Zuivering van oppervlaktewater met minimale voorbehandeling

Danny Harmsen, Emile Cornelissen, (KWR Water Research Institute), Peter Wessels, Walter van der Meer (Oasen)

'1-step volstroom omgekeerde osmose' moet drinkwaterzuivering gebaseerd op één processtap mogelijk maken. Zo moet drinkwater van onberispelijke kwaliteit kunnen worden bereid met een minimale voorzuivering. Het 1-step-RO-concept speelt optimaal in op toekomstige ontwikkelingen en is bovendien duurzamer en goedkoper dan conventionele ultrafiltratie als voorbehandeling. De haalbaarheid van dit concept, met commercieel beschikbare spiraalgewonden RO-membranen en een nieuw voedingsspacerloos RO-systeem, is getest op oppervlaktewater. Daarnaast is het concept in een technisch/economische haalbaarheidsstudie vergeleken met het conventionele UF-RO-scenario.

Bij membraanfiltratie worden stoffen uit het water verwijderd door een selectief membraan op basis van verschillen in stofeigenschappen (bijvoorbeeld grootte), meestal (maar niet altijd) gedreven door een drukverschil. Om zouten en kleine organische stoffen uit het water te halen wordt omgekeerde osmose (reverse osmose, RO) toegepast, waarbij water onder hoge druk door een selectief RO-membraan wordt geperst. Bij RO is vaak een uitgebreide voorbehandeling noodzakelijk. Bij het concept 1-step RO wordt met een combinatie van innovatieve bedrijfsvoeringen gestreefd deze voorbehandeling zo klein mogelijk te maken.
De belangrijkste technische kenmerken van het 1-step RO-concept zijn (i) een verregaande verwijdering van alle onopgeloste en opgeloste bestanddelen in één zuiveringsstap (RO), (ii) de productie van gedemineraliseerd water dat aansluitend wordt geremineraliseerd, (iii) een flexibel/wisselend gebruik van lokale bronnen (zoet en brak grond- en oppervlaktewater, oeverfiltraat en eventueel regenwater, (voorgezuiverd) afvalwater en zeewater), en (iv) decentrale, lokale en kleinschalige productie en levering van drinkwater.
Door toepassing van het 1-step-RO-concept moet drinkwater van onberispelijke kwaliteit worden verkregen. Hierbij vormt het een optimale voorbereiding op toekomstige ontwikkelingen, zoals klimaatverandering, verzilting, wensen van afnemers en wisselende/veranderende kwaliteit en kwantiteit van beschikbare bronnen. Het proces is bovendien duurzaam, onder meer door een laag verbruik van energie en chemicaliën, weinig reststoffen, weinig vervuiling en nagroei in het distributienet en in binnen-installaties, en goedkoop [1]. In 2015 is het project 'Multi-source 1-step volstroom RO, maatwerk van tap tot bron' van start gegaan in het Topconsortium Kennis en Innovatie (TKI). Deelnemende partijen zijn Oasen, Hoogheemraadschap Schieland en de Krimpenerwaard en KWR met medewerking van WE Consult.

Spiraalgewonden RO met en zonder voedingsspacer

Vanaf 2016 is onderzoek uitgevoerd naar oppervlaktewater met commercieel beschikbare spiraalgewonden RO-membranen (SW-RO; spiral wound). Spiraalgewonden membranen bevatten zogeheten 'voedingsspacers', die tussen de membranen zijn geplaatst om afstand tussen de membranen te houden en zo de stroming van voedingswater tussen de membranen mogelijk te maken. Zonder deze spacers zouden de membranen tegen elkaar aan liggen waardoor langsstroming

