



Veldproef ondergrondse zoetwaterberging in zout grondwater (Pilot ASR Prominent)



Copyright © 2012

Nationaal Onderzoeksprogramma Kennis voor Klimaat (KvK). Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd, in geautomatiseerde bestanden opgeslagen en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm, geluidsband of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het Nationaal Onderzoekprogramma Kennis voor Klimaat. In overeenstemming met artikel 15a van het Nederlandse auteursrecht is het toegestaan delen van deze publicatie te citeren, daarbij gebruik makend van een duidelijke referentie naar deze publicatie.

Aansprakelijkheid

Hoewel uiterste zorg is besteed aan de inhoud van deze publicatie aanvaarden de Stichting Kennis voor Klimaat, de leden van deze organisatie, de auteurs van deze publicatie en hun organisaties, noch de samenstellers enige aansprakelijkheid voor onvolledigheid, onjuistheid of de gevolgen daarvan. Gebruik van de inhoud van deze publicatie is voor de verantwoordelijkheid van de gebruiker.

Veldproef ondergrondse zoetwaterberging in zout grondwater



grondwater

K.G. Zuurbier, MSc.^{1,2}
Dr. Ir. M. Paalman¹

Borging: prof. Dr. P.J. Stuyfzand^{1,2}

KWR



⁽¹⁾ KWR Watercycle Research Institute

⁽²⁾ Vrije Universiteit Amsterdam

KWR rapportnummer: KWR 2014.011
KvK rapportnummer: KvK 115/2014 KvK 115/2014
ISBN: EAN 978-94-90070-81-6

Met dank aan Telersvereniging Prominent, Hoogheemraadschap van Delfland, Productschap Tuinbouw, Rabobank

Dit onderzoeksproject ('Optimized Aquifer Storage and Recovery of freshwater in saline aquifers') wordt uitgevoerd in het kader van het Nationaal Onderzoekprogramma Kennis voor Klimaat (www.kennisvoorklimaat.nl). Dit onderzoeksprogramma wordt medegefinancierd door het Ministerie van Infrastructuur en Milieu.

Inhoudsopgave

Samenvatting	Error! Bookmark not defined.
Summary	9
Extended summary	10
1 Inleiding	14
1.1 De noodzaak van aanvullend zoetwater.....	14
1.2 Oplossingsrichting: ondergrondse berging.....	15
1.3 Innovatieve putconcepten anno 2014.....	16
1.3.1 De Freshkeeper.....	16
1.3.2 De Freshmaker	16
1.3.3 Gebruik van MPPW bij ASR	17
1.4 Doelstellingen en opzet ASR proef Westland	18
2 Opzet veldproef ondergrondse waterberging Prominent.....	20
2.1 Waterdistributienetwerk ‘Groeneweg’	20
2.2 Opzet puttenveld	22
2.3 Karakterisatie ondergrond.....	23
2.4 Monitoring tijdens veldproef.....	24
2.4.1 Monitoring verpompings ASR systeem.....	24
2.4.2 Monitoring zoetwaterbel in het doelpakket	24
2.5 Modellerings veldproef	25
3 Resultaten veldproef ASR Westland	28
3.1 Karakterisatie ondergrond.....	28
3.2 Kwaliteit oorspronkelijke grondwater	30
3.3 Kwaliteit injectiewater	31
3.4 Verpompings door ASR systeem	32
3.5 Terugwinning van zoetwater	33
3.5.1 EC-metingen op pompunit	33
3.5.2 Chemische analyses teruggewonnen water	34
4 Modellerings ASR cyclus.....	36
4.1 Simulatie op basis verzamelde ondergrondgegevens	36
4.1.1 Opzet model.....	36
4.1.2 Vergelijking meetresultaten met modelsimulatie (SEAWAT).....	36
4.2 Simulatie inclusief opgebarste, voormalige WKO-put.....	38
4.3 Simulatie zonder / na dichten lekkage voor volledig seizoen.....	41
5 Continuering terugwinning na verzilting via omgekeerde osmose	44
5.1 Aanpak	44
5.2 Resultaten toepassen omgekeerde osmose op mengwater	45
5.3 Oorzaken voor membraanverstopping bij ontzilting mengwater	46

5.4	Mogelijke oplossingen voor membraanverstopping bij terugwinning van ondergronds opgeslagen hemelwater.....	47
5.5	Aanbevelingen rondom membraanverstopping.....	47
6	Conclusie en aanbevelingen	50
6.1	Conclusies	50
6.2	Aanbevelingen en handelingsperspectieven	52
7	Tot slot	54
8	Literatuurverwijzingen.....	56
9	Begeleidingscommissie Veldproef ASR Westland	58

HDHL 3.2 optimized aquifer storage of freshwater in saline aquifers

Samenvatting

In de herfst/winter wordt een groot deel van het hemelwateroverschot in het Westland afgevoerd naar zee. In de zomer kent het gebied echter een structureel gietwatertekort. Daarvoor kan ondergrondse wateropslag een oplossing bieden. 'Ondergrondse wateropslag' (ook wel *Aquifer Storage and Recovery* of ASR genoemd) is het infiltreren van periodieke zoetwateroverschotten in ondergrondse watervoerende pakketten, met als doel dit te onttrekken in perioden van een tekort aan zoet water.

