

## **Periodiek spoelen met lucht en water (AiRO) voorkomt membraanvervuiling in hogedrukfiltratie-membranen**

*Danny Harmsen, Emile Cornelissen, Erwin Beerendonk (KWR), Martin Pot, Sjack van Agtmaal (Evides Industriewater)*

**Hogedrukfiltratie biedt vele voordelen, maar membraanvervuiling leidt tot operationele problemen. Om de vervuiling te beheersen worden membranen daarom op gezette tijden gereinigd. De effectiviteit van deze reiniging is sterk afhankelijk van de hydraulische omstandigheden. Deze kunnen verbeterd worden met lucht- en waterspoeling (AiRO) in verticaal geplaatste spiraalgewonden membraanelementen. Uit lab-, pilot- en full-scale onderzoek van KWR en Evides Industriewater in de periode 2005-2013 blijkt dat AiRO effectief is in het beheersen van de drukvaltoename en het verwijderen van biomassa en deeltjes. Evides Industriewater heeft de eerste succesvolle full-scale toepassing van AiRO in bedrijf.**

Membranefiltratie wordt steeds vaker toegepast bij (drink)waterbehandeling. Dit biedt vele voordelen, maar hogedrukfiltratie-membranen (voor nanofiltratie (NF) en omgekeerde osmose (RO)) hebben last van vervuiling, met name biofouling. Dit resulteert in operationele problemen (verstopping van het voedingswaterkanaal en daling van productwateropbrengst), en dat leidt weer tot hogere kosten en in sommige gevallen een mindere waterkwaliteit. Membranen worden daarom op gezette tijden gereinigd.

De effectiviteit van membraanreiniging is sterk afhankelijk van de hydraulische omstandigheden in spiraalgewonden membraanelementen (SWM) [1]. Om de hydraulische omstandigheden te verbeteren, is een nieuw reinigingsconcept ontwikkeld, dat gebruik maakt van lucht- en waterspoeling in verticaal geplaatste SWM-elementen [2]. Dit innovatieve concept staat bekend als het AiRO-concept. Het doel van AiRO is om

1. de voorbehandeling van het voedingswater te beperken,
2. het gebruik van chemische reinigingsmiddelen te verminderen,
3. het energieverbruik bij hoge druk membraanfiltratie-installaties (NF/RO) te verlagen.

Aan het einde van de jaren '90 van de vorige eeuw vond een eerste verkennend onderzoek naar deze nieuwe techniek plaats bij WMO (Waterleiding Maatschappij Overijssel, het huidige Vitens). Hierbij werd succesvol sporadische luchtspoeling toegepast op vervuilde spiraalgewonden NF- en RO-modules. Dit leverde een Nederlands octrooi op [3]. De eerste gepubliceerde ervaringen met het periodiek spoelen met lucht en water (AiRO) waren eveneens veelbelovend. AiRO resulteerde in een effectief herstel van de membraanprestaties zonder verlies van de membraanintegriteit [2].

Sinds 2010 is een 1400 m<sup>3</sup>/uur full-scale demiwaterinstallatie (DWP, afbeelding 1) in het Botlekgebied van het Havenbedrijf Rotterdam in gebruik. Bouwer en beheerder van de

installatie is Evides Industriewater. De DWP is de eerste en tot nu toe enige AiRO membraaninstallatie op praktijkschaal.



**Afbeelding 1. De 1400 m<sup>3</sup>/uur full-scale demiwaterinstallatie (DWP) in de Botlek van Evides Industriewater**

### **Proefopzet**

In de periode 2005-2013 zijn er meerdere lab- en pilot-scale onderzoeken gedaan op verschillende watertypen. Een aantal van deze onderzoeken wordt hieronder beschreven.

#### ***Membraantestcel***

Voor kortdurende laboratoriumproeven werd een zogenaamde membraanvervuilingsimulator (MFS) gebruikt als testcel [4]. In een MFS wordt een membraanvel met een voedingspacer geplaatst en kan vervuiling visueel in situ worden bestudeerd. De MFS is zo ontworpen dat vergelijkbare hydraulische condities worden bereikt als bij het gebruik van spiraalgewonden membraanelementen in de praktijk. Perslucht werd via de ingang van het voedingskanaal van de MFS geïntroduceerd en gemengd met voedingswater. Gedurende drie weken werd een RO-membraanvel gevoed met leidingwater uit Nieuwegein. Aan dit water werd natriumacetaat toegevoegd om de groei van biofilm te promoten. Voor het reinigen werd de MFS verticaal gezet, en het membraan werd gedurende een half uur gespoeld met lucht en water. De gecumuleerde biomassa van het membraanvel voor en na spoeling werd verzameld en gesuspenseerd. Deze suspensie werd geanalyseerd op adenosine-trifosfaat (ATP) om de concentratie van actieve micro-organismen te bepalen.

