquel is gevonden de beste resultaten geeft:

$$Sh = 0{,}065\ Re^{0{,}875}\ Sc^{0{,}25}$$

Het getal van Reynolds (Re) en van Schmidt (Sc) zijn als volgt gedefinieerd:

$$Re = \frac{\varrho v d_h}{\mu}$$

$$Sc = \frac{\mu}{\varrho D_i}$$

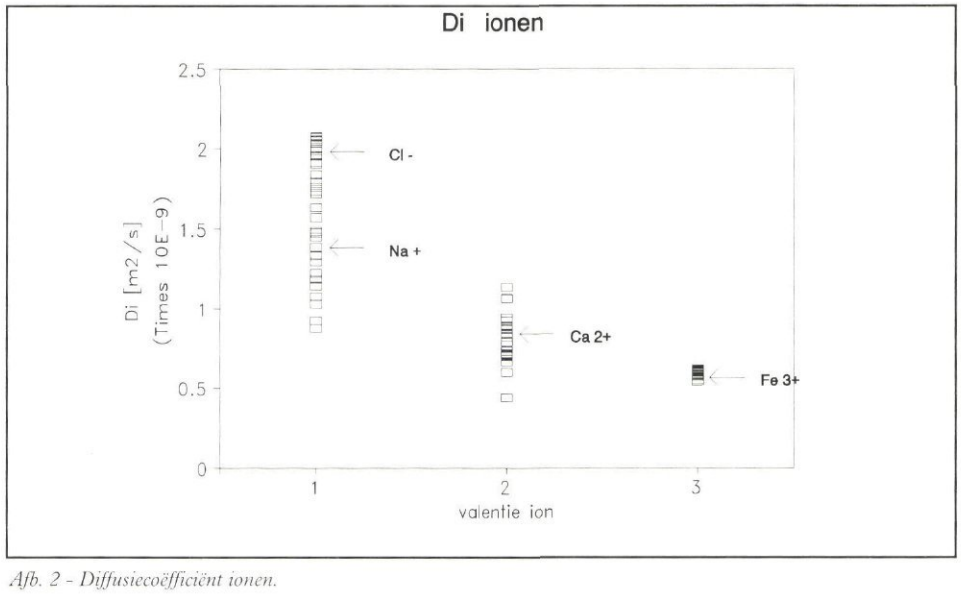
met v als de snelheid [m/s] in het membraankanaal.

Diffusiecoëfficiënt
Om met het diffusiemodel het massatransport door het membraan te bepalen moet de diffusiecoëfficiënt D_i van de desbetreffende stof bekend zijn.
Er moet onderscheid gemaakt worden tussen de diffusiecoëfficiënt van zouten en van organische stoffen.

De diffusiecoëfficiënt van zouten:
De diffusiecoëfficiënt van ionen in een waterige oplossing kan worden berekend met de vergelijking van Nernst:

