



Brak grondwater: niet mijden, maar gebruiken!

Eindrapport BTO onderzoek pilots Noordburgum
(Vitens) en Zevenbergen (Brabant Water)

BTO 2011.048
Maart 2012

Brak grondwater: niet mijden, maar gebruiken!

Eindrapport BTO onderzoek pilots Noordburgum
(Vitens) en Zevenbergen (Brabant Water)

BTO 2011.048
Maart 2012

© 2012 KWR

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.

Colofon

Titel

Brak grondwater: niet mijden, maar gebruiken! Eindrapport BTO onderzoek pilots Noardburgum (Vitens) en Zevenbergen (Brabant Water)

Opdrachtnummer

B111450

Onderzoeksprogramma

Waterbehandeling

Projectmanager

Jan Willem Kooiman

Opdrachtgever

College van Opdrachtgevers (CvO)

Kwaliteitsborger

Maarten M. Nederlof

Auteurs

Klaasjan J. Raat en Jan Willem Kooiman

Met medewerking van

Ate Oosterhof, Nico Wolthek (Vitens), Stephan van de Wetering, Harry Boukes, Carl van Rosmalen, Martijn Groenendijk (Brabant Water), Maarten Nederlof en Pieter Stuyfzand (KWR)

Verzonden aan

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten en is openbaar

Voorwoord

Eind-2009 zijn Vitens en Brabant Water pilot studies gestart naar de winning en gebruik van brak grondwater voor de bereiding van drinkwater. De start van de pilots vormden een mijlpaal in het BTO-project Brakwater: na het eerste idee van de zoethouder in 2000(!) en vele jaren van ideevorming en voorbereiding werd daadwerkelijk brak grondwater gewonnen en gebruikt voor de bereiding van drink- (Vitens) en industriewater (Brabant Water). Dát de pilots daadwerkelijk van start zijn gegaan is voor een groot deel te danken aan de inzet en investeringen die Vitens en Brabant Water gepleegd hebben.

Daarnaast zijn beide pilots en het BTO onderzoek vanuit diverse andere bronnen financieel ondersteund:

- De pilot Noardburgum (Vitens) heeft een innoWATOR subsidie ontvangen van SenterNovem (Ministerie van Economische Zaken, thans EL&I). De pilot is bekend onder zijn projectnaam DAROWater, met als projectpartners Hatendoer-Water, TU Twente, Vitens en KWR (vanuit het BTO).
- De pilot Zevenbergen (Brabant Water) is financieel ondersteund met een innovatiesubsidie van de Provincie Noord-Brabant.
- Het BTO brakwateronderzoek heeft cofinanciering ontvangen van de Europese Unie, als onderdeel van het MEDINA-project (EU Contract Number 036997).

Wij danken de (co)financiers en projectpartners voor hun ondersteuning van en inzet tijdens de pilots. Zonder deze steun waren beide pilots en het BTO onderzoek niet mogelijk geweest.

Het BTO brakwaterproject is vanaf de start van de pilots (inclusief voorbereiding) begeleid door een enthousiaste projectgroep, met medewerkers van Vitens, Brabant Water en KWR. In deze groep is intensief samengewerkt, wat geleid heeft tot twee succesvolle pilots, diverse gezamenlijke (internationale) publicaties en presentaties, en een succesvol landelijk symposium “De smaak van brak grondwater”, op 5 oktober 2010 in samenwerking met Waternetwerk. Ook dit eindrapport is geschreven in nauwe samenwerking met en met bijdragen van de projectgroep, die bestond uit onderstaande hydrologen, hydrochemici en watertechnologen:

- Ate Oosterhof (Vitens)
- Nico Wolthek (Vitens)
- Stephan van de Wetering (Brabant Water)
- Harry Boukes (Brabant Water)
- Carl van Rosmalen (Brabant Water)
- Martijn Groenendijk (Brabant Water)
- Maarten Nederlof (KWR)
- Pieter Stuyfzand (KWR)
- Klaasjan Raat (KWR)
- Jan Willem Kooiman (KWR)

Wij danken allen voor hun inzet en enthousiasme in de afgelopen 3 jaar.

Klaasjan Raat en Jan Willem Kooiman, Nieuwegein, maart 2012.

Samenvatting

De winning en zuivering van brak grondwater is een aantrekkelijke optie voor de drinkwatersector, in die gevallen waar zoet en schoon grondwater onvoldoende beschikbaar is. Brak grondwater is ruimschoots in de Nederlandse ondergrond beschikbaar én winbaar en kan met de huidige zuiveringstechnieken (omgekeerde osmose, RO) tegen acceptabele kosten geschikt worden gemaakt voor drinkwater. Door gerichte onttrekking (interceptie) van toestromend brak grondwater kan verzilting van bestaande 'zoete' winvelden worden tegengegaan. Dit idee is bekend als het zoethouderconcept en vormde de aanleiding voor het BTO project Brakwater, dat wordt afgesloten met dit eindrapport.

De afvoer van membraanconcentraat, een restproduct van ontzilting, is een grote belemmering voor de doorbraak van brak grondwater als grondstof. Lozing (injectie) van dit concentraat in de diepe ondergrond lijkt een haalbare en duurzame oplossing, zeker als opslag plaats heeft in aquifers met een vergelijkbare chemische waterkwaliteit. Een knelpunt is de bestuurlijke haalbaarheid van concentraatinjectie: wetgeving en beleid zijn (nog) niet goed toegerust voor beoordeling van concentraatopslag in de diepe ondergrond.

Verzilting van bestaande grondwaterwinningen waren voor de waterbedrijven Vitens en Brabant Water reden om pilots te starten naar de winning en zuivering van brak grondwater. De pilots moesten duidelijk maken of gebruik van brak grondwater voor de bereiding van drinkwater technisch, financieel en bestuurlijk haalbaar is. Dit rapport beschrijft op beknopte wijze de belangrijkste opbrengsten en ervaringen na anderhalf jaar pilotonderzoek. Daarbij is aandacht voor de prestaties van de RO-installatie en injectieput, effecten van brakwaterwinning op zoet/ zout verdeling in de ondergrond, effecten van concentraatinjectie op de waterkwaliteit van de doelaquifer en de ontwikkelingen in beleid en wet- en regelgeving rondom concentraatinjectie. Gelijktijdig met dit eindrapport verschijnt het rapport "*Water quality changes following deep well injection of BWRO concentrate. Results from the BWRO pilots Noardburgum and Zevenbergen.*" (BTO2011.105(s)), waarin uitgebreider wordt ingegaan op de gevolgen van concentraatinjectie voor de waterkwaliteit van de doelaquifer.

Opzet pilots

De pilot Noardburgum (Vitens) is gelegen in een voormalig puttenveld, dat als gevolg van verzilting in 1993 verlaten is. Het zoethouderconcept wordt toegepast door gelijktijdige onttrekking van zoet grondwater bovenin de winaquifer en van brak grondwater onderin. Het brakke water wordt ontzilt middels omgekeerde osmose (50% recovery) en het concentraat wordt geïnjecteerd in de onderliggende doelaquifer, die gescheiden is van de winaquifer door een afsluitende kleilaag. In de pilot Zevenbergen (Brabant Water) wordt enkel brak grondwater onttrokken. Ook dit water dient als voeding voor een RO (50% recovery) en ook hier wordt het concentraat geïnjecteerd in de onderliggende doelaquifer. Tijdens beide pilots is een uitgebreid monitoringsprogramma uitgevoerd, gericht op prestaties van de RO en injectieput en de waterkwaliteit(sveranderingen) in doelaquifer, RO en winaquifer.

Ontzilting technisch geen probleem, injectie soms wel

Ontzilting van brak, anoxisch grondwater middels omgekeerde osmose was, ook zonder gebruik van antiscalants, technisch goed uitvoerbaar, mits de recovery zorgvuldig gekozen werd. Ervaringen met injectie van membraanconcentraat zijn wisselend. In Noardburgum was een recovery mogelijk van ca. 70% (met dientengevolge sterke oververzadiging van bijvoorbeeld kalk), zonder dat verstopping optreedt van injectieput en doelaquifer. In Zevenbergen treedt geleidelijke putverstopping reeds op bij 50% recovery, bij vergelijkbare mineraaloververzadiging. Deze verschillen worden verklaard door verschillen in samenstelling van het concentraat (concentraties CO_3^{2-} , Fe^{2+}) en de bodemsamenstelling van de doelaquifer (kalkgehalte, textuur). Verstopping van de injectieput kan worden verholpen door regeneratie met zoutzuur. De dosering van zoutzuur moet zorgvuldig worden gekozen, om gasbelvorming te voorkomen. Boor kwam in hoge concentraties in het voedingswater van Zevenbergen voor. Verwijdering van boor uit het permeaat is mogelijk, maar vergt aanvullende zuivering. De beste

optie om hoge concentraties van boor in het drinkwater te vermijden, blijft zodoende een nauwkeurige selectie van de winaquiifer.

Brakwaterwinning werkt verzoetend

Het zoethouder-concept is in Noardburgum succesvol in de praktijk toegepast: verzilting van het bovenste (zoete) onttrekkingsfilter werd effectief tegengegaan door de gelijktijdige onttrekking van dieper brak grondwater. Anders dan werd verwacht, resulteerde de brakwaterwinning ook dieper in de winaquiifer tot een verzoeting, zoals bleek uit waterkwaliteitsmetingen in diverse waarnemingsfilters. Eenzelfde verzoeting was waarneembaar in Zevenbergen, zoals tot uiting kwam in dalende chlorideconcentraties van het onttrokken brakke grondwater. Dit resultaat verandert ons denken ten aanzien van verzilting en brak grondwater: winning en gebruik van brak grondwater kan, onder de juiste omstandigheden, een duurzame strategie zijn tegen verzilting. In veel verziltinggevoelige gebieden hoeven we brak grondwater daarom niet mijden, maar kunnen we het juist gebruiken.

Effecten van injectie van membraanconcentraat is op beide locaties beperkt

De samenstelling van het concentraat kwam op beide locaties goed overeen met de kwaliteit van het oorspronkelijke water in de doelaquiifer. In Noardburgum waren reacties tussen concentraat en bodem nagenoeg afwezig, zodat de samenstelling van het concentraat na injectie vrijwel niet veranderde. Injectie van concentraat leidde in Zevenbergen wel tot sterke hydrogeochemische reacties, zoals kationuitwisseling, neerslag van kalk en vrijkomen van magnesium en strontium door oplossing van dolomiet. De veelheid van reacties leidde echter tot een beperkte verandering van de waterkwaliteit in de doelaquiifer: na een jaar injecteren kwam de waterkwaliteit nog altijd goed overeen met de oorspronkelijke kwaliteit van de doelaquiifer, ook voor strontium. Geconcludeerd wordt dat, op beide locaties, concentraatinjectie technisch mogelijk is en dus een mogelijke oplossing vormt voor lozing van membraanconcentraat.

Wet- en regelgeving: beleid in ontwikkeling

Na de beslissing van Vitens en Brabant Water om brakwater pilots te starten heeft het meer dan drie jaar geduurd voordat de pilots daadwerkelijk van start gingen. Oorzaak van deze vertraging was de vergunningverlening voor de injectie van membraanconcentraat, en dan met name onduidelijkheid over welke overheid als bevoegd gezag optreedt. Hierover is voorlopig duidelijkheid: bij injectie op dieptes groter dan 100m is de Mijnbouwwet van toepassing en ligt het gezag (dus) bij het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie (EL&I). Het is echter niet gezegd dat deze situatie ook in de toekomst zo blijft. Mede als gevolg van de pilots en de veranderende houding van de Provincie Zuid-Holland ten aanzien van (relatief ondiepe) concentraatinjectie door de glastuinbouw, is het denken over hoe om te gaan met concentraatinjectie momenteel volop in beweging. Belangrijk hierin zijn ondermeer de recente notitie van de Technische Commissie Bodembescherming over concentraatinjectie door de glastuinbouw, en de standpunten die VEWIN heeft ingenomen. Een belangrijk onderwerp is het ontwikkelen van een deugdelijk toetsingskader voor concentraatinjectie, dat nochtans ontbreekt. Het is momenteel niet duidelijk in welke richting het beleid zich zal ontwikkelen, maar buiten kijf staat dat het voor de drinkwatersector van groot belang is actief bij de ontwikkelingen betrokken te blijven, middels VEWIN, maar ook inhoudelijk door voortzetting van brak wateronderzoek.

Brak grondwater, de toekomst!?

De pilots Noardburgum en Zevenbergen hebben aangetoond dat brakwaterwinning en -gebruik technisch goed mogelijk is, dat injectie in die gevallen een mogelijke oplossing is voor lozing van membraanconcentraat, en dat winning van brak grondwater een duurzame strategie kan zijn tegen verzilting van puttenvelden en aquifers. De mogelijkheden van brak grondwater beperken zich niet tot Nederland. In kustgebieden wereldwijd zijn de zoetwatervoorkomens niet toereikend voor de stijgende watervraag en leidt overexploitatie tot verzilting van aquifers en winvelden. Winning en gebruik van brak grondwater kan bijdragen aan verduurzaming van de globale (drink)watervoorziening, ondermeer als alternatief voor zeewaterontzilting (goedkoper, want energiezuiniger) of door toepassing van het zoethouderconcept in verziltende putvelden. Verdere kennisontwikkeling, onder andere op het gebied van dichtheidstroming en tegengaan van putverstopping, en praktijkervaring is daarbij een noodzaak. Kortom: "Brak grondwater: niet mijden, maar gebruiken".

Inhoud

Voorwoord	1
Samenvatting	3
Inhoud	5
1 Inleiding	7
2 Opzet pilots Noardburgum en Zevenbergen	9
2.1 Opzet pilots Noardburgum en Zevenbergen	9
2.2 Hydrogeochemie van win- en doelaquifers	12
2.3 Selectie criteria win- en doelaquifer	14
3 Prestaties RO en injectieput	15
3.1 Membraanprestaties Omgekeerde Osmose	15
3.1.1 Verstopping van de kaarsenfilters op Zevenbergen	16
3.1.2 Conclusie: ontzilting van brak grondwater technisch goed uitvoerbaar	17
3.2 Oververzadiging en neerslagvorming: kan de recovery omhoog?	17
3.2.1 Verhoogde recovery is mogelijk op Noardburgum	17
3.2.2 Grens aan de recovery op Zevenbergen	19
3.2.3 Waarom een duidelijk verschil in neerslagvorming?	19
3.3 Veilig regenereren van de injectieput	20
3.4 Boor in permeaat kan een probleem zijn	21
3.5 Conclusies: ontzilting technisch geen probleem, injectie soms wel	21
4 Effecten winning brakwater	23
4.1 Winning van brak grondwater werkt verzoetend	23
4.2 Zoethouder werkt in de praktijk	25
4.3 Spin off: de zoetmaker	26
4.4 Conclusies: verzoeting creëren door brakwater te winnen	27
5 Effecten injectie membraanconcentraat op de waterkwaliteit in doelaquifer	29
5.1 Vergelijk concentraat en oorspronkelijk water in doelaquifer	29
5.2 Interacties van concentraat met de aquifermatrix	31
5.3 Conclusies: geen negatieve geochemische effecten van concentraatinjectie	34
6 Wet- en regelgeving	35
6.1 Huidige wetgeving	35
6.2 TCB advies concentraatinjectie door de (glas)tuinbouw	35
6.3 Standpunt van de drinkwatersector	37

6.4	Conclusie: beleid in ontwikkeling	37
7	Brak grondwater, de toekomst!?	39
7.1	Niet mijden, maar gebruiken	39
7.2	Internationaal perspectief	39
7.3	De toekomst	40
8	Literatuur	41
I	Overzicht publicaties BTO Brakwater	43

1 Inleiding

De winning en zuivering van brak grondwater is een aantrekkelijke optie voor de drinkwatersector, in die gevallen waar zoet en schoon grondwater onvoldoende beschikbaar is (Oosterhof *et al.*, 2009). Brak grondwater is ruimschoots in de Nederlandse ondergrond beschikbaar én winbaar (Stuyfzand *et al.*, 2003) en kan met de huidige zuiveringstechnieken (omgekeerde osmose, RO) tegen acceptabele kosten geschikt worden gemaakt voor drinkwater. Anders dan freatische grondwater, leidt winning van (diep) brak grondwater nauwelijks tot problemen als verdroging door verlaging van de grondwaterstand. Het grootste voordeel van gebruik van brak grondwater is wellicht dat verzilting van bestaande 'zoete' winvelden kan worden tegengegaan, door gerichte interceptie (onttrekking) van toestromend brak grondwater. Dit idee is bekend als het zoethouderconcept (Grakist *et al.* 2002; Kooiman *et al.* 2004) en vormde de aanleiding voor het BTO project Brakwater.

Bij zuivering van brak grondwater middels omgekeerde osmose wordt het brakke voedingswater gesplitst in een 'nagenoeg zoutloos' permeaat en een concentraat met een hogere zoutconcentratie. De afvoer van dit concentraat is een grote belemmering voor de doorbraak van brak water als grondstof. Dicht aan de kust kan concentraat direct op zee worden geloosd (hoewel ook dit lokaal negatieve gevolgen kan hebben voor mariene ecosystemen), maar verder landinwaarts is dit geen optie door de hoge investeringskosten van aanleg van infrastructuur (afvoerpijpleiding). Lozing van concentraat op (zoet) oppervlakte water, eventueel via rioolwaterzuivering (RWZI), is geen alternatief door de hoge zoutvracht en de mogelijk hoge concentraties van diverse (natuurlijke) sporenelementen. Lozing in de diepe ondergrond lijkt wel een haalbaar en duurzaam alternatief, zeker als opslag plaats heeft in aquifers met een vergelijkbare chemische waterkwaliteit als het concentraat (Stuyfzand en Raat, 2010). Het belangrijkste knelpunt hierbij is de "bestuurlijke haalbaarheid" van concentraatinjectie ofwel de haalbaarheid van het verkrijgen van een vergunning (Bernhardi *et al.*, 2006). De huidige wetgeving en beleid zijn (nog) niet goed toegerust voor beoordeling van concentraatopslag in de diepe ondergrond.

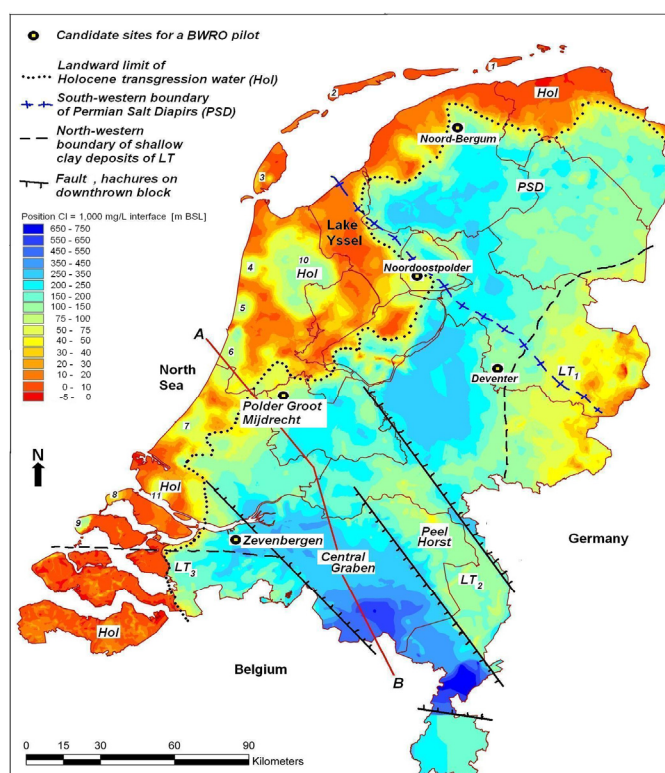
De voordelen van gebruik van brak grondwater waren voor de waterbedrijven Vitens en Brabant Water reden om pilot studies te starten naar de winning en zuivering van brak water (Oosterhof *et al.*, 2008). Deze pilots startten in het najaar van 2009, na een voorbereidingsperiode van bijna 3 jaar, waarbij de vergunningverlening de belangrijkste te nemen horde was. In de pilots wordt brak water gewonnen, ontzilt middels omgekeerde osmose en het concentraat wordt teruggebracht in de bodem, in een diepere aquifer die fysiek gescheiden is van de winaquifer door een dikke afsluitende kleilaag. De pilots moesten duidelijk maken of gebruik van brak grondwater voor de bereiding van drinkwater technisch, financieel en bestuurlijk haalbaar is. Daarbij stonden de effecten van concentraatinjectie op de waterkwaliteit van de doelaquifer centraal, daar deze van belang zijn voor beleid en vergunningverlening in de toekomst. Andere aspecten die in de pilots aan bod kwamen, waren de prestaties van de RO installaties (membraanvervuiling, denk aan scaling van membranen en energieverbruik) en de injectieput (verstopping), kwaliteit van het voedingswater en permeaat, effect van winning van brak grondwater op de verdeling van zoet en brak water in de winaquifer (zoethouderconcept), en de economische haalbaarheid van (full-scale) brakwaterwinning. De pilots zijn een mooi voorbeeld van een combinatie van watertechnologisch, hydrochemisch en geohydrologisch onderzoek, met veel parallellen tussen beide disciplines, zoals bijvoorbeeld het gedrag van oververzadigde zoute stromen in de RO en in de ondergrond.