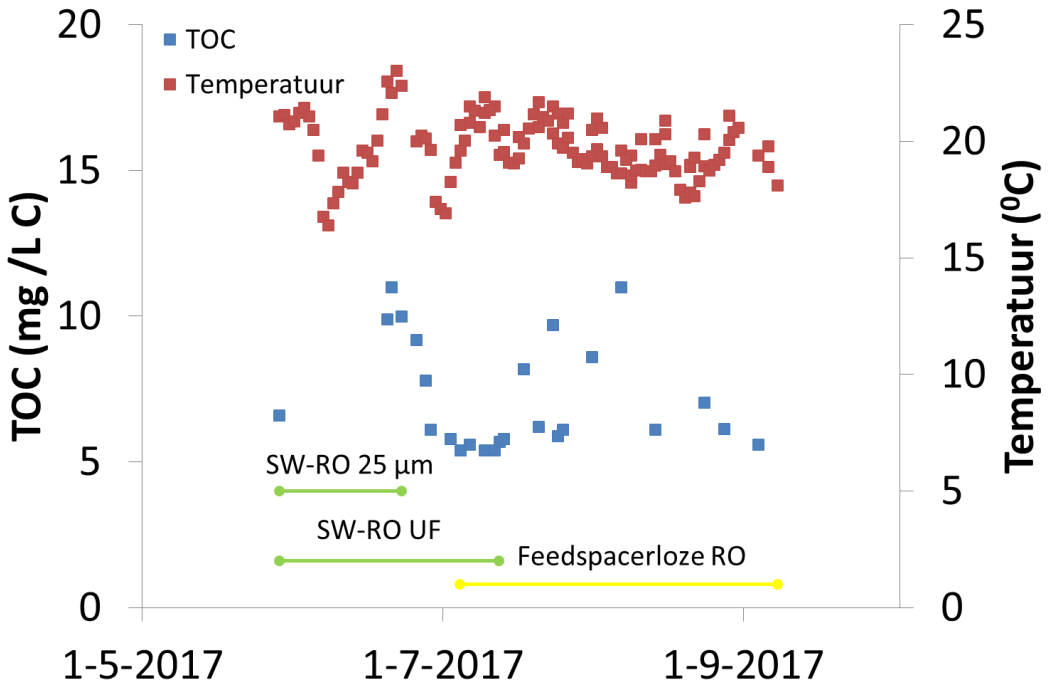
van voedingswater niet mogelijk zou zijn. De voedingsspacers, die veelal opgebouwd zijn uit netjes, verhogen ook de turbulentie in het voedingskanaal. Turbulentie helpt om de stoffen die door het membraan worden tegengehouden weer van het membraanoppervlak af te voeren. In de voedingsspacers doen zich echter ook vaak verstoppingsproblemen voor, omdat de spacer onbedoeld een perfect dragermateriaal vormt voor biomassa die kan groeien op de nutriënten in het voedingswater. In het project is daarom ook een nieuw voedingsspacerloos RO-systeem ontwikkeld en getest om het effect van minder turbulentie te onderzoeken. Bij de voedingsspacerloze RO is wel gebruik gemaakt van hetzelfde membraan als in de SW-RO's.
De eerste testen vonden plaats met vijverwater bij KWR [2]. Vervolgens zijn beide pilots, zowel met als zonder spacer, verplaatst naar de proefhal van zuiveringsstation 'De Hooge Boom' van Oasen te Kamerik. Hier werd onderzoek gedaan op het oppervlaktewater van de Grecht [3], een wetering die grenst aan het terrein van het zuiveringsstation.
In dit artikel worden de resultaten vergeleken van beide membraansystemen in dit laatste onderzoek.

Pilotonderzoek

Het pilotonderzoek naar SW-RO is uitgevoerd op oppervlaktewater uit de Grecht na een grof filter (250 µm) gevolgd door (1) ultrafiltratie (UF) en SW-RO, en (2) een 25µm-filter en SW-RO. Er is gekozen voor een 25µm-filter omdat de larven van driehoeksmosselen ongeveer 30 µm groot zijn. Deze larven moeten worden verwijderd om problemen door de aangroei van driehoeksmosselen op de membranen te voorkomen [2]. Het voedingsspacerloze RO-systeem werd direct getest op het oppervlaktewater na het grof filter (250 µm).
Tijdens het onderzoek is gekeken naar het effect van (a) het type voorbehandeling, (b) het toepassen van hydraulische reiniging met behulp van lucht/waterspoeling en (c) het effect van verschillende permeaatproductie (flux) door de RO-membranen.

Waterkwaliteit

In Afbeelding 1 zijn het gehalte totaal organische koolstof (TOC) en de temperatuur van het oppervlaktewater gedurende de testperiode weergegeven, samen met de looptijd van de verschillende testen.