In dit project is onderzocht hoe de ASR techniek geoptimaliseerd kan worden met een uitgekiend puttensysteem, waarmee ook uit verzilte waterpakketten een groot deel van het zoet water te herwinnen is.

De verschillende technische onderdelen van het geavanceerde ASR-systeem functioneerden in de praktijk goed. Op basis van modelmatige berekeningen wordt ingeschat dat het terugwinrendement aan zoet water (irrigatiewater) maximaal 60% zal bedragen. Toch was het terugwinrendement in het eerste jaar van deze proef lager dan verwacht, namelijk een 19,8%. Dit is veroorzaakt door het korte, relatief droge, winterseizoen van 2012-2013, waarin slechts 25% van de geplande hoeveelheid water geïnjecteerd is. Ook vond er 'kortsluitstroming' plaats, waarbij dieper gelegen zoutwater langs een oude bronbuis naar boven kwam. Binnen het project is gepoogd deze lekkage met een nieuwe techniek te dichten door beton op 40 tot 50 meter diepte te injecteren. Het onderzoek naar de effectiviteit hiervan loopt nog. De verwachting is dat wanneer de lekkage is gedicht en de geïnjecteerde volumes groter zijn het geschatte rendement zal toenemen richting de 60%.

Modellering laat zien dat het inzetten van een Freshkeeper, een buis die ondergelegen zout grondwater afvangt, voorkomt dat het zoutwater de zoete onttrekkingsput bereikt. Hiermee zou het rendement verhoogd kunnen worden naar > 60%.

Wanneer teruggewonnen zoet water door menging met zout water moest worden ingezet voor omgekeerde osmose, bleek dit te leiden

tot membraanverstopping, vermoedelijk veroorzaakt door kleimobilisatie en/of vorming van ijzercolloïden. Gebruik van voorzuivering voorafgaand aan osmose en/of regelmatige behandeling van de membranen kan hier soelaas bieden, maar vereisen een nadere (kostentechnische) haalbaarheidsanalyse. Een strategische plaatsing van de onttrekkingsbron voor het te ontzilt water is daarom vermoedelijk een betere oplossing.

Na deze pilot zijn er meer initiatieven gelanceerd om te bestuderen of aanvullende zoetwaterbronnen in het Westland geschikt zijn voor ASR infiltratie, zoals gezuiverd effluent en regenwater afkomstig van daken van industrie- of veiling terreinen.

Meer informatie:

www.kwrwater.nl/zoetinzout

Marcel Paalman (KWR), marcel.paalman@kwrwater.nl

Summary

A large part of the rainwater surplus in the Westland greenhouse area is discharged to sea, while this area suffers from structural freshwater shortage in summer. Infiltration of temporary freshwater surplus via wells in aquifers is proposed to enable recovery in times of demand. This technique is referred to as 'aquifer storage and recovery' (ASR). This report presents the outcomes of a field study to optimize freshwater recovery from ASR in saline aquifers using multiple partially penetrating wells (MPPWs).

This study shows that the sophisticated ASR set-up using two MPPWs is ready for field practice. The recovery of freshwater was lower than predicted, however, as the injected volume was four times smaller in the short winter season, that was left after completing the ASR-system, than the projected yearly injection volume in future. Additionally, short-circuiting of deeper saltwater along a decommissioned pumping well nearby caused early salinization of the ASR wells.

The use of recovered injection water mixed with groundwater, for desalination by reverse osmosis, led to membrane clogging. Clay dispersion/mobilisation and the formation of iron colloids were found the most plausible causes for this.

Positive perspectives have emerged from the ASR field pilot as a viable freshwater management tool in the study area.

More information:

www.kwrwater.nl/freshinsalt/westland

Marcel Paalman (KWR), marcel.paalman@kwrwater.nl

Extended summary

A large part of the rainwater surplus in the Westland greenhouse area (West-Netherlands) is discharged to sea, while this area suffers from structural freshwater shortage in summer. Infiltration of temporary freshwater surplus via wells in aquifers is proposed to enable its recovery in times of demand. This technique is referred to as 'aquifer storage and recovery' (ASR). This report presents the outcomes of a field study aiming to optimize freshwater recovery from ASR wells in saline aquifers using multiple partially penetrating wells (MPPWs). The set-up of the Westland ASR field trial at 's Gravenzande is discussed and the findings from the first ASR-cycle (December 2012 – August 2013) are presented.

Multiple partially penetrating wells (MPPWs) ready for practice

This study shows that the sophisticated ASR set-up using two MPPWs is ready for field practice. Freshwater could be injected and recovered independently at the field site at three depth intervals at two well locations 10 m apart. In total, 15,518 m³ of freshwater (average Cl-concentration: 6.8 mg/l) was collected from 270,000 m² of greenhouse rooftop and injected in December 2012 and January 2013. Subsequently, the water was partly recovered for direct use (19.8%) in two recovery periods in January and March 2013. The rest of the injected freshwater was recovered mixed with saltwater, and was desalinated using reverse osmosis, in order to make it suitable for irrigation (salinity < 0.5 mmol/l).