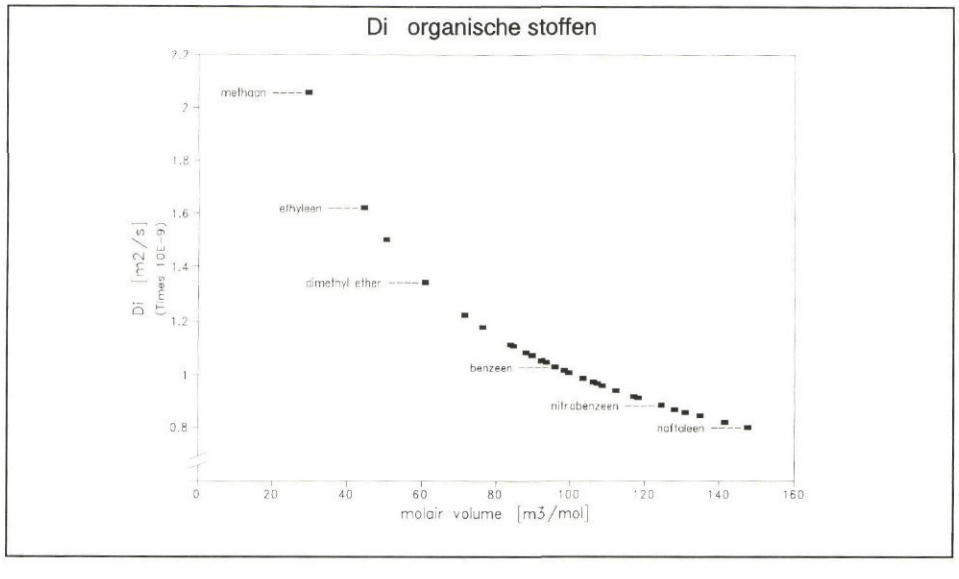
$$D_i = l_i \frac{R_g T}{z_i F^2}$$

met:
l_i = equivalente geleidbaarheid [$10^{-4} m^2$ S/mol]. De waarde van l_i kan uit handboeken worden gehaald
R_g = gasconstante = 8,3143 [J/°K mol]
T = temperatuur [°K]



Afb. 2 - Diffusiecoëfficiënt ionen.

Afb. 3 - Diffusiecoëfficiënt organische stoffen.



z_i = lading van ion i [-]
F = Faraday getal = 96,500 [C]

Voor Na^+ wordt D_i bijvoorbeeld: D_i,Na = $50{,}1 \cdot 10^{-4} \cdot (8{,}3143 \cdot 298{,}15)/(1 \cdot 96500^2) = 1{,}33 \cdot 10^{-9}$ [m^2/s]

De diffusiecoëfficiënt van organische stoffen:
Om D_i voor organische stoffen te bepalen wordt gebruik gemaakt van de vergelijking zoals die door Wilke-Chang is opgesteld:
met:
M_W = molair gewicht [g/mol]
T = temperatuur [°K]
μ = absolute viscositeit [Ns/m^2]
V_i = molair volume [m^3/mol]

Voor ionen is het molair volume eenduidig bepaald. Voor organische verbindingen kan het LeBas molair volume worden gebruikt. Deze methode houdt in dat het molair volume van een verbinding kan worden bepaald door aan de afzonderlijke atomen een waarde toe te kennen die afhangt van de eigenschappen van het atoom (H, O, C, etc.) en de verbinding (dubbele binding, ringstructuur, etc.).

In afbeelding 2 wordt de afhankelijkheid van D_i gegeven ten opzichte van de lading van het ion. Hieruit blijkt dat D_i afneemt bij een toenemende lading.
De relatie tussen het molair volume en D_i voor organische verbindingen blijkt uit afbeelding 3.

Brijn/produktverhouding (Q_B/Q_P-verhouding)
Als reeds vermeld, worden met het transport van water naar het membraanoppervlak ook opgeloste stoffen meegevoerd.
Is de afvoer van deze stoffen uit de grenslaag kleiner dan de aanvoer dan zal zich op het membraan een vuillaag afzetten. Deze vuillaag kan bestaan uit:
- anorganische zouten, waarvan het oplosbaarheidsprodukt is overschreden, en hydroxyden. Dit proces wordt aangeduid met 'scaling';
- organische stoffen. Als er teveel organische stoffen in het water aanwezig zijn, kunnen deze stoffen zich op het membraan afzetten. Dit proces wordt aangeduid met 'fouling';
- micro-organismen. Als de eerder genoemde organische stoffen zich afzetten ontstaat er een voedingsbodem waarmee micro-organismen zich kunnen voeden.

Door de vervuiling van het membraan treedt een daling van de flux op, die zelfs 50% of meer van de oorspronkelijke flux kan bedragen. Een aanzienlijke vermindering van de vervuiling kan worden bereikt door een goede voorbehandeling van het voedingswater en/of het beheersen van de belangrijkste procesvariabelen.

Een veelvuldig gebruikte methode om de membraanvervuiling en het effect van concentratie-polarisatie tegen te gaan is een hoge stroomsnelheid van het water langs het membraan te garanderen. Dit kan worden bereikt door een minimale brijndebiet te eisen, wat inhoudt dat het brijndebiet een minimale waarde moet hebben, gerelateerd aan het produktdebiet van het laatste element in het drukvat.
Als voorbeeld kan de eis worden gesteld dat het brijndebiet minimaal 5 maal de geproduceerde hoeveelheid van het laatste element van een drukvat met 6 elementen moet zijn (afb. 4):
Voor een membraanfiltratieproces wordt gestreefd naar een zo hoog mogelijk recovery, bijvoorbeeld 80%. Als de gewenste produktiehoeveelheid ook bekend is (bijvoorbeeld 10 m^3/h) kan eenvoudig uit de massabalansen het voedingsdebiet Q_F en het brijndebiet Q_B worden bepaald (met $Q_{P,T}$ = de produktie van een drukvat gevuld met 6 membraanmodules):

