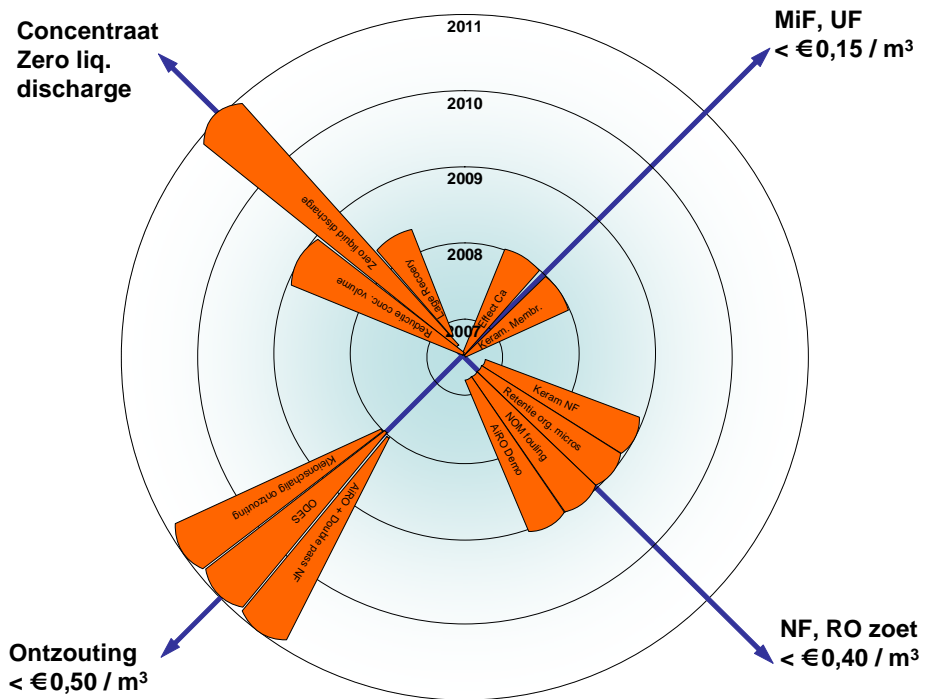


# Membraanfiltratie in BTO 2007-2011



**BTO 2007.001**  
11 januari 2007

# **Membraanfiltratie in BTO 2007-2011**

© 2007 Kiwa Water  
Research  
Alle rechten voorbehouden.  
Niets uit deze uitgave mag  
worden verveelvoudigd,  
opgeslagen in een  
geautomatiseerd  
gegevensbestand, of  
openbaar gemaakt, in enige  
vorm of op enige wijze,  
hetzij elektronisch,  
mechanisch, door  
fotokopieën, opnamen, of  
enig andere manier, zonder  
voorafgaande schriftelijke  
toestemming van de  
uitgever.

**Kiwa Water Research**  
Groningehaven 7  
Postbus 1072  
3430 BB Nieuwegein

Tel. 030 606 95 11  
Fax 030 606 11 65  
[www.kiwawaterresearch.eu](http://www.kiwawaterresearch.eu)

# Colofon

**Titel**

Membraanfiltratie in BTO 2007-2011

**Projectnummer**

11.1589.700

**Projectmanager**

Anneke Gijsbertsen

**Opdrachtgever**

BTO

**Kwaliteitsborger(s)**

Emile Cornelissen

**Auteur(s)**

Jan Hofman, Peter Wessels

Dit rapport is uitsluitend bestemd voor BTO participanten en **niet openbaar**

# Inhoud

	<b>Inhoud</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Ontwikkelingen Membraanfiltratie</b>	<b>3</b>
2.1	Membraanfiltratie veelbelovend en betaalbaar?	3
2.2	Inzet van membraanfiltratie in de wereld	4
2.3	Ontwikkelingen in de Nederlandse drinkwatersector	5
2.4	De 'membraan ambitie' van de Nederlandse waterbedrijven	6
<b>3</b>	<b>Membraanfiltratie in BTO 2003-2006</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Financieringsruimte</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Strategische keuzes membraanonderzoek</b>	<b>13</b>
5.1	Focus	13
5.2	Groeirichtingen en Projecten	13
5.2.1	Beheersen vervuiling micro- en ultrafiltratie	13
5.2.2	Inzet NF/RO op (zoet) oppervlaktewater of RWZI effluent	15
5.2.3	Zeewaterontzouting	17
5.2.4	Concentraat	18
<b>6</b>	<b>Overzicht projecten</b>	<b>21</b>
<b>7</b>	<b>Referenties</b>	<b>25</b>

# 1 Inleiding

Begin 2006 is door de PBC Waterbehandeling en het College van Opdrachtgevers het stuk nr. 2006-EGIZ03 "voorstel BTO Waterbehandeling 2006 e.v." vastgesteld. In het document wordt een analyse gemaakt van de uitdagingen op het gebied van waterbehandeling. De achtergrond voor de uitdagingen is het dilemma waarvoor de sector gesteld wordt: enerzijds is kostenreductie noodzakelijk, anderzijds verlangt de consument veilig drinkwater van een hoge kwaliteit. Uiteindelijk is dit stuk opgewerkt tot een visie voor het BTO Waterbehandeling en als zodanig ook vastgelegd in een BTO rapport (BTO 2006.034) [1].

Ondanks de doorgaans voortreffelijke drinkwaterproductie in Nederland, worden de Nederlandse drinkwaterbedrijven voortdurend geconfronteerd met nieuwe uitdagingen door ongewenste stoffen en pathogene micro-organismen in het ruwe water en soms zelfs in het drinkwater. De PBC Waterbehandeling stelt daarom dat het van belang is om nieuwe zuiveringstechnieken en -schema's te ontwikkelen die nodig zijn om de huidige kwaliteit en veiligheid te kunnen handhaven. Daarbij is wel nodig om de kosten laag te houden en ook andere barrières voor nieuwe technologie (zoals concentraat, relatief hoog energie- en chemicaliëngebruik, etc.) zoveel mogelijk te slechten.

In het BTO Waterbehandeling is daarom gekozen voor een focus in het onderzoek gericht op

- verwijdering van ongewenste stoffen en pathogene micro-organismen door verschillende zuiveringstechnieken,
- biologische stabiliteit en verwijdering van deeltjes in de zuivering om waterkwaliteitsverandering in het distributienet tegen te gaan, en
- technologische ontwikkeling van zuiveringstechnieken en -schema's waarmee kosten of andere belemmeringen kunnen worden gereduceerd.

Membraanfiltratie kan een goede keuze zijn om deze doelen te realiseren. Het grote voordeel van membraanfiltratie is dat met een zuiveringsstap meerdere van de bovengenoemde aspecten kunnen worden gehaald. In deze notitie wordt de visie weergegeven met betrekking tot het onderzoek naar membraanfiltratie binnen het BTO waterbehandeling voor de periode 2007-2011.