Beide pilots zijn inhoudelijk ondersteund vanuit het BTO brakwaterproject. Hoewel de pilots doorlopen (Brabant Water) of een vervolg zullen krijgen (Vitens), eindigt het BTO project medio 2011, met de publicatie van dit eindrapport. Dit rapport beschrijft op beknopte wijze de belangrijkste opbrengsten en ervaringen na anderhalf jaar pilot onderzoek. Achtereenvolgens komen aan bod: de opzet van beide pilots, prestaties van RO en injectieput, effecten van brakwaterwinning op zoet/zout verdeling, effecten van concentraatinjectie op de waterkwaliteit van de ondergrond en de ontwikkelingen in beleid en wet- en regelgeving. Een aantal van de onderwerpen wordt uitgebreider besproken in de diverse publicaties die in de afgelopen jaren vanuit het project geschreven zijn. In de tekst wordt veelvuldig naar deze publicaties verwezen. Een volledig overzicht van alle brakwater-publicaties sinds 2002 wordt gegeven in

Bijlage I. Deze publicaties zijn digitaal beschikbaar via Watnet. Dit rapport sluit af met een doorkijk naar gebruik van brak grondwater in de toekomst. Want als de pilots één ding hebben duidelijk gemaakt, is dat winning en gebruik van brak grondwater een duurzame strategie is in verziltingsgevoelige grondwatersystemen, zoals de Nederlandse delta. De titel van dit rapport luidt dan ook niet zonder reden “Brak grondwater: niet mijden, maar gebruiken!”.

2 Opzet pilots Noardburgum en Zevenbergen

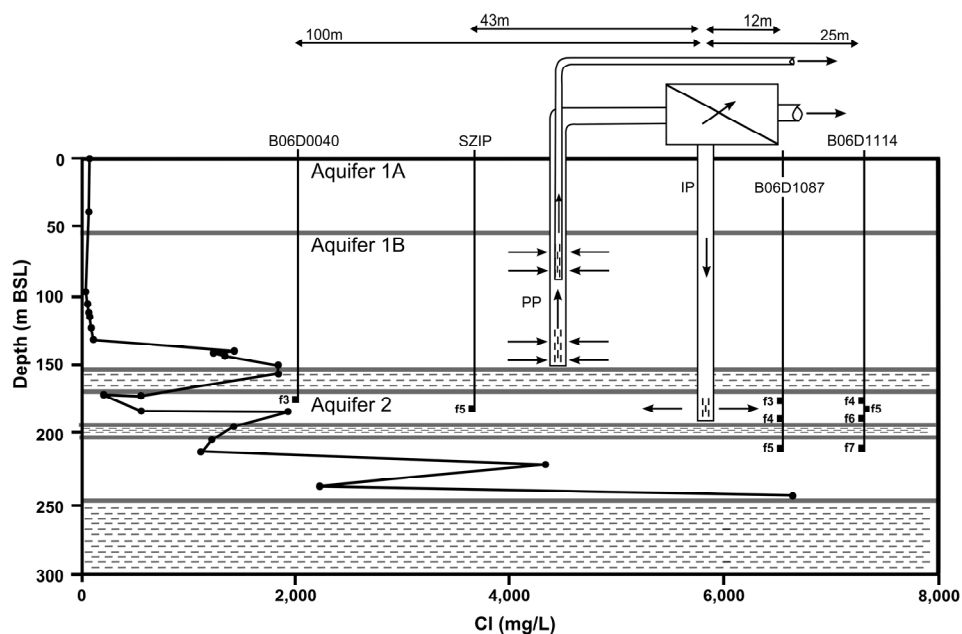
De pilots van Vitens en Brabant Water zijn gelegen in Noardburgum (Vitens), in de provincie Friesland, en in Zevenbergen (Brabant Water), in het westen van de provincie Noord-Brabant (Figuur 1). Het brakke water in de ondergrond is afkomstig van de vele trans- en regressiefasen in het Holocene en Pleistoceen, hetgeen geresulteerd heeft in een complex verloop van chlorideconcentraties met de diepte. In beide pilots komen diverse inversies voor, en met name bovenin opeenvolgende aquifers is het chloridegehalte lager dan onderin de bovenliggende aquifer.



Figuur 1. Ligging van de brakwaterpilots Noardburgum en Zevenbergen. Verder is aangegeven: diepte tot de eerste 1,000 mg Cl/L isolijn (m-NAP), maximale intrusie van Holocene transgressie water (Hol), ondiepe voorkomens van laat-Tertiaire tot vroeg-Pleistoceen mariene afzettingen, en ondiepe zout diapieren uit het Perm (PSD). Figuur uit Stuyfzand en Stuurman, 2008.

2.1 Opzet pilots Noardburgum en Zevenbergen

Figuren 2 en 3 tonen de opzet van beide pilots. De pilot Noardburgum is gelegen in een voormalig puttenveld, dat als gevolg van verzilting in 1993 verlaten is. Het zoethouderconcept wordt toegepast in de pilot, door gelijktijdige en gelijke (elk 50 m³/h) onttrekking van zoet grondwater, bovenin aquifer 1B, en brak grondwater onderin dezelfde aquifer. Het brakke water wordt gebruikt als voedingswater voor de RO installatie, welke naast de winput staat opgesteld in een zeecontainer (Foto 1). Het permeaat wordt direct getransporteerd naar de bestaande drinkwaterzuivering van Noardburgum (op hetzelfde terrein) en daar toegevoegd aan het overige ruw water. De RO draaide aanvankelijk met een recovery van 50%, resulterend in de productie van 25 m³ h⁻¹ permeaat en evenzoveel concentraat. In een later stadium van de pilot is geëxperimenteerd met hogere recoveries, respectievelijk 70 en 75%. Technische specificaties van de RO zijn vermeld in Tabel 1. Het concentraat wordt geïnjecteerd in aquifer 2, de “doelaquifer”. Aan het ontwerp van de injectieput is veel aandacht besteed, ondermeer ter voorkoming van gas clogging door ontgassing van methaan, dat in hoge concentraties in het voedingswater en (dus) concentraat van Noardburgum voorkomt. Voor meer informatie over het voorkomen van gas clogging wordt verwezen naar Raat (2008).



Figuur 2. Opzet van de brakwaterpilot Noardburgum (Vitens): ligging van winput (PP; 2 filters), injectieput (IP) en diverse waarnemingsputten, alsmede het chlorideverloop aan het begin van de pilot. Het zoethouderconcept wordt toegepast door gelijktijdige onttrekking van zoet en brak grondwater op twee dieptes in aquifer 1B.



Foto 1: RO proefinstallatie Vitens, Pb Noardburgum. De installatie is opgesteld in een zeecontainer

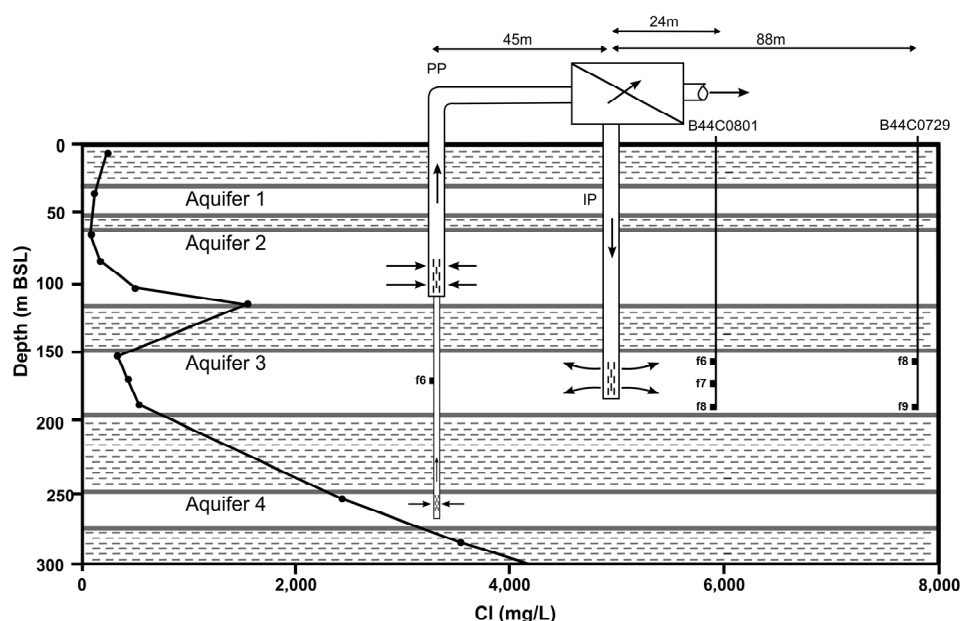
Naast de win- en injectieput, toont figuur 2 de diverse waarnemingsputten die aangelegd zijn. Waarnemingsfilters waren gelegen in zowel de doelaquifer als de winaquifer (NB figuur 2 toont alleen de filters in de doelaquifer) en werden gebruikt voor monitoring van de waterkwaliteit, stijghoogte in beide aquifers, en ontwikkeling van het zoet/brak-grensvlak in de doelaquifer, middels een zoutwachter langs de winput. Naast deze metingen werd de kwaliteit van het voedingswater, permeaat en concentraat gemonitord, alsmede de prestaties van de RO (MTC en drukval voeding-concentraat) en de injectieput (injectiedruk). Een uitgebreide beschrijving van het monitoringprogramma wordt gegeven in

het opslagplan van de pilot Noardburgum (Oosterhof en Wolthek, 2008), met aanvullingen in Raat en Stuyfzand (2009a).

Tabel 1. Technische specificaties van RO installaties Noardburgum en Zevenbergen

Parameter	eenheid	Noardburgum		Zevenbergen
Merk en type membraan		Dow Filmtec LE440i		Dow Filmtec LE440i
Capaciteit (voeding)	m ³ h ⁻¹	50		50
Voorbehandeling		2 stage 5µm en 1 µm filters		2 stage 5µm en 1 µm filters
Staging		One stage		One stage
Element type		8 inch spiral wound		8 inch spiral wound
Aantal elementen		30		30
Recovery	%	50	70	50
Dosering chemicaliën		geen	geen	geen
Gemiddelde flux	Lmh	20	28	20.4
Voedingsdruk	kPa	912	1257	836
Energieverbruik	kWh m ⁻³	0.63	0.62	0.58
TDS influent	mg L ⁻¹	1507		1040
TDS effluent	mg L ⁻¹	8.9	9.2	10.9

De opzet van de pilot Zevenbergen wordt schematisch weergegeven in Figuur 3. Tabel 1 geeft de technische specificaties van de RO. Brak grondwater wordt onttrokken uit aquifer 2 (49.2 m³ h⁻¹) en aangevuld met een kleine deelstroom uit aquifer 4 (0.8 m³ h⁻¹). Deze deelstroom is bijgezet om ervoor te zorgen dat het chloridegehalte van het RO voedingswater gedurende de gehele pilot op een niveau van >300 mg-Cl/L blijft. Net zoals de pilot Noardburgum, draaide de RO op Zevenbergen met een recovery van 50%, die later (tijdelijk) is verhoogd naar 65%. Het permeaat wordt geleverd aan de productielocatie Zevenbergen, en toegevoegd aan het daar geproduceerde industriewater. Het concentraat wordt geïnjecteerd in de aquifer 3. Ook de pilot Zevenbergen wordt uitgebreid gemonitord, en de opzet hiervan is vergelijkbaar met Noardburgum: waterkwaliteit wordt gemonitord in diverse filters in win- en doelaquifer, evenals de stijghoogte; kwaliteit van voedingswater, permeaat en concentraat wordt nauwlettend gevolgd, alsmede de prestaties van RO en injectieput. Opzet van het monitoringprogramma wordt uitgebreid beschreven in het opslagplan (Boukes, 2008), aangevuld met Raat en Stuyfzand (2009b).



Figuur 3. Opzet van de brakwaterpilot Zevenbergen (Brabant Water): ligging van winput (PP; 2 filters), injectieput (IP) en diverse waarnemingsputten, alsmede het chlorideverloop aan het begin van de pilot. Het voedingswater van de RO was samengesteld uit brakwater afkomstig van aquifer 2 (49.2 m³ hr⁻¹) en aquifer 4 (0.8 m³ hr⁻¹)

2.2 Hydrogeochemie van win- en doelaquifers

Een uitvoerige beschrijving van de hydrochemie van de win- en doelaquifers van Noardburgum en Zevenbergen wordt gegeven in Raat *et al.* (2011). Tabel 2 en 3 geven een beknopt overzicht van de waterkwaliteit in win- en doelaquifers van beide pilots. De in de tabellen genoemde BEX-index is de voor zeezout gecorrigeerde som van Na, K en Mg (in meq/L) en is een indicator voor optreden van verzoeting (BEX >0) dan wel verzilting (BEX <0) van het grondwater. De winaquifer in Noardburgum bestaat uit twee watertypen (Stuyfzand-classificatie): zoet grondwater (F3CaHCO₃ type) tot een diepte van 130 meter met daaronder, tot aan de afscheidende laag op 155 meter, brak grondwater (b3CaCl-). De licht positieve BEX waarden van het zoete water duiden op verzoeting van deze aquifer door infiltratie van voldoende zoet water. De sterk negatieve BEX waarden van het brakke grondwater duiden op verzilting. Met andere woorden: dit brakke water is een resultaat van indringing van brak/zout water in een zoete aquifer (en niet andersom), wat strookt met de verziltingsgeschiedenis van het voormalige puttenveld Noardburgum. De doelaquifer in Noardburgum bestaat uit een dun laagje verzilt F3CaHCO₃- water (met een sterk negatieve BEX waarde), gelegen op eveneens verzilt B3CaCl- en b2CaCl- watertypes. De brakke waters in Noardburgum worden gekarakteriseerd door hoge concentraties van Ca, Fe, Mn, CH₄, Ba en Sr en relatief lage concentraties SO₄, PO₄, NH₄ en sporenelementen als B, Li en zware metalen. Deze samenstelling is kenmerkend voor infiltrerend zeewater. De hoge methaanconcentraties zijn waarschijnlijk het resultaat van contact met Holocene klei- en veenlagen, tijdens infiltratie van het zeewater vanuit het noorden of westen. Opvallend is de overgang naar lage methaanconcentraties vanaf ca. 189 meter diepte. Wij vermoeden dat dit water dezelfde oorsprong heeft als het bovenliggende methaanrijke water, maar dat het tijdens infiltratie niet in contact is geweest klei- en veenlagen (bijvoorbeeld door infiltratie in een zandige stroomgeul).

De winaquifer van Zevenbergen (Tabel 3) kent eenzelfde opbouw als die van Noardburgum: zoet grondwater (F3CaHCO₃ type) tot een diepte van 87 meter met daaronder tot aan de scheidende kleilaag brak grondwater (B3CaCl- en b3CaCl-). De doelaquifer kent een dunne laag zoet grondwater (f3NaCl) bovenop verzoet brak grondwater (B3NaCl+). De verzoeting is waarschijnlijk het gevolg van expansie van het diepe Brabantse zoetwaterlichaam tijdens het Kwartair. De samenstelling van het dit brakke water onderscheidt zich van dat van doelaquifer van Noardburgum, ondermeer door zijn hogere BEX, (veel) hogere concentraties van Na, HCO₃, B, F, Li en Sr, en lagere concentraties CH₄, Ca, Fe, Mn, SiO₂, PO₄, TOC en Ba. Deze verschillen hangen grotendeels samen met de complexe hydrogeochemische reacties die optreden tijdens intrusie van zoet dan wel zout grondwater. Zeer opvallend in de doelaquifer van Zevenbergen zijn de zeer hoge Sr concentraties, mogelijk veroorzaakt door oplossing van Sr-rijke kalk of dolomiet.

Tabel 2. Hydrochemie van de win- en doelaquifer van de brakwaterpilot Noardburgum. Water wordt gewonnen op twee dieptes: 67 -86 (zoet water) en 134 -148 m-mv (brak water). Het membraanconcentraat wordt geïnjecteerd in aquifer 2, op een diepte van 173 -192m-mv. Water types volgens indeling van Stuyfzand (1993). BEX geeft verzilting (BEX < 0) danwel verzoeting van het grondwater (BEX > 0).

	Diepte m-mv	CH4	Cl	HCO3	Ca	Sr	Fe	BEX	Watertype	B	Ba
		mg/L						meq/L		ug/L	
AQUIFER 1B	-63		51	362	108			0.6	F3CaHCO3o		
	-73		70	373	117			0.0	F3CaHCO3o		
	-85		35	389	100			1.4	F3CaHCO3+		
	-87		31	401	108			0.5	F3CaHCO3		
	-103		38	404	120			0.5	F3CaHCO3o		
	-104		29	417	108			0.6	g3CaHCO3+		
	-110		37	418	122			0.5	F3CaHCO3		
	-115		49	437	123			0.2	F3CaHCO3		
	-120		57	399	116			-0.1	F3CaHCO3		
	-125		63	412	131			-0.1	F3CaHCO3o		
	-127		66	394	130			-0.3	F3CaHCO3o		
	-127		75	397	128			-0.5	F3CaHCO3o		
	-134		510	358	274			-10.8	B3CaCl-		
	-140		1200	322	555			-26.6	b3CaCl-		
	-145		1800	272	764			-40.4	b3CaCl-		
	-146		1800	270	762			-40.8	b3CaCl-		
	-147		1800	267	717			-41.4	b3CaCl-		
AQUITARD											
AQUIFER 2	-170	9.30	110	325	114	0.41	7.38	-1.3	F3CaHCO3-	24	44
	-172	11.00	370	329	222	0.78	16.10	-7.4	B3CaCl-	21	128
	-179	14.00	530	363	292	0.97	27.10	-11.3	B3CaCl-	14	186
	-179	12.00	870	348	426	1.48	32.00	-17.1	B3CaCl-	28	789
	-180	12.00	670	331	324	1.11	29.70	-14.8	B3CaCl-	18	226
	-190	0.21	4200	223	1250	5.35	33.60	-82.2	b2CaCl-	43	1580
	-191	0.09	4500	227	1370	5.98	34.00	-85.8	b2CaCl-	51	1660
	-208	0.10	3200	240	1060	4.96	23.60	-64.1	b2CaCl-	60	624
	-208	0.21	4100	233	1200	5.36	24.10	-81.0	b2CaCl-	63	829
AQUITARD											

Tabel 3. Hydrochemie van de win- en doelaquifer van de brakwaterpilot Zevenbergen. Het RO voedingswater was een mix van water uit aquifer 2 (90 - 115 m-mv; 49.2 m³ hr⁻¹) en aquifer 4 (250 - 255 m-mv; 0.8 m³ hr⁻¹). Het concentraat wordt geïnjecteerd in aquifer 3, op een diepte van 168 - 182 m-mv.

