





Naar 2 elementen per drukvat?

IR. M. RIEMERSMA, TU DELFT, THANS WERKZAAM BIJ DHV
IR. W.G.J. VAN DER MEER, WATERLEIDING FRIESLAND
PROF.IR. J.C. VAN DIJK, TU DELFT

Op dit moment wordt in Nederland door verschillende waterleidingbedrijven onderzoek verricht naar de toepassing van membraanfiltratie, veelal op proefinstallatieschaal. Eén van de nadelen van een proefinstallatie in het algemeen is, dat het zeer lastig of zelfs uitgesloten is om de verschillende configuraties (aantal elementen per drukvat, staging) van een totale praktijkinstallatie uit te kunnen testen. Dit geldt vooral voor de uiteindelijke productie aan permeaat (productwater) en de kwaliteit van dit water.
Om toch de invloed van de verschillende configuraties en procescondities op de uiteindelijke prestatie van een installatie te kunnen bepalen is een mathematisch model ontwikkeld. Dit model is een aangepaste versie van het eerder door TUD [3,4] ontwikkeld model voor reverse osmosis (RO) membranen.

Doel van de studie is 'de hydraulisch optimale installatie te bepalen voor een willekeurige situatie'. In eerste instantie is gekozen voor de situatie: ruw grondwater, te zuiveren met nanofiltratie.

Theoretische achtergronden

Netto drijvende kracht

Een hydraulisch optimale installatie gebruikt de voedingsdruk zo effectief mogelijk. De netto drijvende kracht (de druk die effectief wordt gebruikt, NDP) is afhankelijk van:

- de osmotische druk
- drukverliezen aan voedingskant
- drukverliezen aan permeaatkant

Uitgedrukt in formulevorm:

$Q_p = K_w A_m NDP$

$NDP = (P_{voeding} - P_{drop,voeding} - P_{osmotisch} - P_{drop,permeaat} - P_p)$

waarin:

Q_p	= permeaatdebiet (m^3/s)
K_w	= membraan-permeabiliteits constante (m/s/bar)
A_m	= membraanoppervlak (m^2)
$P_{voeding}$	= voedingsdruk (bar)
$P_{drop,voeding}$	= drukverlies aan voedingskant (bar)
$P_{osmotisch}$	= de osmotische druk (bar)
$P_{drop,permeaat}$	= drukverlies aan permeaatkant (bar)
P_p	= permeaat tegendruk (bar)
NDP	= netto driven pressure (bar)

De $P_{drop,permeaat}$ is rechtstreeks afhankelijk van de stroomsnelheid van het permeaat, $P_{drop,voeding}$ van de stroomsnelheid van de voeding en $P_{osmotisch}$ is onder andere afhankelijk van de stroomsnelheid van de voeding, via de concentratie polarisatie, die sterk toeneemt bij lage stroomsnelheden. Hoe lager de stroomsnelheid hoe hoger de osmotische druk.

De drukverliezen door wrijving aan voedingskant zijn afhankelijk van de stroomsnelheid via een exponentiële relatie. Hoe lager de stroomsnelheid hoe lager de drukverliezen. De basisvergelijkingen [2,4] zijn weergegeven in afbeelding 1.

De Q_b/Q_p ratio

Voor het minimaliseren van de osmotische druk is een hoge stroomsnelheid van de voeding vereist, terwijl voor het minimaliseren van drukverliezen aan voedingskant een lage stroomsnelheid van de voeding is vereist. Om die stroomsnelheid te vinden waarbij de NDP maximaal is heeft Aeijelts Averink [3,4] de empirische Q_b/Q_p ratio gebruikt die de verhouding van brijn (concentraat) en permeaat geeft van het laatste element in een drukvat.