Gegeven:
$\gamma = 80\%$
$Q_{P,T} = 10\ m^3/h \rightarrow Q_F = 10/0{,}8 = 12{,}5\ m^3/h$
$Q_B = Q_F - Q_{P,T} = 2{,}5\ m^3/h$

Uit het voorbeeld volgt voor de Q_B/Q_P-verhouding (als voor het laatste element een Q_P wordt aangenomen van 1,4 m^3/h, wat een reële schatting is als wordt uitgegaan van brakwaterontzouting met 1 drukvat):

$Q_B = 2{,}5/1{,}4 = 1{,}8 \cdot Q_P$

Als aan de eis voor Q_B moet worden voldaan moet het brijndebiet echter minimaal $5 \cdot 1{,}4 = 7\ m^3/h$ bedragen. Omdat de druk en de membraaneigenschappen niet veranderen, verandert $Q_{P,T}$ niet en volgt:

Gegeven:
$Q_{P,T}$ = 10 m^3/h
Q_B, EIS = 7 $m^3/h \rightarrow Q_F = 10 + 7 = 17\ m^3/h$
γ = 58,8 %

Uit dit voorbeeld blijkt dat de eis voor de Q_B/Q_P-verhouding maatgevend is ten aanzien van de maximale recovery van een drukvat. Als de eis $Q_B \geqq 5Q_P$ buiten beschouwing wordt gelaten kan met 6 elementen een recovery van 80% worden gehaald. Met deze eis wordt de recovery gelimiteerd tot zo'n 60%.

Druk
Een van de belangrijkste parameters in het membraanfiltratieproces is de nettodruk over het membraan. Deze netto-druk volgt uit:

netto-druk = voedingsdruk - osmotische druk - drukverliezen

De voedingsdruk wordt door hogedrukpompen op het systeem aangebracht. Het is dus een variabele, die door de systeembeheerder kan worden aangepast en die kan worden gebruikt om het proces (de produktie!) te controleren.

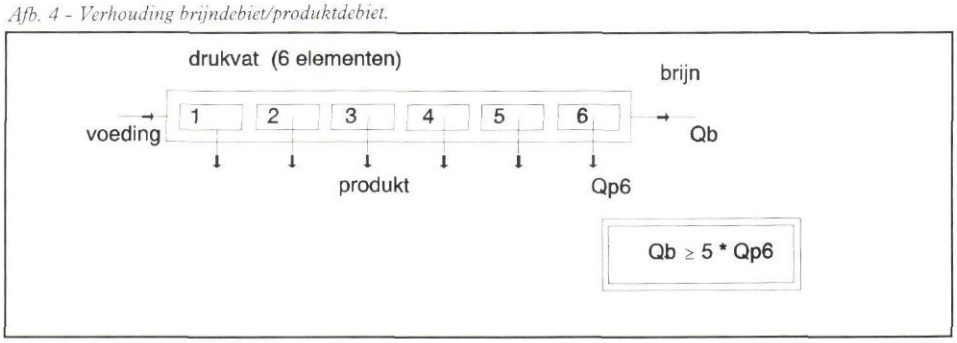
De osmotische druk kan worden bepaald als de zoutconcentratie en het type zout bekend is. Er bestaat een lineaire relatie tussen de osmotische druk en de concentratie van een zout i (afgeleid door Van 't Hoff, 1885):

$$\pi_i = \frac{\beta C_i RT}{M_{w,i}}$$

met β als coëfficiënt die overeenkomt met het aantal atomen waaruit het zout bestaat. Als voorbeeld wordt de osmotische druk voor zeewater, met een concentratie aan zout (NaCl) van 35.000 [g/m^3] berekend:

β = 2
C = 35.000 [g/m^3]
R = 8,3143 [J/°K mol]
T = 298,15 [°K]
M = 58,45 [g/mol]
Hieruit volgt: π = 2.970.000 [N/m^2] = 29,7 [bar]

Afb. 4 - Verhouding brijndebiet/produktdebiet.