## 2 Ontwikkelingen Membraanfiltratie

### 2.1 Membraanfiltratie veelbelovend èn betaalbaar?

De membraanfiltratiemarkt is booming en overheerst de wereldmarkt voor waterbehandeling. De hoofdreden hiervoor is de toenemende waterschaarste, waardoor op steeds meer plaatsen zeewater en afvalwater als bron voor de drinkwatervoorziening wordt genomen. Membraanfiltratie vormt daarbij en enkelvoudige barrière en is goedkoper dan bijvoorbeeld verdamping.

Ook voor brak en zoetwatertoepassingen kiest men in veel gevallen voor membraanfiltratie boven oxidatie voor de verwijdering van organische microverontreinigingen en desinfectie. Dit vindt haar oorzaak in het feit dat in het verleden de chemische waterzuivering vaak aanleiding tot problemen gaf met o.a. trihalomethanen (chloring), bromaat (ozonisatie), NDMA (monochlooramine). Hierdoor is er ook in sommige landen (Frankrijk bijvoorbeeld) weerstand tegen de inzet van UV-peroxide of andere vormen van (geavanceerde) oxidatie. Membraanfiltratie is dan het alternatief.

In Nederland is de laatste jaren een forse scepsis ontstaan ten aanzien van membraanfiltratie. Onze inschatting is dat dit komt door het wekken van onrealistische verwachtingen. In de praktijk bleken opbrengst (netto flux), chemicaliënverbruik (fouling), effectiviteit (integriteit) en operationele kosten (menskracht) hoger dan vooraf door de leveranciers ingeschat. Uiteindelijk is de toepassing van membraanfiltratie in de praktijk minder rooskleurig gebleken: de bedrijfsvoering viel tegen en de kosten waren hoger dan gepland.

Het is een misvatting dat nanofiltratie of lage druk RO altijd duurder zou moeten zijn dan oxidatieve technieken. UV-peroxide gevolgd door actieve koolfiltratie is immers ongeveer even duur als nanofiltratie of lage druk RO. Ook het energieverbruik is vergelijkbaar. Het verschil wordt gemaakt in de voorzuivering en de kosten die daarmee gemoeid gaan om membraanvervuiling te voorkomen. Wanneer de voorzuivering sterk kan worden beperkt, zal blijken dat membraanfiltratie concurrerend is in prijs.

Concentraat blijft eveneens een belangrijk aandachtspunt bij membraanfiltratie. Ten aanzien van de concentraatproblematiek is echter de laatste jaren veel vooruitgang geboekt met concepten die de concentraatstroom met 90% kunnen reduceren. Hybride installaties met pelletontharding en/of ionenwisseling zijn daarvan goede voorbeelden. Wereldwijd wordt er toegewerkt naar zero liquid discharge systemen. Een alternatieve, Nederlandse benadering is om juist een lagere recovery te kiezen. Bij de zoethouder behoeven geen anti-scalants meer te worden toegevoegd en wordt een concentraat met lagere zoutgehaltes verkregen, waardoor het concentraat eenvoudiger afgezet zou moeten kunnen worden.

**Membraanfiltratie is veelbelovend en het kan beter & goedkoper!**

## 2.2 Inzet van membraanfiltratie in de wereld

### 2.2.1 Zeewater ontzouting

Internationaal is er veel belangstelling voor membraanfiltratie. Membraanfiltratie wordt gezien als de belangrijkste technologie voor het oplossen van mondiale waterproblemen. Grote gebieden op de wereld kampen met watertekorten. Daar staat tegenover dat de helft van de wereldbevolking op een afstand minder dan 50 km vanaf de kust woont. Toepassing van zeewaterontzouting in deze gebieden ligt daardoor voor de hand.

Een recente marktanalyse door Global Water Intelligence [2] op het gebied van zeewaterontzouting voorspelt een groei van 12 % per jaar tot 2010. Het grootste deel van de markt wordt bepaald door de Golfregio gevolgd door Spanje en Algerije. Na 2010 is de verwachting dat de grootste groei zal plaatsvinden in China en India. De omvang van de markt na 2015 zal in die regio's kunnen toenemen met 15 % per jaar.

Door Sandia [4] is een inventarisatie gemaakt van de kosten van membraanfiltratie. De kosten voor zeewaterontzouting bedragen tussen \$ 0,45 en \$ 0,56 en worden genoemd op basis van een reeks publicaties in internationale literatuur. Hierbij moet worden opgepast dat appels en peren met elkaar worden vergeleken. Zo is bekend dat Tampa Bay (0,56 US\$/m<sup>3</sup>) en Askelon (0,50 US\$/m<sup>3</sup>) eerder brak dan zeewater ontzouten. De kosten zijn tussen de 40 en 55 % afkomstig uit vaste kosten (rente en afschrijving). Daarnaast is een aanzienlijk deel van de kosten gerelateerd aan het energieverbruik. Bij zeewaterontzouting kan dit oplopen tot bijna 50 %. De overige kosten zijn afkomstig van membraanvervanging, menskracht en chemicaliën.

De laatste jaren is er een sterk dalende tendens ontstaan in de kosten voor zeewaterontzouting, veroorzaakt door nieuwe ontwikkelingen zoals energierterugwinning uit concentraat, double pass nanofiltratie systemen en gecombineerde systemen met membranen en verdampers. In de huidige *state-of-the-art* wordt aangenomen dat een zeewaterontzouting kan worden uitgevoerd voor zo'n € 0,50 à € 0,70 per kubieke meter [14].

### 2.2.2 Brak- en zoetwater toepassingen

Behalve voor ontzouting zijn membranen ook inzetbaar voor de verwijdering van organische en anorganische verontreinigingen, zoals bestrijdingsmiddelen, EDC's, persoonlijke verzorgingsmiddelen, industriële stoffen etc. In gebieden met grote waterschaarste is ook hergebruik van afvalwater een belangrijk toepassingsgebied voor membraanfiltratie.

Voor brak water worden door Sandia [4] bedragen tussen \$ 0,18 en \$ 0,70 genoemd. Daarbij wordt aangetekend dat er geen uniforme rekenwijze gehanteerd wordt en onduidelijk is welke procesonderdelen (voorzuiivering, nazuiivering, concentraatbehandeling) zijn meegenomen of weggelaten. Bij zoet oppervlaktewater zijn de kosten voor membraanfiltratie circa € 0,30 tot € 0,50 exclusief voorzuiivering. De kosten voor de voorzuiivering kunnen eveneens oplopen tot € 0,40 per kubieke meter.