#### ***2,5 inch membraan installatie***

Voor langeduur-AiRO-experimenten werd een membraanfiltratie-opstelling gebruikt met drie parallel verticaal opgestelde 2,5 inch membraanelementen (afbeelding 2). De membranen werden gevoed met Nieuwegeins drinkwater. Aan ieder afzonderlijk element werd aan de voedingszijde natriumacetaat gedoseerd om biofilmvorming te promoten.

De test duurde 42 dagen. Het eerste membraanelement werd niet gespoeld (referentie), het tweede element dagelijks en het derde membraanelement éénmalig, aan het einde van de test op dag 42. Elke spoeling duurde 5 minuten. Na de test zijn de elementen uit de installatie gehaald en aangeboden voor autopsie. Membraanautopsies werden op vergelijkbare wijze

uitgevoerd als hierboven beschreven is voor de MFS, waarbij biologische parameters (ATP en koolhydraten) werden bepaald.

### **8 inch membraanelementen installatie**

Een opstelling (afbeelding 3) met twee parallel verticaal opgestelde 8 inch membraan-elementen werd gedurende 16 maanden gevoed met oppervlaktewater dat was voorbehandeld met coagulatie en UF. Het eerste element (referentie) werd alleen met lucht en water gespoeld als het drukverschil over het membraan groter werd dan 0,6 bar om beschadiging van het element te voorkomen. Het tweede element werd dagelijks gedurende 3 minuten gespoeld.



**Afbeelding 2. AiRO-opstelling met drie parallelle 2,5 inch SWM RO-elementen bij KWR**



**Afbeelding 3. AiRO-opstelling met twee parallelle 8 inch SWM RO-elementen bij Evides Industrierwater**

## **Resultaten en discussie**

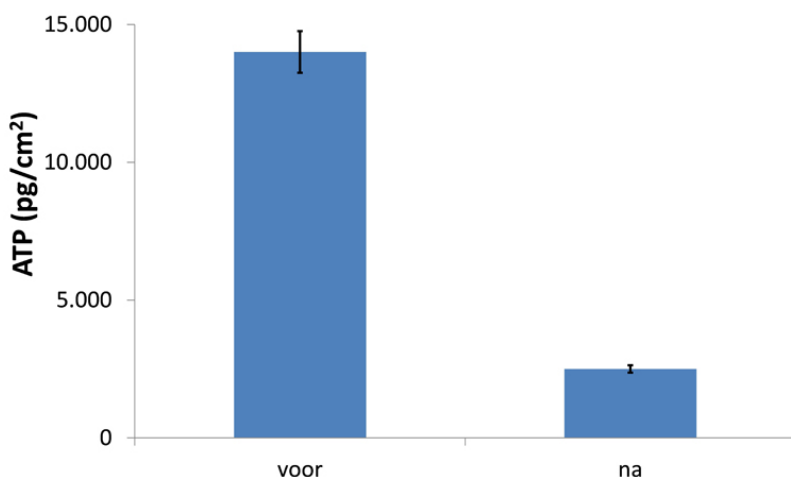
### **Laboratoriumtest membraantestcel**

Uit de testen met de MFS blijkt dat er tijdens het spoelen over de hele lengte en breedte van het stromingskanaal van het MFS een fijne verdeling van luchtbellens plaatsvindt (afbeelding 4). De luchtbellens in het spacergedeelte van het kanaal zijn ongeveer even groot als de ruitachtige filamenten van de voedingsspacer. Grotere bellens aan de voedingszijde van de MFS worden blijkbaar gebroken door de voedingsspacer [5]. Tijdens het spoelen is de hoeveelheid lucht in de testcel niet constant. Momenten met een kleine hoeveelheid luchtbellens werden gevolgd door momenten met een grote hoeveelheid luchtbellens in de testcel. Dit zorgt voor een hoge turbulentie aan de voedingszijde van de MFS tijdens de spoeling [6].