ASR performance in year 1 lower than predicted

In this first season, a smaller part of the recovered water was found suitable for direct use than predicted beforehand. The two main reasons were:

- The winter season 2012/2013 was relatively short, due to completion and permitting of the ASR-system not earlier than December 2012, and the period January till May 2013 was relatively dry. The injected volume (15,518 m³) was therefore only 28% of the projected yearly injection volume in future (>55,000 m³). Such a small volume, lacking any buffer around it is quite vulnerable to mixing with ambient saline groundwater and density-driven flow, which happened indeed.
- Short-circuiting of deeper saltwater at 3 m from one of the ASR wells along a former aquifer thermal energy storage (ATES) well, which bursted in 2008. The functionality of the 'protective' clay layer underlying the target aquifer was thereby firmly reduced, creating a preferen-

tial flow path for deeper saltwater. This caused rapid intrusion of saltwater into the injected freshwater bubble upon recovery.

The pumping of the ASR-system and the spreading of the injected freshwater in the target aquifer were modelled using SEAWAT. Proper calibration of the SEAWAT model suffered from the lack of knowledge on the magnitude characteristics of the leakage via the former ATES well. Modelling of a case without this bursted ATES well or assuming successful restoration of the underlying clay layer showed that the introduction of a 'Freshkeeper' which uses the deepest well screen of the MPPWs to intercept saltwater yields the highest recovery efficiency. Future recovery efficiencies up to approximately 60% may then be attained.

The use of recovered injection water mixed with groundwater, for desalination by reverse osmosis, led to membrane clogging

The remaining rainwater was recovered mixed with saline groundwater and subsequently desalinated by reverse osmosis. Production of fresh irrigation water with an RO system fed by this mixture (injected rainwater and saline groundwater) led to clogging of the RO membranes. This was manifested by decreasing freshwater production and an increasing pressure drop between both ends of the membrane. Clay mobilisation by the sudden freshening of the aquifer is held responsible for this clogging process as clay was observed during the breakthrough of the injected freshwater front at several monitoring wells. Although the formation of iron precipitates by simultaneous abstraction of oxygen containing and iron containing water was ruled out, the formation of iron colloids in the aquifer during injection may form another source of particles to cause the membrane clogging observed. Pre-treatment of RO feed water and more strategic placement of the abstraction wells for the RO feed water is proposed to prevent the membrane clogging observed.

Future perspectives generated from the Westland ASR trial

The Westland ASR field trial has produced important insights and relevant directions for further research, even after completion of only a short first cycle. Practical problems have emerged and are now (to be) solved. Therefore, there is perspective to act:

1. The saltwater leakage through the underlying clay layer via the former ATES well can be technically sealed. A first attempt was made in August 2013 using cone penetration drilling followed by injection of concrete at a depth of 40 – 50 m below surface level. A technical novelty of which the success is now examined. If this methods proves efficient, a technique is at hand to counteract the increasing problems of groundwater short-circuiting (for example via former wells) in many areas worldwide;

2. The freshwater recovery of the ASR system can be further enhanced using the 'Freshkeeper' principle. By this interception of deeper saltwater which would otherwise admix during recovery, a significantly larger percentage of injected freshwater can be recovered (up to approximately 60%). The intercepted water can be fed to a RO-treatment facility to produce even more freshwater;
3. The use of injected freshwater which is mixed with salt groundwater upon recovery for desalination has, although in the current set-up it led to RO membrane clogging, an advantage over conventional salt or brackish water RO: less energy is required due to the lower salinity of the RO feedwater, and less concentrate needs to be disposed of or the same volume of concentrate will have a lower salinity. The latter will prevent the accelerated salinization of an aquifer when used for simultaneous abstraction of brackish/saltwater to feed the RO and disposal of the concentrated saltwater produced in the process;
4. After initiating the pilot, more temporary freshwater resources were identified in the Westland area, such as freshwater from waste water treatment plants and rainwater collected by roofs in industrial areas. ASR is now recognized as a promising technique to benefit from these otherwise unexploited resources, while improving its quality for irrigation water use by self-purification during aquifer residence. Several initiatives were launched to study the sudden potential of these resources as triggered by ASR application.

1 Inleiding

1.1 De noodzaak van aanvullend zoetwater

Voor de glastuinbouw is voldoende goed gietwater een belangrijke productievoorwaarde. Goed gietwater bevat praktisch geen opgeloste zouten (lees natrium). In het Westland teelt het merendeel van de bedrijven op substraat. Afhankelijk van deze teelt liggen de grenswaarden tussen ca. 2 en 20 mg Na/l (Paalman, 2013). Alleen hemelwater voldoet aan deze kwaliteitseisen. Alle andere beschikbare waterbronnen, zoals het oppervlaktewater, grondwater of effluent bevatten te hoge concentraties aan opgeloste zouten. Om als geschikte gietwaterbron te dienen moet dit water eerst behandeld (ontzilt) worden.