Samenvatting

In het kader van een afstudeerproject is onderzocht bij welke configuratie (staging, aantal elementen per drukvat) een membraanfiltratie-installatie hydraulisch optimaal presteert (grootste permeaatproductie). Hiertoe is gebruik gemaakt van een gekalibreerd computermodel. In eerste instantie is uitgegaan van een gemiddelde kwaliteit grondwater, te zuiveren met nanofiltratie.
Het blijkt dat de hydraulisch optimale configuratie ligt bij 2 elementen per drukvat en dat de staging een kleine invloed heeft. De opbrengst, ten opzichte van een conventionele membraanfiltratie-installatie, wordt verhoogd met 27%. Er kan daardoor bespaard worden op de investeringskosten van membraanelementen.
Daarnaast is bekeken wat de invloed van procescondities is op de hydraulisch optimale configuratie. De procescondities die een belangrijke rol spelen zijn: membraantype, gewenste recovery en samenstelling van het voedingswater.

Afb. 1 Basisvergelijkingen

Drukverlies voedingskant:

$$P_{drop,\,voeding} = \lambda_c \frac{\rho v_c^2}{2} \frac{L}{d_h}$$

$$\lambda_c = 6.23\, Re_c^{-0.8}$$

$$Re_c = \frac{v_c d_h}{\nu}$$

Concentratie polarisatie:

$$\beta = \frac{C_{bij\ membraan}}{C_{voeding}} = \exp\left(\frac{F_w}{k}\right)$$

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

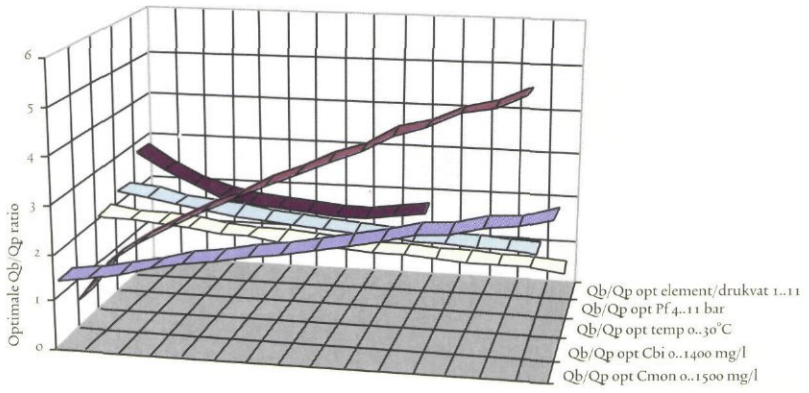
$$Sh = 0.065\, Re_c^{0.875}\, Sc^{0.25}$$

Met:

v_c	=	snelheid voedingskant (m/s)
L	=	lengte voedingsspacer (m)
d_h	=	hydraulische diameter (m)
λ_c	=	wrijvingscoëfficiënt (-)
F_w	=	waterflux ($m^3/(m^2 s)$)
Sh	=	getal van Sherwood (-)
Sc	=	getal van Schmidt (-)
Re	=	getal van Reynolds (-)
D_i	=	diffusiecoëfficiënt van ionen (m^2/s)

Eerder onderzoek door Aeijelts Averink wees uit dat voor brak water met een concentratie van 2.000 mg/l aan monovalenten, te zuiveren met een RO membraan, de optimale Q_b/Q_p ratio 5 is. In zijn onderzoek werd al de opmerking geplaatst dat dit voor een andere kwaliteit water anders ligt.

Hoe de optimale Q_b/Q_p ratio afhangt van procescondities als temperatuur, concentraties mono- en bivalenten, druk en aantal elementen per drukvat is gegeven in afbeelding 2. Voor dit onderzoek wordt uitgegaan van een gemiddelde kwaliteit grondwater, waarvan de invoergegevens zijn weergegeven rechts van de afbeelding. De optimale Q_b/Q_p ratio blijkt voor dit type water 2.0 te zijn.



Afb. 2 Invloeden op de optimale Q_b/Q_p ratio

Op de hoogte-as van de grafiek staat de optimale ratio uitgezet. De horizontale as verschilt voor iedere lijn, daartoe staat rechts van de grafiek de schaal van iedere procesconditie vermeld. Afbeelding 2 is verkregen door steeds één procesconditie te wijzigen terwijl de overige invoergegevens constant blijven.

De optimale ratio blijkt vooral af te hangen van de concentraties aan mono- en bivalenten. Deze bepalen de osmotische druk en de ratio stijgt dus voor hoge concentraties, waarbij de concentratie bivalenten de grootste invloed heeft op de osmotische druk.