**Afbeelding 4. Fijn verdeelde luchtbellens tijdens spoelen met lucht en water over de lengte en breedte van het membraan-kanaal**

Het AiRO-experiment begon met ernstige biofouling op het membraanoppervlak van de voedingsspacer (bruin kleverig vastzittend materiaal). Na een lucht- en waterspoeling van 30 minuten leek een groot deel van de biomassa verwijderd te zijn, wat werd bevestigd door ATP-metingen. De ATP-concentratie daalde van 14.000 pg ATP/cm<sup>2</sup> naar 2.500 pg ATP/cm<sup>2</sup> (83 % reductie) (afbeelding 5). Dit betekent dat deze lucht- en waterspoeling zeer effectief is voor het verwijderen van biomassa, al wordt niet 100% verwijderd.



**Afbeelding 5. Verwijdering van biomassa van een vervuild membraanvel in een MFS met behulp van lucht- en waterspoeling (uitgedrukt in ATP) (uit [5])**

#### **Pilot met 2,5 inch RO elementen**

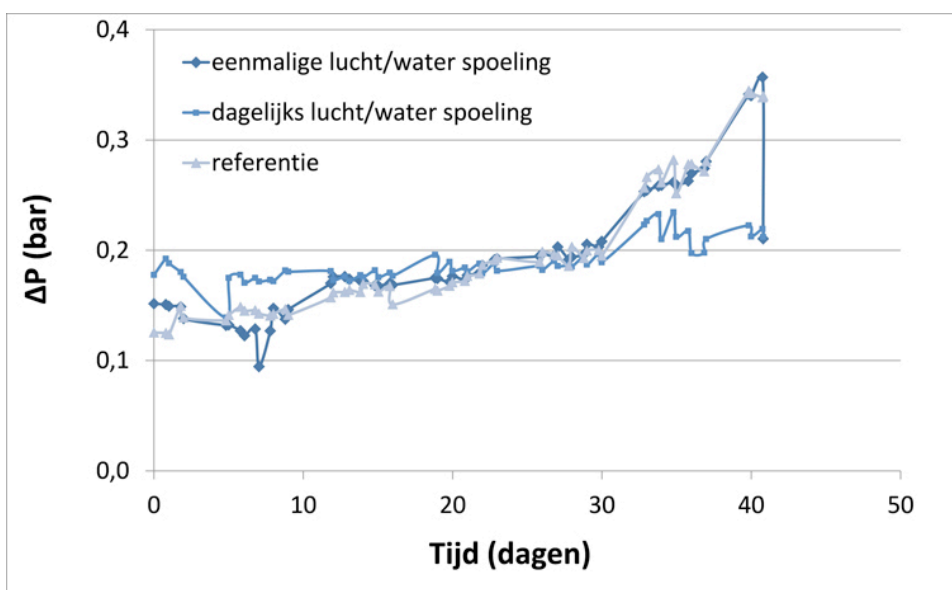
Uit de testen met de MFS blijkt dat spoelen met lucht en water een effectieve methode is om drukvaltoename over het voedingskanaal van het membraan te beheersen wanneer water met veel nutriënten wordt gebruikt. Dit komt door de hogere turbulentie tijdens de spoeling.

Uit de test met drie parallel verticaal opgestelde membraanelementen blijkt dat met lucht- en waterspoeling de drukval met succes kan worden beheerst. Dit is te zien in afbeelding 6. Doordat de initiële drukval bij alle drie anders was, lijkt er op het eerste gezicht weinig verschil tussen de methoden op te treden, maar nadere beschouwing laat zien dat dagelijkse spoeling wel degelijk effectief is. Waar de drukval met 172% toenam voor het referentie-element, was dit 39% voor het éénmalig gespoelde element, en slechts 11% voor het dagelijkse gespoelde element.