Afbeelding 1. TOC-gehalte en temperatuur oppervlaktewater bij Oasen, eind mei - begin september 2017, inclusief overzicht uitgevoerde testen

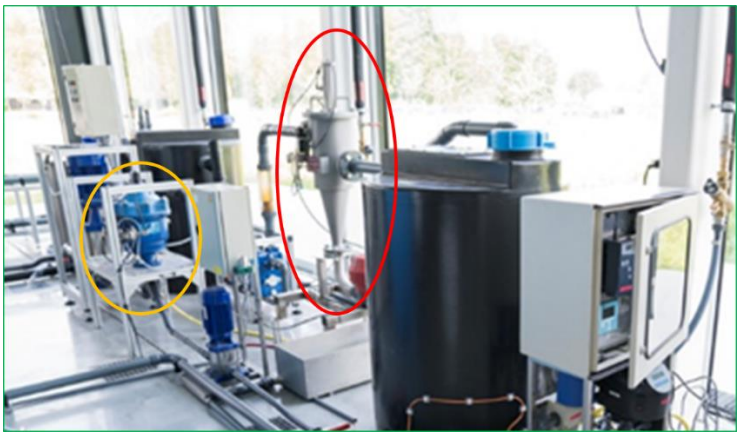
Bij de start van de testen in mei was het TOC-gehalte in het oppervlaktewater ongeveer 7 mg C/L, voor 63% bestaande uit humuszuren en voor 8% uit biopolymeren. Van biopolymeren is bekend dat ze een belangrijke rol spelen bij membraanvervuiling [4], [5].

Testen met SW-RO met en zonder UF-voorbehandeling

Proefopzet

Tijdens het onderzoek is een vergelijking gemaakt tussen twee typen voorbehandeling: (1) 'conventionele' voorbehandeling met ijzerchloridedosering en ultrafitratie (UF, zie afbeelding 2), en (2) filtratie over een zelfreinigend 25µm-filter (zie afbeelding 3). Beide testen zijn gelijktijdig uitgevoerd met hetzelfde ruwwater.

Afbeelding. 2 RO- (linksachter) en UF- (middenvoor) installatie gebruikt tijdens SW-RO onderzoek



Afbeelding 3. Grof 250µm- (rode cirkel) en zelfreinigend 25µm-filter (gele cirkel) die zijn gebruikt tijdens SW-RO onderzoek

Bij beide testen werd dezelfde langsstroomsnelheid toegepast (~0,1 m/s oftewel een voedingsdebiet van 350 L/uur). De flux door het RO-membraan na voorbehandeling met UF was 25 L/m^2.uur, na voorbehandeling met het 25µm-filter 10 L/m^2.uur. Beide RO-installaties werden periodiek (zes keer per dag) hydraulisch gereinigd met behulp van lucht/waterspoeling.

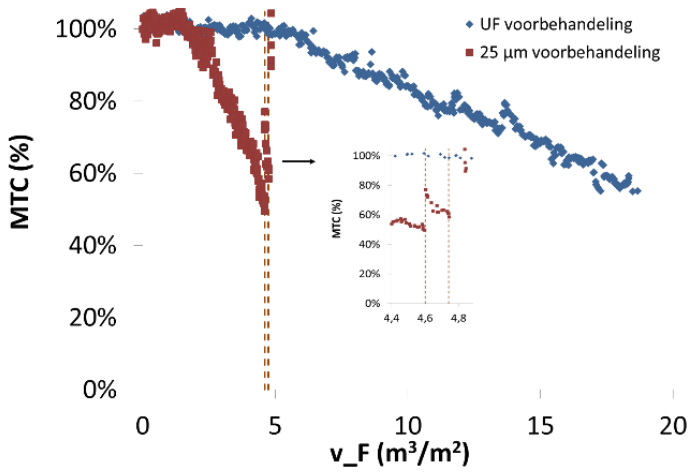
Membraanvervuiling en reiniging

Membraanvervuiling manifesteert zich op twee manieren. Er kan verstopping van het voedingskanaal of de voedingsspacer plaatsvinden, met als gevolg dat de drukval (NPD, normalized pressure drop) over het voedingskanaal in de tijd oploopt. Het membraan zelf kan ook vervuild raken, waardoor er minder permeaat wordt geproduceerd bij gelijkblijvende voedingsdruk. Dit heeft als gevolg dat de permeabiliteit, uitgedrukt in de massatransportcoëfficiënt (MTC, m/s.Pa), daalt. Bij een vooraf