De watervraag (kwantiteit) is teeltafhankelijk en ligt tussen ca. 2.000 en 12.000 m³/ha. In de glastuinbouw in het Westland wordt hemelwater meestal als primaire waterbron gebruikt. De gemiddelde neerslag hoeveelheid bedraagt ca. 8500 m³/ha/j, hetgeen, mits gelijkmatig verdeeld over het jaar of bij voldoende bufferruimte, voor teelten met een lage of gemiddelde watervraag toereikend zou moeten zijn. Voor teelten met een hoge watervraag (7.500 – 12.000 m³/ha), zoals paprika en tomaat zijn één of meer aanvullende gietwaterbronnen nodig.

Hemelwater wordt opgevangen in bassins met een minimale capaciteit van 500 m³/ha. Door de relatief geringe omvang van de bovengrondse bassins in het Westland wordt slechts een deel van het hemelwater effectief opgevangen en benut (Paalman, 2013). **Vooraf in de herfst/winter wordt een groot deel van het hemelwateroverschot afgevoerd via het oppervlaktewater. In de zomer is er vervolgens structureel een gietwatertekort.** Daarom wordt brak/zout grondwater ontzilt middels omgekeerde osmose, waarna het ontzilde water als gietwater in de kas wordt gebruikt. Het zoute residu wordt geïnjecteerd in diepere watervoerende pakketten (Paalman, 2013).

Een zoekrichting naar 'goed gietwater' is om het **hemelwater optimaler te benutten** dan hierboven omschreven. Een oplossing zou kunnen zijn om de omvang van de bassins te vergroten, maar ruimte is in het Westland zowel schaars als duur en dient maximaal ingezet te worden als teeltareaal. Voor een gewas als komkommer met een hoge watervraag zou door vergroting van het bassin van 500 m³/ha naar 3000 m³/ha de prijs stijgen van indicatief € 0.60/m³ naar 1,23/m³ (Agrimaco, 2010). Dit betekent dat het gebruik van brak grondwater als aanvullende gietwaterbron kosteneffectiever is dan vergroting van het bovengrondse bassin.

Een andere mogelijkheid is om het **overtollige hemelwater en eventueel andere tijdelijke zoetwaterbronnen, ondergronds op te slaan**. Een haalbaarheidsstudie uitgevoerd voor het Westland heeft aangegeven dat deze mogelijkheid kosteneffectief kan zijn t.o.v. de bestaande praktijk (Zuurbier, 2012a).

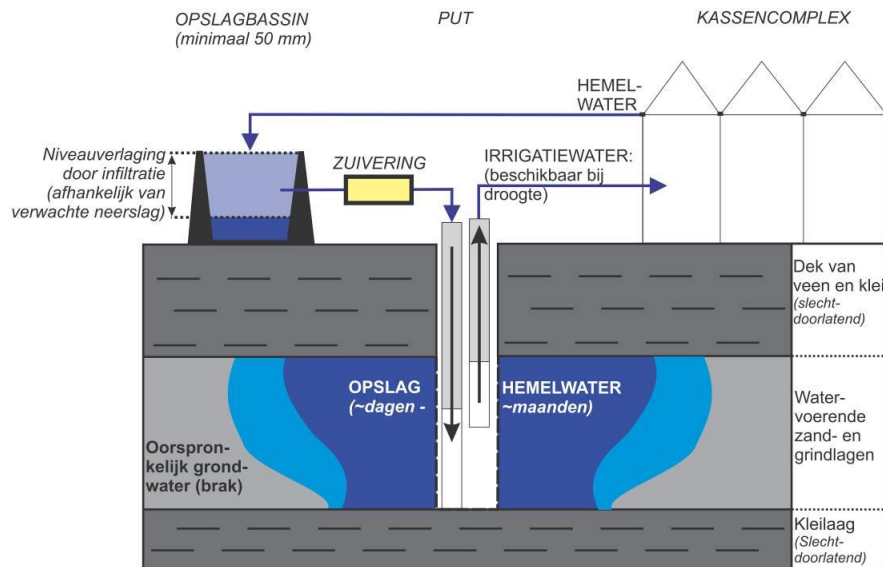
1.2 Oplossingsrichting: ondergrondse berging

Ondergrondse waterberging (Engels: aquifer storage and recovery, ofwel ASR) wordt gedefinieerd als **“het infiltreren van water in ondergrondse watervoerende lagen (‘aquifers’) in perioden van wateroverschot met als doel dit te onttrekken in perioden van droogte”** (Pyne, 2005). Deze techniek wordt wereldwijd steeds meer toegepast, waarbij infiltratie van overtollig zoetwater plaatsvindt door putten of infiltratievijvers, terwijl terugwinning vooral via putten geschiedt. Voor ondergrondse berging wordt doorgaans gekozen omdat (Zuurbier et al., 2012):

1. Water op deze wijze voor langere perioden kan worden vastgehouden voor uiteindelijk gebruik;
2. Ruimte voor opslag bovengronds beperkt is;
3. Het water in de ondergrond goed geconserveerd wordt (bv. geen algengroei);
4. Het opgeslagen water beschermd is tegen invloeden van buitenaf (temperatuur, verdamping, vervuiling);
5. Er doorgaans geen (dure) nabehandeling van het water vereist is, waardoor ook afvalstromen worden voorkomen;
6. Er ruimte kan worden gemaakt bovengronds voor opvang van piekneerslag, zonder dat kostbaar zoetwater verloren gaat.