	Aantal elementen per drukvat						
Staging	1	2	3	4	5	6	7
1:1	0,883	0,895	0,850	0,780	0,702	0,628	0,565
2:1	0,896	0,916	0,890	0,842	0,784	0,723	0,664
3:1	0,893	0,918	0,899	0,861	0,811	0,755	0,703
4:1	0,891	0,917	0,902	0,868	0,822	0,771	0,719
5:1	0,885	0,915	0,903	0,871	0,828	0,780	0,729
6:1	0,881	0,912	0,902	0,872	0,831	0,783	0,736
1 stage	γ< 80%	0,885	0,899	0,895	0,877	0,850	0,817

Tabel 1 Elementopbrengst (m³/h/element) voor de verschillende instellingen

Gebruik van het model

Invoer van het model

De invoer van het model voor grondwater met een gemiddelde kwaliteit, te zuiveren met een spiraalgewonden 8 inch FilmTec NF 70 membraan, is gegeven in afbeelding 3.

Op basis van de gegeven elementopbrengst berekent het model het totaal aantal benodigde elementen, die 889 elementen bedraagt voor de invoer van afbeelding 3. Vervolgens past het model het voedingsdebiet aan totdat de 80% recovery wordt gehaald.

Er wordt geëxperimenteerd onder gelijke druk, gelijke recovery en een gelijk aantal elementen, gevarieerd zijn de opstelling van membraanelementen en het voedingsdebiet.

Bij de opstelling van de membraanelementen wordt gekeken naar 2 stages. Het aantal elementen per drukvat varieert van 1 tot en met 6, de staging verloopt van 1:1 tot en met 6:1. Een 6:1 staging wil zeggen 6 drukvaten in de eerste stage tegenover 1 drukvat in de tweede stage. Als laatste stap is bij deze staging de mogelijkheid opgenomen om alle elementen in 1 stage te plaatsen wat in feite ∞:1 voorstelt.

Het aantal elementen per drukvat bepaalt het aantal drukvaten, de staging bepaalt de verdeling van het aantal drukvaten over beide stages.

Uitvoer van het model - hydraulisch optimale configuratie

De optimalisatie parameter is de elementopbrengst, die is afgebeeld in afbeelding 4.

Duidelijk is het hydraulisch optimale werkgebied bij 2 elementen per drukvat. De grafiek is beperkt tot 7 elementen per drukvat omdat anders de recovery van 80% overschreden wordt. Staging heeft een geringe invloed op de elementopbrengst terwijl het aantal elementen per drukvat een zeer grote invloed heeft. De waarden uit afbeelding 4 zijn weergegeven in tabel 1.

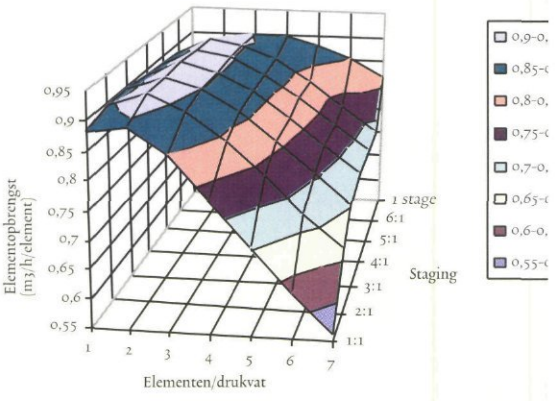
Het blijkt dat, ten opzichte van een 'normaal ontwerp' (6 elementen per drukvat), een behoorlijke winst kan worden gehaald in elementopbrengst, namelijk van 0.723 naar 0.918 m³/h/element.