	Diepte m-mv	CH4	Cl	HCO3	Ca	Sr	Fe	BEX	Watertype	B	Ba
		mg/L						meq/L		ug/L	
AQUIFER 1	-34	7.60	85	311							
	-35		46	339							
	-35	17.00	57	335							
	-35	7.40	80	314							
AQUITARD											
AQUIFER 2	-63	21.00	36	376							
	-80		140	367	100	0.40	1.90	0.6	F3CaHCO3o	550	4
	-80	6.40	110	402	102	0.41	2.00	0.8	F3CaHCO3	370	0
	-83	3.50	130	382	106	0.50	1.90	0.7	F3CaHCO3o	280	6
	-91		190	376	111	0.67	1.10	0.4	f3CaHCO3o	590	2
	-98	1.50	275	358	132	0.87	1.80	-1.7	f3CaClO	590	0
	-101	5.90	510	368	230	1.80	3.00	-6.5	B3CaCl-	520	10
	-109		580	357	182	1.90	1.10	-4.4	B3NaCl-	760	4
	-109	0.20	800	337	270	3.50	2.10	-9.1	B3CaCl-	690	8
	-111	0.19	1100	348	380	5.60	3.20	-15.8	b3CaCl-	940	9
	-114	2.30	1400	445	470	8.40	4.10	-19.3	b3CaCl-	560	31
AQUITARD											
AQUIFER 3	-150	0.27	290	417	82	2.50	0.60	1.8	f3NaCl	1100	10
	-166	0.07	375	431	78	4.70	0.72	2.2	B3NaCl	870	16
	-168	0.06	385	444	64	4.60	0.69	2.8	B3NaCl+	1000	0
	-169	0.38	375	418	99	3.50	0.96	0.8	B3NaClO	680	8
	-173		400	449	62	4.50	0.64	3.2	B3NaCl+	940	4
	-175	0.05	465	445	44	3.10	0.00	4.0	B3NaCl+	970	4
	-176	0.06	435	452	52	4.10	0.56	3.5	B3NaCl+	1000	0
	-181	0.05	420	448	52	4.00	0.00	3.5	B3NaCl+	880	4
	-182	0.04	465	450	42	3.00	0.50	3.9	B3NaCl+	1000	0
	-185	0.07	520	452	40	2.30	0.42	2.8	B3NaCl+	1100	34
AQUITARD											
AQUIFER 4	-252		2400	676	29	1.20	0.03	3.2	b4NaCl	5600	11
	-253	0.02	2600	700	1	1.20	0.20	-3.2	b4NaCl	7699	110
	-284	0.06	3600								
	-303	0.03	4400								

Naast de waterkwaliteit is begrip van de reactiviteit van de doelaquifer van belang om (mogelijke) waterkwaliteitsveranderingen tijdens injectie van membraanconcentraat te kunnen verklaren. Tabel 4 geeft een beknopte beschrijving van de geochemie van beide doelaquifers. Deze gegevens zijn verkregen uit analyses aan bodemmateriaal afkomstig van boorkernen die bij aanleg van beide pilots gestoken zijn. De doelaquifer van Noardburgum bestaat uit grofzandige, goed gesorteerde fluviatiele zanden van laat-Tertiaire tot vroeg-Pleistocene oorsprong. Het gehalte aan reactieve bestanddelen zoals organische stof en kalk of andere mineralen is zeer laag. Pyriet is wel in enige mate aanwezig, maar zal niet reactief zijn bij injectie van anaeroob membraanconcentraat. De doelaquifer van Zevenbergen bestaat uit mariene zanden, eveneens van laat-Tertiaire tot vroeg-Pleistocene ouderdom, met daartussen kleine voorkomens van klei- en leemlenzen. Deze doelaquifer kent een veel grotere reactiviteit dan Noardburgum, hetgeen tot uiting komt in het hogere organische stofgehalte, de grotere kationuitwisselingscapaciteit (CEC), het (zeer) hoge kalkgehalte, en de aanwezigheid van reactieve mineralen zoals tot uiting komt in de hoge concentraties sporenelementen gemeten na Koningswater-extractie.

Tabel 4. Samenvatting van de geochemie van de doelaquifer van beide pilots. Analysegegevens van bodemmateriaal uit tijdens aanleg van de pilots gestoken boorkernen. Elementconcentraties na destructie met Koningswater.

Omschrijving		Eenheid	Noardburgum	Zevenbergen	Omschrijving		Eenheid	Noardburgum	Zevenbergen
Algemeen	Klei	%	2.4	5.1	Sporenelementen	As	ppm	0.6	29.2
	EC-H ₂ O	uS/cm	140	450		B	ppm	0.5	47
	BOM	%	0.31	0.76		Cd	ppm	0.01	0.11
	CaCO ₃	%	0.00	18.04		Co	ppm	1.2	9.0
	CEC	meq/kg	17.0	45.9		Cr	ppm	5.8	64.6
Macro elementen	FeS ₂	ppm	670	6402		La	ppm	2.5	11.2
	Al	ppm	1250	7725		Ni	ppm	4.0	15.6
	Ca	ppm	300	77600		Pb	ppm	1.5	8.5
	Fe	ppm	4200	42825		Sb	ppm	0.08	0.60
	K	ppm	350	4350		Sr	ppm	3	520
	Mg	ppm	200	9750		Th	ppm	0.85	2.90
	Mn	ppm	65	195		U	ppm	0.3	1.2
	Na	ppm	75	848		V	ppm	1.5	76.8
	P	ppm	10	1040		Zn	ppm	8	37

2.3 Selectie criteria win- en doelaquifer

Door Stuyfzand en Raat (2010) en Raat *et al.* (2010) wordt een aantal aandachtspunten gegeven die van belang zijn bij de selectie van win- en doelaquifers. Voor een succesvol gebruik van brak grondwater zijn de volgende aspecten van belang:

- Saliniteit water in de winaquifer: bij voorkeur chloride <10,000 mg /L of TDS (totaal opgeloste stoffen) <20,000 mg/L, om hoge voedingsdrukken en daarmee een hoog energieverbruik te voorkomen (brak grondwater orde grootte 1000 kPa, zeewater een factor 3-4 hoger)
- Voorkomen van scaling van de membranen: lage concentratie van slecht oplosbare ionen, zodat het risico van neerslagvorming in RO (scaling) en/of injectieput (verstopping) beperkt is en recovery niet te laag wordt (en daarmee de permeaat opbrengst).
- Concentratie boor in winaquifer: Voedingswaters met hoge boorconcentraties worden bij voorkeur gemeden. Boor komt veelvuldig in hoge concentraties in brak grondwater voor en kan gemakkelijk membranen passeren en in het permeaat terecht komen en daarmee de norm voor boor in het Waterleidingbesluit overschrijden.
- Vergunning voor injectie concentraat: bij voorkeur zijn saliniteit en gehalten nutriënten en zware metalen na concentratie door de RO vergelijkbaar of lager dan die in de doelaquifer
- Bijdrage aan voorkomen verzilting bestaande winningen: dusdanige selectie van win- en doelaquifer dat zoethouder concept gebruikt wordt.

In beide pilots voldoet de winaquifer grotendeels aan deze voorwaarden. Aandachtspunten zijn wel de oververzadiging van het concentraat (beide pilots) en boor in de winaquifer / het voedingswater van Zevenbergen. Hierop wordt in de volgende hoofdstukken uitvoerig ingegaan. Een belangrijk criterium voor de doelaquifer is dat deze geohydrologisch gescheiden is van de winaquifer, door een goede afsluitende kleilaag. Verder zijn saliniteit en gehalten aan nutriënten en zware metalen bij voorkeur hoger dan de winaquifer.

3 Prestaties RO en injectieput

Voor zowel Vitens als Brabant Water vormden de pilots de eerste ervaring met ontziltling van brak grondwater en injectie van membraanconcentraat. Voor de start van de pilots had Vitens al wel ruime ervaring met toepassing van membraantechnologie (omgekeerde osmose) voor de zuivering van anoxisch (zoet) grondwater. Voor Brabant Water was de pilot de eerste keer dat RO technologie werd toegepast op anoxisch water. Het zuurstofloos houden van de RO is een belangrijk aandachtspunt bij osmose van anoxisch water; binnendringen van zuurstof moet te allen tijde worden voorkomen, omdat anders vrijwel direct ijzerneerslagen zullen vormen. Andere aandachtspunten in de pilots waren de oververzadiging en mogelijke neerslagvorming van zouten in het concentraat en de retentie van boor door de RO-membranen. Neerslag van mineralen kan leiden tot scaling van de membranen en verstopping van de injectieput en doelaquifer. Boor komt veelvuldig in hoge concentraties in brak grondwater voor en kan gemakkelijk membranen passeren en in het permeaat terecht komen (en mogelijk de norm in het Waterleidingbesluit overschrijden).

3.1 Membraanprestaties Omgekeerde Osmose

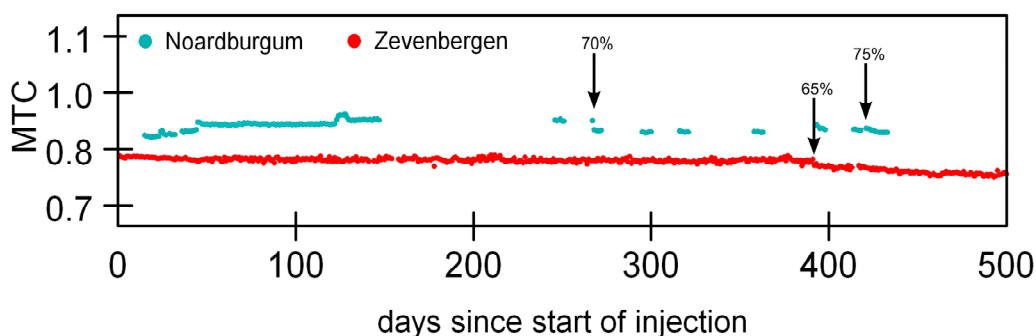
Beide pilots startten met een recovery van 50%, maar deze is later, als test, verhoogd naar respectievelijk 70% en 75% (Noordburgum) en 65% (Zevenbergen). Zowel tijdens de 'reguliere' bedrijfsvoering (50% recovery) als tijdens de aanvullende tests hebben de ROs zonder problemen gefunctioneerd. De gemiddelde waterkwaliteit van voedingswater, permeaat en concentraat bij 50% recovery wordt gegeven in Tabel 5. In principe zijn de concentraties in het concentraat een factor twee hoger dan in het voedingswater, met uitzondering van HCO_3 (verschuiving carbonaatevenwicht) en boor en methaan. Het kleine, ongeladen methaan passeert het membraan en dien ten gevolge zijn de concentraties methaan in het permeaat op Noordburgum net zo hoog als in voedingswater en concentraat (ca. 15 mg/L). Ook het kleine element boor, dat bij $\text{pH} < 8$ grotendeels als ongeladen species (H_3BO_3) in de oplossing aanwezig is, passeert gemakkelijk het membraan. In Zevenbergen resulteert dit in hoge concentraties boor in het permeaat. Hierop wordt nader ingegaan in paragraaf 3.4.

Figuur 4 toont het verloop van de MTC. Deze was gedurende de periode van 50% recovery nagenoeg stabiel in de pilot Zevenbergen en nam zelfs in geringe mate toe in Noordburgum. Dit wijst erop dat de ROs succesvol zuurstofloos gehouden zijn (anders was een MTC daling door membraanvervuiling door ijzer(hydr)oxiden verwacht), hetgeen bevestigd werd door de online zuurstofmetingen. De stabiele MTC laat ook zien dat in de ROs bij 50% recovery waarschijnlijk geen neerslagvorming plaats had, of dat eventuele neerslagvorming in ieder geval niet tot scaling heeft geleid (bijvoorbeeld doordat neerslagen zich niet afzetten op de membranen, maar verder worden getransporteerd). In Noordburgum nam de MTC iets af bij verhoging van de recovery naar 70% (naar ongeveer het niveau bij opstart), maar bleef daarna wel stabiel. (Merk op dat de registratie van MTC in Noordburgum enkele malen heeft stilgelegen; de RO heeft wel continue gedraaid.) De meetperiode bij 75% recovery is te kort om iets te kunnen zeggen het MTC verloop. In Zevenbergen nam de MTC geleidelijk af nadat de recovery verhoogd was naar 65%, hetgeen wijst op neerslagvorming en scaling in de RO. Bij deze recovery ontstonden ook problemen met de injectieput; zie daarvoor paragraaf 3.2.2. In de volgende paragraaf wordt uitgebreider ingegaan op oververzadiging en neerslagvorming in de RO van Zevenbergen.

Tabel 5. Gemiddelde waterkwaliteit van voedingswater, permeaat en concentraat bij 50% recovery. Concentraties in concentraat zijn in principe een factor 2 hoger dan in voedingswater (uitgezonderd HCO₃, CH₄ en B, zie tekst). Afwijkingen hiervan zijn een gevolg van verschil in aantal en frequente van monsternamen van voedingswater en permeaat (bijvoorbeeld chloride in Zevenbergen).

		Noordburgum			Zevenbergen		
		voeding	permeaat	concentraat	voeding	permeaat	concentraat
pH		6.8	5.2	7.0	7.3	5.5	7.5
EC	[mS/m]	253	2.92	473	136	1.47	256
CH ₄	[mg/L]	15.0	14.7	15.7	1.0	n.d.	1.4
Cl	[mg/L]	691	4.4	1409	321	1.8	583
Br	[mg/L]	2.9	<0.1	5.5	0.6	n.d.	1.8
F	[mg/L]	0.06	<0.05	0.12	0.16	<0.05	0.27
HCO ₃	[mg/L]	344	<10	671	386	7.8	752
SO ₄	[mg SO ₄ /l]	<2.0	<2.0	<2.0	4.0	0.1	7.8
tot-PO ₄	[mg P/L]	0.16	<0.02	0.28	0.10	0.006	0.20
TOC	[mg/L]	4.5	<0.5	9.6	4.0	0.8	7.8
Na	[mg/L]	90.4	4.4	174	167	2.4	328
K	[mg/L]	3.5	0.36	6.5	6.3	0.1	12.4
NH ₄	[mg N/L]	0.9	0.2	1.4	0.9	0.8	1.7
Ca	[mg/L]	375	0.83	754	128	0.14	259
Mg	[mg/L]	32	<0.1	61	12.0	0.14	24.2
Sr	[ug/L]	1237	<2	2516	997	1.0	2106
Ba	[ug/L]	261	<1	533	1.7	0.03	2.9
Fe	[mg/L]	39.5	0.077	78	1.6	0.002	3.4
Mn	[mg/L]	0.85	<0.005	1.7	0.04	<0.001	0.09
Si	[mg Si/L]	15.8	<0.5	30.0	11.2	0.12	19.9
As	[ug/L]	<0.1	<0.1	<1.0	1.3	n.d.	2.0
B	[ug/L]	n.d.	n.d.	n.d.	726	268	1239
Ni	[ug/L]	<1.0	<1.0	<1.0	1.4	n.d.	2.6

n.d. = niet bepaald



Figuur 4. Verloop van de MTC tijdens beide pilots. MTC in $10^{-8} \text{ m s}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$. Pijlen geven moment van verandering van recovery aan. Bij aanvang draaiden beide pilots met een recovery van 50%. De registratie van MTC in Noordburgum heeft enkele malen stilgelegen, de RO heeft wel continue gedraaid.

3.1.1 Verstopping van de kaarsenfilters op Zevenbergen

De kaarsenfilters, die voor de ROs waren opgesteld, vormden een aandachtspunt in de pilot Zevenbergen. In het eerste half jaar van de pilot verstopten deze 10 en 2 μm filters relatief snel, en moesten zodoende met enige regelmaat, eerder dan verwacht worden vervangen. Om kosten te besparen is na de zomer van 2010 besloten het fijnste filter te verwijderen en alleen te draaien met het 10 μm filter. Het verwijderen van het 2 μm filter heeft geen nadelige gevolgen gehad voor het functioneren van de RO (Figuur 4) of de injectieput. Sterker, sinds de zomer van 2010 verstopte het (overgebleven) 10 μm filter minder snel en wordt het circa eens per 4 maanden vervangen, hetgeen financieel acceptabel is.

Vermoed wordt dat de deeltjesbelasting sinds de zomer van 2010 is afgenomen, maar dit kan niet worden geverifieerd.

In het najaar van 2010, dus nadat het verstoppingsprobleem van de kaarsenfilters zich min of meer “spontaan” had opgelost, zijn deeltjestellingen uitgevoerd voor en na het 10 µm kaarsenfilter en na de RO. Resultaten van deze metingen worden uitgebreid beschreven in Raat en Beverloo (2010). Uit de tellingen bleek dat het gezamenlijk ruwwater (vóór kaarsenfilter) relatief veel grove deeltjes (>10 µm) heeft ten opzichte van de beide brakke deelstromen waaruit het is samengesteld (het voedingswater in Zevenbergen is een mix van brak water uit aquifer 2 (49.2 m³/h) en aquifer 4 (0.8 m³/h), zie Fig. 3). Deze grove deeltjes worden overigens door het 10 µm kaarsenfilter uit het ruw water gezeefd en bereiken de RO niet. Uit de tellingen bleek verder dat ook het concentraat ten opzichte van het RO voedingswater (ná kaarsenfilter) relatief veel grove deeltjes kent. Dit laatste is een mogelijke aanwijzing dat in de RO toch neerslag plaats heeft, zonder dat dit leidt tot scaling. Neerslagvorming en/of flocculatie na menging van de brakke deelstromen zijn mogelijke verklaringen voor de hoge deeltjesconcentratie voor grove deeltjes in het gezamenlijk ruw water vóór het kaarsenfilter.

3.1.2 Conclusie: ontzilting van brak grondwater technisch goed uitvoerbaar

Geconcludeerd wordt dat ontzilting van anoxisch brak grondwater middels omgekeerde osmose technisch goed mogelijk is, en dat membraanvervuiling als gevolg van binnendringen van zuurstof of neerslagvorming door oververzadiging kan worden voorkomen. De bedrijfsvoering van beide pilot-installaties is stabiel bij een recovery van 50%. Uit de pilot Zevenbergen blijkt verder dat het mixen van verschillende (typen) brakke voedingswaters tot onverwachte problemen kan leiden, zoals mogelijke neerslagvorming. Dit resultaat is van belang voor *full scale* toepassingen, waar ruw water uit verschillende putten wordt gemengd voordat het als voedingswater de RO in gaat.

3.2 Oververzadiging en neerslagvorming: kan de recovery omhoog?

Bij een RO recovery van 50% (of zelfs bij 70% in Noardburgum) vormt neerslagvorming geen operationeel probleem in de RO installatie. Op zich is dit resultaat opmerkelijk, gezien het feit dat het membraanconcentraat in beide pilots sterk oververzadigd was ten opzichte van een aantal mineralen, met name carbonaten en fosfaten. Dit roept de vraag op of de recovery verhoogd kan worden zonder dat scaling optreedt. Hierbij zijn niet alleen de prestaties van de RO van belang, maar ook die van de injectieput (verstopping). Een voordeel van een hogere recovery is dat de efficiency van de RO toeneemt, zodat voor de productie van permeaat minder energie nodig is (uitgedrukt in kWh/m³ permeaat). Een tweede voordeel is dat meer permeaat wordt geproduceerd (uitgedrukt in m³) wat benut kan worden voor de drinkwaterbereiding. Het concentraat echter is dan wel sterker ingedikt en bevat stoffen die tegengehouden worden door de membranen in hogere concentraties.

3.2.1 Verhoogde recovery is mogelijk op Noardburgum

Tabel 6 toont de kwaliteit, inclusief verzadigingsindices, van het concentraat bij de verschillende recoveries, voor beide pilots. Voor Noardburgum toont de tabel een sterke oververzadiging voor de carbonaten kalk (CaCO_3), dolomiet ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), sideriet (FeCO_3) en rhodochrosite (MnCO_3), de fosfaten hydroxyapatiet ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) en vivianiet ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), en kwarts (SiO_2). Met name bij de verhoogde recoveries is de oververzadiging zeer hoog, zoals bijvoorbeeld de meer dan 250x oververzadiging ten opzichte van sideriet bij 75% recovery ($\text{SI} = 2.4; 10^{2.4}\text{x}$ oververzadiging). Merk overigens op dat de oververzadiging van de fosfaten hydroxyapatiet en vivianiet bij 75% recovery lager is dan bij 70% en 50%. Hierover later meer.

Tabel 6. Waterkwaliteit en verzadigingsindices (SIs) van het RO concentraat voor beide pilots, bij verschillende RO recoveries. Waterkwaliteit is gebaseerd op analyses van watermonsters, de verzadigingsindices zijn berekend met PHREEQC.