### 2.2.3 *Onderzoek*

Wereldwijd is er veel aandacht voor toepassing van en onderzoek naar membraanfiltratie. Sandia National Laboratories en the Bureau of Reclamation van het US Department of the Interior hebben een uitgebreide Desalination and Water Purification Roadmap opgesteld [3]. In dit document wordt ontzoutingstechnologie gezien als een belangrijk middel om the uitdagingen op het gebied van drinkwater, zowel kwantitatief als kwalitatief op te lossen. Sandia identificeert (in 2003) de investerings- en bedrijfsvoeringskosten als belangrijkste Achilleshiel van de technologie. In de roadmap worden de volgende onderzoek op de volgende gebieden vastgesteld:

- Vermindering van investerings- en bedrijfsvoeringskosten;
- Verbetering van de procesefficiency
- Verbetering van de mogelijkheden om verontreinigingen in het water te verwijderen.

De belangrijkste onderwerpen voor onderzoek zijn membraantechnologie, innovatieve/nieuwe technologie, thermische ontzouting, concentraat en waterhergebruik.

Om contact te houden met de internationale onderzoekswereld op het gebied van membraanfiltratie, is Kiwa Water Research vertegenwoordigt in het Management Committee van de IWA Specialist Group on Membrane Technology. Jan Hofman is de vertegenwoordiger in dit committee dat gemiddeld zo'n tweemaal per jaar bij elkaar komt. De specialist group is o.a. verantwoordelijk voor de organisatie van de IWA Membrane Technology Conference. Deze is gepland in 2007 in Harrogate en 2009 in Beijing.

### 2.3 **Ontwikkelingen in de Nederlandse drinkwatersector**

De Nederlandse drinkwatersector heeft zich de laatste jaren ontwikkeld van een sterk technologiegedreven bedrijfstak naar een bedrijfstak waarin doelmatigheid en de consument centraal staan. Een belangrijk instrument en drijvende kracht daarbij is de invoering de benchmark geweest. Het streven naar verbetering van de doelmatigheid heeft daarbij geleid tot een groot aantal fusies waarbij het aantal waterleidingbedrijven sterk is afgenomen. Doordat de vraag naar drinkwater in Nederland stabiliseert of zelfs licht daalt, is de noodzaak voor grote investeringen in nieuwe productielocaties en uitbreiding van productiecapaciteit gering. Investeringen die plaatsvinden zijn in het algemeen vervangingsinvesteringen of investeringen om goedkoper te produceren en/of de waterkwaliteit te verbeteren.

Nanofiltratie voor de drinkwaterproductie wordt op relatief kleine schaal toegepast op anaeroob grondwater (ongeveer 10 installaties bij Vitens). Doel van deze installaties is meestal een gecombineerde kleurverwijdering en hardheidsreductie. Daarnaast wordt CSF-AKF-UF in combinatie met RO toegepast op oppervlaktewater in Heemskerk (PWN) met als doel desinfectie, ontzouting en verwijdering van ongewenste stoffen. Ook wordt UF en RO toegepast voor de productie van industriewater op een aantal locaties.



Toch is de belangstelling voor membraanfiltratie in Nederland de laatste paar jaar fors afgenomen. De belangrijkste redenen daarvoor zijn

- de kosten blijken in de praktijk beduidend hoger te zijn dan oorspronkelijk gedacht. Het in bedrijf houden van de installatie vergt vaak relatief veel menskracht. De opbrengst van een installatie (flux en recovery) is daardoor nogal eens lager dan in het ontwerp is aangenomen. Daarnaast is het energieverbruik relatief hoog;
- vezelbreuk en integriteitsproblemen bij ultrafiltratie leiden vaak tot uitval i.v.m. membraanreparaties of -vervanging. Dit leidt tot een aanzienlijke kostenverhoging als gevolg van down time, noodzakelijke overdimensionering en menskracht;
- het chemicaliënverbruik is hoog. Bij UF en MF moet vaak een vlokmiddel worden gedoseerd om vervuiling te beheersen en regelmatig teruggespoeld met inzet van chloorbleekloog. Bij NF en RO worden anti-scalants en/of zuur gedoseerd om scaling te voorkomen en de recovery te verhogen. Daarnaast zijn veel chemicaliën en mensuren nodig voor het reinigen van membranen en de vervuiling te beheersen;
- veelvuldig reinigen om de vervuiling te beheersen kan ook de levensduur van de membranen bekorten. Dit leidt dan tot hogere membraanvervangingskosten;
- de beperkte mogelijkheden en de kosten voor afzet van het concentraat, met name bij toepassing van NF en RO.

Ook Nederland wordt voortdurend geconfronteerd met nieuwe uitdagingen door ongewenste organische stoffen en nieuwe pathogenen in het ruwe water. Nieuwe technologie is nodig om ook moeilijk verwijderbare stoffen aan te pakken. Een van de mogelijkheden is toepassing van (geavanceerde) oxidatie processen zoals ozon of UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Deze technieken zijn relatief goedkoop (0,25-0,30 €/m<sup>3</sup> voor UV-peroxide + AKF), maar leiden ook tot de vorming van nevenproducten.

Door de huidige kostenontwikkeling lijkt membraantechnologie een goed alternatief te kunnen bieden mits een oplossing gevonden wordt voor het concentraat en vervuiling beheersbaar wordt zonder intensieve voorzuivering. Het hier voorgestelde onderzoeksprogramma zal daar dan ook vooral op gericht zijn.

Voor de TTI Water is het daarnaast van belang dat toegepast onderzoek wordt verricht, mede met het oog op de export van kennis door Nederlandse bedrijven. Aangezien membraanfiltratie een wereldwijd groeiende markt is, zal membraanfiltratie binnen de TTI Water een belangrijke plaats verdienen.

#### **2.4 De 'membraan ambitie' van de Nederlandse waterbedrijven**

*Laten we door ons onderzoek membraanfiltratie goedkoper maken en oplossingen bieden voor het concentraat. Membraanfiltratie zal daarmee breder ingezet worden voor de Nederlandse drinkwatervoorziening. Tevens kunnen we daarmee ook export genereren en een excellente waterzuivering*

*met membraanfiltratie voor een bredere wereldpopulatie bereikbaar maken  
(Millenium Development Goals).*



### 3 Membraanfiltratie in BTO 2003-2006

De projecten en prioritering van het membraanonderzoek in het BTO zijn vastgesteld door de voormalige PBC membraanfiltratie [13]. De volgende onderwerpen en prioriteiten, vermeld tussen haakjes, zijn daarbij benoemd:

1. Concentraat (zeer belangrijk): Onderzoek naar technologische en bestuurlijke oplossingen
2. Vervuiling (zeer belangrijk): Aanpak vanuit een fundamentele richting, maar wel in aansluiting met de praktijk
3. Membraankeuze (belangrijk): belangrijk voor de aanpak van vervuilingproblemen
4. Kwaliteitsaspecten (continueren): Kwaliteitsaspecten werd in 2003 minder belangrijk beoordeeld. Het is immers bekend wat membranen voor drinkwaterkwaliteit kunnen betekenen. De inzetbaarheid van membranen hangt meer af van punt 1-3. Inmiddels is gebleken dat de kennis ten aanzien van de verwijdering van organische microverontreinigingen met membranen nog tot veel nieuwe inzichten heeft geleid

Bovengenoemde onderwerpen en prioriteiten zijn in grote lijnen nog steeds actueel. Er zijn echter 2 verschillen te noemen met 3 jaar geleden.