ASR wordt gebruikt wanneer het oorspronkelijke grondwater een ontoereikende kwaliteit heeft (doorgaans te zout), of in gebieden waar door netto onttrekking schade kan ontstaan door verdroging. Toepassing van ASR in Nederland ten behoeve van de drinkwatervoorziening is nog steeds zeer beperkt (Stuyfzand et al., 2012). Kunstmatige infiltratie via bekkens en diepinfiltratiesystemen (met continue infiltratie en terugwinning op afstand) vindt bij de drinkwaterbedrijven wel op grote schaal plaats (Stuyfzand and Doomen, 2005). Denk hierbij bijvoorbeeld aan het infiltreren en onttrekken van zoet water in de duinen langs de kust. ASR wordt steeds meer toegepast in de glastuinbouw (Zuid-Holland, 2009), waar grote hoeveelheden regenwater met het kasdek worden opgevangen; een ideaal en goedkoop uitgangswater voor irrigatie. In [Figuur 1](#) wordt het principe van ASR voor de glastuinbouw geïllustreerd. Het hemelwater vanaf het kasdek wordt tijdelijk opgeslagen in een bovengronds opvangbassin, waarna het na een zandfiltratie (zuivering) wordt geïnfiltrerd. Bij behoefte aan gietwater wordt het water onttrokken en benut in de kas.

Figuur 1: Opzet ondergrondse waterberging ten behoeve van de glastuinbouw



1.3 Innovatieve putconcepten anno 2014

Anders dan grofweg 20 jaar geleden is er door een toename in kennis rondom ondergrond, boortechnieken en putaansturing meer flexibiliteit bij het benutten van de ondergrond. Hierdoor kan tegenwoordig op zeer specifieke dieptes/intervallen water gecontroleerd onttrokken en geïnjecteerd worden. Om dit te illustreren worden 3 recente technieken belicht: de Freshkeeper, de Freshmaker en de MPPW.

1.3.1 De Freshkeeper

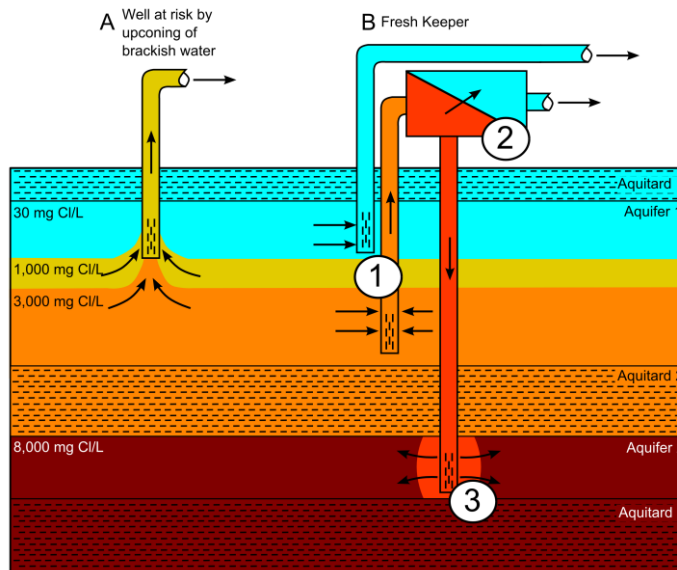
Het doel van de Freshkeeper (Figuur 2) is om verzilting van relatief ondiepe winning te voorkomen. Deze verzilting vindt plaats door opgekegeling van dieper zout grondwater, hetgeen ontstaat door ondiepe onttrekking. De Freshkeeper heeft als doel om juist dit brakke water af te vangen. Daarvoor wordt een extra, diepe put geboord tot onder de ondiepe winput. Met deze Freshkeeper put wordt vervolgens brakwater onttrokken en ofwel direct elders geïnfilteerd, of wel ingezet als voedingswater voor omgekeerde osmose.

1.3.2 De Freshmaker

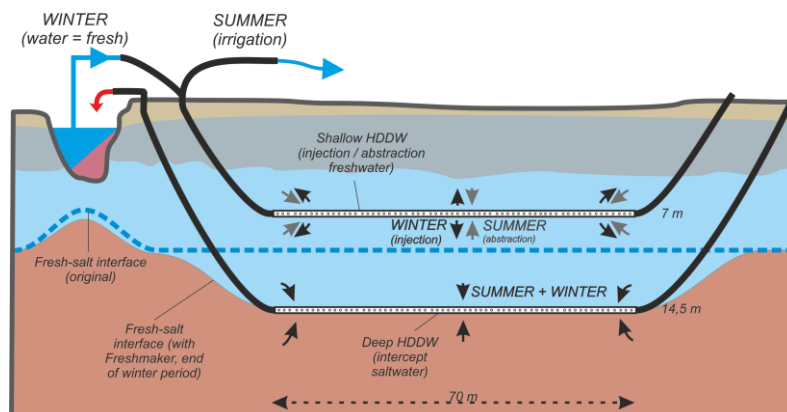
De Freshmaker (Figuur 3) gebruikt horizontale putten (Horizontal Directional Drilled Wells: HDDWs) om:

1. Op beperkte diepte een zoetwaterlens te vergroten / creëren;
2. Deze lens te beschermen door een diepe afvangput;
3. Zoetwater te onttrekken met de ondiepe put in tijden van droogte.