Locatie		Noardburgum			Zevenbergen	
RO recovery		50%	70%	75%	50%	65%
pH		6.97	7.12	7.18	7.52	7.54
EC	[mS/m]	473	670	845	256	350
CH4	[mg/L]	15.7	16.8	13.7	1.4	n.d.
Cl	[mg/L]	1409	2067	2700	583	771
Br	[mg/L]	5.54	8.06	9.59	1.82	2.70
F	[mg/L]	0.12	0.11	0.24	0.27	0.36
HCO3	[mg/L]	671	1100	1400	752	1140
SO4	[mg SO4/l]	<2.0	<2.0	<2.0	7.8	n.d.
tot-PO4	[mg P/L]	0.70	0.54	0.07	0.20	0.62
TOC	[mg/L]	9.6	15.0	20.0	7.8	12.0
Na	[mg/L]	174	222	250	328	465
K	[mg/L]	6.5	9.8	12.3	12.4	15.0
NH4	[mg N/L]	1.45	2.32	3.17	1.7	2.4
Ca	[mg/L]	754	1107	1423	259	365
Mg	[mg/L]	60.75	83.90	124.33	24.2	35.5
Sr	[ug/L]	2516	3730	4940	2106	3150
Ba	[ug/L]	533	740	1020	2.9	7.0
Fe	[mg/L]	78	116	146	3.4	5.2
Mn	[mg/L]	1.7	2.5	3.2	0.09	0.14
Si	[mg Si/L]	30.0	40.8	40.3	19.9	29.4
As	[ug/L]	<1.0	<1.0	n.d.	2.0	2.2
B	[ug/L]	n.d.	n.d.	n.d.	1239.1	n.d.
Ni	[ug/L]	<1.0	<1.0	n.d.	2.6	<d.l.
Verzadigingsindex						
Bariet		n.a.	n.a.	n.a.	-2.17	n.a.
Calciet		0.72	1.2	1.4	0.98	1.3
Dolomiet		0.52	1.4	1.9	1.09	1.7
Fluoriet		-2.24	-2.1	-1.4	-1.67	-1.3
Gips		n.a.	n.a.	n.a.	-2.45	n.a.
Hydroxyapatiet		2.26	3.1	1.1	2.22	3.2
Kwarts		1.21	1.3	1.3	1.02	1.2
Rhodochrosiet		0.44	0.8	1.0	-0.25	0.0
Sideriet		1.83	2.2	2.4	1.12	1.4
SiO2(amorf)		-0.14	0.0	0.0	-0.33	-0.2
Strontianiet		-1.23	-0.8	-0.5	-0.59	-0.3
Talk		-1.84	-0.1	0.6	-0.28	0.9
Vivianiet		3.30	3.6	2.0	0.13	0.7
Witheriet		-2.78	-2.3	-2.1	-4.11	-3.8
vet gedrukt = SI concentraat >0.3 n.d. = niet bepaald n.a. = niet van toepassing						

Ondanks de zeer sterke oververzadiging is de MTC in de RO constant gebleven en heeft (dus) geen (meetbare) scaling plaats gevonden, ook niet bij 70% en 75% recovery. Ook is er geen putverstopping opgetreden. Na injectie verandert de samenstelling van het concentraat hier nagenoeg niet, op wat sorptie van silica na (Raat *et al.*, 2011; zie ook hoofdstuk 5). Tijdens de pilot bleef ook de injectiedruk constant, hetgeen erop wijst dat de injectieput niet verstopt. In Noardburgum heeft dus, ondanks de sterke oververzadiging, geen neerslag plaats in de RO, noch in de injectieput of de bodem.

Bovenstaande resultaten gelden voor 50% en 70% recovery; van de test met 75% recovery zijn geen meetdata in de ondergrond beschikbaar en de metingen van MTC bestrijken een te korte periode. Echter, uit Tabel 6 blijkt dat de RO bij 75% recovery een omslagpunt heeft bereikt. Eerder werd opgemerkt dat de oververzadiging ten opzichte van de fosfaten hydroxyapatiet en vivianiet bij 75% recovery lager is dan bij 70% en 50%, hetgeen volgt uit de lagere fosfaat concentraties bij 75% recovery (Tabel 6). Verder valt op dat de concentratie silica bij 75% recovery niet gestegen is ten opzichte van 70% recovery.

Hoewel enige schommelingen in samenstelling van het voedingswater plaats hebben, is dit geen verklaring voor de lagere concentraties fosfaat en silica. Met andere woorden, fosfaat en silica blijven achter in de RO bij 75% recovery (neerslag, sorptie). Dit wordt bevestigd door massabalansberekeningen aan het voedingswater, permeaat en concentraat. De balans is niet kloppend te maken voor PO_4 en Si, wat aantoont dat deze in de RO achterblijven.

Geconcludeerd wordt dat 70% recovery de grens is voor de RO van Noardburgum en dat daarboven problemen (scaling) in de RO kunnen (gaan) plaatshebben. Deze recovery is flink hoger dan men theoretisch op basis van verzadigingsindices (SIs) zou verwachten. Verzadigingsindices geven dus een (te) conservatieve schatting van de operationeel veilige recovery.

3.2.2 Grens aan de recovery op Zevenbergen

Het beeld voor Zevenbergen is grotendeels tegengegesteld aan dat voor Noardburgum. Wel is het concentraat in Zevenbergen (50%) in vergelijkbare mate oververzadigd ten opzichte van diverse carbonaten, het fosfaatmineraal hydroxyapatiet, en kwarts (Tabel 6). Bij 50% recovery is geen scaling waargenomen in de RO, maar uit metingen in de doelaquifer blijkt dat kalk en sideriet weldegelijk neerslaan na injectie in de ondergrond (Raaijmakers *et al.*, 2011; zie ook hoofdstuk 5). Dit beeld komt overeen met de resultaten van de deeltjestellingen, waaruit bleek dat het concentraat ten opzichte van het RO voedingswater (na passeren van de kaarsenfilter!) relatief veel grove deeltjes ($>10\mu\text{m}$) kent (Raaijmakers en Beverloo, 2010). Dit is een mogelijke aanwijzing dat reeds in de RO neerslagvorming plaats heeft, zonder dat dit leidt tot scaling. Immers, de MTC was stabiel tijdens 50% recovery (Figuur 4). Naar schatting is in het eerste jaar ca. 35 ton ofwel ca. 13m^3 kalk in de bodem neergeslagen. Waar deze neerslag (voornamelijk) plaatsvond is niet te zeggen, anders dan ergens in het traject tussen de injectieput en de eerste waarnemingsput (Z24), op 24 m afstand. Tevens is bekend dat de injectiedruk na 12 maanden met ca. 7% was toegenomen.

Na ruim een jaar draaien met 50% recovery is deze op Zevenbergen verhoogd naar 65%. Eerder werd al opgemerkt dat deze verhoging resulteerde in een geringe, maar continue afname van de MTC (Figuur 4). De gevolgen voor de injectieput waren nog duidelijker: verhoging van de recovery resulteerde binnen 3 maanden in een aanzienlijke (verdere) toename van de injectiedruk (ca. 20% extra toename). Deze resultaten wijzen erop dat neerslagvorming plaats heeft zowel in of rond de injectieput als in de RO. Echter, uit een (eenmalig) vergelijking van de samenstelling van het voedingswater en concentraat blijkt niets van neerslagvorming van carbonaten, fosfaten of andere mineralen in de RO: de gehalten in het concentraat van bijvoorbeeld calcium, magnesium, ijzer, bicarbonaat en fosfaat verhouden zich tot het voedingswater zoals verwacht mag worden op basis van membraanretentie (100:35).

Samengevat leert de pilot in Zevenbergen het volgende:

- bij 50% recovery heeft neerslag van carbonaten in de bodem plaats, met als gevolg een lichte verstopping van de injectieput;
- bij 65% recovery verstopt de injectieput snel en heeft vermoedelijk enige scaling plaats in de RO.

Duidelijk is dat een recovery van 65% niet bedrijfszeker is, maar tevens kan worden afgevraagd of 50% recovery dat wel is. Dit hangt ondermeer af van in hoeverre de injectieput te regenereren is. Een wellicht meer bedrijfszekere optie dan regenereren is om neerslagvorming in de ondergrond te voorkomen door dosering van zuur (HCl of CO_2) aan de voeding van de RO of het concentraat. Hierdoor wordt de pH van het concentraat verlaagd en neemt de oplosbaarheid van kalk toe. Dit concept zal in 2012 in Zevenbergen worden getest.

3.2.3 Waarom een duidelijk verschil in neerslagvorming?

Noardburgum en Zevenbergen kennen dus zeer duidelijke verschillen in neerslagvorming in RO, injectieput en ondergrond. In Noardburgum worden geen (nauwelijks) neerslagen gevormd in RO en ondergrond, tot aan een recovery van 70%. Bij 75% recovery vindt in de RO enkel wat neerslag/sorptie plaats van PO_4 en silica, maar niet van bijvoorbeeld sideriet en kalk, terwijl het concentraat zeer sterk is oververzadigd ten opzichte van deze mineralen. In Zevenbergen heeft wel neerslag plaats van deze mineralen, in de ondergrond reeds vanaf 50% recovery en in de RO en in/rondom de injectieput vanaf

65% recovery. Een belangrijke vraag is waarom deze verschillen bestaan, ondanks dat verzadigingsindices in beide pilots van vergelijkbare orde zijn (Tabel 6).

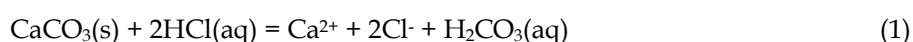
Verschillen in gedrag van concentraat na injectie in de ondergrond, worden (deels) verklaard door verschillen in reactiviteit (geochemie) van de beide doelaquifers. Meer hierover is te vinden in Raat *et al.* (2011) en Hoofdstuk 5. Los van de geochemie, zijn er twee mogelijke verklaringen voor het verschil in gedrag van (met name) de carbonaatneerslagen in de RO. Merk op dat de ijzergehalten (Fe^{2+}) in Noardburgum zeer hoog zijn. Lab tests met synthetisch (nagemaakt) Noardburgum concentraat, mét en zónder Fe^{2+} in de oplossing, laten zien dat kalk niet neerslaat in aanwezigheid van Fe^{2+} maar wel als de oplossing vrij is van Fe^{2+} (Jack Gilron, Ben-Gurion University of the Negev, mondelinge mededeling). Tot eenzelfde conclusie kwamen Herzog *et al.* (1989), in een studie naar *magnetic water treatment*: Fe^{2+} gaat de vorming van kalkneerslag tegen.

Inhibitie door Fe^{2+} is dus een aannemelijke verklaring waarom kalk zich niet vormt in Noardburgum (zeer hoge Fe^{2+}) en wel in Zevenbergen (zeer lage Fe^{2+} !). Toch verklaart dit niet waarom er in Noardburgum geen sideriet (FeCO_3) neerslaat, ondanks een gemeten oververzadiging tot wel 250x (75% recovery). Een mogelijke verklaring is de carbonaatconcentratie in de oplossing. Merk op dat de “achtergrond” van de carbonaatoververzadiging (sideriet, kalk, dolomiet) anders is bij Zevenbergen dan bij Noardburgum. In het concentraat van Zevenbergen zijn gehalten van calcium, magnesium en ijzer (veel) lager dan in Noardburgum, maar door de hogere carbonaat (CO_3) gehalten (vergelijkbare HCO_3 , hogere pH) kent Zevenbergen een vergelijkbare oververzadiging ten opzichte van genoemde mineralen. Mogelijk dat neerslagvorming meer gestuurd wordt door (hoge) carbonaatgehaltenes dan door gehalten aan bijbehorende metalen.

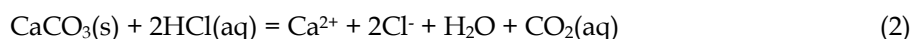
3.3 Veilig regenereren van de injectieput

Na verhoging van de recovery naar 65% raakte de injectieput van Zevenbergen binnen 4 maanden in zo’n mate verstopt dat regeneratie van de put noodzakelijk was. Regeneratie is door Brabant Water in drie stappen uitgevoerd: (1) versneld afpompen van de injectieput, (2) jutteren en versneld afpompen, en (3) regenereren met hulp van zoutzuur (HCl). Stappen (1) en (2) hebben niet geleid tot verbetering van de put. Regeneratie met zoutzuur had wel succes, hoewel drie opeenvolgende HCl-regeneraties de verstopping slechts voor de helft konden wegnemen. Een rapportage over de regeneratie van de IP put van Zevenbergen is momenteel in voorbereiding.

Een risico van regeneratie met zoutzuur is de vorming van grote hoeveelheden van CO_2 , volgens:



ofwel



CO_2 lost in principe goed op in water, maar bij veel CO_2 productie kan de oplosbaarheid worden overschreden en worden gasbellen gevormd. Deze gasbellen zullen snel stijgen naar het oppervlak, met als gevolg een oncontroleerbare (en gevaarlijke) *blow out* of “spuiter” (analoog aan een fles cola die na schudden geopend wordt). Gasbellen zullen zicht niet vormen zolang de druk van de bovenstaande waterkolom groot genoeg is, volgens

$$P_{N_2} + P_{CO_2} < P_{\text{watercolumn}} + P_{\text{atm}} \quad (3)$$

Aan de hand van bovenstaande vergelijkingen en het oplosbaarheidproduct van CO_2 kan een inschatting gemaakt worden van de hoeveelheid HCl die tijdens de regeneratie veilig kan worden toegevoegd. Voor Zevenbergen wordt deze geschat op 0.96 mol HCl/L ofwel 3.5%, waarbij veiligheidshalve wordt uitgegaan van een $P_{\text{watercolumn}}$ van 14 atmosfeer (140 m). Voor meer informatie, inclusief een uitgebreide toelichting op wijze van (veilig) uitvoeren van een regeneratie met zoutzuur wordt verwezen naar Raat en Van Beek (2011).

3.4 Boor in permeaat kan een probleem zijn

Boor komt veelvuldig in hoge concentraties in brak grondwater voor en kan gemakkelijk membranen passeren en in het permeaat terecht komen en mogelijk tot overschrijding van de norm in het Waterleidingbesluit leiden. Dit komt doordat boor een klein element is en (bij pH < 8) grotendeels als ongeladen species (H_3BO_3) in de oplossing aanwezig is. Voor de start van de pilot was duidelijk dat dit een aandachtspunt was in Zevenbergen, door de hoge boorconcentraties (>500 µg/L) in de winaquifer. Concentraties van boor in voedingswater, permeaat en concentraat zijn te vinden in Tabel 5 (50% recovery). Uit de tabel blijkt dat boor niet geheel ongehinderd de RO membranen passeert en dat dientengevolge de concentraties in het permeaat ca. een factor 3 lager zijn dan in het voedingswater. Desondanks is de concentratie boor in het permeaat zeer hoog en nadert deze de norm in het Waterleidingbesluit van 500µg/L (Overeenkomstig WHO richtlijn, EU richtlijn gaat uit van 1,000 µg/L).

Er zijn mogelijkheden om boorconcentraties in het permeaat te verlagen, bijvoorbeeld verhoging van de pH van het voedingswater (verschuiving van ongeladen H_3BO_3 naar H_2BO_3^-), door gebruik te maken van SWRO (sea water reverse osmosis) membranen of door (aanvullende) nabehandeling van het permeaat. De eerste optie is niet relevant omdat een verhoging van de pH zal leiden tot neerslagvorming van carbonaten en (dus) scaling van de RO en injectieput. De andere twee opties kunnen in principe worden toegepast, maar een nadeel zijn de kosten die hieraan verbonden zijn, waarmee een groot voordeel BWRO (brackish water reverse osmosis) ten opzichte van SWRO verdwijnt. De beste optie om hoge concentraties van boor te vermijden blijft zodoende een nauwkeurige selectie van de winaquifer. Bij toepassing van het zoethouderconcept bestaat natuurlijk ook altijd de mogelijkheid boor weg te mengen met het ruw water van de zoete winputten.

3.5 Conclusies: ontziltling technisch geen probleem, injectie soms wel

Ontziltling van brak, anoxisch grondwater middels omgekeerde osmose is, ook zonder gebruik van antisclerants, technisch gezien goed uitvoerbaar, mits de recovery zorgvuldig gekozen is. Ervaringen met injectie van membraanconcentraat zijn wisselend. In de pilot Noardburgum is een recovery mogelijk van ca. 70% (met dientengevolge sterke oververzadiging), zonder dat verstopping optreedt. In Zevenbergen treedt geleidelijke putverstopping reeds op bij 50% recovery. Mogelijke oorzaken voor verschillen tussen beide pilots zijn de samenstelling van het concentraat (CO_3^{2-} , Fe^{2+}) en de bodemsamenstelling van de doelaquifer (kalkgehalte, textuur). Naast deze hoofdconclusies, hebben de pilots ons het volgende geleerd:

- Verzadigingsindices geven een (te) conservatieve schatting van de operationeel veilige recovery. Enige oververzadiging ten opzichte van carbonaten, fosfaten en silica leidt niet noodzakelijker wijze tot membraanscaling.
- Afwezigheid van RO scaling betekent niet dat ook injectie probleemloos verloopt. In Zevenbergen heeft (bij afwezigheid van merkbare membraanscaling bij een recovery van 50%) wel degelijk neerslag in de bodem plaats, met als gevolg putverstopping.
- Het mixen van verschillende typen (brakke) voedingswaters kan tot problemen leiden, zoals mogelijke neerslagvorming. Dit resultaat is van belang voor *full scale* toepassingen, waar ruw water uit verschillende putten wordt gemengd voordat het als voedingswater de RO in gaat.
- Fe^{2+} is mogelijk een inhibitor van neerslagvorming van kalk. In aanwezigheid van Fe^{2+} is dan een zeer grote kalkoververzadiging mogelijk.
- Zoutzuur (HCl) is het aangewezen middel om putverstopping door kalk op te lossen. Echter, de productie van grote hoeveelheden van CO_2 , met als gevolg gasbelvorming, is een groot risico van deze regeneratie (kans op oncontroleerbare spuiters). Dit risico kan beperkt worden door een gecontroleerde dosering van HCl. De "veilige" concentratie toe te voegen HCl kan berekend worden op basis van de oplosbaarheid van CO_2 en de druk van de bovenstaande waterkolom (diepte).
- Boor komt in hoge concentraties in het voedingswater van de pilot Zevenbergen voor. Verwijdering van boor uit het permeaat is mogelijk, maar kostbaar. De beste optie om hoge concentraties van boor te vermijden blijft, indien voorhanden, de selectie van een winaquifer met lage boor concentraties.

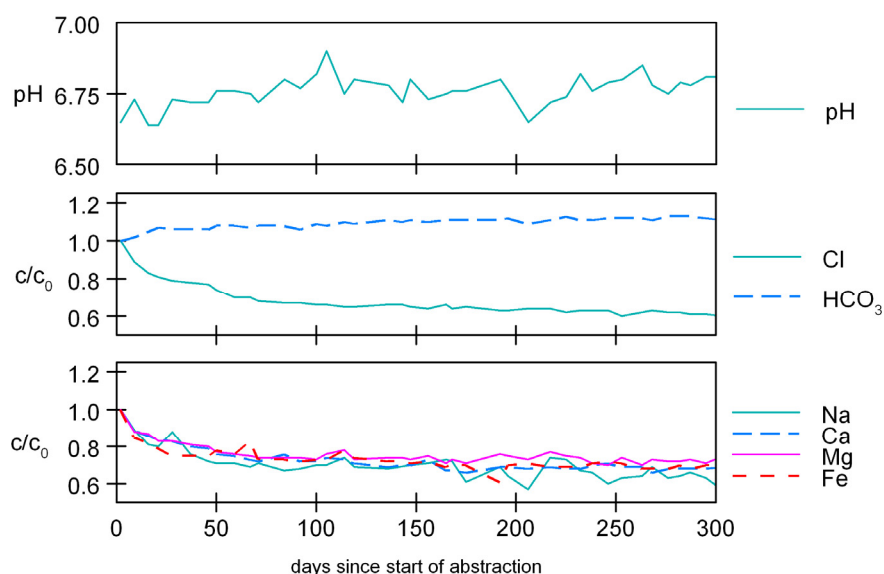
4 Effecten winning brakwater

Centraal in de pilots stond het effect van injectie van membraanconcentraat op de waterkwaliteit van de doelaquifer. De aanleiding van het brak wateronderzoek was echter een andere: de mogelijkheid om verzilting van (bestaande) zoetwater bronnen tegen te gaan door gerichte onttrekking van toestromend brak grondwater. Dit zoethouderconcept (Grakist *et al.* 2002; Kooiman *et al.* 2004) is daadwerkelijk toegepast in de pilot Noardburgum, en ook de pilot Zevenbergen leert ons het nodige over invloeden van brakwaterwinning op zoet/zoutverdeling in de ondergrond. Ervaringen op beide locaties hebben ons denken over verzilting veranderd. Een *spin off* hiervan is het idee van de zoetmaker, ofwel het vergroten van de bergingscapaciteit voor zoetwater in laag-Nederland door, analoog aan de zoethouder, gerichte onttrekking van brak grondwater (Vink *et al.*, 2010).