Allereerst leggen we anno 2006 meer nadruk op kostenreductie, ondermeer door beperking van de vervuiling en de voorzuivering. Daarnaast is er het nodige bereikt in het onderzoek in de periode 2003-2006:

1. Het onderzoek heeft aangetoond dat ionen als calcium de werking van membraanfiltratie aanzienlijk kunnen beïnvloeden. Verwijderen van calcium:
  - maakt aanzienlijke recoveryverhoging bij nanofiltratie mogelijk, waardoor het concentraatvolume wordt gereduceerd;
  - voorkomt NOM-Calcium complexering bij nanofiltratie, waarmee een belangrijke oorzaak voor vervuiling kan worden weggenomen;
  - vermindert ook bij ultrafiltratie de vervuiling aanzienlijk.
2. Onderzoek naar toepassing van keramische microfiltratiemembranen toonde aan dat toepassing kan worden gerealiseerd tegen kosten die vergelijkbaar zijn met polymere membranen. Keramische membranen bleken robuuster en eenvoudiger in de bedrijfsvoering.
3. Voor de bewaking en het stellen van diagnoses is een aantal tools beschikbaar gekomen op basis van het BTO onderzoek. De Scaleguard is inmiddels een aantal jaren succesvol in gebruik. Daarnaast is er een test ontwikkeld voor het vaststellen van de vervuilingspotentie van ultrafiltratiemembranen (mini-UF). Ten slotte is in samenwerking met de programmalijs microbiologie de Membrane Fouling Simulator

(MFS) ontwikkeld om membraanvervuiling te bestuderen. Deze MFS wordt nu volop gebruikt in onderzoek BTO, Vitens en Wetsus.

4. Op het gebied van retentie van organische stoffen is vastgesteld dat de retentie niet alleen afhangt van het molecuulgewicht maar dat ook de polariteit een grote rol speelt. Vastgesteld is dat de retentie van een membraan lager is voor polaire stoffen dan voor apolaire stoffen.
5. Ten slotte is van een aantal nieuwe innovatieve toepassingsvormen van membranen zoals AiRO en forward osmosis (ODES, OMBR) een *proof-of-principle* bereikt, waardoor de weg voor verdere ontwikkeling gebaad is.

## 4 Financieringsruimte

In Tabel 1 is een overzicht gegeven van de begroting van de programmalijn Waterbehandeling voor de komende jaren. Als referentie zijn ook de toegekende budgetten voor 2006 weergegeven. Voor 2006 stelde het College van Opdrachtgevers een plafond van 1.120 k€ vast als richtwaarde voor de totale omvang van de programmalijn.

Zoals in de tabel te zien is de komende jaren al een groot deel van het budget in de programmalijn reeds toegekend aan projecten. De budgettaire ruimte in 2007 en 2008 is daarom beperkt. Bovendien is de PBC voornemens om in 2007 een nieuw onderzoek naar verwijdering van organische microverontreinigingen te starten (voorstel daarvoor ingediend bij CvO in september 2006).

Het project "Brak grondwater/zoethouder" heeft weinig voortgang gehad. In 2006 is het budget al een jaar vooruitgeschoven. Eind 2006 zal worden nagegaan of (en zoja, hoe) dit project moet worden voortgezet.

De laatste regel in de tabel (geel) geeft uiteindelijk aan wat de budgettaire ruimte in de programmalijn voor de komende jaren is.

Tabel 1. Voorstel begroting en ombuigingen Programmalijn Waterbehandeling 2006-2009.

Project/omschrijving	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Cofinanciering	Bron Cofinanciering
UF-NOM	75							
Keramische membranen UF	75							
Brak grondwater / zoethouder		150	128					
Q21 Concentraat	50						200	DC
Q21 NF NOM-vervuiling	50	50	50					
Q21 Retenties organische stoffen	50	50	50					
Zuivering grondwater voor Q21	220	180	70					
Aanpakd/optimalisatie waterzuiveringsprocessen NOM	100	100	100	100			200	IS
jaarlijkse onderzoeksbijeenkomst Waterbehandeling	20	20	20	20				
Beperking fouling spiral wound membranen (Airo)	50	75	75					
omzetting prioitaire stoffen en inactivatie pathogenen UV/H2O2	250	250	250	250			580	400 IS; 180 AwwaRF
Vrije Ruimte	75	75	75	75				
Programmamanagement	30	30	30	30				
<b>Totaal gealloceerd</b>	<b>1045</b>	<b>980</b>	<b>848</b>	<b>475</b>				
Begroting	1120	1120	1120	1120	1120	1120		
Ombuiging (Brak grondwater)		150	128					
Nieuw project ongewenste stoffen grondwater	80	160						
<b>Beschikbaar BTO</b>	<b>-5</b>	<b>130</b>	<b>400</b>	<b>645</b>	<b>1120</b>	<b>1120</b>		
<b>TTI-Water BTO</b>		<b>400</b>	<b>400</b>	<b>400</b>	<b>400</b>	<b>400</b>	<b>500-2000</b>	<b>Afhankelijk van rekenwijze</b>
<b>Techneau</b>							<b>550</b>	

Uit de cijfers in de tabel valt op dat in 2007 volgens de huidige programmering 325 k€ gealloceerd is voor onderzoek membraanfiltratie. Microfiltratie en ultrafiltratie zijn daarbij geheel niet meer in beeld en van de 325 k€ wordt bovendien ongeveer de helft besteed aan het brak water project. Hieruit concludeert de PBC dat ombuigingen noodzakelijk zijn ten faveure van:

- Microfiltratie en ultrafiltratie (keramische MF, verminderen vervuiling en verlaging kosten)
- Technologie nanofiltratie en RO (oplossen vervuiling en concentraat problemen, verlaging kosten)

Aanvullend op het BTO is in de jaren 2006-2010 circa 550 k€ cofinanciering beschikbaar vanuit het Europese project "Techneau" . In de TTI water is naar schatting een bedrag tussen k€ 2.500 en k€ 4.000 beschikbaar in de jaren 2007-2011. In 2007 en 2008 is er een programmeerbare ruimte van ongeveer 530 respectievelijk 800 k€. Deze ruimte biedt voldoende mogelijkheden om membraanfiltratie een ruimere positie te geven die het verdient.