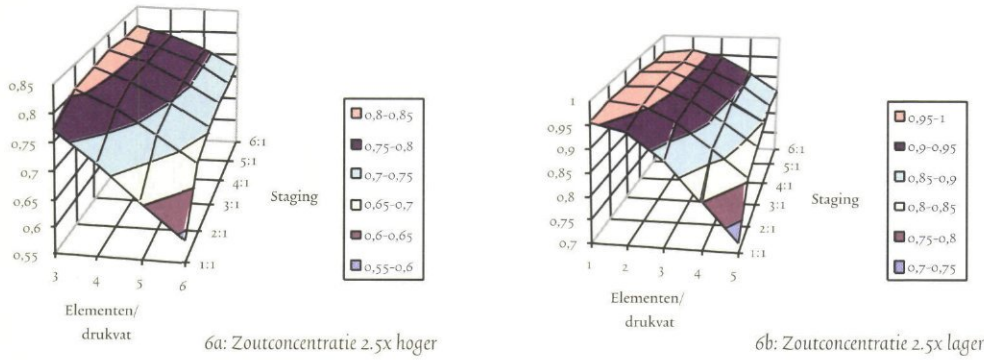
De vetgedrukte waarden geven de optimale elementopbrengst weer, bij elk aantal elementen per drukvat. In het navolgende wordt beschreven hoe staging en het aantal elementen per drukvat geoptimaliseerd worden.

Afb. 3 Invoer van het model

Membraantype:	NF70-8040
Temperatuur:	12,5°C
Concentratie monovalenten:	250 mg/l
Concentratie bivalenten:	150 mg/l
Voedingsdruk:	7 bar
Aanvankelijke elementenopbrengst:	0.9 m³/h/element
Recovery:	0.8 (-)
Aanvankelijk voedingsdebiet:	1.000 m³/h

Afb. 4 Elementopbrengst (m³ permeaat/h/element)



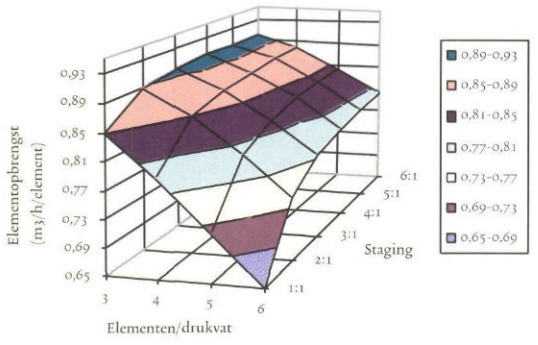


6a: Zoutconcentratie 2.5x hoger

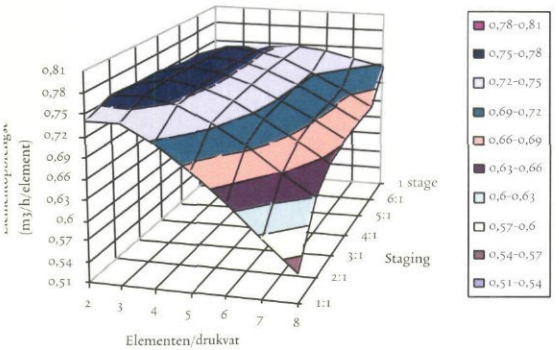
6b: Zoutconcentratie 2.5x lager

Afb. 6 Elementopbrengst (m³/h/element)

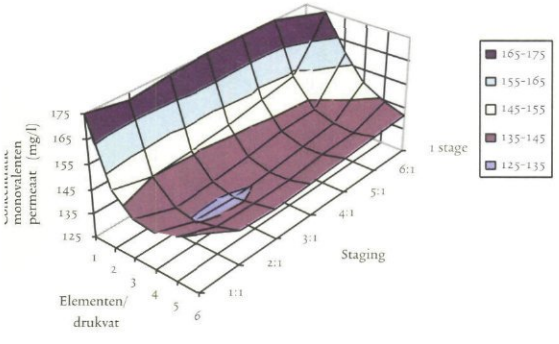
Afb. 5 Recovery is 85%



Afb. 7 Elementopbrengst voor een ESPA-8040 UHY element



Afb. 8 Kwaliteit van het permeaat voor monovalenten



Staging

De vetgedrukte waarden van tabel 1 volgen een duidelijke lijn voor de optimale staging bij elk aantal elementen per drukvat. Deze lijn wordt gevormd doordat de stroomsnelheden efficiënt verspreid worden over de 2 stages.