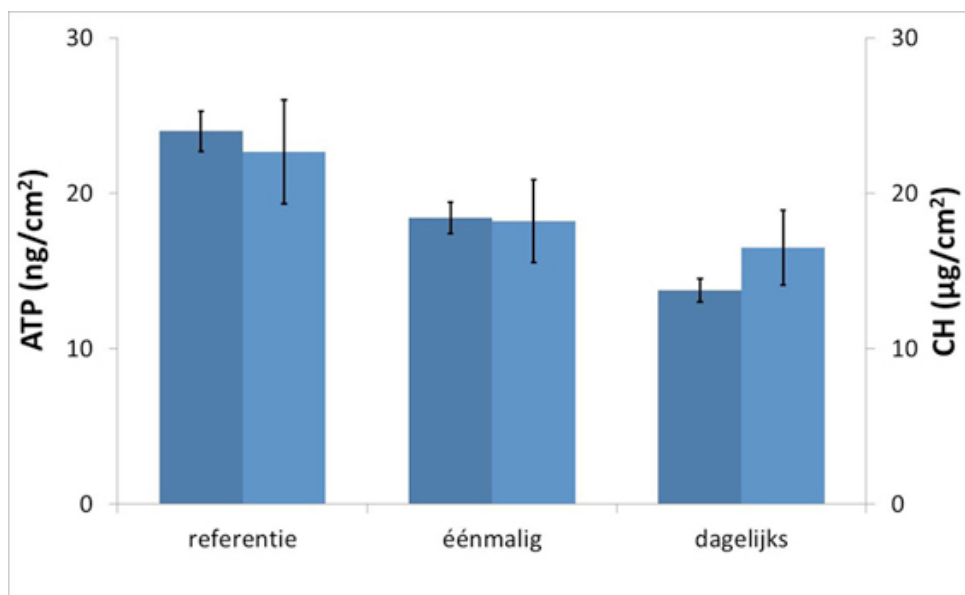
Lucht- en waterspoeling bleek de drukvaltoename over het membraan element niet volledig te kunnen voorkomen (afbeelding 6). Dit werd bevestigd door autopsie van de membranen waarbij de afzetting van biomassa werd gemeten aan de hand van ATP (als maat voor actieve biomassa; zie donkerblauwe balkjes in afbeelding 7) en koolhydraten (CH<sub>2</sub>O, als maat voor actieve en inactieve cellen en extracellulaire polymere stoffen; zie lichtblauwe balkjes in afbeelding 7).

De bacteriële hechting bleek zeer sterk te zijn, want na intensieve spoeling is slechts een beperkte daling in ATP en CH<sub>2</sub>O waarneembaar (maximale verlaging van 40 %). De lagere

drukvaltoename suggereert dat lucht- en waterspoeling verstopping van het voedingskanaal voorkomt of vermindert en dat biomassa maar beperkt wordt verwijderd.



**Afbeelding 6. Drukval in de tijd voor 2,5 inch SWM RO-elementen met en zonder spoeling**  
Voedingswater was Nieuwegeins drinkwater verrijkt met natriumacetaat.



**Afbeelding 7. Gemiddelde concentratie ATP (ng/cm<sup>2</sup>, donkerblauw) en CH (µg/cm<sup>2</sup>, lichtblauw) tijdens experimenten met lucht- en waterspoeling**

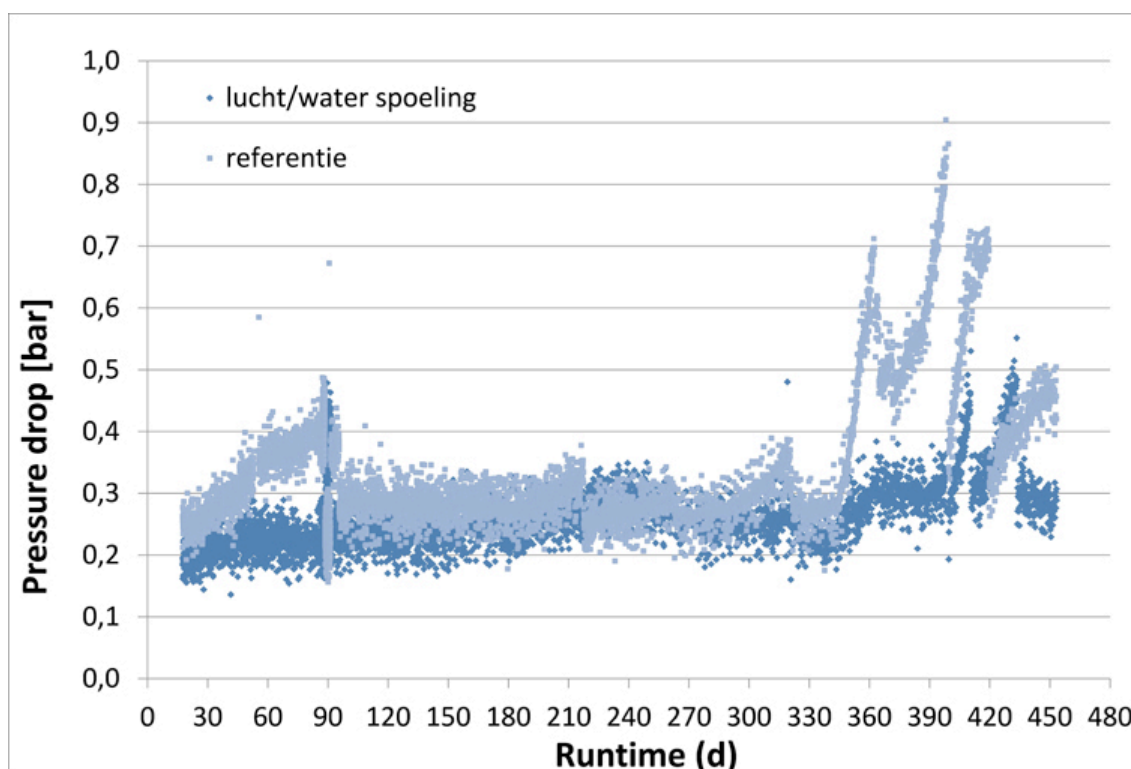
#### Pilot test met 8 inch SWM RO elementen