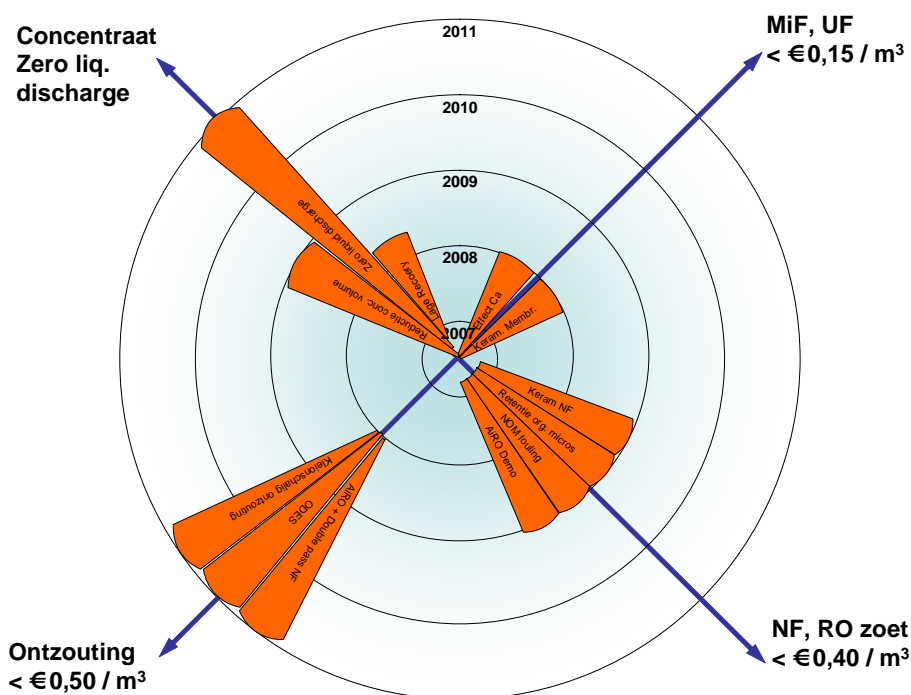
# 5 Strategische keuzes membraanonderzoek

## 5.1 Focus

Vanuit het perspectief van de nationale en internationale ontwikkelingen kiest de PBC Waterbehandeling ervoor om de focus van het onderzoek naar membraantechnologie in vier technologische richtingen te leggen. Deze groeirichtingen hebben doelen voor de lange termijn, maar moeten ook op middellange termijn implementeerbare producten opleveren. Voor iedere groeirichting is een lange termijn doel geformuleerd, maar wordt ook vastgelegd welke tussentijdse stappen worden gerealiseerd, en hoe de opbrengsten daarvan al kunnen worden ingezet.

Veel van de resultaten zullen ook gebruikt kunnen worden voor andere toepassingen. Resultaten van bijvoorbeeld vervuilingsonderzoek zijn ook van toepassing bij hergebruik van afvalwater. De ontwikkelde kennis voor zoet oppervlakte water zal ook het begrip van de optredende effecten bij zeewaterontzouting vergroten.

De groeirichtingen zijn schematisch weergegeven in Figuur 1. In de volgende paragraaf zullen de vier richtingen verder worden toegelicht.



Figuur 1. Groeirichtingen onderzoek membraanfiltratie.

## 5.2 Groeirichtingen en Projecten

### 5.2.1 Beheersen vervuiling micro- en ultrafiltratie

De eerste groeirichting is erop gericht vervuiling van lage druk membraansystemen (micro- en ultrafiltratie) te beheersen. Doel is om de bedrijfs-



voeringskosten van UF en MF te verlagen tot minder dan € 0,15 per m<sup>3</sup> voor drinkwatertoepassingen. Bij deze kosten vormt UF en MF een acceptabel alternatief voor bijvoorbeeld conventionele vlokformings- en vlokverwijderingsprocessen.

Kosten kunnen worden gereduceerd door verhoging van de flux en reductie van het chemicaliënverbruik, beide te realiseren door een betere beheersing van de vervuiling. Daarnaast is kostenreductie mogelijk door verlaging van de membraanprijs, verhoging van de recovery (minder waterverlies) en vermindering van de integriteitsproblemen.

Projecten:

#### **A. Inzet keramische membranen.**

Keramische membranen kunnen worden ingezet met een hoge flux. Ook zijn extreme reinigingsregimes mogelijk, zonder de eigenschappen van de membranen te beïnvloeden. Onderzoek naar keramische microfiltratiemembranen heeft aangetoond dat de kosten vergelijkbaar zijn met polymere UF membranen en de bedrijfsvoering eenvoudiger en robuuster is. De mechanische eigenschappen zijn bovendien zodanig dat geen integriteitsproblemen te verwachten zijn. Om virusverwijdering mogelijk te maken met microfiltratie is wel een vlokmiddeldosering nodig (bij microfiltratie). Een nadeel vormen de hoge investeringskosten. Vanwege de hoge flux wordt dit echter in de bedrijfsvoering gecompenseerd.

Projectdoelen:

- Realiseren demonstratie-installatie (10-20 m<sup>3</sup>/h), direct op oppervlaktewater
- Nadere vergelijking met conventionele UF membraansystemen
- Vaststellen waterkwaliteit (integriteit, virusverwijdering).
- Toepassing van keramische UF membranen.

#### **B. Effecten van Ca-NOM complexering op vervuiling bij lage druk membraanfiltratie**

Onderzoek op laboratoriumschaal heeft aangetoond dat de aanwezigheid van meerwaardige ionen zoals calcium kan leiden tot een sterkere binding van vervuiling - met name NOM maar ook andere negatief geladen deeltjes - aan het membraanoppervlak. Door calcium weg te nemen kan deze hechting worden gereduceerd en de opbrengst van de installatie worden verhoogd. Het mechanisme achter dit verschijnsel is nog niet voldoende ontrafeld. Verder onderzoek onder praktijkcondities is nodig om de mechanismen te begrijpen en er maximaal voordeel mee te behalen. Daarnaast zal een concept dienen te worden ontwikkeld voor de bereiding van calciumvrij water. Bij toepassing van UF als voorzuivering voor NF of RO is het zinvol om de effectiviteit de terugspoeling met NF permeaat te onderzoeken. De kosten voor calciumverwijdering dienen gecompenseerd te kunnen worden door de verbeterde bedrijfsvoering van de membranen, zodat de totale kostprijs onder € 0,15 per m<sup>3</sup> blijft.