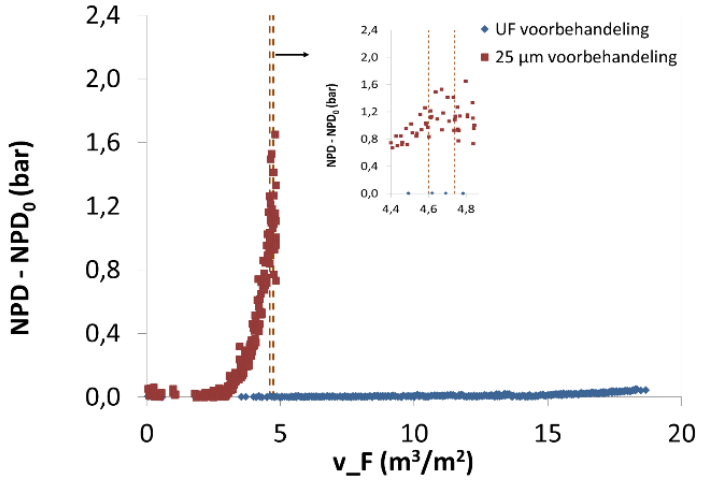
vastgestelde vervuiling (NPD>0,6 bar of MTC-daling < 50%) werd een chemische reiniging (CIP, Cleaning In Place) uitgevoerd met natronloog en zoutzuur. Op het moment dat de CIP vaker dan één keer per maand nodig was, werd de test gestopt.

Resultaten en discussie SW-RO

In afbeelding 4 en 5 zijn het MTC-verloop en de drukvaltoename over het voedingskanaal weergegeven als functie van het cumulatief geproduceerde volume.



Afbeelding 4. MTC-verloop SW-RO. CIP weergegeven als rode stippellijn



Afbeelding 5. Drukvalverloop SW-RO. CIP weergegeven als rode stippellijn

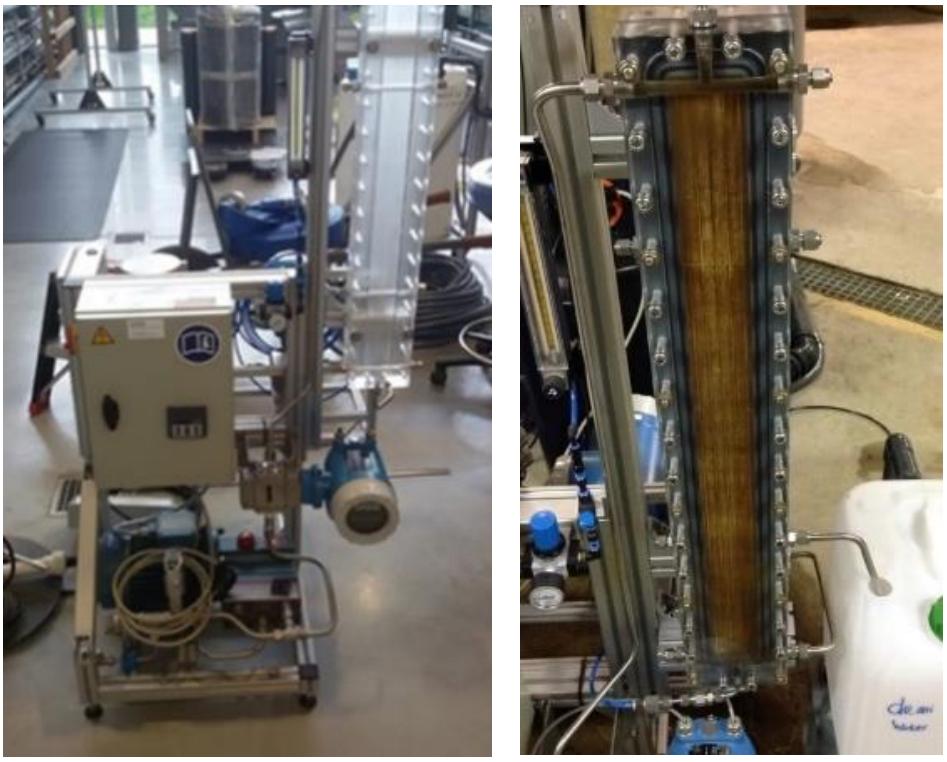
Het RO-element met 25µm-filter voorbehandeling was na 4,6 m^3/m^2 permeaatproductie toe aan een chemische reiniging omdat de permeabiliteit (MTC) met 50 procent was gedaald. De CIP leverde voor zowel permeabiliteit als drukval een verbetering van 20 tot 30 procent op. Het membraan was echter zo vervuild (drukval > 0,6 bar) dat er binnen 24 uur (na een productie van 0,1 m^3/m^2) weer een CIP nodig was. Daarom werd de test stopgezet.