Figuur 2: Opzet Fresh-keeper: een diepe put vangt onderliggend brakwater af om verzilting van ondiepe putten te voorkomen.



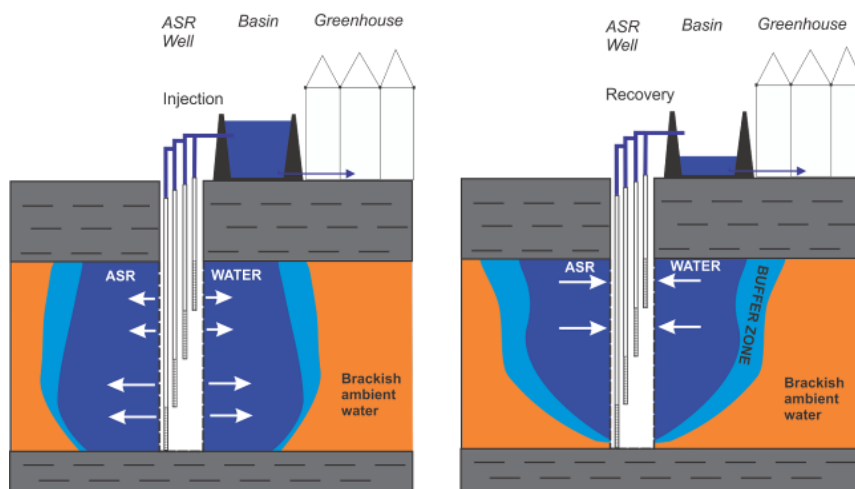
Figuur 3: Opzet Fresh-maker: een horizontale put (HDDW) injecteert en wint zoetwater op beperkte diepte, terwijl dieper juist zoutwater continu wordt afgevangen met een tweede horizontale put.



1.3.3 Gebruik van MPPW bij ASR

De MPPW (Multiple Partially Penetrating Well, [Figuur 4](#)) is nader beschreven door Zuurbier et al. (2014) en bestaat uit meerdere filters, welke boven elkaar geplaatst zijn in 1 boorgat. De verschillende filters zijn van elkaar gescheiden via kleiproppen, waardoor verticale stroming tussen verschillende filters door het boorgat wordt voorkomen. Hierdoor kan er op verschillende diepte-intervallen water geïnjecteerd en onttrokken worden. Dit principe wordt in deze veldproef verder onderzocht.

Figuur 4: Werking van de MPPW voor vergroting terug te winnen zoetwater bij ASR.



1.4 Doelstellingen en opzet ASR proef Westland

De geschiktheid van watervoerende pakketten (aquifers) voor ASR is sterk afhankelijk van de lokale condities, zoals de geologie, grondwaterkwaliteit en grondwaterstroming (Ward et al., 2009). In de hotspot Haaglanden blijken deze drie parameters sterk variabel, waardoor de geschiktheid van de ondergrond voor ASR sterk varieert (Zuurbier et al., 2013). Uit laatstgenoemde studie blijkt dat vooral het Oostland geschikt is voor ondergrondse waterberging. Hier kan al met kleinschalige systemen een hoog *terugwinrendement* (percentage van injectiewater dat met voldoende kwaliteit wordt teruggewonnen) worden behaald. In het Westland is het grondwater overwegend zouter. Dit heeft tot gevolg dat het geïnjecteerde zoetwater meer last ondervindt van oprijving, waardoor een kleiner deel herwinbaar is. In het Westland lijken grootschalige ASR systemen in potentie wel in staat om een groot deel (60%) van het injectiewater terug te winnen (Zuurbier et al., 2013).

Voorts blijkt door technische aanpassingen in het putontwerp bij ondergrondse waterberging het terugwinrendement in theorie (en praktijk) sterk te kunnen verbeteren (Zuurbier et al., 2012; Zuurbier et al., 2014). De belangrijkste aanpassing hierbij is het installeren van meerdere putfilters in één verticaal boorgat: de zogenaamde multiple partially penetrating well of MPPW (Zuurbier et al., 2012). Een eerste test hiermee met een kleinschalig systeem in een brak pakket in Nootdorp leidde tot een verhoging van het terugwinrendement van 20% naar 60% (Zuurbier et al., 2014). Dit was ruim voldoende om hier de jaarlijkse watervraag te kunnen leveren.

De onderhavige veldproef in het Westland bouwt voort op de eerdere, kleinschalige proef in Nootdorp. Doelstelling van dit veldonderzoek is het beantwoorden van de volgende onderzoeksvraag: Kan ook in een zouter milieu (ca. 4000 – 5000 mg chloride/l) een hoger terugwinrendement bij ASR worden behaald, om zo ook in het Westland een grotere mate van zelfvoorzienendheid te bereiken?

Om dit doel te bereiken is gebruik gemaakt van:

1. opschaling van het systeem voor ondergrondse waterberging door koppeling van 4 glastuinbouwbedrijven (totaal: 27 hectare);
2. optimale terugwinning van het geïnjecteerde zoetwater via twee bronlocaties met ieder 3 separate putfilters;
3. inzet van ontzilting door omgekeerde osmose. Zo kan ook het water dat door vermenging brak en niet direct inzetbaar is als gietwater worden teruggewonnen en benut;
4. monitoring in het veld, gevolgd door zoet-zoutmodellering.