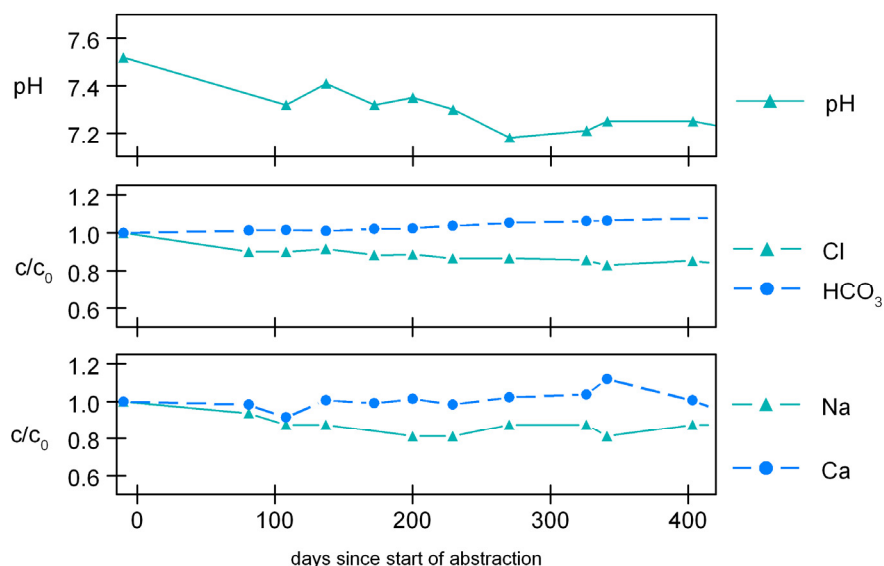
4.1 Winning van brak grondwater werkt verzoetend

De kwaliteit van het onttrokken water is in beide pilots nauwlettend gevolgd. Uit deze metingen blijkt eenzelfde verloop (daling) van het chloridegehalte na start van de brakwaterwinning (Fig. 5 en 6). In Noardburgum nam chloride af van ca. 1000 mg/L aan het begin van de pilot tot rond de 600 mg/L na tien maanden. De grootste daling had plaats in de eerste 50 dagen, maar ook daarna bleef het chloride gehalte geleidelijk dalen. In Zevenbergen was de afname van chloride minder spectaculair, maar bedroeg nog altijd ruim 15% in het eerste jaar: van 300 mg/L initieel tot 250 mg/L na 340 dagen. Ook hier geldt dat de grootste afname plaats had in de eerste maanden van de pilot.

In Noardburgum ging de afname in chloride gepaard met een, relatief gezien, vergelijkbare afname van de kationen Na, Ca, Mg en Fe (Fig. 5). De concentratie HCO_3 nam daarentegen toe. In Zevenbergen nam de HCO_3 concentratie iets toe, terwijl de Ca concentratie, anders dan in Noardburgum, stabiel bleef. Natrium vertoonde, zoals verwacht, een vergelijkbare afname als chloride. Voor Noardburgum geldt dat de kwaliteitsveranderingen in het onttrokken brakke water mogelijk wijzen op bijmenging van bovenliggend zoet grondwater. Immers, hogerop in de winaquifer zijn de concentraties Ca, Mg en Fe lager en de concentraties HCO_3 juist hoger dan ter hoogte van het brakke onttrekkingsfilter (Tabel 2). Voor Zevenbergen is het moeilijk te zeggen of bijmenging van boven plaats had. De gemeten (stabiele) Ca concentraties in het onttrokken water bedragen ca. 130 mg/L, hetgeen het midden houdt tussen water ter hoogte van het onttrekkingsfilter en bovenliggend water (Tabel 3). HCO_3 concentraties veranderen weinig met de diepte en ook de toename in het onttrokken water was beperkt. Merk op dat, voor beide locaties, de kwaliteitsveranderingen in het opgepompte brakke voedingswater geen gevolgen hadden voor de kalkoververzadiging en instelling van de RO recovery. In Noardburgum bleef de kalkoververzadiging op een vergelijkbaar niveau als aan het begin van de onttrekking, door toename van de pH en HCO_3 concentratie, die compenseerden voor de afname in calcium. Ook in Zevenbergen veranderde de mate van kalkoververzadiging nauwelijks, door de relatief stabiele Ca en HCO_3 concentraties.



Figuur 5. Verandering in enkele waterkwaliteitsparameters in het onttrokken brakke water in Noordburgum. Concentraties ten opzichte van concentraties bij start onttrekking (c/c_0).



Figuur 6. Verandering in enkele waterkwaliteitsparameters in het onttrokken brakke water (aquifer 2) in Zevenbergen. Concentraties ten opzichte van concentraties bij start onttrekking (c/c_0).

In beide pilots resulteerde de onttrekking van brak grondwater dus in een plaatselijke verzoeting van de winaquiifer. In het 'klassieke' verzilte systeem, waarin zoetwaterputten verzilt zijn door opgekelend brak water, is deze reactie te verwachten. Immers, met name rondom de verzilte put bevindt zich brak water, terwijl op enige afstand van de put, op dezelfde diepte, zoeter water voorkomt. Bij winning van het brakke (opgekegelde) water zal dit zoetere water lateraal toestromen, mits de aanvulling vanuit de zijkanten van het systeem voldoende groot is. Zevenbergen is echter een ander systeem, waar niet eerder (zoet) water gewonnen is en waar (dus) geen lokale opkegeling heeft plaats gehad. Verzoeting door brakwaterwinning kan daar plaatsvinden doordat lateraal zoet water toestroomt, hetgeen alleen mogelijk is als het systeem momenteel een verzoeting ondergaat. De waarnemingen op Zevenbergen hebben tot de hypothese geleid dat het onttrekken van brakwater in een verzoetend watersysteem (op den duur) tot verzoeting van het systeem moet leiden. De beter doorlatende delen in een verzoetend systeem zullen (van nature) reeds het snelst verzoeten en bij onttrekking ook het grootste aandeel water. Het omgekeerde geldt overigens ook: het winnen van brak grondwater in een verziltend systeem zal juist leiden tot versnelde verzilting. Om de effecten van brakwaterwinning goed in te kunnen schatten, is

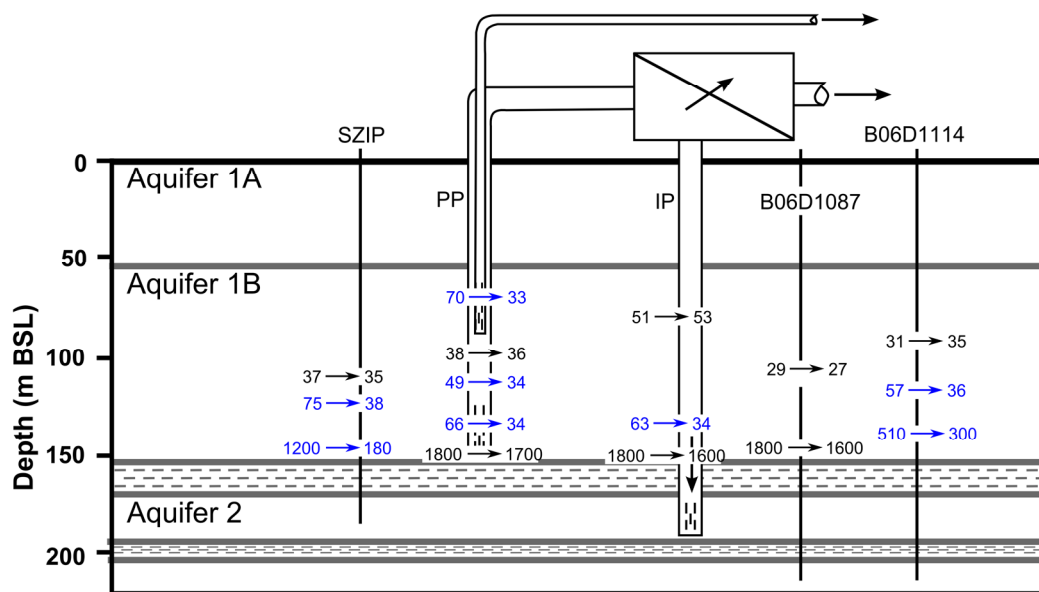
dus gedegen kennis nodig van zowel de geohydrologie, de actuele zoet-zoutverdeling, en of het systeem momenteel (van nature) verzoet of verzilt.

Samengevat: het onttrekken van brakwater in een verzoetend watersysteem kan (op den duur) leiden tot een versnelde verzoeting van het systeem. Het is daarom de vraag of het mijden van brak grondwater in verzoetende systemen wel een juiste strategie is om zo duurzaam mogelijk drinkwater te produceren.

4.2 Zoethouder werkt in de praktijk

Het principe van de zoethouder is in Noardburgum in de praktijk toegepast, door gelijktijdige en gelijke (elk 50 m³/h) onttrekking van zoet grondwater bovenin aquifer 1B en brak grondwater onderin dezelfde aquifer. De werking van de zoethouder is nauwlettend gevolgd middels een zoutwachter langs de winput en geregelde waterkwaliteitsmetingen (Cl en Na) in filters van diverse waarnemingsputten in de winaquisfer. Resultaten van de zoethouder zijn eerder gepresenteerd door Oosterhof en Raat (2010).

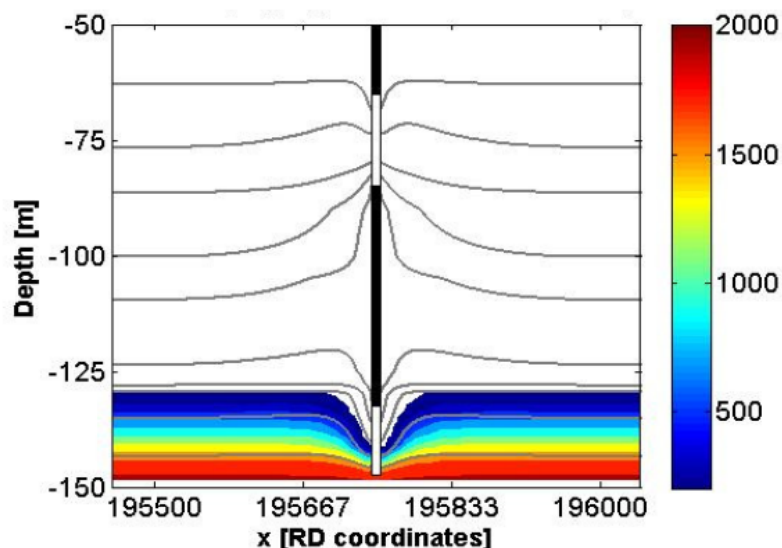
Aan de hand van waterkwaliteitsveranderingen in het gewonnen brakke water werd in de vorige paragraaf al gesteld dat brakwaterwinning ter hoogte van het onttrekkingsfilter tot een verzoeting heeft geleid. Dit beeld wordt bevestigd door chloridemetingen in de winaquisfer (Fig. 7). Een verzoeting is waargenomen in 8 van de 16 waarnemingsfilters, in de overige filters veranderden chloridegehalten niet of nauwelijks. Hieruit wordt duidelijk dat de daling van het chloridegehalte niet alleen plaats had rondom de winput, maar ook in filters op grotere afstand zoals in waarnemingsput B06D1114, op ruim 50 m afstand van de winput. Opgemerkt wordt dat de optredende verzoeting sterk gekoppeld is aan de geohydrologie (doorlatendheid) van de aquifer. Als voorbeeld: direct boven de Tegelenklei (kleilaag tussen aquifer 1 en 2) heeft gedurende de pilot nauwelijks verzoeting plaats gehad, enkele meters hoger wel (Fig. 7). Dit beeld komt overeen met de in de vorige paragraaf gestelde ‘verzoetings’-hypothese.



Figuur 7. Verandering in chlorideconcentratie in winaquisfer van Noardburgum, na 8 maanden toepassing van de zoethouder. Blauw: verzoeting; zwart: geen duidelijke verandering chlorideconcentratie.

De werking van de zoethouder is door Van der Valk (2011) gemodelleerd met hulp van Seawat (USGS, 2002). Seawat is een 3D-hydrologisch model, dat rekening houdt met effecten van dichtheidsverschillen op de stroming. Van der Valk's modelleringen laten zien dat de brakwaterwinning zorgt voor een verlaging van de zoet-brakgrensvlak. Dit komt overeen met de observaties in de vorige paragraaf, dat waterkwaliteitsveranderingen van het gewonnen brakke water mogelijk wijzen op bijmenging van bovenliggend zoet grondwater. De invloed van onttrekking reikt volgens de modelleringen niet verder dan ca. 75m horizontale afstand van de winput (Fig. 8); down coning als gevolg van brak waterwinning lijkt dus slechts een lokaal verschijnsel. Overigens is een verlaging van het zoet-zoutgrensvlak niet het

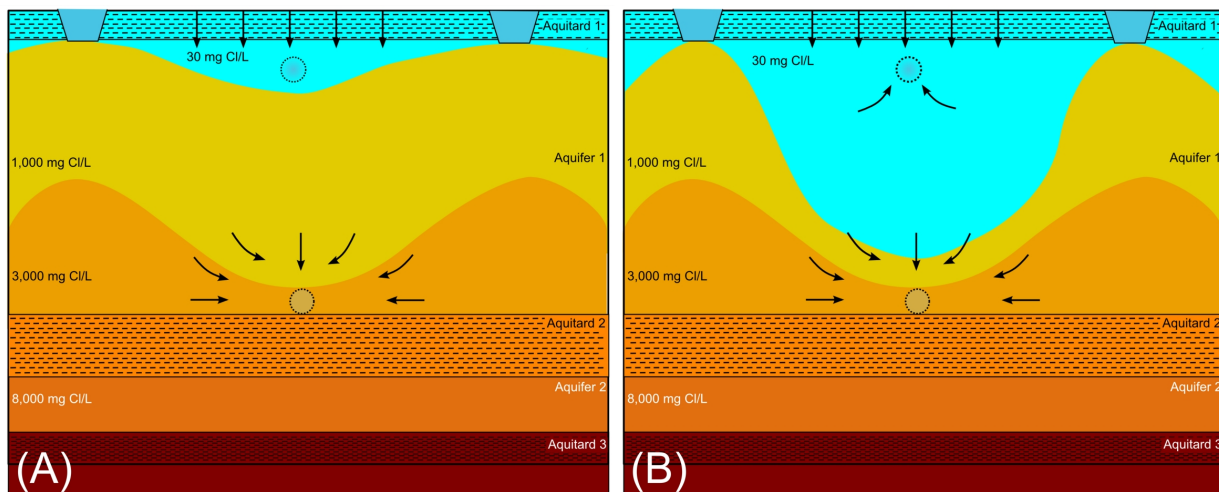
doel van de zoethouder, een stabilisatie is al voldoende. In Noardburgum kan dit bereikt worden met een lager onttrekkingsdebiet van het brakke water, wat als voordeel heeft dat minder brak gezuiverd hoeft te worden. Berekeningen van Van der Valk (2011) laten zien dat een minimale brakwateronttrekking van ca. $16 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ nodig is om het grensvlak stabiel te houden, bij een zoetwateronttrekking van $50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.



Figuur 8. Gemodelleerde chlorideverdeling in de winaQUIFER, na ca. 1 jaar gelijktijdige onttrekking van zoet (boven) en brak grondwater. Kleurschaal geeft de chlorideconcentratie in mg/L. Figuur uit Van der Valk (2011, Technische Universiteit Delft).

4.3 Spin off: de zoetmaker

Winning van brakgrondwater zorgt voor een verlaging van het zoet-brakgrensvlak, met als gevolg dat de bergingscapaciteit voor (infiltrerend) zoet grondwater (mits beschikbaar) wordt vergroot. Dit is het centrale idee achter de zoetmaker (fresh maker), een concept ontwikkeld door KWR (Vink *et al.*, 2010), als spin off van het BTO brakwateronderzoek en het BTO/InnoWater onderzoek naar aanleg en gebruik van horizontale putten (HDDW; Rambags *et al.*, 2010). In Figuur 9 wordt de werking van de zoetmaker schematisch weergegeven. Door brakwater te winnen (Fig. 9A) (en te lozen op het oppervlaktewatersysteem), wordt de infiltratie van zoet grondwater in tijden van neerslagoverschot (herfst, winter, voorjaar) vergroot. Dit zorgt voor een extra (ondergrondse)berging van zoetwater, dat in de normale situatie via het oppervlakte water systeem wordt afgevoerd en 'verloren' gaat. Het extra opgeslagen zoete water kan in de zomer gebruikt worden voor beregening of irrigatie (Fig. 9B).



Figuur 9. Werking van de zoetmaker (Vink et al., 2010). Door winning van brakgrondwater in tijden van neerslagoverschot (herfst, winter, voorjaar) wordt de infiltratie en ondergrondse berging van zoet water vergroot (A). Dit opgeslagen water kan in de zomer gebruikt worden voor beregening of irrigatie (B).

Het zoetmakerconcept is in eerste instantie ontwikkeld voor toepassing in de land- en tuinbouw in laag-Nederland, maar kan ook elders in de wereld worden toegepast. In vergelijking met alternatieve oplossingen voor de zoetwaterschaarste in laag-Nederland scoort de zoetmaker goed (Vink et al., 2010):

- in vergelijking met conventionele ASR systemen kent de zoetmaker minder verliezen van zoet water door kwel, dichtheidsstroming en laterale grondwaterstroming.
- in vergelijking met gebruik van ontzilt brak grondwater is minder energie nodig.
- in vergelijking met grootschalige centrale bronnen is geen uitgebreid distributienetwerk noodzakelijk, hetgeen investerings- en exploitatiekosten scheelt. Bovendien kent de zoetmaker een grotere flexibiliteit en geringere kwetsbaarheid dan centrale systemen.

4.4 Conclusies: verzoeting creëren door brakwater te winnen

Als verzilting door grondwateronttrekking een probleem is of kan worden, is het in veel (van nature verzoetende) systemen raadzaam *juist* ook brak water te winnen. Dit is een belangrijk idee dat volgt uit de ervaringen op de pilots Noardburgum en Zevenbergen, maar ook uit berekeningen in het kader van het zoetmakerconcept (Vink et al., 2010). Dit verandert ons denken over brak grondwater: winning en eventueel gebruik van brak grondwater kan een duurzame strategie zijn, zowel in de drinkwatersector (tegengaan van verzilting van zoete bronnen) als in de land- en tuinbouw (vergroten van ondergrondse berging van zoet water). Winnen van brakwater is in dat perspectief te beschouwen als een oplossing voor waterschaarste in deltagebieden zoals laag-Nederland, op voorwaarde dat er een bestemming is voor het brakke grondwater en het eventueel geproduceerd concentraat..

De succesvolle toepassing van het zoethouderconcept in Noardburgum is een belangrijke doorbraak. Er zijn goede mogelijkheden om de gesloten (want verzilte) grondwaterwinning van Noardburgum te heropenen, waardoor een belangrijke bijdrage geleverd kan worden aan de drinkwatervoorziening in de provincie Friesland. Een volgende stap is het opschalen van de resultaten van de pilot, waarbij ondermeer de vraag speelt hoeveel en waar brakwater gewonnen moet worden. Doel is met een minimale onttrekking van brak grondwater de bestaande zoetwaterputten zoet te houden. De pilot in Zevenbergen leert dat ook in Noord-Brabant winning van brak grondwater een in te zetten techniek is, bijvoorbeeld bij het beheersen van de chlorideconcentraties in het diepe deel van de winning Nuland.

5 Effecten injectie membraanconcentraat op de waterkwaliteit in doelaquifer

Gebruik van brak grondwater als bron voor drinkwater is een aantrekkelijk alternatief voor de Nederlandse drinkwatersector, vanwege de mogelijkheid verzilting tegen te gaan (zie hoofdstuk 4), maar ook als mogelijk alternatief voor enkele freatische grondwaterwinningen die sterk antropogeen verontreinigd zijn of waar winning tot verdrogingsproblemen leidt door verlaging van de (freatische) grondwaterstand (Oosterhof *et al.*, 2009). Afvoer van membraanconcentraat is de grote belemmering voor de doorbraak van brak water als grondstof. Lozing in de (diepe) ondergrond wordt gezien als een duurzame oplossing voor dit concentraatprobleem, zeker als opslag plaats heeft in aquifers met een vergelijkbare of 'slechtere' chemische waterkwaliteit als het concentraat (Stuyfzand en Raat, 2010). Toch stuit deze oplossing momenteel op bestuurlijke weerstand, vanwege zorgen om verslechtering van de waterkwaliteit in de doelaquifer.