Lucht- en waterspoeling bleek ook drukvaltoename ten gevolge van membraanvervuiling in 8 inch SWM elementen bij toepassing op oppervlaktewater te voorkomen (afbeelding 8). Bij het referentie-element nam de drukval toe van 0,2 bar naar 0,4 bar gedurende de eerste 90 dagen. De daaropvolgende lucht- en waterspoeling bracht de drukval terug naar de initiële waarde van

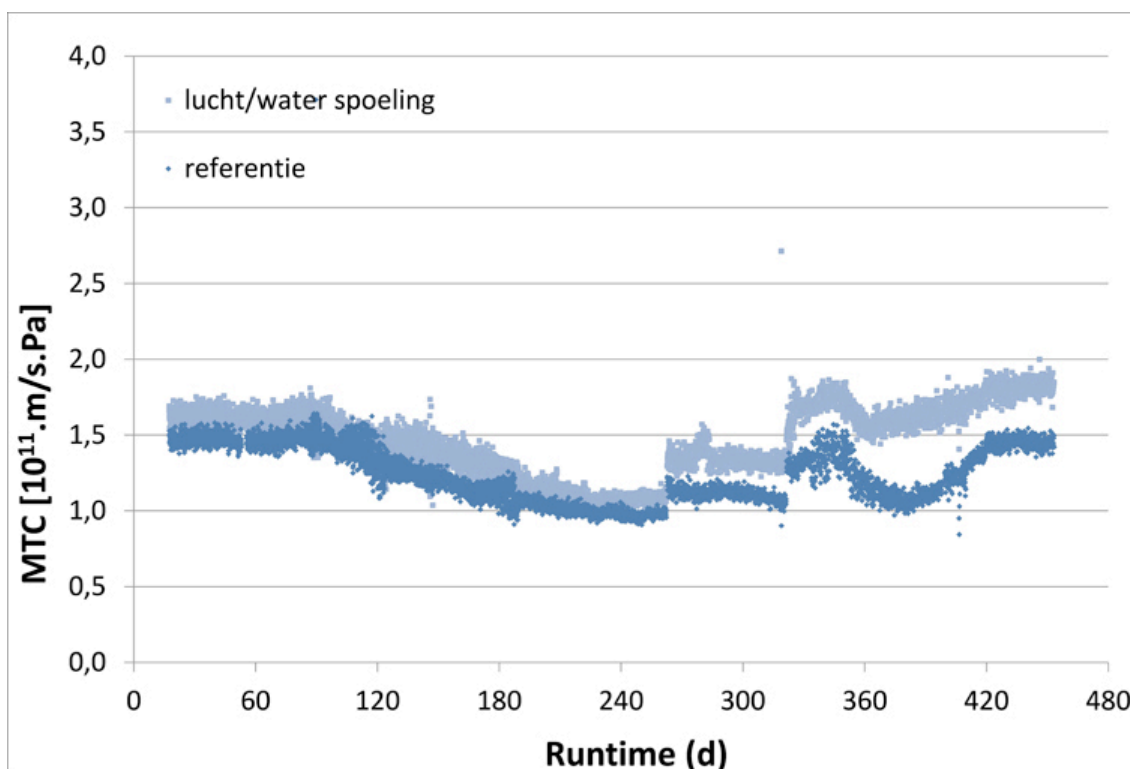
0,2 bar. Na 300 dagen nam de drukval drastisch toe om vervolgens na een lucht- en waterspoeling weer terug te keren richting de 0,2 bar. In het element met dagelijkse lucht- en waterspoeling is de drukvaltoename onder controle. De drukvaltoename werd veroorzaakt door membraanvervuiling (hoofdzakelijk biofouling), zoals bleek bij een membraanautopsie.