De derde term in de vergelijking voor de netto-druk is het drukverlies, die kan worden weergegeven door de algemene vergelijking voor drukverlies in een kanaal:

$$dp = \lambda \frac{p \cdot v^2}{2} \cdot \frac{L}{d_h}$$

met:
λ = weerstandscoëfficiënt [-]
ϱ = dichtheid [kg/m^3]
v = snelheid [m/s]
L = membraan-kanaallengte c.q. lengte membraan-sheet [m]
d_h = hoogte membraankanaal [m]

Ook in deze vergelijking blijkt een aantal parameters niet eenduidig te zijn bepaald. Het gaat hierbij vooral om de weerstandscoëfficiënt λ.
Voor λ blijken volgens de literatuur diverse empirische relaties te bestaan. Om een reële waarde voor het drukverlies te verkrijgen is een aantal van deze relaties onderling vergeleken.
De relatie volgens Schock & Miquel blijkt ook in dit geval het best aan te sluiten op meetgegevens van de membraanproducenten. De relatie luidt:

- voedingskanaal: $\lambda = 6{,}23\ Re^{-0{,}3}$
- permeaatkanaal: $\lambda = a\ Re^{-0{,}8}$, waarbij a varieert van 105 tot 13, afhankelijk van het type membraan.

Modellering

Met behulp van de genoemde theorieën, vergelijkingen en empirische relaties is vervolgens een rekenmodel ontwikkeld, waarbij is uitgegaan van het spiraalgewonden-membraan systeem.
De opbouw van het rekenmodel met alle randvoorwaarden en uitgangspunten is gegeven in het verslag (zie literatuur).

Toepassing model
In het onderzoek is het effect van een variërende Q_B/Q_P-verhouding nader uitgewerkt, waarbij vooral het effect op het drukverlies, op de recovery en op de concentraties wordt gespecificeerd. Hierbij zijn opstellingen met 1, 2, en 3 stages onderzocht, steeds met 6 elementen per drukvat. In de volgende paragraven wordt een indruk gegeven van de resultaten zoals die zijn verkregen met het rekenmodel voor een 1-stage opstelling.

De berekeningen zijn toegepast op een FilmTec BW30-8040 membraan (een 8 inch brakwater membraan). De startwaarden voor het rekenprogramma en de membraankarakteristieken zijn in de tabel weergegeven.

Startwaarden rekenprogramma.

voedingsdruk	25	[bar]
voedingsconcentratie	2.000	[mg/l]
watertemperatuur	25	[°C]
elementen per drukvat	6	
membraanconstante K_W	$9{,}54^{-7}$	[m/s bar]
membraanconstante K_S	$1{,}59^{-7}$	[m/s]

Optimalisatie van de brijn/produkt-verhouding: 1 stage

Druk
In afbeelding 5 wordt de drukverhouding voor het *laatste element* in het drukvat (element nr. 6) weergegeven bij verschillende Q_B/Q_P-verhoudingen.
Uit deze afbeelding volgt:
- er treedt een optimum op van de effectieve druk rond een Q_B/Q_P-verhouding van 5,0;
- voor een lage Q_B/Q_P-verhouding is de osmotische druk bepalend voor het drukverlies. Naarmate de Q_B/Q_P-verhouding wordt verhoogd wordt het aandeel van het wrijvingsverlies steeds groter.

In afbeelding 6 wordt voor een Q_B/Q_P-verhouding van 5,0 het drukverloop door het drukvat nader uitgewerkt. Uit deze afbeelding kan duidelijk de toename van de osmotische druk en het verloop van het drukverlies door wrijving worden afgelezen.

Debiet
Het produktdebiet is rechtstreeks afhankelijk van de effectieve druk, die over het membraan heerst.
Uit afbeelding 7 volgt:

- de produktie per drukvat blijft vrijwel constant ($\pm$ 10,6 m^3/h). Verhoging van de Q_B/Q_P-verhouding heeft dan ook alleen tot gevolg dat het brijndebiet toeneemt. Dit resulteert in een afname van de recovery.

In afbeelding 8 wordt voor de Q_B/Q_P-verhouding 5,0 het verloop van het debiet door het drukvat weergegeven. Duidelijk wordt dat de recovery per element toeneemt in het drukvat.