Het RO-element dat werd gevoed met UF-product moest na 18,7 m^3/m^2 permeaatproductie chemisch worden gereinigd. De drukval over het voedingskanaal was tot dat moment slechts opgelopen tot zo'n 0,05 bar. Het toepassen van UF als voorbehandelingsstap gaf onder de hier geldende condities dus

veel minder verstopping van het voedingskanaal dan bij voorbehandeling met het 25µm-filter. Voorbehandeling met UF kon daling van de MTC echter niet voorkomen, hoewel deze daling wel veel langzamer plaatsvond.
De UF-voorbehandeling bleek effectiever dan het 25µm-filter in het verminderen van de vervuiling van het RO-membraan (MTC) en in het voorkomen van verstopping over het voedingskanaal. De UF-voorbehandeling vertraagde de MTC-daling wel, maar was nog steeds niet in staat om RO-vervuiling geheel te voorkomen. Doordat het filter nog opgeloste stoffen doorliet die op het RO-membraan plakten, trad vervuiling op.
De keerzijde was echter dat een sterke vervuiling plaatsvond van het UF-membraan, bovenop de langzamere vervuiling van het RO-membraan. Uit metingen, waarbij het organisch materiaal werd gekarakteriseerd voor en na UF en het 25µm-filter, bleek dat de UF 93 procent van de biopolymeren verwijderde. Het 25µm-filter verwijderde maar 7 procent. Het UF-membraan kon slechts in bedrijf worden gehouden bij een hoog chemicaliënverbruik (dagelijkse chemische reiniging) en een zeer lage en economisch onaantrekkelijke productieopbrengst (netto flux) van 20 L/m^2.uur. Feitelijk werd met UF-voorbehandeling de vervuiling van de RO dus niet geheel voorkomen, en tegelijk een tweede membraanstap toegevoegd die zelf sterk vervuilde.

Testen met voedingsspacerloze RO

Proefopzet
Om het effect van de voedingsspacer te onderzoeken is een nieuw voedingsspacerloos RO-systeem ontwikkeld en getest. Hierbij is gebruik gemaakt van hetzelfde type membraan als in de SW-RO's.
Afbeelding 6 toont foto's van de installatie met het voedingsspacerloze RO-systeem. Om een enigszins redelijke verdeling en langsstroming van het voedingswater over het totale membraanoppervlak te garanderen, zijn er zes parallelle voedingskanalen gemaakt.