Dit hoofdstuk geeft een beknopte beschrijving van de effecten van injectie van membraanconcentraat op de waterkwaliteit in doelaquifer van de pilots Noardburgum en Zevenbergen. Een uitgebreidere evaluatie van de waterkwaliteitsveranderingen na injectie wordt gegeven in rapport BTO2011.105(s) "Water quality changes following deep well injection of BWRO concentrate. Results from the BWRO pilots Noardburgum and Zevenbergen" (Raat *et al.*, 2011).

Navolgende tekst is gebaseerd op de vele waterkwaliteitsanalyses die verricht zijn aan watermonsters uit de diverse filters in de doelaquifers van beide pilots. Naar de waarnemingsfilters (zie ook Fig. 2 en 3) wordt verwezen middels een code bestaande uit informatie over de pilotlocatie, afstand van waarnemingsput tot injectieput (IP) en diepte van het waarnemingsfilter. Als voorbeeld: "Z24-176" verwijst naar een filter in Zevenbergen, op 24 m afstand van de IP, op een diepte van 176 m onder maaiveld.

5.1 Vergelijk concentraat en oorspronkelijk water in doelaquifer

Opslag van membraanconcentraat heeft bij voorkeur plaats in een aquifer met vergelijkbare of hogere concentraties aan chloride en andere ionen (Stuyfzand en Raat, 2010). In Tabel 7 en 8 wordt de samenstelling van het concentraat vergeleken met die van de doelaquifer van beide pilots.

Het concentraat van Noardburgum (Tabel 7) kenmerkt zich door een zeer hoge Fe concentratie, hoge concentraties van Ca, HCO_3 en CH_4 , en enigszins verhoogde concentraties van Br, Ba, Sr and Li. Concentraties van de sporenelementen As, Cr and Ni zijn zeer laag voor brak grondwater (veelal onder de detectielimiet), met thorium (56 $\mu\text{g/L}$) als enige uitzondering. Al eerder is opgemerkt dat de doelaquifer in Noardburgum niet homogeen is qua waterkwaliteit, maar juist sterk gelaagd: chloride neemt toe van 370 mg/L bovenin (N25-172) tot 4500 mg/L onderin (N25-191). Feitelijk bestaat deze aquifer uit twee watertypen (Tabel 2): een B3CaCl - type bovenin, met onder andere een zeer hoog CH_4 gehalte, en een b2CaCl - type onderin, met (zeer) hoge concentraties Ca, Sr en Ba en een laag CH_4 gehalte. Het membraanconcentraat valt keurig binnen de waterkwaliteitsranges van deze twee watertypen, voor de meeste macro elementen en alle sporenelementen. Enige uitzondering zijn de hogere concentraties in het concentraat van de macro's HCO_3 , PO_4 , TOC, Fe en Si, (de concentratie PO_4 in het concentraat is met 0.70 mg/L nog altijd zeer laag).

Tabel 7 (links). Waterkwaliteit van concentraat (gemiddelde) en doelaquifer in Noardburgum. ICP data van het concentraat waren afkomstig van N12-179 (B06D1087-f3), na doorbraak van het concentraat in dit filter. Bekend is dat het concentraat tijdens bodempassage in Noardburgum (vrijwel) geen veranderingen ondergaat.

Tabel 8 (rechts). Waterkwaliteit van concentraat (gemiddelde) en doelaquifer in Zevenbergen.

Monsterpunt		Concentraat	B06D1114-f4	B06D1114-f5	B06D1114-f6			Concentraat	B44C0801-f06	B44C0801-f07	B44C0801-f08
Label		Conc	N25-172	N25-180	N25-191	Label		Conc	Z24-168	Z24-176	Z24-182
Diepte	[m-mv]	n.a.	172	180	191	Diepte	[m-mv]	n.a.	168	176	182
pH		6.97	6.85	6.78	6.7	pH		7.52	7.59	7.67	7.75
EC	[mS/m]	473	153	240	1026	EC	[mS/m]	256	164	176.5	191
CH4	[mg/L]	15.7	11.0	12.0	0.1	CH4	[mg/L]	1.4	0.06	0.06	0.04
Cl	[mg/L]	1409	370	670	4500	Cl	[mg/L]	583	385	435	465
Br	[mg/L]	5.5	1.3	2.5	15.1	Br	[mg/L]	1.8	1.2	1.3	1.5
F	[mg/L]	0.1	0.1	0.1	0.0	F	[mg/L]	0.3	0.9	1.0	1.0
HCO3	[mg/L]	671	329	331	227	HCO3	[mg/L]	752	444	452	450
SO4	[mg SO4 / l]	<2.0	<2.0	<2.0	160	SO4	[mg SO4 / l]	7.77	3	1.77	2
tot-PO4	[mg P/L]	0.70	0.2	0.18	0.13	tot-PO4	[mg P/L]	0.20	0.02	0.03	0.04
TOC	[mg/L]	9.60	4.2	4.7	2.7	TOC	[mg/L]	7.78	3.12	3.93	2.85
Na	[mg/L]	174	47	71.4	849	Na	[mg/L]	328	270	290	300
K	[mg/L]	6.53	2.86	3.28	14.6	K	[mg/L]	12.4	14	20	26
NH4	[mg N/L]	1.45	0.74	0.9	4.4	NH4	[mg N/L]	1.7	0.7	1.0	1.4
Ca	[mg/L]	754	222	324	1370	Ca	[mg/L]	259	64	52	42
Mg	[mg/L]	60.7	20.5	27.3	157	Mg	[mg/L]	24.2	28	43	52
Fe	[mg/L]	78.5	16.1	29.7	34	Fe	[mg/L]	3.36	0.69	0.56	0.5
Mn	[mg/L]	1.68	0.631	0.738	1.54	Mn	[mg/L]	0.09	0	0.01	0.01
Si	[mg Si/L]	30.0	14	14	13	Si	[mg Si/L]	19.9	10.0	9.8	9.1
Al	[ug/L]	d.l.	d.l.	1.5	3.4	Al	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	18.9
As	[ug/L]	<1.0	3.1	1.9	<1.0	As	[ug/L]	2.0	d.l.	d.l.	d.l.
B	[ug/L]	24.6	20.6	14.1	32.9	B	[ug/L]	1239	1000	1000	1000
Ba	[ug/L]	533	128	226	1660	Ba	[ug/L]	4.5	18.0	34.0	30.0
Be	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	Be	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.
Cd	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	Cd	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.
Co	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	Co	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.
Cr	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	Cr	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.
Cu	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	Cu	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.
Eu	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	Eu	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.
La	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	La	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.
Li	[ug/L]	22.3	8.5	11.9	30.2	Li	[ug/L]	42.7	36.4	41.9	47.8
Mo	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	Mo	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.
Ni	[ug/L]	<1.0	2.4	1.5	<1.0	Ni	[ug/L]	2.6	d.l.	d.l.	d.l.
Pb	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	Pb	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.
Sb	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	Sb	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.
Se	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	Se	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.
Sr	[ug/L]	2516	777	1110	5980	Sr	[ug/L]	1700	4600	4100	3000
Th	[ug/L]	55.6	10.8	21.6	26.8	Th	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.
Ti	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	Ti	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.
Yb	[ug/L]	2.2	0.8	1.1	2.2	Yb	[ug/L]	0.7	d.l.	d.l.	d.l.
V	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.	V	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.
Zn	[ug/L]	d.l.	d.l.	4.2	d.l.	Zn	[ug/L]	d.l.	d.l.	d.l.	d.l.
Bariet		n.a.	n.a.	n.a.	1.24	Bariet		-2.17	-2.13	-1.35	-2.11
Calciet		0.72	-0.05	-0.01	0.13	Calciet		0.98	0.32	0.30	0.28
Dolomiet		0.52	-0.97	-0.92	-0.50	Dolomiet		1.09	0.47	0.71	0.84
Fluoriet		-2.24	-2.66	-2.82	-3.37	Fluoriet		-1.67	-1.11	-1.14	-1.24
Gips		n.a.	n.a.	n.a.	-0.88	Gips		-2.45	-3.28	-3.62	-3.67
Hydroxyapatiet		2.26	-0.98	-1.08	-0.42	Hydroxyapatiet		2.22	-2.38	-2.43	-2.08
Kwarts		1.21	0.87	0.87	0.86	Kwarts		1.02	0.71	0.70	0.66
Rhodochrosiet		0.44	-0.18	-0.23	-0.39	Rhodochrosiet		-0.25	-0.18	-1.14	-1.08
Sideriet		1.83	0.95	1.10	0.71	Sideriet		1.12	0.43	0.41	0.43
SiO2(amorf)		-0.14	-0.48	-0.48	-0.49	SiO2(amorf)		-0.33	-0.64	-0.65	-0.68
Strontianiet		-1.23	-1.99	-1.95	-1.71	Strontianiet		-0.59	-0.31	-0.28	-0.35
Talk		-1.84	-4.94	-5.08	-3.85	Talk		-0.28	-0.52	0.43	1.01
Vivianiet		3.30	1.01	1.28	0.04	Vivianiet		0.13	-2.95	-3.03	-2.70
Witheriet		-2.78	-3.63	-3.51	-3.17	Witheriet		-4.11	-3.59	-3.31	-3.23

d.l = detectie limiet (RSD% >= 10%)

vet gedrukt = SI >0.3

d.l = detectie limiet (RSD% >= 10%)

vet gedrukt = SI >0.3

d.l = detectie limiet (RSD% >= 10%)

vet gedrukt = SI >0.3

d.l = detectie limiet (RSD% >= 10%)

vet gedrukt = SI >0.3

Net zoals Noardburgum, kenmerkt het concentraat van Zevenbergen (Tabel 8) zich door hoge concentraties voor HCO₃, Ca, Sr en Li. Gehalten aan Fe, CH₄ en Ba daarentegen zijn relatief laag. Opvallend zijn de zeer hoge concentraties boor in Zevenbergen, tot ca. 1250 µg/L. Al eerder (hoofdstuk 3) is opgemerkt dat ook in het permeaat van Zevenbergen zeer hoge boorconcentraties voorkomen: de gemiddelde concentratie van 268 µg/L nadert de norm in het Waterleidingbesluit van 500µg/L. De waterkwaliteit van de doelaquifer van Zevenbergen varieert weinig met de diepte: met uitzondering van een klein bovenste deel bevindt zich op elke diepte het B3NaCl-watertype (Tabel 3). De range in waterkwaliteit in de doelaquifer is dientengevolge dus veel smaller dan in Noardburgum. Concentraties voor de macro's Cl, SO₄, Ca, Fe, SiO₂ en TOC waren hoger in het concentraat dan in de doelaquifer, . Zoals gemeld waren de concentraties B, Sr en Li vrij hoog in het concentraat, toch waren deze gehalten nog altijd lager dan in de doelaquifer. Voor de meeste andere sporenelementen gold dat de concentraties

beneden de detectielimiet waren, zowel in het concentraat als in de doelaquifer. Enige uitzondering was nikkel, dat wel in het concentraat meetbaar was ($2.6 \mu\text{g/L}$), maar niet in het grondwater. Overigens geldt dat deze nikkelconcentratie nog altijd zeer laag is, zeker voor brak grondwater.

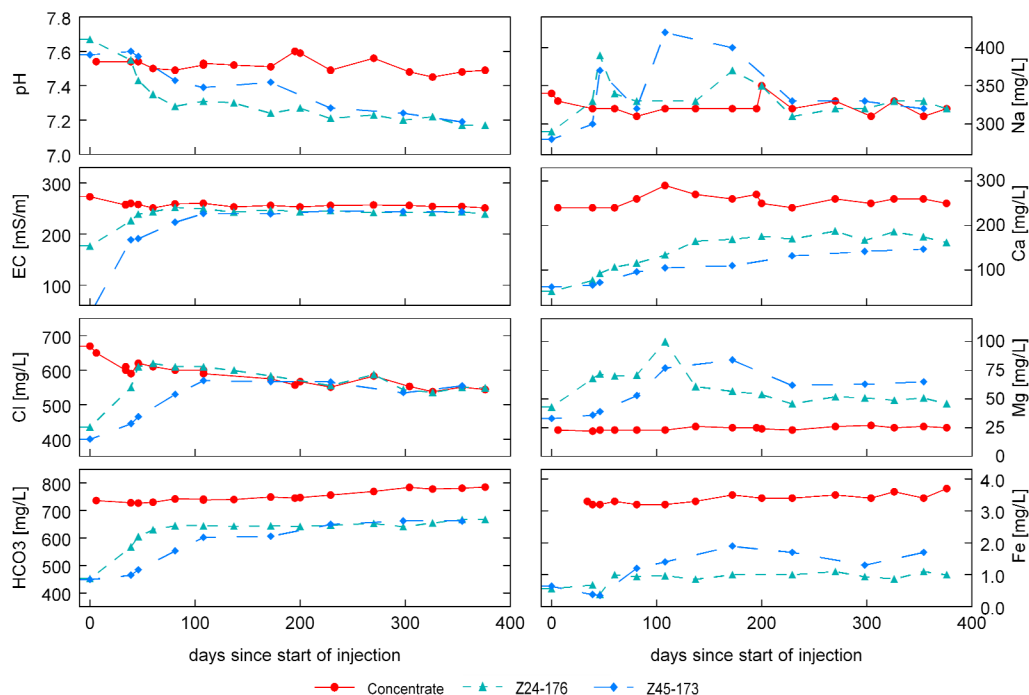
Samenvattend: voor beide locaties geldt dat de waterkwaliteit van het concentraat goed overeenkomt met de waterkwaliteit (ranges) van de doelaquifer. Enkel enige macro-elementen zijn hoger in het concentraat dan in de doelaquifer (beide locaties), maar dit lijkt weinig relevant. De inschatting is dat er geen negatieve effecten van injectie voor de grondwaterkwaliteit in de doelaquifer zullen zijn.

5.2 Interacties van concentraat met de aquifermatrix

Na injectie kan het concentraat reageren met de aquifermatrix, waardoor de samenstelling van het concentraat veranderd. Belangrijkste processen die kunnen optreden zijn: neerslag van mineralen vanuit het (oververzadigde) concentraat, oplossing van mineralen vanuit de aquifer, en kationuitwisseling tussen bodem en concentraat.

In Noardburgum waren geen aantoonbare reacties tussen concentraat en bodem aanwezig, op enige verwijdering van PO_4 na, door sorptie of neerslagvorming van hydroxyapatiet ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) en/of vivianiet ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$). Ondanks oververzadiging ten opzichte van kwarts (SiO_2) en de carbonaten kalk (CaCO_3), dolomiet ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), sideriet (FeCO_3) en rhodochrosite (MnCO_3) had geen neerslag plaats van deze mineralen. Mogelijke redenen waren inhibitie van kalkneerslag door de hoge Fe^{2+} concentraties en *slugginess* ('traagheid') van neerslag van SiO_2 . Voor de afwezigheid van neerslag van sideriet is geen goede verklaring gevonden. Voor een uitgebreidere toelichting op mineraaloververzadiging en neerslagvorming in Noardburgum wordt verwezen naar Hoofdstuk 3 en Raat *et al.* (2011). In de vorige paragraaf werd reeds geconstateerd dat het concentraat qua chemische samenstelling goed overeenkwam met het oorspronkelijke water in de doelaquifer. Samen met de constatering dat het concentraat na injectie hoegenaamd geen veranderingen ondergaat, betekent dit dat injectie van membraanconcentraat in Noardburgum geen negatieve effecten heeft op de waterkwaliteit in de doelaquifer.

Injectie van concentraat leidde in Zevenbergen wel tot sterke reacties tussen concentraat en aquifermatrix. Illustratief hiervoor is Figuur 10, waarin de doorbraak van het concentraat in waarnemingsputten op 24 meter en 45 meter afstand van de injectieput wordt getoond. Uit de figuur valt ondermeer af te leiden dat kalk en sideriet neerslaan (lagere Ca, Fe en HCO_3 concentraties; daling van de pH) en dat Mg juist in oplossing gaat. De diverse hydrogeochemische interacties tussen concentraat en aquifer komen ook duidelijk naar voren in Tabel 9. Deze tabel vergelijkt het concentraat met de waterkwaliteit in drie filters van Z24, na respectievelijk doorstroming van deze filters met 3 en 9 poriënvolumes concentraat. Evenals figuur 10 toont deze tabel dat Ca, Fe en HCO_3 uit het concentraat worden verwijderd en dat Mg juist oplost. Andere optredende hydrogeochemische reacties zijn de verwijdering uit de oplossing (neerslag, sorptie) van PO_4 , NH_4 , Mn, As en Ni en de sterke toename van concentraties Sr en Ba. Met name (het patroon van) de toename van Sr was sterk gekoppeld aan Mg, en wordt toegeschreven aan het in oplossing gaan van Mg-mineraal dat rijk is aan strontium, mogelijk een dolomiet. Het in oplossing gaan van Mg en Sr had plaats in de gehele aquifer (zowel tussen IP en Z24, als tussen Z24 en Z45), terwijl neerslag van kalk en sideriet enkel plaats had tussen IP en de eerste waarnemingsput Z24. De vele hydrogeochemische reacties die optraden zijn overigens goed te verklaren aan de hand van de geochemie van de doelaquifer, die rijk was aan kalk (bevordert neerslag van carbonaten) en (hydr)oxiden (sorptie) en een relatief fijne textuur had in vergelijking met Noardburgum en daardoor een hogere kationuitwisselingscapaciteit.



Figuur 10. Veranderingen in diverse waterkwaliteitsparameters na doorbraak van geïnjecteerd concentraat in Zevenbergen, op 24 (Z24-176) en 45 meter (Z45-173) afstand van de injectieput. In rood de samenstelling van het concentraat.

De aquifer van Zevenbergen was dus hoog reactief, met als gevolg diverse veranderingen van de samenstelling van het concentraat (injectaat) tijdens bodempassage. De vraag of injectie van membraanconcentraat in Zevenbergen verantwoord is, kan dus niet simpel worden beantwoord door een vergelijking van samenstelling van het concentraat en het oorspronkelijke water van de doelaquifer (Tabel 8). Een antwoord is wel te krijgen door vergelijking van de initiële samenstelling van het grondwater met die na vele doorspoeling met membraanconcentraat. Zie daarvoor Tabel 10 (beide locaties). Uit deze tabel blijkt dat, ondanks de vele optredende reacties, injectie niet tot een significante verandering van de waterkwaliteit heeft geleid in Zevenbergen. Concentraties van een aantal macroparameters namen toe, maar was dit weinig relevant. Ondanks het in oplossing gaan van strontium, waren de eind-concentraties in dezelfde range als de initiële concentraties. De enige sporenelementen waarvoor een toename werd gevonden waren arseen en nikkel, maar de eindconcentraties waren zeer laag ($<1 \mu\text{g/L}$) en zodoende niet relevant. Samengevat: injectie van membraanconcentraat leidt in Zevenbergen niet tot een achteruitgang van de waterkwaliteit in de doelaquifer.

Tabel 9. Waterkwaliteit in de doelaquifer van Zevenbergen (Z24) na doorspoeling van de aquifer met respectievelijk ca. 3 en 9 poriënvolumes (PF) concentraat.