In de zomer van 2012 zijn het definitieve ontwerp en de vergunningsaanvraag opgesteld. Aanleg van het systeem bestaande uit leidingen, zuivering en pompen vond plaats in de periode oktober t/m januari. Na verkrijging van de vergunning is half december gestart met injectie van zoetwater. In februari en maart is gepoogd dit water zoet te terug te winnen voor direct gebruik, en vervolgens voor gebruik na omgekeerde osmose (RO).

Dit rapport beschrijft gedetailleerd de opzet, resultaten en interpretatie van de veldproef ondergrondse waterberging (verder: 'OWB') Westland, van de periode juli 2012 – december 2013.

Opgemerkt wordt dat ook na deze periode vervollexperimenten en monitoring zullen plaatsvinden, maar die vallen buiten de scope (tijdsplanning) van dit project. Kortom de beschreven resultaten in dit eindrapport zijn tussenresultaten.

2 Opzet veldproef ondergrondse waterberging Prominent

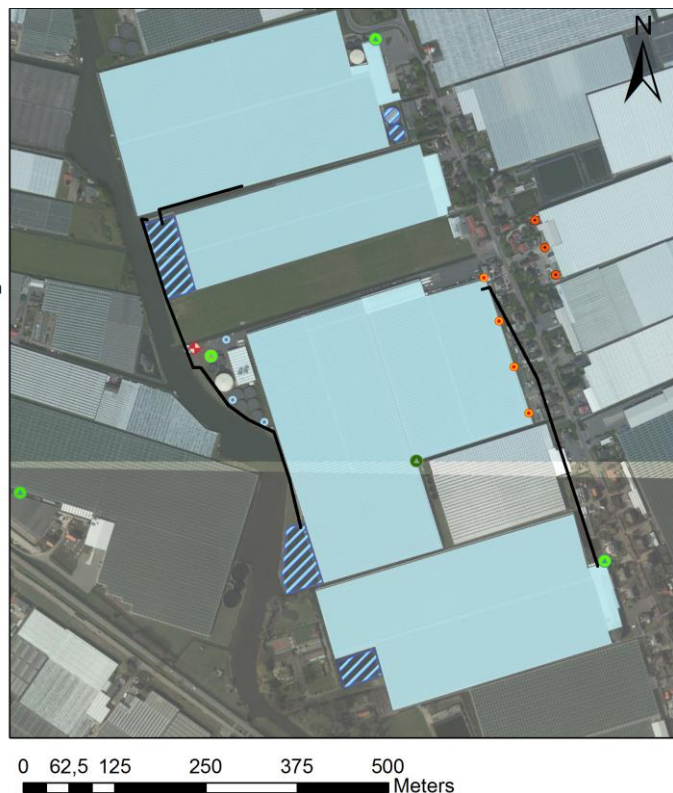
2.1 Waterdistributienetwerk 'Groeneweg'

Op de proeflocatie (Innovatiebedrijf 'Groeneweg-II' van Prominent, Groeneweg 75a, 's Gravenzande) wordt water van vier bedrijven verzameld om één centraal ASR systeem te voeden. Hiervoor zijn de verschillende bassins onderling verbonden (Figuur 5, Figuur 6). Met hetzelfde systeem kan in tijden van tekorten, water uit de ondergrond worden onttrokken voor teruglevering aan de verschillende bassins. Vanuit de bassins wordt het water verpompt voor gebruik in de kas. De verpompte volumes zijn bijgehouden met watermeters. Als opslaglocatie is het centraal gelegen veld achter het bedrijf 'Groeneweg-II' gekozen. Hier was voldoende (bereikbare) ruimte voor het installeren van pomp- en meetputten. Daarnaast werd bepaald dat de afstand op deze locatie tot overige pompputten (behoudens de RO winput van 'Groeneweg-II' zelf) voldoende moest zijn om verstoring van de geïnjecteerde bel te voorkomen.

Figuur 5: Bovenaanzicht deelnemende bedrijven, leidingwerk en putlocaties. R.O.= reverse osmosis (omgekeerde osmose).

Legenda

- ◆ Bronnen OWB
- Waterleiding
- ▨ Basins
- WKO-koud
- WKO-warm
- R.O.-win
- R.O.-reject
- Deelnemende bedrijven