Concentratie
In afbeelding 9 worden de gemiddelde produkt- en brijnconcentraties weergegeven. De afname van de concentraties met een toenemende Q_B/Q_P-verhouding is duidelijk uit de afbeelding af te lezen.

Dit komt onder andere door de verlaging van de concentratiepolarisatie door de hogere langsstroomsnelheid.
In afbeelding 10 wordt de brijnconcentratie en de concentratie aan het membraanoppervlak (= brijnconcentratie * beta) weergegeven voor een Q_B/Q_P-verhouding van 5,0. Uit de afbeelding volgt dat de concentratie-polarisatie toeneemt in het drukvat.

Alternatieven ter verbetering van de prestaties

In het voorgaande zijn de berekeningen uitgevoerd onder standaardcondities. Het is echter mogelijk om door het toepassen van enkele kunstgrepen (recirculatie, booster) tot verbetering van de prestaties te komen.

Toepassen van een booster
In een opstelling met meerdere stages is het rendement van een tweede en eventuele derde stage beduidend lager dan de eerste stage. Het rendement (= de recovery) van die stages kan echter worden verhoogd door de voedingsdruk te verhogen m.b.v. een booster of aanjager (afb. 11).

Het verhogen van de druk levert dus een hogere flux op in de elementen van de tweede stage. Hierbij dient er uiteraard voor gezorgd te worden dat in de tweede stage nog voldaan wordt aan de minimale Q_B/Q_P-verhouding.

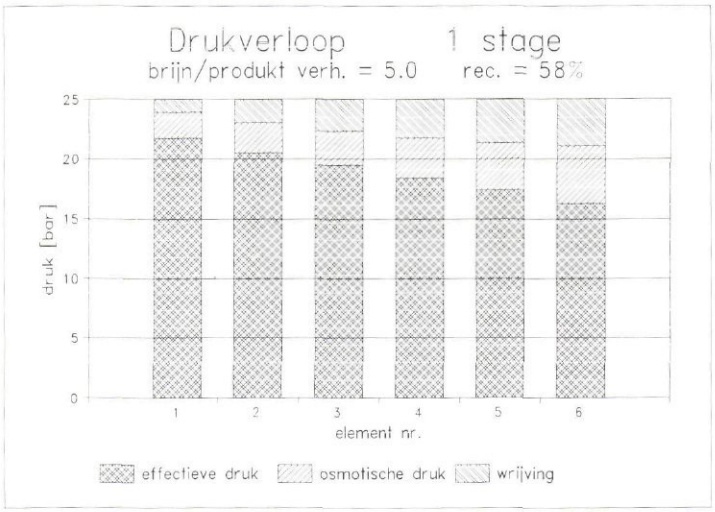
Toepassen van recirculatie
Het toepassen van recirculatie (afb. 12), waarbij een deel van de brijn gerecirculeerd wordt, is een ander alternatief om de prestaties te verbeteren.
De effecten van recirculatie op het proces zijn:
- terugvoeren van de brijn houdt in dat de concentratie van het voedingswater toeneemt. Hierdoor ontstaat een hoger concentratieverschil over het membraan en zal de zoutflux toenemen;
- de verhoogde concentratie betekent een hogere osmotische druk, waardoor de effectieve druk over het membraan afneemt. Dit geeft een lagere waterflux zodat de produktconcentratie toeneemt.
- het verhoogde debiet zorgt voor een hogere langsstroomsnelheid wat een gunstig effect (vermindering) heeft op de concentratie-polarisatie.

Andere toepassingsgebieden

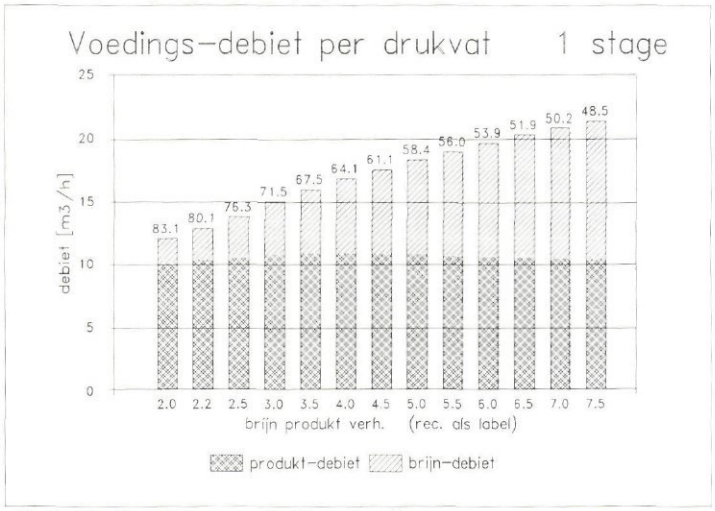
Er is uitgebreid onderzoek verricht naar de prestaties van een brakwatermembraan. Met behulp van het ontwikkelde rekenmodel is het ook mogelijk om de andere toepassingsgebieden te onderzoeken, zoals bijvoorbeeld nanofiltratie of zeewaterontzouting.