Bij het onderzoek wordt ook gekeken naar de membraanintegriteit: de mate waarin het materiaal zijn eigenschappen behoudt. De membraanintegriteit werd niet beïnvloed door dagelijkse lucht- en waterspoeling gedurende de 16 maanden dat de twee parallelle 8 inch SWM elementen in bedrijf waren. Dit volgt uit de permeabiliteitsgegevens uitgedrukt in de massatransportcoëfficiënt (MTC) (afbeelding 9).

De membraanpermeabiliteit laat een vergelijkbare ontwikkeling zien als de drukval over de twee geteste elementen. Een afname van de MTC van dag 0 tot dag 270 werd gevolgd door een toename van de MTC tot dag 450. De toe- en afname in MTC werd waarschijnlijk veroorzaakt door variaties in de waterkwaliteit van het voedingswater. De membraanpermeabiliteit van het element met dagelijkse lucht- en waterspoeling was aanvankelijk hoger en bleef hoger gedurende de 16 maanden dat er werd getest. Aan het einde van de test werd een lichte toename van de MTC waargenomen ten opzichte van het referentie-element. De zoutpassage bleef voor beide elementen ongewijzigd (resultaten hier niet weergegeven) wat ook wijst op een onveranderde membraanintegriteit.



**Afbeelding 8. Drukval in de tijd voor twee parallelle 8 inch SWM elementen met en zonder lucht- en waterspoeling**



**Afbeelding 9. Permeabiliteit in de tijd voor twee parallelle 8 inch SWM elementen met en zonder lucht- en waterspoeling**

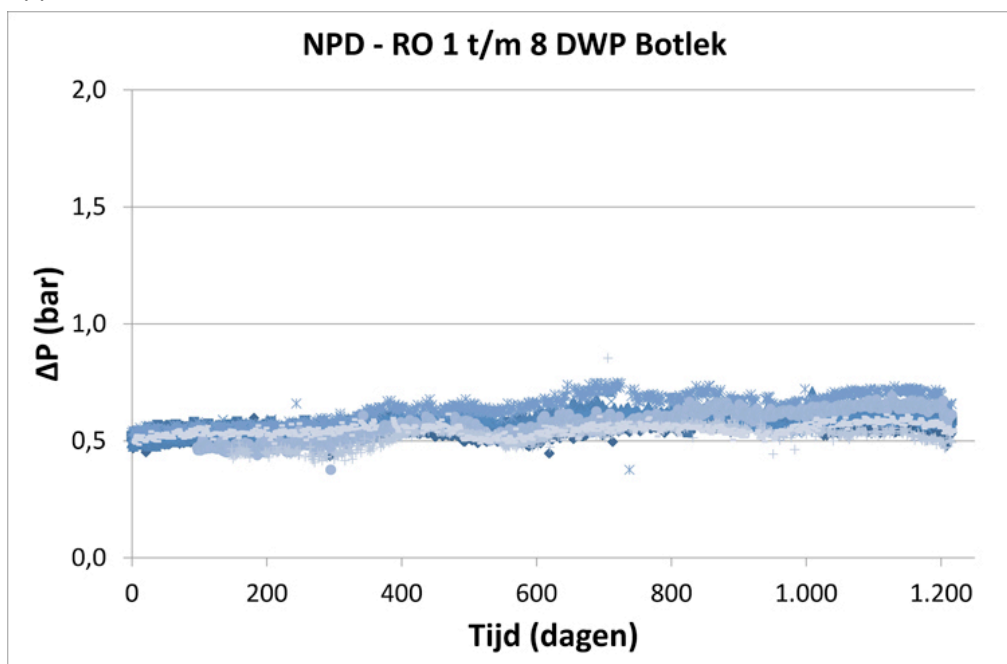
### **Eerste full-scale ervaringen met AiRO van Evides Industriewater**