Projectdoelen:

- Ontrafelen mechanismen Ca-verwijdering en effect op vervuiling UF
- Onderzoek effectiviteit terugspoelen van MF/UF met Ca-vrij water

- Uitvoeren pilot onderzoek UF-NF op oppervlaktewater met inzet van NF permeaat als terugspoelmedium.
- Economische afweging van Ca-verwijdering vs. verbeterde bedrijfsvoering UF

### 5.2.2 *Inzet NF/RO op (zoet) oppervlaktewater of RWZI effluent*

Inzet van NF of RO op oppervlaktewater is duur, voornamelijk vanwege de benodigde intensieve voorzuivering. Deze is nodig om membraan(spacer)vervuiling te voorkomen. Wanneer de voorzuivering drastisch kan worden beperkt, wordt nanofiltratie/RO een economisch alternatief voor geavanceerde oxidatie. In de huidige *state-of-the-art* kost de inzet van NF of RO inclusief voorzuivering ca. € 0.60 - € 0.80 per m<sup>3</sup>. Door sterk vereenvoudigen of zelfs overbodig maken van de voorzuivering zijn besparingen van 30 tot 50 % mogelijk.

Met de huidige concepten en installaties is dat zeer beperkt mogelijk, daarvoor zijn nieuwe concepten nodig. Onderzoek in de tweede groeirichting zal vooral gericht zijn op de ontwikkeling van die nieuwe concepten voor de inzet van NF en RO met zeer beperkte voorzuivering. De kosten van de zuivering met NF of RO op zoet oppervlaktewater of RWZI effluent bedragen dan maximaal € 0,40 per m<sup>3</sup> (target).

Projecten:

#### **A. Ontwikkeling en opschaling van AiRO**

Onderzoek heeft aangetoond dat toepassing van een water-luchtspoeling in de eerste trap (AiRO) in combinatie met een biocide een aanzienlijke verbetering van de beheersbaarheid van de vervuiling kan realiseren.

Verwacht wordt, dat door toepassing van AiRO, behandeling van oppervlaktewater met RO of NF met maar een beperkte voorzuivering mogelijk wordt.

Hechting en ophoping van vervuiling in spacerkanalen kan worden verminderd door gebruik te maken van hoge afschuifspanningen. Dit kan worden gerealiseerd door hoge of snel veranderende vloeistofsnelheden. Gedacht kan worden aan effecten van luchtbellen (AiRO), vibraties (Vibratory Shear Enhanced Processing = VSEP), spiraalgewonden membranen met integrated flow distributor (GrahamTek, Singapore).

Projectdoelen:

- Hydrodynamische effecten in spiraalgewonden modules vaststellen onder normale onstandigheden en bij shear-verhogende maatregelen zoals o.a. bij toepassing van luchtbellen (AiRO)
- Optimalisering lucht-waterverhouding AiRO
- Effect AiRO op retenties vaststellen
- Ontwikkeling van AiRO op technologische schaal
- Demonstratie van en onderzoek naar de werking van AiRO op (semi-) technologische schaal

#### **B. Modelleren en voorspelling retenties organische microverontreinigingen**

Organische microverontreinigingen worden in grote aantallen aangetroffen in oppervlaktewater. Ook in grondwater worden verontreinigingen

aangetroffen. De grote verscheidenheid aan stoffen maakt individuele meting een ondoenlijke en zeer kostbare zaak. De voorspelling van de retenties van organische stoffen op basis van hun fysische en chemische eigenschappen is daarom nodig. Onderzoek in de afgelopen jaren heeft een duidelijke stap voorwaarts gemaakt en aangetoond dat het toepassen van modellen mogelijk is (PhD Arne Verliefe). Het onderzoek in dit veld is nog niet afgerond en verdient voortgang.

Projectdoel:

- Voorspellen van retenties op basis van membraan- en stoffeigenschappen

### **C. NOM fouling NF**

Onderzoek op labschaal heeft aangetoond dat calcium ook bij NF een belangrijke rol speelt bij de hechting van NOM op het membraanoppervlak. Verwacht wordt dat NOM vervuiling kan worden voorkomen door het verwijderen van calcium. Anderzijds, bestaan er ook goede mogelijkheden voor de verwijdering van NOM, bijvoorbeeld gefluïdiseerde ionenwisselaars, die NOM fouling ook kunnen tegengaan. Hier ligt een koppeling met het NOM project.

Projectdoel:

- Vaststellen van en onderzoek naar de effectiviteit van calciumverwijdering of NOM verwijdering voor de beheersing van organische vervuiling van NF of RO.
- Economische afweging van de extra voorzuivering

### **D. Keramische nanofiltratiemembranen**

Keramische microfiltratiemembranen zijn succesvol toegepast op oppervlaktewater. Ook keramische nanofiltratie membranen zijn verkrijgbaar, maar nog niet eerder toegepast voor de productie van drinkwater. Door de mechanische en chemisch inerte eigenschappen is intensieve reiniging van deze membranen mogelijk, waardoor inzet voor de drinkwaterproductie, in het bijzonder onder sterk vervuilende condities, interessante perspectieven biedt.

Verwacht wordt dat keramische nanofiltratie membranen (nog) relatief duur zullen zijn en daardoor mogelijk pas op langere termijn in beeld zullen komen voor de grootschalig productie van drinkwater. Op de korte tot middellange termijn zijn er echter wellicht mogelijkheden voor speciale toepassingen. Daarbij kan worden gedacht aan de behandeling van IX regeneraat (scheiding zouten en organische stof of scheiden 2-waardige en 1-waardige zouten), de behandeling van concentraat (bijv. van een hoge recovery RO) en semi dead-end toepassingen zoals een MBR-NF. Naast de technische mogelijkheden zijn de kosten van een dergelijk systeem van belang. Het onderzoek zal vooral een oriënterend karakter hebben (ogen en oren functie, vernieuwend).

Projectdoel:

- Technische en economische evaluatie van toepassingsmogelijkheden van keramische nanofiltratie bij de behandeling van oppervlaktewater of RWZI effluent en de behandeling van reststromen.

### 5.2.3 Zeewaterontzouting

Zeewaterontzouting met membranen zal een steeds grotere rol gaan spelen bij het oplossen van mondiale watertekorten. Het afgelopen decennium is gebleken dat de kostprijs voor zeewaterontzouting aanzienlijk is gedaald en concurrerend wordt met de behandeling van zoet oppervlaktewater.

Belangrijke ontwikkelingen die op dit gebied worden waargenomen zijn: double-pass nanofiltratiesystemen, hybride systemen met membranen en verdamping en schaalvergroting van de membraanelementen (16" - 20").

De verwachting is dat de kostprijs voor zeewaterontzouting verder kan dalen, waardoor het ook voor Nederland een aantrekkelijk alternatief wordt. Om concurrerend te zijn wordt als doel gesteld een zeewaterontzouting voor minder dan € 0,50 per m<sup>3</sup> te realiseren.