Nanofiltratie
Nanofiltratie wordt toegepast met een lage voedingsdruk (5 tot 10 bar). Als een spiraalgewonden membraan wordt toe-

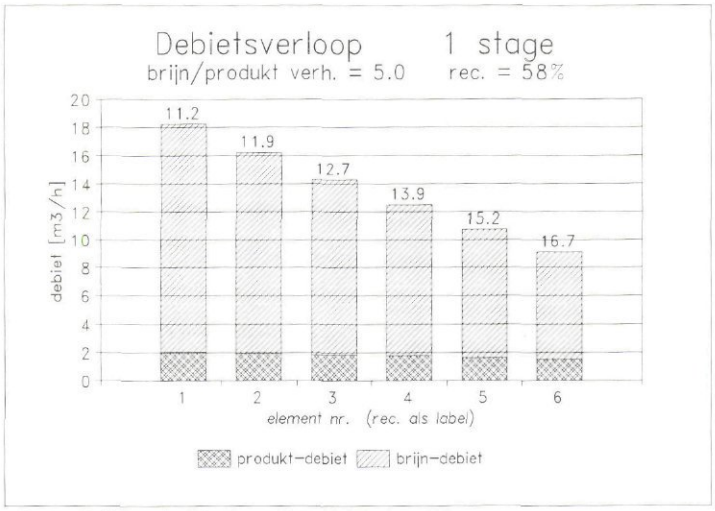
Afb. 5 - Drukverhouding versus Q_B/Q_P-verhouding.



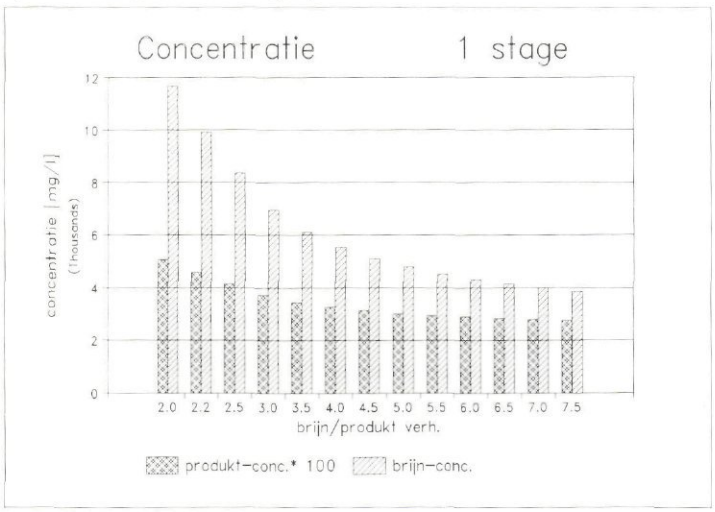
Afb. 6 - Drukverloop in een module.



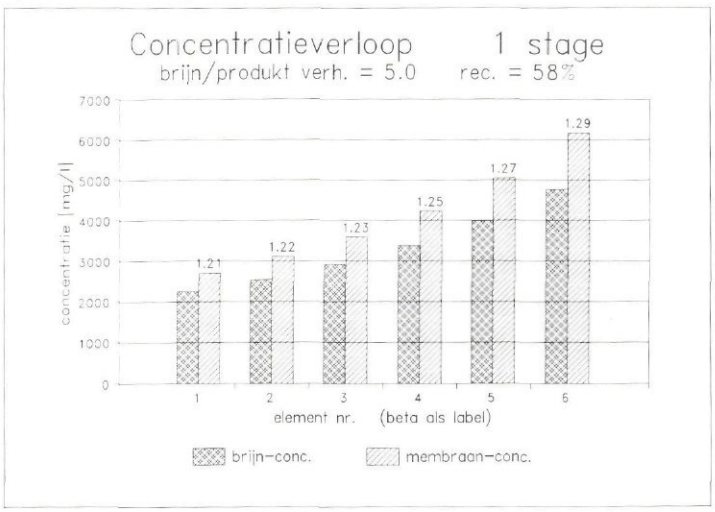
Afb. 7 - Voedingsdebiet versus Q_B/Q_P-verhouding.