Monsterpunt		Concentraat Conc	B44C0801-f06 Z24-168		B44C0801-f07 Z24-176		B44C0801-f08 Z24-182	
Label			Z24-168		Z24-176		Z24-182	
Diepte	[m-mv]		168		176		182	
t50	[d]		44		37		44	
PF			2.8	8.6	3.3	8.8	2.8	8.6
pH		7.52	7.27	7.22	7.31	7.20	7.36	7.17
EC	[mS/m]	256	247	245	247	243	247	242
CH4	[mg/L]	1.4						
Cl	[mg/L]	583	605	556	605	543	600	558
Br	[mg/L]	1.82	1.62	1.93	1.65	1.90	1.60	1.97
F	[mg/L]	0.27	0.51	0.28	0.55	0.33	0.55	0.29
HCO3	[mg/L]	752	642	691	644	654	656	662
SO4	[mg SO4/l]	7.77	9.00	7.33	9.00	6.67	9.00	6.67
tot-PO4	[mg P/L]	0.20	0.10	0.06	0.06	0.07	0.11	0.08
TOC	[mg/L]	7.78		7.83		7.67		7.13
Na	[mg/L]	328	395	327	430	327	340	317
K	[mg/L]	12.4	18.0	13.3	25.0	22.7	32.5	30.0
NH4	[mg N/L]	1.7	1.0	1.6	1.1	1.2	1.8	1.4
Ca	[mg/L]	259	181	216	150	176	108	180
Mg	[mg/L]	24.2	35.0	29.3	80.5	50.3	96.5	44.3
Sr	[ug/L]	2106	10800	3733	12550	5833	7900	5367
Ba	[ug/L]	2.92	8.80	4.33	19.00	11.20	15.00	8.17
Fe	[mg/L]	3.36	0.83	0.97	0.92	0.97	0.80	0.75
Mn	[mg/L]	0.09	0.04	0.01	0.09	0.04	0.08	0.03
Si	[mg Si/L]	19.9	16.7	19.9	15.1	18.2	14.4	19.6
As	[ug/L]	2.0	1.1	0.9	0.9	0.5	0.9	0.2
B	[ug/L]	1239	1400		1700		1350	
Ni	[ug/L]	2.6	0.85	0.41	0.95	0.65	0.65	0.36
Verzadigingsindex (SI)								
Bariet		-2.2	-1.7	-2.1	-1.4	-1.7	-1.5	-1.8
Calciet		1.0	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4
Dolomiet		1.1	0.4	0.3	0.7	0.5	0.8	0.3
Fluoriet		-1.7	-1.2	-1.6	-1.3	-1.6	-1.4	-1.7
Gips		-2.4	-2.5	-2.5	-2.6	-2.6	-2.7	-2.6
Hydroxyapatiet		2.2	-0.7	-1.3	-1.9	-1.4	-1.3	-1.5
Kwarts		1.0	1.0	1.1	0.9	1.0	0.9	1.1
Rhodochrosiet		-0.3	-0.9	-1.4	-0.5	-0.9	-0.5	-1.1
Sideriet		1.1	0.2	0.1	0.3	0.2	0.3	0.0
SiO2(amorf)		-0.3	-0.4	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5	-0.3
Strontianiet		-0.6	-0.2	-0.7	-0.1	-0.5	-0.2	-0.6
Talk		-0.3	-1.7	-2.2	-0.6	-1.4	-0.1	-1.9
Vivianiet		0.1	-2.9	-3.4	-2.9	-3.0	-2.6	-3.4
Witheriet		-4.1	-4.1	-4.5	-3.8	-4.1	-3.8	-4.3

blauw vet gedrukt = >10% afname in vergelijking met concentraat; indicatie voor sorptie en/of neerslag

blauw vet gedrukt SI = >0.3 afname in vergelijking met concentraat; indicatie voor sorptie en/of neerslag

rood vet gedrukt = 10% toename in vergelijking met concentraat; indicatie voor desorptie en/of oplossing.

rood vetgedrukt SI = >0.3 toename in vergelijking met het concentraat; indicatie voor desorptie en/of oplossing.

Tabel 10. Vergelijk van de initiële waterkwaliteit van de doelaquifer en de waterkwaliteit na 7 (Noordburgum) en 12 maanden (Zevenbergen) doorspoeling met membraanconcentraat.

Locatie		Noordburgum		Zevenbergen	
WP		B06D1114		B44C0801	
Label		N25		Z24	
Diepte	[m-mv]	172 - 191		168 - 182	
		initieel	eind	initieel	eind
pH		6.70 - 6.85	7.01	7.59 - 7.75	7.20
EC	[mS/m]	153 - 1026	441	164 - 191	243
CH4	[mg/L]	0.09 - 12.00	15.4	0.04 - 0.06	
Cl	[mg/L]	370 - 4500	1317	385 - 465	552
Br	[mg/L]	1.3 - 15.1	5.96	1.18 - 1.49	1.93
F	[mg/L]	0.03 - 0.08	0.17	0.9 - 1	0.30
HCO3	[mg/L]	227 - 331	674	444 - 452	669
SO4	[mg SO4 / l]	<2 - 160	<2	1.77 - 3	6.89
tot-PO4	[mg P/L]	0.13 - 0.20	0.29	0.02 - 0.04	0.07
TOC	[mg/L]	2.7 - 4.7	9.13	2.85 - 3.93	7.54
Na	[mg/L]	47 - 849	161	270 - 300	323
K	[mg/L]	2.9 - 14.6	6.28	14 - 26	13.0 - 30
NH4	[mg N/L]	0.7 - 4.4	1.50	0.7 - 1.4	1.4
Ca	[mg/L]	222 - 1370	702	42 - 64	176 - 216
Mg	[mg/L]	21 - 157	56.0	28 - 52	29 - 50
Sr	[ug/L]	777 - 5980	2241	3000 - 4600	3733 - 5833
Ba	[ug/L]	128 - 1660	461	18 - 34	4.3 - 11.2
Fe	[mg/L]	16 - 34	72.2	0.5 - 0.69	0.90
Mn	[mg/L]	0.6 - 1.5	1.57	d.l. - 0.01	0.03
Si	[mg Si/L]	13 - 14	26.3	9.1 - 10.0	19.2
As	[ug/L]	<1.0 - 3.1	<1.0	d.l.	0.2 - 0.9
B	[ug/L]	14 - 33	25.6	1000	
Ni	[ug/L]	<1.0 - 2.4	<1.0	d.l.	0.36 - 0.65

5.3 Conclusies: geen negatieve geochemische effecten van concentratieinjectie

Zowel in Noordburgum als Zevenbergen heeft injectie van membraanconcentraat niet geleid tot een significante verandering van de waterkwaliteit in de doelaquifer. Van doorslaggevend belang hierbij was de goede overeenkomst in samenstelling van het membraanconcentraat en het initiële grondwater in de doelaquifer. Dit duidt op een goede selectie van de win- en doelaquifer.

6 Wet- en regelgeving

Na de beslissing van Vitens en Brabant Water om een brakwater pilot te starten heeft het meer dan drie jaar geduurd voordat de pilots daadwerkelijk van start gingen. Oorzaak van deze “vertraging” was de vergunningverlening voor de injectie van membraanconcentraat, en meer specifiek onduidelijkheid over welke overheid als Bevoegd Gezag op treedt. Het initiatief om de pilots te starten heeft hierin voorlopig duidelijkheid gebracht, maar ook ontwikkelingen in wet- en regelgeving in gang gezet. Dit hoofdstuk zet de huidige stand van zaken en ontwikkelingen op een rijtje.

6.1 Huidige wetgeving

Volgens de huidige wetgeving valt injectie (infiltratie) van membraanconcentraat op dieptes >100m-mv onder de Mijnbouwwet en treedt het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie (EL&I) op als Bevoegd Gezag. Naast een Mijnbouwvergunning waren voor beide pilots diverse andere vergunning verplicht. Zie daarvoor het overzicht Tabel 11 of, voor een uitgebreidere beschrijving ook in Europese context, de recente juridische verkenning door Pelamonia (2011). Ondanks de veelheid aan vergunningen en betrokken overheidsinstanties, kan de drinkwatersector redelijk ‘uit de voeten’ met de huidige wetconstructie, maar een onzekere factor blijft wel de Ontheffing van het lozingsbesluit, die een onderdeel vormt van de vergunning en wordt verleend voor een periode van maximaal 4 jaar. Na deze periode kan opnieuw een ontheffing worden aangevraagd, waarbij het risico bestaat dat de nieuwe aanvraag niet wordt gehonoreerd. Duidelijk is dat dit (te) veel onzekerheid geeft bij de ontwikkeling van grootschalige toepassingen van brakwaterwinning; gepleegde investeringen in ondergrond en zuivering zijn niet rendabel als de brakwaterwinning zich onverhoopt beperkt tot een periode van 4 jaar.

Tabel 11. Overzicht benodigde vergunningen en bijbehorend bevoegd gezag bij winning brakwater en injectie van het concentraat op dieptes >100m-mv. EL&I = Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie.

Type vergunning	Bevoegd Gezag
Mijnbouwvergunning	EL&I
Mijnbouw Opslagvergunning	EL&I
Goedgekeurd Opslagplan	EL&I
Bouwvergunning	Gemeente
Milieuvergunning	EL&I
WvO-vergunning	Waterschap
Onttrekking	Provincie

Feitelijk is sinds de vergunningverlening van de pilots in 2009 niets veranderd in de wet- en regelgeving. Toch is een aantal ontwikkelingen gaande op dit terrein. De eerste is de uitvoering van de brakwaterpilots Noardburgum en Zevenbergen zelf. De vergunningen voor de pilots zijn afgegeven om ervaring op te doen en informatie te verzamelen over de effecten van concentraatinjectie op de waterkwaliteit in de doelaquifer. Dit draagt bij aan de ontwikkeling van toekomstig beleid en wet- en regelgeving. Een tweede is het advies over concentraatinjectie door de (glas)tuinbouw, dat in 2010 door de Technische Commissie Bodembescherming (TCB) is uitgebracht (TCB, 2010). Een laatste belangrijke ontwikkeling is een aantal initiatieven vanuit de drinkwatersector. VEWIN heeft in 2011 een standpunt ingenomen over gebruik van brakwater en op initiatief van vier drinkwaterbedrijven is een eerste aanzet gemaakt om te komen tot een duidelijk toetsingskader voor concentraatinjectie.

6.2 TCB advies concentraatinjectie door de (glas)tuinbouw

Op verzoek van het Ministerie van VROM (thans Infrastructuur en Milieu), maar met als drijvende kracht de Provincie Zuid-Holland, heeft de TCB een advies geschreven hoe om te gaan met concentraatinjecties door de (glas)tuinbouw. In Zuid-Holland wordt door een groot aantal tuinders kleinschalig en discontinu membraanconcentraat van brak grondwater geïnjecteerd in de ondergrond. Net als in de pilots van Noardburgum en Zevenbergen is dit concentraat een restproduct van de ontzouting (RO) van brak voedingswater. Het permeaat wordt door de tuinders gebruikt als gietwater. De Provincie Zuid-Holland is ongelukkig met de veelheid aan kleinschalige concentraatinjecties en voert

sinds een aantal jaren een restrictief beleid, met als doel een stopzetting van de lozingsonthefing (en dus verbod op concentraatinjectie) vanaf 2013.

Het advies van de TCB heeft alleen betrekking op concentraatinjectie door de tuinbouwsector en expliciet wordt vermeld dat het advies “nadrukkelijk niet (gaat) over de infiltratie van brijn dat is ontstaan bij andere bedrijfsmatige activiteiten.” Als voorbeeld van andere activiteiten wordt de drinkwaterbereiding genoemd. Hierbij volgt de TCB de Minister van (destijds) VROM, die in haar adviesaanvraag stelde dat mogelijk in een later stadium een zelfstandige adviesaanvraag volgt over de benutting van brak grondwater door drinkwaterbedrijven. Echter, het recente TCB advies zal mogelijk ook zijn invloed hebben op beleidsontwikkeling voor de drinkwatersector, reden waarom het advies hieronder nader wordt besproken.

De TCB vindt dat het lozen van concentraat in de ondergrond door de tuinbouw niet past binnen de randvoorwaarden van duurzaam bodemgebruik (TCB, 2010). De TCB heeft de voorkeur om eerst de mogelijkheden te onderzoeken voor waterbesparing en hergebruik van water en vervolgens andere bronnen van goed gietwater te onderzoeken, waarbij gebruik van brakgrondwater de laagste voorkeur heeft. Mocht gebruik van brak grondwater en injectie van concentraat onvermijdelijk zijn, dan stelt TCB een aantal voorwaarden aan injectie:

1. De chlorideconcentratie van het brijn (concentraat) komt ongeveer overeen of is lager dan de chlorideconcentratie van het watervoerend pakket waarin het brijn wordt geloosd.
2. De concentratie van andere stoffen voldoet aan de voor deze stoffen in het ontvangende water gestelde normen.
3. Er dient een waterscheidende laag aanwezig tussen de laag waaruit het grondwater wordt opgepompt en de laag waarin het brijn wordt geloosd.
4. Een collectief systeem voor het oppompen van grondwater en lozen van brijn is het uitgangspunt. Er is controle op het proces.
5. Er vindt monitoring plaats van het grondwater in zowel het eerste als het tweede watervoerend pakket en van het te lozen brijn. Doel van de monitoring zou moeten zijn dat geverifieerd wordt of wordt voldaan aan het *stand still* principe (ofwel dat injectie niet leidt tot een verhoging van concentraties van geselecteerde chemische parameters).

Overigens stelt de TCB dat dieper injecteren van concentraat, zoals gebeurd in beide brakwaterpilots, een alternatief kan zijn voor de huidige, relatief ondiepe injectie (60 – 100 m-mv) door de tuinbouwsector. Echter, tevens merkt de TCB op dat ook bij diep infiltratie de geldende normen voor stoffen niet mogen worden overschreden. Juist dit is een lastig en, naar ons idee, nog weinig uitgewerkt punt. Van belang is hoe het *stand still* principe wordt toegepast. Als voorbeeld: injectie van membraanconcentraat leidt in de pilot Noardburgum tot een geringe toename van fosfaatgehaltes in de doelaquifer. Bij strikte toepassing van het *stand still* principe (zoals vaak gebeurt!) geldt dat injectie in dit geval tot een verslechtering van de chemische waterkwaliteit leidt. Hoewel wellicht juridisch juist, wordt hier naar ons idee geen recht gedaan aan het multi-begrip grondwaterkwaliteit en mag uit de verhoging van slechts een of enkele parameters niet geconcludeerd worden dat “de” waterkwaliteit verslechterd. Een eerlijker benadering is om de gehele watermatrix te beschouwen, met aandacht voor zowel parameters waarvan de concentratie toeneemt, als ook voor die parameters waarvan de concentratie daalt, zoals barium en strontium na injectie in Noardburgum. Een ander punt is de normstelling voor (diep) brak grondwater. Het RIVM (Verweij *et al.*, 2008) stelt, terecht, dat verschillende normen moeten worden opgesteld voor diverse grondwaterlichamen in Nederland, waarbij recht wordt gedaan aan de uiteenlopende chemische waterkwaliteit van (ook) brakke en zoute grondwatertypen. Verweij *et al.* (2008) doen een voorstel voor normstelling voor een aantal (regionale) grondwaterlichamen in Nederland, inclusief brakke en zoute lichamen. De vraag is of deze normen ook opgaan voor diepe brakwatervoorkomens, waarvan we de waterkwaliteit (zeker wat betreft sporenelementen) nog maar slecht kennen. Ook rijst de vraag hoe je een norm stelt voor een doelaquifer zoals in Noardburgum, met een groot verschil in waterkwaliteit (watertype) bovenin de aquifer en 10 meter daaronder.

6.3 Standpunt van de drinkwatersector

In reactie op bovenstaande ontwikkelingen wordt ook vanuit de drinkwatersector actie ondernomen om tot een duidelijk beleid voor membraaninjectie te komen. Betrokken bedrijven zijn Oasen (trekker), Brabant Water, Vitens en Waternet. Oasen en Waternet zijn momenteel druk doende met de opstart van een brakwaterpilot in Ridderkerk (PURO-project). Opzet van deze pilot is vergelijkbaar met de pilot Zevenbergen, met als verschil dat de RO in de put wordt geplaatst in plaats van bovengronds, hetgeen volgens de initiatiefnemers voordelen heeft voor het energiegebruik. Aanleiding voor deze pilot is, net als bij Vitens en Brabant Water, bescherming van verziltende winningen door afvangen van toestromend brak water. Daarnaast voorziet Waternet een tweede toepassing van brakwaterwinning: verbetering van de oppervlakte waterkwaliteit in (diepe) polders door afvangen (en gebruik) van brak, nutriëntrijk kwelwater.

Vewin pleit ervoor een vrijstelling te creëren in de Mijnbouwwet voor lozing van brakwaterconcentraat in de bodem (Vewin, 2011). Voorts pleit Vewin ondermeer voor de ontwikkeling van een eenduidig beoordelingskader voor lozen van concentraat in de bodem en verlenging van de termijn van ontheffing van het lozingenbesluit naar 40 jaar (Waterspiegel, mei 2011). Een eerste aanzet voor een beoordelingskader is onlangs gegeven door Speets (2011), in gezamenlijke opdracht van Vitens, Brabant Water, Oasen en Waternet. De voorgestelde toetsing omvat de volgende hoofdonderdelen:

- Ontwikkeling zoetwatervoorraad.
- Ontwikkeling chemische toestand ontvangend watervoerend pakket (KRW).
- Risico's regeneratie van putten.
- Risico's voor verstopping ontvangend watervoerend pakket.

Ten aanzien van de toetsing van concentraatinjectie wordt door Speets (2011) voorgesteld om de verwachte concentraties te toetsen aan de heersende concentraties van natuurlijk voorkomende stoffen in de doelaquifer. Er wordt aangeraden om bij overschrijding van concentraties per geval te bezien welke risico's van de betreffende overschrijding worden verwacht en welke mitigerende maatregelen getroffen kunnen worden. Indien de risico's als verwaarloosbaar worden geïnterpreteerd, kan worden gesteld dat er sprake is van een toelaatbare kwaliteitsverandering. Overigens wordt uit de notitie van Smeets (nog) niet duidelijk hoe om te gaan met enkele hierboven en in vorige hoofdstukken gestelde vragen. Hoe stel je normen voor doelaquifers met een grote variatie in watertypes (e.g., Noardburgum)? Moet je verandering in waterkwaliteit in de doelaquifer (op relatief grote diepte!) niet ook wegen tegen de (milieukundige) voordelen van gebruik van brak grondwater, zoals verzoeting van je winaquifer en mogelijk behoud van verziltende winningen? Hierbij zijn parallellen te trekken naar de vergunningverlening van warmte-koudeopslagsystemen (WKO). Toepassing van WKO's wordt sterk gepromoot (energiebesparing!), waarbij maar weinig aandacht is voor mogelijke negatieve gevolgen voor de grondwaterkwaliteit, bijvoorbeeld door ondergrondse menging van verschillende watertypen (Bonte *et al.*, 2008). Blijkbaar weegt het voordeel hier wel op tegen het nadeel.

6.4 Conclusie: beleid in ontwikkeling

De start van de pilots Noardburgum en Zevenbergen en beleidsverandering ten aanzien van concentraatinjectie door de (glas)tuinbouw in Zuid-Holland, hebben het beleid ten aanzien van brakwatergebruik en concentraatinjectie in beweging gebracht. Momenteel is niet duidelijk in welke richting het beleid zich zal ontwikkelen. Het is voor de drinkwatersector dan ook van groot belang actief bij de ontwikkelingen betrokken te blijven, via de VEWIN, maar ook inhoudelijk door voortzetting van de pilots en brak wateronderzoek. Ontwikkeling van een deugdelijk toetsingskader voor concentraatinjectie is hierbij van groot belang. Belangrijke (inhoudelijke) vragen daarbij zijn ondermeer hoe normen te stellen voor (brakke) doelaquifers waarvan we de natuurlijke grondwaterkwaliteit slecht kennen en hoe de risico's van eventuele normoverschrijding te beoordelen.

7 Brak grondwater, de toekomst!?

De brakwaterpilots van Vitens en Brabant Water zijn opgezet met vier hoofddoelen: (1) ervaring opdoen met aanvraag van vergunningen voor concentraatinjectie, (2) ervaring opdoen met ontzilting van anoxisch brak grondwater door omgekeerde osmose, (3) in de praktijk testen of injectie van membraanconcentraat technisch goed mogelijk is, en (4) onderzoeken welke gevolgen concentraatinjectie heeft voor de waterkwaliteit van de ontvangende aquifer. Wat betreft deze aspecten zijn de pilots succesvol geweest. Ervaringen met omgekeerde osmose waren zeer positief; scaling van de membranen door binnendringen van zuurstof of neerslagvorming door oververzadiging trad niet op bij de gekozen recovery van 50%, en in Noordburgum zelfs niet bij hogere recoveries. Concentraatinjectie had in beide pilots niet in negatieve effecten op de waterkwaliteit in de doelaquifer. Alleen wat betreft technische bedrijfszekerheid van injectie waren de resultaten wisselend. In Noordburgum was het technisch mogelijk sterk oververzadigd concentraat te injecteren, zonder dat putverstopping plaatsvond. In Zevenbergen trad geleidelijke putverstopping reeds op bij een RO recovery van 50%, als gevolg van neerslag van kalk. Een mogelijke oplossing voor dit probleem is zuurdosering in de RO, hetgeen in 2012 in Zevenbergen zal worden getest.