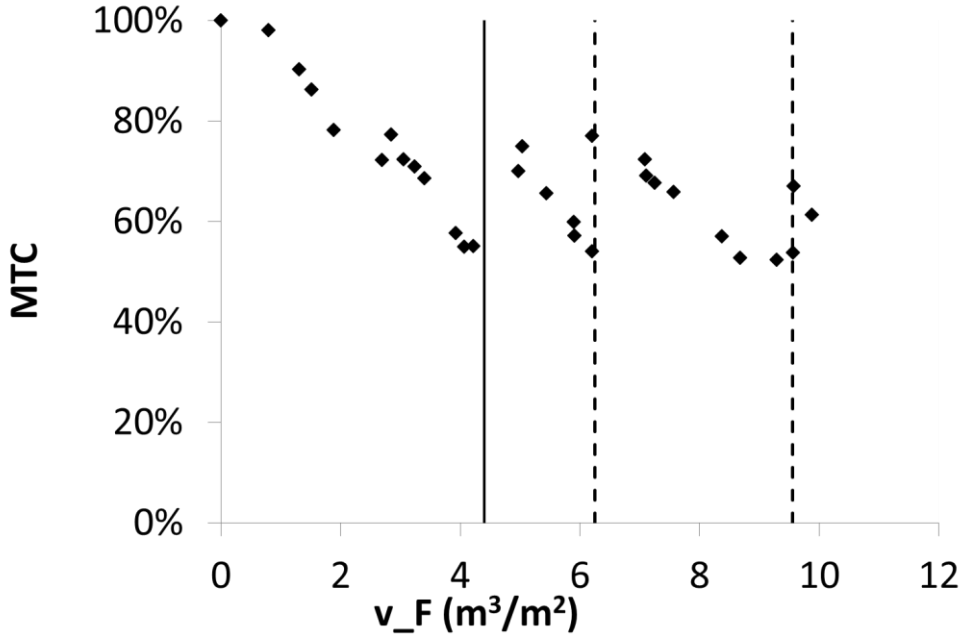


Afbeelding 6. Voedingsspacerloze RO-installatie. Links systeem zonder membraanvel. Rechts tijdens testen met oppervlaktewater 'Grecht'

De voedingsspacerloze RO werd gevoed met het oppervlaktewater 'Grecht' na een grof filter (250 µm) zonder $FeCl_3$ -dosering. De langsstroomsnelheid tijdens de test was 0,56 m/s; dit komt overeen met een voedingsdebiet van 100 L/uur. De flux door het RO-membraan was 13 L/m^2.uur bij 2 bar. Tijdens de testen is de drukval over het voedingskanaal niet gemeten. Ook tijdens de test met de voedingsspacerloze RO werd er na een MTC-daling van meer dan 50% een CIP uitgevoerd.

Resultaten voedingsspacerloze RO

Het MTC-verloop tijdens de test met het voedingsspacerloze RO-membraan, als functie van het cumulatief geproduceerd volume, is weergegeven in Afbeelding 7.



Afbeelding 7. Verloop MTC tijdens voedingsspacerloze RO-test. CIP weergegeven als zwarte stippellijn. Stilstand weergegeven als zwarte lijn

Na een productie van ongeveer 1,5 m^3/m^2 begon de MTC te dalen door membraanvervuiling. Na 4,3 m^3/m^2 heeft de installatie enkele dagen stilgestaan omdat er geen aanvoer van water was als gevolg van een externe storing. Op dat moment was de daling vergelijkbaar met de MTC-daling bij het SW-RO-element na het 25µm-filter.

Deze periode van stilstand had een positief effect op de MTC-daling, waarschijnlijk door het gemakkelijker loslaten van de vuillaag. De MTC nam duidelijk toe, maar door onomkeerbare vervuiling niet tot het oorspronkelijke niveau. Na de eerste reiniging kon de MTC aanzienlijk worden verhoogd (30%). Dit is vergelijkbaar met de verbetering van de MTC na de CIP van de SW-RO na 25µm-filter. Het effect van een CIP is verder vergelijkbaar met het effect van stilstand. Nadat de installatie voor de tweede keer chemisch was gereinigd, was er al weer vrij snel een reiniging nodig. Er werd twee keer zoveel permeaat geproduceerd (10,5 m^3/m^2) als met de RO na 25µm-filter, maar beduidend minder dan met de RO na UF. Hierbij dient te worden opgemerkt dat de installaties niet in exact dezelfde periode werden getest maar wel bij een vergelijkbare watersamenstelling van het oppervlaktewater (zie afbeelding 1).

SW-RO vs voedingsspacerloze RO

Het SW- en het voedingsspacerloze RO-systeem zijn vergeleken bij een minimale (250+25- en 250µm-filter) voorbehandeling. Om een goede vergelijking tussen de verschillende systemen te kunnen maken is er naar de permeaatproductie (flux) gekeken. De berekende permeaatproductie is genormaliseerd voor standaardwaarden zodat de verschillende systemen één op één kunnen worden vergeleken onder dezelfde omstandigheden.

De genormaliseerde permeaatproductie bleek bij het voedingsspacerloze RO-membraan significant (75%) hoger te zijn dan die van het SW-RO-membraan.