Afb. 8 - Debietsverloop in een module.

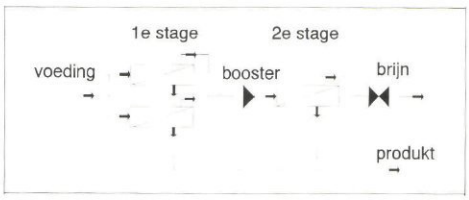


Afb. 9 - Concentratieverloop in een module.

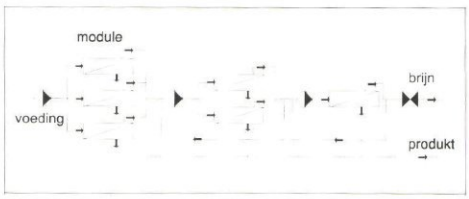


Afb. 10 - Concentratie versus Q_B/Q_P-verhouding.

gepast (met 6 elementen per drukvat) kan het drukverlies door wrijving oplopen tot 4 à 5 bar.
Als de voedingsdruk laag wordt gehouden heeft dit wrijvingsverlies tot gevolg dat de netto-druk voor de tweede stage te laag wordt (en hiermee ook de flux van de elementen in de tweede stage.) Het is zelfs mogelijk dat de netto-druk negatief wordt.
Het verhogen van de voedingsdruk heeft echter tot gevolg dat de flux van de eerste elementen verhoogd wordt. Hierdoor versnelt het foulings-proces zodat het membraan eerder moet worden schoongemaakt.
De bovengenoemde problemen kunnen op de volgende manieren worden opgelost:
- Tegendruk aan de permeaatzijde
Tegendruk aan de permeaatzijde kan



Afb. 11 - Booster.



Afb. 12 - Recirculatie.

worden gerealiseerd door een regelklep in de permeaat-afvoerleiding. De tegendruk zorgt ervoor dat met een hoge voedingsdruk kan worden gewerkt (en er voldoende druk overblijft voor de tweede stage), zonder dat de flux in de eerste elementen van de eerste stage te hoog wordt.

- Toepassen van een booster
Hierdoor wordt het wrijvingsverlies in de eerste stage gecompenseerd.
- Toepassen van recirculatie
Als recirculatie wordt toegepast is één stage voldoende om het gewenste resultaat te bereiken en vervalt het probleem.

Zeewaterontzouting

Zeewaterontzouting met membraanfiltratie wordt al enkele decennia toegepast als drinkwatervoorziening.
Het belangrijkste verschil tussen zeewater- en brakwaterontzouting is dat de concentraties aan zouten in het zeewater beduidend hoger liggen dan bij brakwater (35.000 mg/l om 2.000 mg/l). De hoge concentraties hebben tot gevolg dat de osmotische druk van de brijn al na één stage een waarde van 40 bar kan aannemen (uitgaande van een recovery van 30%).

Als er nu een tweede stage wordt geplaatst zal de osmotische druk oplopen tot meer dan 60 bar. Als ook nog de wrijvingsverliezen in aanmerking worden genomen zal het duidelijk zijn dat de netto-druk voor de laatste elementen in de tweede stage bijzonder laag en zelfs negatief kan worden.
Zeewaterontzouting wordt daarom meestal toegepast als een single-stage proces.

Een 2-stage proces wordt wel toegepast, maar dan zal er 'produkt staging' worden toegepast: het permeaat van de eerste stage wordt de voeding van de tweede stage.
Dit laatste proces is in feite niets anders dan een 1-stage zeewaterontzouting gevolgd door een 1-stage brakwaterontzouting (het permeaat van de eerste stage heeft een zoutconcentratie van 1.000 tot 2.000 mg/l, afhankelijk van het voedingsdebiet).
Ook kan de totale brijnafvoer van de installatie worden verminderd door de brijn van de tweede stage weer als voeding voor de eerste stage te gebruiken.