De Nederlandse Antillen maken sinds 2006 ook deel uit van het BTO. Ze hebben ervaring met verdampingstechnieken sinds 1930. Hun vraag/focus voor het BTO is dan ook voornamelijk gericht op zeewaterontzouting. De resultaten van het onderzoek in deze groeirichting zal voor een groot deel ook toepasbaar zijn voor brak- en zoetwatertoepassingen.

Daarnaast zal zeewaterontzouting sterk vanuit de TTI Water worden aangemoedigd door de Nederlandse Overheid (export kansen) en ziet de PBC Waterbehandeling goede mogelijkheden voor synergie in onderzoek naar membraanfiltratie op zoet oppervlaktewater en effluent.

#### **A. Toepassing van AiRO™ en double pass NF op zeewater**

Een trend bij de toepassing van membraanfiltratie voor zeewaterontzouting is het gebruik maken van een double pass NF systeem. Hiermee kan een aanzienlijke kostenverlaging worden gerealiseerd t.o.v. conventionele zeewater RO systemen (-25% energie). Toepassing van (spiral wound) membranen voor zeewaterontzouting wordt echter vaak gehinderd door het optreden van (bio)fouling. Verwacht wordt dat AiRO ook effectief kan worden ingezet voor de beperking van biofouling en particulate fouling bij zeewaterontzouting. Omdat de membraanvervuiling in een zeewateromgeving heel anders van karakter kan zijn dan bij zoetwatertoepassingen, is apart onderzoek op dit gebied nodig. Qua technologie wordt sterk aangehaakt bij de ontwikkeling van AiRO voor de behandeling van zoet oppervlaktewater en effluent.

Projectdoel:

- Onderzoek naar en ontwikkeling van effectiviteit van Saline-AiRO
- Economische evaluatie en vergelijking met de stand der techniek

#### **B. Osmotic Desalination**

Osmotic desalination (ODES) is een nieuwe ontzoutingstechnologie die gebruik maakt van een osmotische pomp (forward osmosis) en een verdampingsstelsel (bijv. Multi Stage Flash (MSF)). Het voordeel van ODES is dat op relatief eenvoudige wijze de capaciteit van bestaande verdampingsinstallaties kan worden vergroot. Wel zal de zoutbelasting van de MSF toenemen. De effecten daarvan zullen onderzocht moeten worden.

Projectdoel:

- Ontwikkelen van ODES tot (semi-)technologische schaal
- Onderzoek naar effect van Forward Osmose op de werking van verdampers (zoutgehalte, recovery)

### **C. Kleinschalige zeewaterontzouting met alternatieve energiebronnen**

Zeewaterontzouting biedt goede perspectieven voor het realiseren van de millennium development goals. Ontwikkeling van kleinschalige systemen die gebruik maken van alternatieve onafhankelijke energiebronnen staat volop in de belangstelling. Gedacht kan worden aan getijden- of golfenergie, of gebruikmaking van zonnearmte. Voorgesteld wordt om oriënterend onderzoek te verrichten.

Projectdoel:

- Oriëntatie op kleinschalige zeewaterontzoutingen met gebruik van alternatieve energiebronnen

#### **5.2.4 Concentraat**

Ontstaan en afvoer van concentraat vormt een belangrijke barrière voor de realisatie van membraansystemen op grote schaal. Met name voor installaties die op grote afstand van zee zijn gebouwd kan de afvoer van concentraat een probleem zijn. Er is een duidelijke behoefte naar technologische oplossingen die uiteindelijk leiden tot een systeem zonder vloeibaar concentraat: *zero liquid discharge*. In het onderzoek wil de PBC deze richting opgaan.

### **A. Brakwater-concept, Anaerobe NF/RO**

De afgelopen jaren is een concept ontwikkeld voor ontzouting van brak grondwater. In dit concept wordt het brakke grondwater bij een relatief lage recovery ontzout met NF of RO, waardoor het gebruik van anti-scalants kan worden vermeden. Het concentraat dat hierbij ontstaat heeft een relatief laag zoutgehalte, dat kan worden geïnfiltreerd in een diepere laag dan waar het brakke water onttrokken wordt. Op deze wijze wordt verdere verzilting van de omgeving voorkomen ('Zoethouder').

Projectdoel:

- Aantonen van het ontwikkelde concept op demonstratieschaal
- Toetsen van de beleidsmatige kaders van het concept

### **B. Reductie concentraatvolume inzet IEX of pellet ontharding**

Door het verwijderen van slecht oplosbare zouten uit het voedingswater van een ontzoutingsinstallatie kan de recovery fors worden verhoogd tot ruim boven de 95 %. Daarmee kan dus de hoeveelheid concentraat ook aanzienlijk worden gereduceerd, waardoor verwerking en lozing goedkoper wordt. Daarnaast kan verwijdering van calcium een positieve bijdrage leveren aan het voorkomen van vervuiling, zowel bij UF (voorbehandeling) als bij NF/RO.

Projectdoel:

- Onderzoek, ontwikkeling en demonstratie van slimme combinaties van pelletontharding of ionenwisseling met NF voor de reductie van het permeaat
- Economische evaluatie van verschillende technologische concentraatoplossingen

### C. 'Zero liquid discharge'

Membraanconcentraat vormt een aanzienlijke barrière voor toepassing in het binnenland. Membraansystemen die geen vloeibare reststroom produceren zouden daarom grote voordelen bieden, mits de kosten daarvan niet te hoog worden. Zero liquid discharge systemen starten altijd met vermindering van het concentraatvolume (zie project hierboven). De kleinere, maar tevens zoutere reststroom moet daarbij wel worden behandeld om echt zero discharge te bereiken.

Scheiding van opgeloste zouten en water is thermodynamisch ongunstig en kostbaar. Gezocht zal worden naar systemen die energetisch zo gunstig mogelijk zijn. Gedacht kan worden aan slimme verdampingssystemen of superkritische ontzouting. Hierbij zal aansluiting worden gezocht met onderzoek door Wetsus (geen wielen 2x uitvinden).

Projectdoelen:

- Verkenning van de mogelijkheden voor zero discharge (bureaustudie)
- Onderzoek en technologieontwikkeling waarmee efficiënte en kosteneffectieve concentraatbehandeling tot vaste afvalstof kan worden gerealiseerd

### D. Lage recovery NF/RO

Een andere benadering ten aanzien van concentraat is om juist te kiezen voor een lage recovery. Daardoor zullen de concentraties in het concentraat veel lager zijn en behoeven geen milieuvreemde stoffen (anti-scalants) te worden gedoseerd. De kosten voor de voorzuivering worden echter gemaakt voor de volledige voedingsstroom. Bij lage recovery betekent dit dat een groot deel van de voorzuiveringskosten teloor gaan in het concentraat. Toepassing van AiRO kan de voorzuiveringskosten aanzienlijk beperken, waardoor bedrijfsvoering bij lage recovery veel aantrekkelijker wordt. Een dergelijke 'lage recovery' benadering is ook al eerder in het BTO opgekomen als zoethouder (lage recovery NF/RO op brak grondwater).