Als 1 element in een drukvat wordt toegepast staan alle 889 elementen parallel geschakeld en, doordat het voedingsdebiet over deze 889 elementen wordt verdeeld, opereren de elementen onder zeer lage stroomsnelheden. Om de stroomsnelheid in de eerste stage te verhogen worden elementen uit de eerste stage naar de tweede stage verplaatst. De eerste stage zal opereren met een bepaalde recovery waardoor concentraatwater (en dus stroomsnelheid) beschikbaar wordt voor de tweede stage.

Als alle drukvaten met 2 elementen parallel worden geschakeld wordt het voedingsdebiet over een 2x lager aantal drukvaten verdeeld. De stroomsnelheden liggen dan aanzienlijk hoger dan in de vorige situatie. De noodzaak om elementen te verplaatsen naar de tweede stage wordt daardoor veel kleiner.

Bij 4 elementen in een drukvat is deze noodzaak verdwenen en is het optimaal om geen tweede stage toe te passen. Dit wordt veroorzaakt doordat de stroomsnelheid in de drukvaten in de eerste stage al hoog ligt, terwijl het verplaatsen van drukvaten naar de tweede stage een toename aan stroomsnelheid tot gevolg heeft in de eerste stage. Er volgt dat bij meer dan 4 elementen per drukvat het voedingsdebiet over te weinig drukvaten wordt verdeeld, zodat meer dan 4 elementen per drukvat zeker niet optimaal is. In dit verband is ook de noodzaak van een derde stage onderzocht, die alleen (licht) betere resultaten haalt in het geval van 1 element per drukvat.

Aantal elementen per drukvat

Bij 1 element per drukvat liggen de stroomsnelheden te laag, waardoor de osmotische druk te hoog wordt.

Bij meer dan 2 elementen per drukvat liggen de stroomsnelheden te hoog, waardoor teveel drukverlies in de voedingsspacer optreedt. Bij meerdere elementen in een drukvat 'planten deze drukverliezen zich voort' door de gehele installatie. Dat wil zeggen dat de drukverliezen in de eerste elementen direct gevolg hebben voor de voedingsdruk van de volgende elementen.

Invloeden van procescondities

Het unieke geval van een gemiddelde kwaliteit grondwater wordt uitgebreid tot een advies voor ontwerp voor elke situatie. Hiertoe is vanuit de invoer van afbeelding 3 achtereenvolgens de recovery, concentratie aan mono- en bivalenten en membraantype gewijzigd. Temperatuur- en voedingsdruk blijken uit afbeelding 2 van geringe invloed.

Recovery

In afbeelding 5 is de recovery van 80% tot 85% verhoogd.

Meerdere elementen in een drukvat zijn noodzakelijk om voldoende membraanoppervlak aan te bieden voor het realiseren van de hogere recovery. Minimaal zijn 3 elementen nodig in een drukvat. Dit impliceert dat bij verhoging van de recovery het optimum verschuift naar een hoger aantal elementen per drukvat.

Zoutconcentraties

In afbeelding 6a en b is de zoutconcentratie van gemiddeld grondwater respectievelijk een factor 2.5 verhoogd en verlaagd.

Uit afbeelding 6 blijkt dat het optimale werkpunt van een installatie zal neigen naar meer elementen per drukvat bij hogere concentraties. Dit wordt veroorzaakt door de hogere snelheden die bij hogere concentraties nodig zijn om de concentratie polarisatie (osmotische drukopbouw) te beperken. Deze hoge snelheden kunnen worden bereikt door minder elementen in een drukvat toe te passen, volgend uit afbeelding 3.

Bij lage concentraties speelt de osmotische druk maar een kleine rol, waardoor de installatie beter presteert onder lage stroomsnelheden. Het optimum verschuift naar 1 element per drukvat.

Membraantype

In afbeelding 7 is als membraantype een 8 inch ESPA RO membraan toegepast in

plaats van het NF 70 nanofiltratie membraan.

Het RO membraan heeft een hogere retentie, waardoor het concentraatwater meer wordt geconcentreerd. De osmotische druk wordt hierdoor groter, zodat het optimale werkpunt neigt naar een kleinere concentratie polarisatie, dus naar een hogere stroomsnelheid. Een hogere stroomsnelheid wordt bereikt door het voedingsdebiet over een kleiner aantal drukvaten te verdelen, dus meer elementen (3) per drukvat.