Het spiraalgewonden element is veel gevoeliger voor verstopping van de voedingskanalen, doordat deze gevuld zijn met een spacer. In de voedingsspacer kan zich biomassa ontwikkelen en daarnaast is de spacer een vangnet voor deeltjes, zeker als er zich ook een biofilm op vormt. De gevoeligheid voor voedingsspacerverstopping is ook duidelijk zichtbaar in de toename van de drukval tijdens de testperiode met de spiraalgewonden elementen (zie afbeelding 5).

Technisch/economische haalbaarheid 1-step RO

Er is een technisch/economische vergelijking gemaakt tussen het 1-step-RO-concept en het scenario waarbij na een grove filtratiestap het voedingswater wordt behandeld door ultrafiltratie en RO. Bij 1-step RO wordt vóór de RO een fijnfiltratiestap toegepast.

De geschatte totale kosten van het 1-step-RO-scenario (250+25µm-filter voorzuivering) met SW-RO-membranen (0,49 €/m^3) zijn lager dan die van het conventionele (250µm-filter+) UF-RO-scenario (0,61 €/m^3). Uit de experimentgegevens blijkt echter dat 1-step SW-RO, in vergelijking met de conventionele bedrijfsvoering (UF-RO), gevoeliger is voor verstopping van de voedingsspacer. Om het verstoppingsprobleem te verminderen is toepassing van het voedingsspacerloze RO-concept potentieel een goed alternatief. Het voedingsspacerloze concept is weliswaar duurder, maar technisch/economisch kan het mogelijk wel de moeite waard zijn om een dergelijk concept te ontwikkelen. Door het verschil in kosten tussen UF-RO en 1-step SW-RO is hier immers nog financiële speelruimte voor.

In deze testen bestond het RO-concept uit een vlakke plaat, maar er valt ook te denken aan capillaire RO. Een capillair RO-membraan heeft immers ook geen voedingsspacer en kan met minimale voorbehandeling worden bedreven. Er bestaan echter geen commercieel beschikbare en betaalbare capillaire RO-membraansystemen.

Conclusies

Alle RO-processen bereikten uiteindelijk een daling van de permeabiliteit (MTC) met meer dan 50% (UF-voorbehandeling SW-RO na ~20 m^3/m^2, 25 µm-voorbehandeling SW-RO na ~5 m^3/m^2 en voedingsspacerloze RO na ~10 m^3/m^2). Bij UF-SWRO treedt de MTC-daling weliswaar later op, maar raakt ook de UF behoorlijk vervuild. Dit is een gedeeltelijke verplaatsing van het probleem.

SW-RO met alleen een 25µm-screen als voorbehandeling leidt, naast de MTC-daling, ook tot een snelle spacerverstopping, ondanks de frequente lucht/waterspoeling.

Bij minimale voorbehandeling is een spiraalgewonden module niet het meest geschikte ontwerp, vooral vanwege optredende voedingsspacerverstopping. Bij toepassing van het voedingsspacerloze RO-concept treedt er nauwelijks verstopping op. Uit de technisch/economische evaluatie blijkt dat, met name voor een 1-step RO-concept, voedingsspacerloze RO-systemen interessant zijn als alternatief voor spiraalgewonden RO-systemen.

Dankwoord

Dit onderzoek werd mede gefinancierd uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat. De auteurs willen Bastiaan Blankert (Kaust), Luuk de Waal (KWR) en Deverick Daantje (Hogeschool Rotterdam) bedanken voor hun bijdrage aan dit onderzoek.

Referenties

1. Meer, W.G.J. van (2013). *Inaugurele rede*, TU Delft

2. Harmsen, D. Wessels, L.P. (2018) *Oppervlaktewater RO met minimale voorzuivering*. TKI-rapport KWR 2018.041

3. Harmsen, D. Cornelissen, E. (2018). *Oppervlaktewater RO te Kamerik met minimale voorzuivering*. TKI-rapport KWR 2018.090

4. Tian, J.Y., Ernst, M., Cui, F., Jekel, M. (2013). 'Correlations of relevant membrane foulants with UF membrane fouling in different waters'. *Water Research* 47 (3), pp. 1218-1228

5. Zheng, X., Ernst, M, Huck, P.M., Jekel, M. (2010). 'Biopolymer fouling in dead-end ultrafiltration of treated domestic wastewater'. *Water Research* 44 (18) pp. 5212-5221