De goede resultaten beschreven in de voorgaande paragrafen resulteerden in 2010 in de bouw van de eerste 1400 m<sup>3</sup>/uur AiRO full-scale demiwaterinstallatie (DWP), in het Botlekgebied van het Havenbedrijf Rotterdam. Hiervoor wordt voorbehandeld oppervlaktewater gebruikt (afbeelding 1). De full-scale DWP fabriek werd gebouwd en wordt beheerd door Evides Industriewater. In de DWP installatie bevinden zich acht aparte drietraps RO-straten, waarvan in de eerste trap 24 8 inch SWM elementen verticaal zijn geplaatst voor periodieke lucht- en waterspoeling. De opvolgende twee trappen zijn ontworpen als een conventionele (horizontale) RO-installatie.

Enkele nadelen van de huidige state of the art NF/RO-installaties zijn het hoge energieverbruik – gedeeltelijk veroorzaakt door membraanvervuiling – en het gebruik van chemische reinigingsmiddelen. AiRO pakt beide nadelen aan, wat resulteert in een lager energieverbruik (geschatte besparing 25%) en een lager verbruik van zuren, basen, detergents, enzymen, biociden en complexvormers zoals EDTA (geschatte besparing 80%). De eerste ervaringen met de full-scale DWP-installatie in de Botlek bevestigen dit. De kosten voor de AiRO installatie bedroegen ongeveer 1% van de totale investeringskosten voor de DWP-installatie. De besparingen zijn 5-10% op de energierekening – als gevolg van de verlaging van de jaarlijkse gemiddelde voedingsdruk voor de RO – en 95% in het chemicaliënverbruik. Verder neemt de levensduur van de membraanmodules toe met naar verwachting 50%.



De effectiviteit van de lucht- en waterspoeling in het beheersen van de drukvaltoename werd in de eerste jaren na in bedrijfstelling van de full-scale DWP-installatie bevestigd (afbeelding 10). Gedurende die periode kwam de drukval niet boven de 0,8 bar uit. Gedurende de eerste 250 dagen werd de DWP-installatie gevoed met drinkwater (omdat de voorbehandeling van het oppervlaktewater nog niet gereed was). Daarna werd er overgeschakeld op voorbehandeld oppervlaktewater.



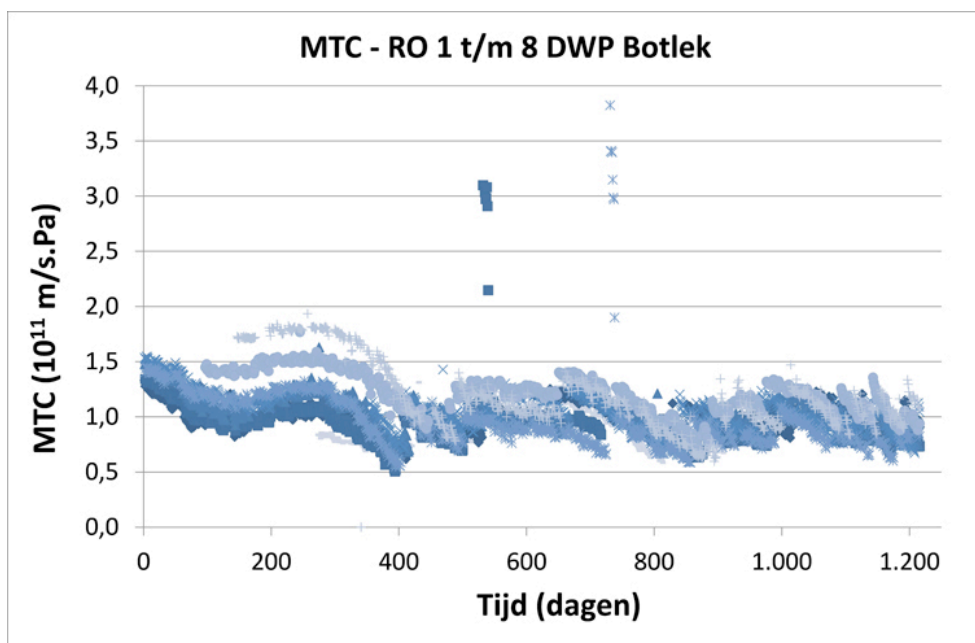
**Afbeelding 10. Drukvaltoename in de tijd bij 8 stacks van verticaal geplaatste 8 inch SWM-elementen met lucht- en waterspoeling in de full-scale DWP installatie (Botlek)**