Conclusies

Het onderzoek heeft zich voornamelijk gericht op het bepalen van de juiste empirische relaties voor het drukverlies en de concentratie-polarisatie. Gebleken is dat het onderzoek zoals door Schock & Miquel uitgevoerd bijzonder goed aansluit bij de resultaten die uit praktijkvoorbeelden volgen.
In het ontwikkelde rekenmodel is dan ook gebruik gemaakt van de empirische relaties van Schock & Miquel voor onder andere het bepalen van de concentratie-polarisatie.
Het blijkt dat de eis voor de Q_B/Q_P-verhouding een grote invloed heeft op het membraanfiltratieproces. Het kan zeer voordelig zijn om, afhankelijk van de kwaliteit van het voedingswater, het proces bij een lagere Q_B/Q_P-verhouding dan de standaardverhouding van 5 te bedrijven. Vermeld moet worden dat de resultaten die in de grafieken zijn weergeven gelden voor $t = 0$. Een lage Q_B/Q_P-verhouding zal tot gevolg hebben dat de vervuiling van het membraan sneller verloopt waardoor het ontstane voordeel (hogere recovery) op moet wegen tegen een kortere looptijd van het membraanfilter.

Voor het model is gebruik gemaakt van een spiraalgewonden module zoals die door de fabrikanten wordt geleverd.
Tijdens het onderzoek is al bekeken of er een verbetering van de bestaande modules mogelijk is. Hierbij moet worden gedacht aan afmetingen van de modules, aantal membranen per module, dikte van de membraankanalen, enz. Wellicht is het mogelijk om door aanpassing van de genoemde aspecten drukverliezen en concentratie-polarisatie te verminderen en hiermee prestaties te verbeteren.

Het onderzoek heeft zich beperkt tot brakwater, waarbij gebruik gemaakt is van één membraan (FilmTec BW30). In de toekomst zullen meerdere membranen (van verschillende producenten) worden toegepast en zullen alternatieven zoals een booster of recirculatie en de toepassingsgebieden nanofiltratie en zeewater nader worden uitgewerkt.

Literatuur

Aeyelts Averink, C. W. (1993). *Membraanfiltratie. Theorie en modellering.* Afstudeerverslag TU Delft.
Ben Boudinar, M., Hanbury, W. T. and Avlonitis, S. (1992). *Numerical simulation and optimalisation of spiral-wound modules.* Desalination 86, pag. 273-290.
Chiolle, A., Gianotti, G., Gramondo, M. and Parrini, G. (1978). *Mathenaticl model of reverse osmosis in parrallel-wall channels with turbulence promoting nets.* Desalination 26, pag. 3-16.
DHV Water BV (1991). *Membrane filtration Manual.* Interne handleiding, DHV Amersfoort.
Dijk, J. C. van (1991). *Membrane filtration.* Collegediktaat N4, TU Delft.
Duranceau, S. J., Taylor, J. S. and Mulford, L. A. (1992). *SOC removal in a membrane softening process.* AWWA journal, Research and Technology, pag. 68-78.
Feron, P. and Solt, G. S. (1990). *The influence of seperators on hydrodynamics and mass transfer in narrow cells: flow visualisation.* Ph.D. Thesis.
Kuroda, O., Takahashi, S. and Nomura, M. (1983). *Characteristics of flow and mass transfer rate in an electrodialyzer compartment including spacer. Desalination 46, pag. 225-232.*
Rautenbach, R. and Albrecht, R. (1989). Membrane Processes.
Schock, G. and Miquel, A. (1987). *Mass transfer and pressure loss in spiral wound modules. Desalination 64, pag. 339-352.*
Taylor, J. S., Linton, D. G. and Mulford, L. A. (1991). Membrane selection. AWWA Seminair Proceedings: Membrane Technologie in the Water Industry, pag. 223-237.
Taylor, J. S. and Duranceau, S. J. (1991). *Modelling membrane mass transfer using dimensional analysis.* AWWA Seminair Proceedings: Membrane Technologie in the Water Industry, pag. 251-222.
Wang Xuesong (1987). *Mass transfer and the fluidized bed intensification of reverse osmosis.* Desalination 62, pag. 211-220.

• • •