Uitvoer van het model - overige aspecten

Aspecten die reden kunnen geven om van het hydraulisch optimum af te wijken zijn:

- kwaliteit van het permeaat
- vervuiling van het membraan
- kosten.

Kwaliteit van het permeaat

In afbeelding 8 is de kwaliteit van het permeaat afgebeeld voor monovalenten.

Bij 4 elementen per drukvat ligt het optimale zuiveringsresultaat. Deze wordt veroorzaakt omdat bij meer elementen per drukvat de laatste elementen inleveren aan permeaatkwaliteit. Het voedingswater van deze laatste elementen is zo geconcentreerd dat een hogere zoutdoorslag plaatsvindt naar het permeaat.

Bij toepassing van minder elementen per drukvat loopt de concentratie polarisatie, door lage stroomsnelheden, zo hoog op dat een hogere doorslag van zouten naar het permeaat plaatsvindt. Overigens is deze doorslag alleen bij 1 element per drukvat noemenswaardig.

Vervuiling van het membraan

Vervuiling van het membraan kan worden veroorzaakt door scaling en bio-fouling. De scalingsgevoeligheid kan het beste worden weergegeven via de concentratie polarisatie die is weergegeven in afbeelding 9 voor het laatste element van de eerste stage. Dit element is het meest gevoelig voor scaling.

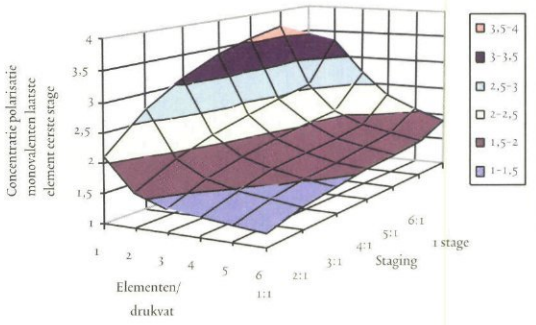
De waarde van concentratie polarisatie waarbij scaling optreedt, is afhankelijk van de ruw waterkwaliteit. Daarom moet altijd op pilotplantschaal gekeken worden naar scaling en bio-fouling. Beide kunnen o.a. voorkomen worden door de stroomsnelheid hoog te houden en kunnen reden zijn om niet het hydraulisch optimum te volgen. Afbeelding 9 is slechts bedoeld als illustratie en kan alleen worden gebruikt als schatting voor gevallen waar de concentratie polarisatie ontoelaatbaar hoog wordt.

Kosten

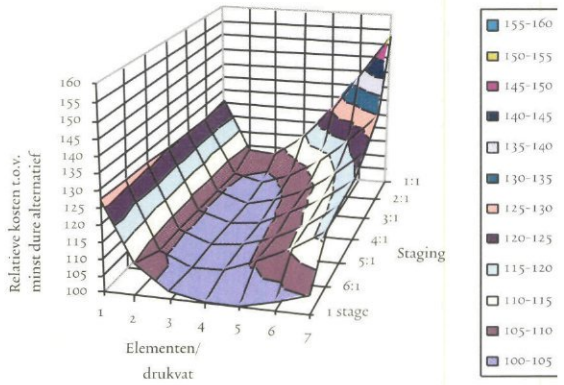
Door een toenemend aantal elementen per drukvat neemt het totaal aantal drukvaten af, waardoor de kosten voor drukvaten dalen. Dit kan reden zijn om van het hydraulisch optimum af te wijken. De kosten voor drukvaten zowel als voor het NF 70 element zijn weergegeven in tabel 2.

Uitgaande van deze prijzen en de berekende elementopbrengsten is het mogelijk de kosten door te rekenen voor een praktijkinstallatie (productie 800 m³/h, verdere invoer uit afb. 3) met drukvaten die afgeschreven worden in 20 jaar en membranen die afgeschreven worden in 5 jaar (reële rente is 5%). Door een hoge elementopbrengst hoeven minder elementen toegepast te worden, maar wordt relatief meer betaald per drukvat. De resultaten zijn weergegeven in afbeelding 10.