In een economische en beleidsmatige verkenning zal een afweging worden gemaakt naar deze wijze van bedrijfsvoering, waarbij sterk wordt aangesloten bij het AiRO project en het brak water project.

Projectdoel:

- Vaststellen haalbaarheid concentraatlozingen bij lage recovery RO in combinatie met AiRO en economische afweging



## 6 Overzicht projecten

In Tabel 2 zijn alle projecten nog een keer opgesomd.

Tabel 2. Overzicht van de projecten en onderzoeksdoelen BTO 2007-2011.

Project	Doel	
<i>Beheersen vervuiling micro- en ultrafiltratie</i>		
Inzet Keramische membranen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realiseren demonstratie-installatie (10-20 m<sup>3</sup>/h), direct op oppervlaktewater</li> <li>• Nadere vergelijking met conventionele UF membraansystemen</li> <li>• Vaststellen waterkwaliteit (integriteit, virusverwijdering).</li> <li>• Toepassing van keramische UF membranen.</li> </ul>	
Effecten van Ca-NOM complexering op vervuiling bij lage druk membraanfiltratie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ontrafelen mechanismen Ca-verwijdering en effect op vervuiling UF</li> <li>• Onderzoek effectiviteit terugspoelen van MF/UF met Ca-vrij water</li> <li>• Uitvoeren pilot onderzoek UF-NF op oppervlaktewater met inzet van NF permeaat als terugspoelmedium.</li> <li>• Economische afweging van Ca-verwijdering vs. verbeterde bedrijfsvoering UF</li> </ul>	
<i>Inzet NF/RO op (zoet) oppervlaktewater of RWZI effluent</i>		
Ontwikkeling en opschaling van AiRO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effecten van hydrodynamische effecten in spiraalgewonden modules door AiRO of andere maatregelen vaststellen</li> <li>• Optimalisering lucht-waterverhouding AiRO</li> <li>• Effect AiRO op retenties vaststellen</li> <li>• Ontwikkeling van AiRO op technologische schaal</li> <li>• Demonstratie van en onderzoek naar de werking</li> </ul>	



	van AiRO op (semi-) technologische schaal	
Modellering en voorspelling retenties organische microverontreinigingen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voorspellen van retenties op basis van stof- en membraaneigenschappen</li> </ul>	
NOM fouling NF	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vaststellen van en onderzoek naar de effectiviteit van calciumverwijdering of NOM verwijdering voor de beheersing van organische vervuiling van NF of RO.</li> <li>• Economische afweging van de extra voorzuivering</li> </ul>	
Keramische nanofiltratiemembranen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Technische en economische evaluatie van toepassingsmogelijkheden van keramische nanofiltratie bij de behandeling van oppervlaktewater of RWZI effluent en de behandeling van reststromen.</li> </ul>	
<i>Zeewaterontzouting</i>		
Toepassing van AiRO™ en double pass NF op zeewater	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Onderzoek naar en ontwikkeling van effectiviteit van Saline-AiRO</li> <li>• Economische evaluatie en vergelijking met de stand der techniek</li> </ul>	
ODES	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ontwikkelen van ODES tot (semi-)technologische schaal</li> <li>• Onderzoek naar effect van Forward Osmose op de werking van verdampers (zoutgehalte, recovery)</li> </ul>	
Kleinschalige zeewaterontzouting met alternatieve energiebronnen onderaan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oriëntatie op kleinschalige zeewaterontzoutingen met gebruik van alternatieve energiebronnen</li> </ul>	
<i>Concentraat</i>		
Brakwater-concept, Anaerobe NF/RO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aantonen van het ontwikkelde concept op demonstratieschaal</li> <li>• Toetsen van de beleidsmatige kaders van het concept</li> </ul>	
Reductie concentraatvolume inzet IEX of pellet	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Onderzoek, ontwikkeling en demonstratie van slimme</li> </ul>	

ontharding	<p>combinaties van pelletontharding of ionenwisseling met NF voor de reductie van het permeaat</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Economische evaluatie van verschillende technologische concentraatoplossingen</li> </ul>	
'Zero liquid discharge'	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkenning van de mogelijkheden voor zero discharge (bureaustudie)</li> <li>• Onderzoek en technologieontwikkeling waarmee efficiënte en kosteneffectieve concentraatbehandeling tot vaste afvalstof kan worden gerealiseerd</li> </ul>	
Lage recovery NF	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vaststellen haalbaarheid concentraatlozingen bij lage recovery RO in combinatie met AiRO en economische afweging</li> </ul>	



## 7 Referenties

- [1] BTO 2006.034, *Integrale zuivering – visie achter het BTO waterbehandeling*, Juli 2006, Peter Wessels
- [2] Global Water Intelligence; *Zie Water Desalination Report, Vol. 42 nr. 35*
- [3] Sandia National Laboratories and U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation: *Desalination and Water Purification Technology Roadmap – A Report of the Executive Committee*, Januari 2003.
- [4] Sandia National Laboratories, J. E. Miller, Review of water resources and desalination technologies, rapport SAND 2003-0800
- [5] AwwaRF Strategic Research Plan, January 2004
- [6] Alice Fulmer, *Membrane Filtration: An overview of current Awwarf Research*, Presentation 2005 AWWA Membrane Technology Conference, March 2005 Phoenix AZ.
- [7] James Crook, *GWRC Pre-workshop survey – Identified research needs*, GWRC Water Reuse Research Needs Workshop, Utrecht 11 april 2005
- [8] T. Ch. Khoo (Public Utilities Board (PUB)) Keynote presentation at the 2006 IWA World Water Congress in Beijing, *Cities of the Future: A Case Study for Singapore's Experience in Integrated Urban Water Management*, 13th September 2006
- [9] New Technologies in Spain, Desalination, Report by ICEX (Spanish institute for foreign trade) , 2006
- [10] *Evaluation of alternative drinking water treatment processes for the World Expo 2010*, Report of the project 'Towards a joint excellent water research centre' by Kiwa Water Research, Shanghai Shibe Water, Tongji University Shanghai and TU Delft. (in preparation), 2006
- [11] I. Worm, Shanghai proeftuin voor geavanceerde drinkwatertechnologie, H2O 2006 nr 20 p. 18
- [12] *Waterbehandeling; informatie uit octrooien*, rapport van Octrooicentrum Nederland, april 2005.
- [13] BTO 2003.031 "*Onderzoek membraanfiltratie, Strategie en samenhang*", Augustus 2003, PBC Membraanfiltratie
- [14] K.V. Reddy en N. Ghaffour, *Overview of the cost of desalinated water and costing methodologies*, Desalination 205 (2007), pp. 340-353.