Lucht- en waterspoeling wordt in de Botlekopstelling toegepast als de drukval stijgt met 5-10 %. In de praktijk betekende dit dat er gedurende de zomerperiode een maandelijkse lucht- en waterspoeling plaatsvond die samenviel met een algenbloeiperiode, die voor substantiële membraanvervuiling zorgde. Gedurende de eerst 250 dagen daalde de permeabiliteit, uitgedrukt als MTC (afbeelding 11), van 1,5 naar  $1,0 \cdot 10^{11}$  m/s.Pa. Nadat werd overgeschakeld op voorbehandeld oppervlaktewater daalde de permeabiliteit met ongeveer met 20%, waarschijnlijk als gevolg van membraanvervuiling.

### Conclusies

- AiRO is effectief in het beheersen van de drukvaltoename als gevolg van membraanvervuiling.
- AiRO verwijdert succesvol biomassa van de membraanelementen.
- AiRO kan biomassa effectief, maar niet voor 100%, verwijderen in SWM elementen
- De integriteit van de membranen werd niet aangetast door AiRO gedurende 20 maanden bedrijfsvoering.
- De eerste succesvolle full-scale toepassing van AiRO (DPW Botlek) is op dit moment in bedrijf. De installatie zorgt voor een lager energieverbruik (10 %) en chemicaliënverbruik (95%).





**Afbeelding 11. Membraanpermeabiliteit, uitgedrukt als MTC-ontwikkeling in de tijd, bij 8 stacks van verticaal geplaatste 8 inch SWM elementen met lucht- en waterspoeling in de full-scale DWP installatie (Botlek)**

Het onderzoek werd onder andere uitgevoerd in het TTIW-samenwerkingskader van Wetsus, centre of excellence for sustainable water technology ([www.wetsus.nl](http://www.wetsus.nl)). Wetsus wordt gefinancierd door de ministeries van Economische Zaken en van Infrastructuur en Milieu, the European Union Regional Development Fund, de provincie Fryslân en het EZ / Kompas-programma van het Samenwerkingsverband Noord-Nederland. Verder is het onderzoek in belangrijke mate mogelijk gemaakt door het Bedrijfstakonderzoek Waterleidingbedrijven (BTO), inclusief bijdragen van Evides, Vitens en Hatendoorn Water. Binnen het huidige programma van Topconsortia Kennis en Innovatie Watertechnologie (TKI) wordt gewerkt aan het verder valoriseren van de AiRO-technologie.

#### Literatuur

1. Kooij, D. van der, Hijnen, W. A. M., & Cornelissen, E. R. (2010). Biofouling of Spiral-Wound Membranes in Water Treatment, Water Research Foundation, Denver, Colorado.
2. [Cornelissen, E. R., Vrouwenvelder, J. S., Heijman, S. G. J., Viallefont, X. D., Van Der Kooij, D., and Wessels, L. P. (2007). Periodic air/water cleaning for control of biofouling in spiral wound membrane elements, *Journal of Membrane Science*, 287(1), 2007b, 94-101.
3. Peter Wessels, Bas Rietman, Ron Jong, "Werkwijze en inrichting voor het zuiveren van oppervlaktewater" Octrooi 1019130
4. Vrouwenvelder, J. S., Bakker, S. M., Wessels, L. P., and van Paassen, J. A. M. The Membrane Fouling Simulator as a new tool for biofouling control of spiral-wound membranes. *Desalination*, 204(1-3 SPEC. ISS.), 2007, 170-174.
5. Cornelissen, E. R., Rebour, L., van der Kooij, D., and Wessels, L. P. Optimization of air/water cleaning (AWC) in spiral wound elements. *Desalination*, 236(1-3), 2009, 266-272.
6. Verberk, J. Q. J. C., and van Dijk, J. C. Air sparging in capillary nanofiltration. *Journal of Membrane Science*, 284(1-2), 2006, 339-351.