7.1 Niet mijden, maar gebruiken

Naast deze opbrengsten hebben de pilots ons veel geleerd over (de gevolgen van) brakwaterwinning. In Noordburgum is het concept van de zoethouder succesvol in de praktijk toegepast: verzilting van een zoetwaterput is tegen te gaan door gerichte onttrekking van het toestromende (opkegelende) brakke water. De pilot in Zevenbergen heeft geleerd dat winning van brakwater kan resulteren in een (versnelde) verzoeting van de winaquaifer. Het is zodoende de vraag of het brakwater-mijdend gedrag van drinkwaterbedrijven in veel gevallen wel een juiste strategie is om zo duurzaam mogelijk drinkwater te produceren. Deze vraag vormt de aanleiding van het BTO-speerpuntonderzoek naar brakwatervoorkomens in Noord-Brabant, hun genese, en de mogelijkheden dit brakke grondwater duurzaam te winnen.

De houding ten opzichte van brak water is dus langzaam aan het kantelen. In deze ontwikkeling past ook het concept van de zoetmaker (Vink *et al.*, 2010) en ander recente ideeën ten behoeve van de zoetwatervoorziening in de Nederlandse delta, zoals de ondergrondse opslag van zoet water in brakke aquifers. Ook het idee van Waternet om brakke kwel naar diepe polders af te vangen, past in deze trend. Brak waterwinning dient hier twee doelen: extra grondstof voor drinkwater en verbetering van de oppervlakte waterkwaliteit in polders en boezem door vermindering van de kwel van brak, nutriëntrijk water.

7.2 Internationaal perspectief

Bovenstaande initiatieven spelen zich af binnen Nederland, maar ook internationaal biedt winning en gebruik van brak grondwater veel kansen. In kustgebieden wereldwijd zijn de zoetwatervoorkomens niet toereikend voor de stijgende watervraag en leidt overexploitatie tot verzilting van aquifers en winvelden. In Europa is dit een probleem in veel Mediterrane landen, maar ook bijvoorbeeld in Denemarken (EEA, 2009). Brak grondwater is in veel delta's wel in voldoende mate beschikbaar, en vormt een aantrekkelijke, alternatieve grondstof in deze gebieden. Gebruik van zeewater wordt nu vaak gepresenteerd als oplossing, maar de keuze voor brak grondwater lijkt logischer. Niet alleen is het zoutgehalte van brak water lager (en daardoor de kosten/energie voor ontzilting), ook heeft brak grondwater een constantere kwaliteit (denk bijvoorbeeld aan troebelheid), wat de aansturing van RO's vergemakkelijkt. Het zoethouderconcept is een ideale methode om verzilting van put(velden) tegen te gaan, met geringe financiële inspanning, zeker als deze wordt afgewogen tegen kosten die gemaakt worden als een winveld verlaten moet worden. Ook dit concept is internationaal goed toepasbaar.

Winning en gebruik van brak grondwater kan nationaal en internationaal bijdragen aan de verduurzaming van de (drink)watervoorziening. Toch worden de ontwikkelingen rondom brak

grondwater in Nederland momenteel sterk belemmerd door het ontbreken van een duidelijke (nationale) beleidsvisie ten aanzien van brak grondwater. Zelfs het verkrijgen van een vergunning voor pilotstudies zoals Noardburgum, Zevenbergen en recentelijk de pilot Ridderkerk van Oasen en Waternet, is moeilijk en zeer tijdrovend. Hoe om te gaan met het concentraat is daarbij het hete hangijzer. Het is onze hoop dat de ervaringen met concentraatinjectie in Noardburgum en Zevenbergen een positieve bijdrage kunnen leveren aan de huidige discussie. Het ontwikkelen van een helder toetsingskader voor concentraatinjectie, waarin ook recht wordt gedaan aan voordelen van brak waterwinning en -gebruik, is een logische vervolgstap.

7.3 De toekomst

Naast het ontwikkelen van een toetsingskader zijn er andere stappen die gezet moeten worden in brakwateronderzoek. De zoethouder heeft zich bewezen op putniveau, maar het concept is nog niet beproefd op de schaal van een heel winveld. Hoeveel en waar moet brakwater gewonnen worden, zodat met minimale onttrekking optredende verzilting wordt tegengegaan? Wat zijn de kosten en energieverbruik van ontzilting op grote schaal? Welke aanpassingen in de zuivering zijn nodig als grote hoeveelheden permeaat worden bijgemengd? Het zijn enkele van de openliggende vragen. Ook op andere thema's is nader onderzoek gewenst. Het BTO-speerpuntonderzoek van Brabant Water naar de mogelijkheden brak grondwater duurzaam te winnen werd reeds genoemd, evenals de ideeën van Waternet om brakke kwel naar diepe polders af te vangen en te gebruiken en de mogelijkheden voor vergroting van de zoet(grond)waterberging in laag-Nederland. Stroming, onder andere in relatie tot dichtheidsverschillen, is daar een belangrijk onderzoeksterrein. Brak grondwater is ook een *business case* in het BTO-speerpuntonderzoek van Vitens naar verbeterde implementatie van BTO-onderzoeksresultaten. Daarbij is ondermeer aandacht voor opschaling van de ervaringen op putniveau naar de gehele winning en ontwikkeling van een toetsingskader voor injectie van membraanconcentraat. Tenslotte is meer technische ervaring met concentraatinjectie gewenst. De aanstaande pilot in Ridderkerk van Oasen en Waternet is wat dat betreft een goede aanvulling op de pilots van Vitens en Brabant Water. Ook de experimenten in Zevenbergen met zuurdosering in de RO zijn zeer relevant.

Tenslotte: veel nieuwe vragen zijn naar voren gekomen door of (beter) dankzij de pilots Noardburgum en Zevenbergen. Maar bovenal is dankzij de pilots duidelijk geworden dat brak grondwater veel kansen biedt voor verbetering van de watervoorziening in Nederland en andere kustgebieden van de wereld. Daarom: "Brak grondwater: niet mijden, maar gebruiken!".

8 Literatuur

- Bernhardi, L., A. Gijsbertsen, J.W. Kooiman, 2006. Juridische belemmeringen bij lozing van membraanconcentraat. Productie van drinkwater uit brak grondwater. H2O 2006(20): 12-13.
- Bonte, M., G.A. Van den Berg en A.P. van Wezel, 2008. Bodemenergiesystemen in relatie tot grondwaterbescherming. Bodem nr 5, oktober 2008.
- Boukes, H., 2008. Opslagplan brakwaterwinning Zevenbergen. Brabant Water, 's-Hertogenbosch.
- EEA, 2009. Water resources across Europe – confronting water scarcity and drought. EEA Report No 2/2009. European Environment Agency, Copenhagen. 60pp.
- Grakist G, C. Maas, W. Rosbergen, J.W.N.M. Kappelhof, 2002. Keeping our wells fresh. In: Proceedings of SWIM-17, Delft University of Technology, R.H. Boekelman (ed), Delft, pp. 337-340
- Herzog, R.E., Q. Shi, J.N. Patil, and J.L. Katz, 1989. Magnetic water treatment: the effect of iron on calcium carbonate nucleation and growth. Langmuir 5:861-867.
- Klein, J. en H. Passier, 2009. Ondergrond en grondwaterkwaliteit in relatie tot brijnlozingen in de provincie Zuid-Holland. Rapport 0912-0124, Deltares. 141pp.
- Kooiman J.W., P.J. Stuyfzand, C. Maas, J.W.N.M Kappelhof, 2004. Pumping brackish groundwater to prepare drinking water and keep salinizing wells fresh: a feasibility study. In: Groundwater and saline intrusion, Proceedings 18th SWIM, Cartagena 2004, L. Araguás (ed), Instituto Geológico y minero de España, Madrid, pp. 625-635
- Oosterhof, A.T. en N. Wolthek, 2008. Opslagplan membraanconcentraat in het kader van de mijnbouwwet. Demonstratieproject brakwater Noardburgum. Vitens, Leeuwarden.
- Oosterhof, A.T. and K.J. Raat, 2010. Keep it Fresh! Field test results of the fresh keeper concept. Proceedings ISMAR-7, Abu Dhabi, 9-13 October 2010.
- Oosterhof, A, N. Wolthek, W. van der Meer, M. Groenendijk, S. van de Wetering, H. Boukes, K.J. Raat en J. Eerhart, 2009. Doorbraak voor gebruik van brak grondwater als alternatieve bron voor drinkwatervoorziening. H2O 42(14/15): 14-17.
- Pelamonia, J., 2011. Brijnlozing door de drinkwaterector. Een juridische verkenning naar de mogelijkheden van brijnlozing voor drinkwaterbedrijf Oasen. Kennispunt Recht, Economie, Bestuur en Organisatie, Universiteit Utrecht.
- Raat, K.J., 2008. Risico's van gas clogging en nikkelprecipitatie bij het infiltreren van membraanconcentraat. Notitie in opdracht van Vitens. 6pp.
- Raat, K.J., P.J. Stuyfzand, S. van de Wetering, M. Groenendijk, 2009. Guidelines for the design of brackish water reverse osmosis plants: selection of source and disposal aquifers and design of RO installation, injection wells and monitoring programs. Report Medina project (EU project number 036997), deliverable D5.1.1B. KWR Watercycle Research Institute.
- Raat, K.J. en P.J. Stuyfzand, 2009a. Monitoringplan Brakwater Pilot Noardburgum. KWR Watercycle Research Institute / BTO.
- Raat, K.J. en P.J. Stuyfzand, 2009b. Monitoringplan Brakwater Pilot Zevenbergen. KWR Watercycle Research Institute / BTO.
- Raat, K.J. en Beverloo, 2010. Deeltjes in diverse waterstromen brakwaterpilot Zevenbergen. Notitie in opdracht van Brabant Water. 10pp.
- Raat, K.J. en C.G.E.M Van Beek, 2011. Regeneratie injectieput brakwaterpilot Zevenbergen. Notitie in opdracht van Brabant Water. 5pp.
- Raat, K.J., P.J. Stuyfzand, H. Boukes en A.T. Oosterhof, 2011. Water quality changes following deep well injection of BWRO concentrate. Results from the BWRO pilots Noardburgum and Zevenbergen. BTO 2011.105(s). KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- Rambags F., D.G. Cirkel, I. van de Hoeven, R. Rothuizen en B. Pittens, 2010. HDDW: van concept tot realisatie. Overzicht van onderzoeken verricht in het kader van het HDDW project. BTO 2010.029. KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- Speets, R., 2011. Omgaan met membraanconcentraat bij brakwaterwinning door waterbedrijven. Royal Haskoning, Arnhem. 31pp.
- Stuyfzand, P.J. en K.J. Raat, 2010. Benefits and hurdles of using brackish groundwater as a drinking water source in the Netherlands. Hydrogeology Journal. DOI 10.1007/s10040-009-0527-y

- Stuyfzand P.J. en R.J. Stuurman, 2008. Origin, distribution and chemical mass balances for brackish and saline groundwaters in the Netherlands. In: G. Barrocu (ed) Proceedings 1st SWIM-swica Joint Saltwater Intrusion Conference, Cagliari-Baia de Chia, Sept. 24–29 2006, pp 151–164.
- Stuyfzand P.J., J. Kappelhof en K. Maas, 2003. Brak grondwater: als grondstof voor drinkwater en als zoethouder. Scan van potentie en haalbaarheid. BTO 2003.006. Kiwa Water Research, Nieuwegein.
- TCB, 2010. Advies Lozingen van brijn bij agrarische activiteiten. A064(2010). Technische Commissie Bodembescherming.
- USGS, 2002. User's Guide to SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Three-Dimensional Variable-Density Ground-Water Flow. U.S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations 6-A7, Tallahassee, Florida, 87pp.
- Van der Valk, M.J.H., 2011. A fresh-keeper for Noard Burgum. The future for a salinated well field? MSc thesis, Technische Universiteit Delft, 127pp.
- Verweij, W., *et al.*, 2008. Advies voor drempelwaarden. RIVM Rapport 607300005/2008.
- Vewin, 2011. Vewin Lobby Agenda 2011/2012. Vewin, Rijswijk.
- Vink, C., F. Rambags en N. Gorski, 2010. Freshmaker: Technologie voor een duurzame zoetwatervoorziening. Fase 1, haalbaarheidsonderzoek. KWR 2010.076. KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.

I Overzicht publicaties BTO Brakwater

Onderstaande tabel geeft een overzicht van alle rapporten, artikelen, notities en posters sinds 2002 zijn verschenen in het kader van het BTO project Brakwater. Het overzicht omvat documenten die zijn opgesteld vanuit het BTO, maar ook publicaties van of in directe opdracht van Vitens en Brabant Water. Alle publicaties zijn digitaal beschikbaar via Watnet.

1	Grakist G, C. Maas, W. Rosbergen, J.W.N.M. Kappelhof, 2002. Keeping our wells fresh. In: Proceedings of SWIM-17, Delft University of Technology, R.H. Boekelman (ed), Delft, pp. 337-340
2	Kappelhof, J. en K. Maas, 2002. De zoethouder. Pilot Ridderkerk. BTO 2002.116 (c). Kiwa Water Research.
3	Stuyfzand, P.J., 2002. Voorkomen, kwaliteit en winbaarheid van brak grondwater voor de Nederlandse drinkwatervoorziening. BTO 2002.152. Kiwa Water Research.
4	Stuyfzand, P.J., 2002. Verziltingsrisico van de Nederlandse Puttenvelden voor de Drinkwatervoorziening door Brakwateropkegeling. BTO2002.153. Kiwa Water Research.
5	Kappelhof, J., K. Maas en P.J. Stuyfzand, 2003. Brak grondwater: als grondstof voor drinkwater (!) en als zoethouder (!). Scan van potentie en haalbaarheid. BTO2003.006. Kiwa Water Research.
6	Kooiman J.W., P.J. Stuyfzand, C. Maas, J.W.N.M Kappelhof, 2004. Pumping brackish groundwater to prepare drinking water and keep salinizing wells fresh: a feasibility study. In: Groundwater and saline intrusion, Proceedings 18th SWIM, Cartagena 2004, L. Araguás (ed), Instituto Geologico y minero de España, Madrid, pp. 625-635
7	Bernhardi, L., 2006. Lozingsmogelijkheden voor membraanconcentraat. Juridisch kader. BTO2006.007(s). Kiwa Water Research.
8	Gijsbertsen, A., L. Bernhardi, J. Kappelhof en J.W. Kooiman, 2006. Beleidsmatige, bestuurlijke en juridische aspecten bij brakwaterwinning en concentraatlozing. Studie van het juridisch kader en verkenning van bestuurlijke mogelijkheden. BTO2006.008. Kiwa Water Research.
9	Bernhardi, L., A. Gijsbertsen, J.W. Kooiman, 2006. Juridische belemmeringen bij lozing van membraanconcentraat. Productie van drinkwater uit brak grondwater. H2O 2006(20): 12-13.
10	Stuyfzand, P.J., J.W. Kooiman, A. Oosterhof and K.J. Raat, 2007. Problems and solutions when recharging brackish aquifers with membrane concentrate from a less brackish source. Proceedings ISMAR-6 conference, Phoenix, Arizona USA, October 28 - November 2, 2007, pp 47-60.
11	Oosterhof, A.T. en M.M. Nederlof, 2007. Demonstratieproject brakwater. Beschrijving voorgenomen activiteiten. Vitens, Leeuwarden.
12	Raat, K.J., 2008. Risico's van gas clogging en nikkelprecipitatie bij het infiltreren van membraanconcentraat. Notitie voor Vitens
13	Oosterhof, A.T. en N. Wolthek, 2008. Opslagplan membraanconcentraat in het kader van de mijnbouwwet. Demonstratieproject brakwater Noardburgum. Vitens, Leeuwarden.
14	Raat, K.J. and P.J. Stuyfzand, 2008. Notitie locatiekeuze brakwater-pilot Zevenbergen (BW). In opdracht van Brabant Water.
15	Boukes, H., 2008. Opslagplan brakwaterwinning Zevenbergen. Brabant Water, 's-Hertogenbosch.
16	Raat, K.J., 2009. Bepalen van verstoppingspotentie concentraat. Notitie in het kader van BTO Brakwater.
17	Oosterhof, A, N. Wolthek, W. van der Meer, M. Groenendijk, S. van de Wetering, H. Boukes, K.J. Raat en J. Eerhart, 2009. Doorbraak voor gebruik van brak grondwater als alternatieve bron voor drinkwatervoorziening. H2O 42(14/15): 14-17.

18	Raat, K.J., P.J. Stuyfzand, S. van de Wetering, M. Groenendijk, 2009. Guidelines for the design of brackish water reverse osmosis plants: selection of source and disposal aquifers and design of RO installation, injection wells and monitoring programs. Report Medina project (EU project number 036997), deliverable D5.1.1B. KWR Watercycle Research Institute.
19	Raat, K.J., 2009. Verslag Workshop Brak Water Pilots, 5 maart 2009.
20	Raat, K.J. en J.W. Kooiman, 2009. PvA Brak grondwater bij Vitens '09-'10. KWR Watercycle Research Institute / BTO.
21	Raat, K.J. en P.J. Stuyfzand, 2009. Monitoringplan Brakwater Pilot Noardburgum. KWR Watercycle Research Institute / BTO.
22	Raat, K.J. en J.W. Kooiman, 2009. PvA Brak grondwater bij Brabant Water '09-'10. KWR Watercycle Research Institute / BTO.
23	Raat, K.J. en P.J. Stuyfzand, 2009. Monitoringplan Brakwater Pilot Zevenbergen. KWR Watercycle Research Institute / BTO.
24	Stuyfzand, P.J. and K.J. Raat, 2010. Benefits and hurdles of using brackish groundwater as a drinking water source in the Netherlands. Hydrogeology Journal. DOI 10.1007/s10040-009-0527-y
25	Raat, K.J., 2010. Verslag 2 ^e Workshop Brak Water Pilots, 14 januari 2010.
26	Raat, K.J., 2010. Verslag 3 ^e Workshop Brak Water Pilots, 17 juni 2010
27	Wolthek, N., K.J. Raat, J.A. de Ruiter, W. van der Meer, A.T. Oosterhof, 2010. Desalination of brackish groundwater with anaerobic membrane filtration and concentrate disposal by deep well injection. Proceedings Advances in Science and Engineering for Brackish Water and Seawater Desalination, Cetraro, Italy, May 8-12, 2010.
28	Oosterhof, A.T. and K.J. Raat, 2010. Keep it Fresh! Field test results of the fresh keeper concept. Proceedings ISMAR-7, Abu Dhabi, 9-13 October 2010.
29	Raat, K.J., P.J. Stuyfzand, H. Boukes, A.T. Oosterhof and J.W. Kooiman, 2010. Water quality changes following deep well injection of supersaturated BWRO membrane concentrate. Poster at ISMAR-7, Abu Dhabi, 9-13 October 2010
30	Raat, K.J., Vink, K. and J.W. Kooiman, 2010. Sustainable use and protection of water resources in delta areas: the fresh maker and fresh keeper. Poster at IWA World Water Congress and Exhibition, 19-24 September, 2010, Montreal.
31	Raat, K.J. and J.W. Kooiman, 2010. Brak grondwater: voorbereiding pilots Noardburgum en Zevenbergen. Achtergrond, kennis en ervaringen uit de voorbereidende fase 2002-2009. BTO2010.034(s).
32	diversen, 2010. Presentaties KNW/KWR symposium "De smaak van brak grondwater", Nieuwegein, 5 oktober 2010.
33	Raat, K.J. en C.G.E.M Van Beek, 2011. Regeneratie injectieput brakwaterpilot Zevenbergen. Notitie in opdracht van Brabant Water. 5pp.
34	Macedonio, F., E. Drioli, K.J. Raat, P.J. Stuyfzand, S. van de Wetering, M. Groenendijk, S. Laborie, C. Cabassud, J-P. Méricq and J. Gilron, 2011. Process strategies for mitigation of impact of concentrates on the environment. In: Drioli, E., A. Criscuoli and F. Macedonio (eds), Membrane Based Desalination: An Integrated Approach (MEDINA). IWA Publishing, London, UK. 336pp.
35	Raat, K.J., P.J. Stuyfzand, S. van de Wetering, and A.T. Oosterhof, 2011. Disposal of BWRO membrane concentrate by deep well injection: results from two field pilots. Proceedings of the 8th IWA Leading-Edge Conference on Water and Wastewater Technologies, Amsterdam, the Netherlands 6-10 June 2011.