Het goedkoopste alternatief blijkt 4 elementen per drukvat in een 1 stage opstelling te zijn. De overige alternatieven zijn uitgezet in procenten duurder dan dit alternatief. Bij weinig elementen per drukvat overheersen de relatief hoge kosten van een drukvat, bij veel elementen per drukvat daalt de elementopbrengst dusdanig dat er veel elementen moeten worden toegepast.



Afb. 9 *Concentratie polarisatie laatste element eerste stage*



Afb. 10 *Kostenbeschouwing voor een membraan opstelling*

Drukvat, geschikt voor	*prijs (NLG)*	*membraantype*	*prijs (NLG)*
1 element	1755	Filmtec NF 70-8040	1500
2 elementen	1908		
3 elementen	2052		
4 elementen	2205		
5 elementen	2340		
6 elementen	2412		
7 elementen	2601		

Tabel 2 *Gangbare prijzen voor drukvaten en het Filmtec NF 70-8040 membraan*

Conclusies

Doorslaggevend voor het ontwerp van een membraaninstallatie is de stroomsnelheid. De stroomsnelheid bepaalt de drukverliezen aan voedingskant en de osmotische druk. Bij oplopende stroomsnelheid daalt de osmotische druk, terwijl drukverliezen aan voedingskant stijgen. Daarom is voor een gegeven drukvat een optimale stroomsnelheid te vinden die deze beide drukverliezen

REDUCING THE NUMBER OF MEMBRANE ELEMENTS PER PRESSURE VESSEL?

For a thesis project, the configuration (staging, number of membrane elements per pressure vessel) at which a membrane filtration installation performs hydraulically optimal (highest production of permeate) is studied. Therefore, a calibrated computer model is used. In the first place, an average quality of ground water to be purified by nanofiltration is assumed.
It appears that the optimal configuration is at 2 elements per pressure vessel and that staging is of minor influence. The production of permeate rises 27%, compared with a conventional design. This way, it is possible to save investment costs on membrane elements. Further on, the influence of process conditions on the hydraulically optimal configuration was studied. The process conditions that show a high influence on the configuration are: type of membrane, recovery and composition of feed water.

afweegt, de empirische Q_b/Q_p ratio. Deze ratio is afhankelijk van de zoutconcentraties, recovery, membraantype en het aantal elementen per drukvat. Voor een gemiddeld grondwater bedraagt de ratio 2, voor brak water 5.

Het hydraulische optimum voor zuivering van grondwater met nanofiltratie ligt bij 2 elementen per drukvat, wat een aanmerkelijk beter resultaat oplevert dan de conventionele 6 à 7 elementen per drukvat.

Dit optimum verschuift bij toepassing van een hogere recovery, aanzienlijk hogere zoutconcentraties of een RO element naar 3 elementen per drukvat.

Een 2 stage configuratie presteert optimaal voor drukvaten die minder dan 4 elementen per drukvat bevatten. Een 1 stage configuratie presteert optimaal voor drukvaten die 4 of meer elementen bevatten.

Redenen om niet het hydraulische optimum aan te houden kunnen zijn:

- kwaliteit van het permeaat, die in geringe mate kan verslechteren bij toepassing van meer of minder dan 4 elementen per drukvat
- scalingsgevoeligheid, door een hogere concentratie polarisatie bij minder dan 4 elementen per drukvat
- kosten, omdat drukvaten voor weinig elementen per drukvat relatief duur zijn.

LITERATUUR

1. M.C. Riemersma, *Afstudeerverslag: Nanofiltratie efficiënter en goedkoper*, TU Delft, 1997
2. ir. W.G.J. van der Meer, *AWWA Conference on Membrane Technology, New Orleans: Mathematical modeling of spiral-wound nanofiltration modules*, 1997
3. W.G.J. van der Meer, C.W. Aeijelts Averink, J.C. van Dijk, *Desalination 105*, 1996
4. ir. C.W. Aeijelts Averink, ir. I.T. Dijkstra, prof. ir. J.C. van Dijk, *Theorie en modellering van membraanfiltratie* H_2O *nr. 10 1995*