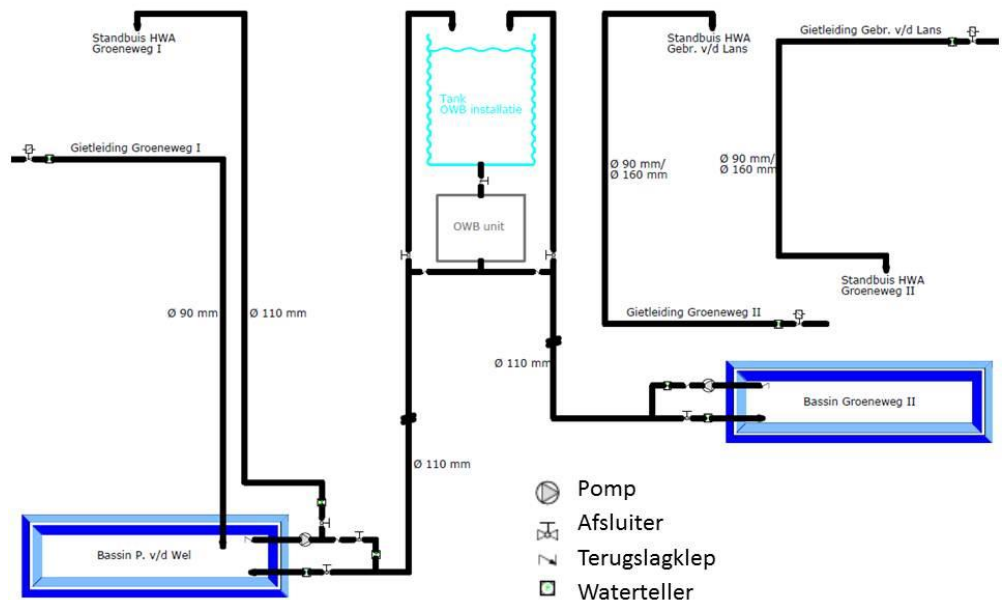


In totaal is een dakoppervlakte van ruim 27 ha benut voor opvang van hemelwater (Tabel 1). Ter indicatie: per mm neerslag betekent dit dat er (potentieel) 270 m³ beschikbaar is voor infiltratie. De tuinders hebben een gemiddelde basisingrootte van ca. 900 m³/ha (Tabel 1), waarmee dus maar een deel van de jaar-

lijkse neerslag effectief kan worden opgevangen. Voorafgaand aan het project is ingeschat dat jaarlijks ongeveer 200 mm aan (winterse) hemelwateroverschotten geborgen kon worden. Dit komt overeen met een jaarlijkse injectie van 55.000 m³.

Om aansturing van de injectie beter te beveiligen is er ter plaatse van het proefveld een hemelwaterbuffersilo (200 m³) geplaatst. Het injectiewater wordt hier verzameld, waarna op basis van het niveau in deze tank de hemelwateraanvoer en de injectie in de ondergrond worden gecontroleerd. Om het hemelwater vrij van zwevend stof te kunnen infiltreren wordt het gezuiverd via eerst een snelfiltratie en daarna langzame zandfiltratie. Hiermee wordt voorkomen dat deeltjes met het injectiewater worden meegevoerd richting putfilters, alwaar ze kunnen zorgen voor (mechanische) putverstopping.

Figuur 6: Watertechnische schema veldproef ondergrondse waterberging Westland. *OWB* = ondergrondse waterberging of 'ASR'



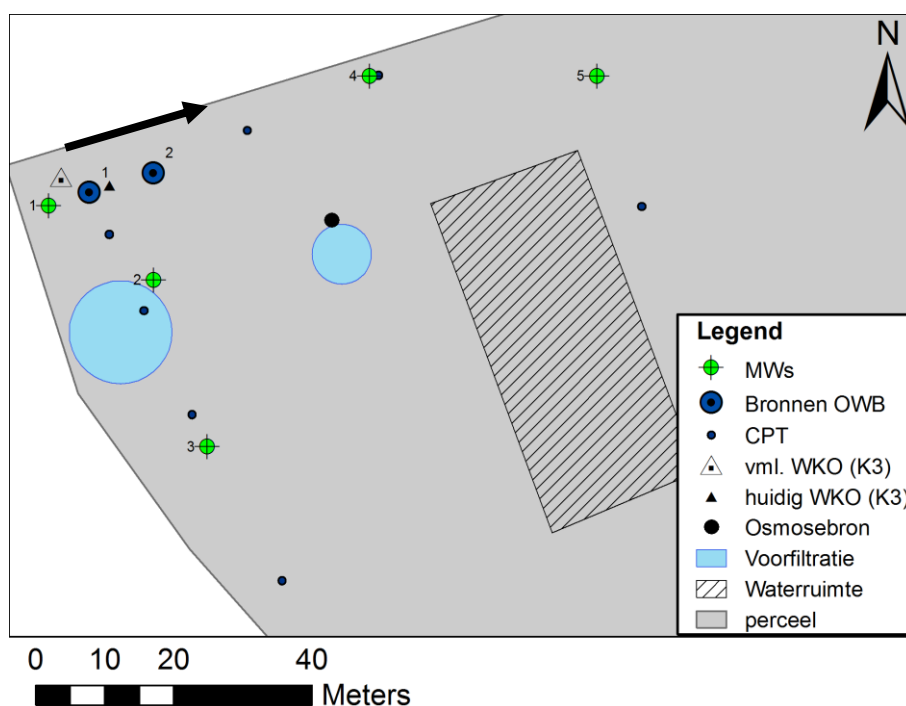
Tabel 1: Gegevens deelnemende bedrijven veldproef ondergrondse waterberging Westland.

Bedrijf	Oppervlak (m ²)	Teelt	Inhoud bassin (m ³)
Groeneweg II	98.400	Tomaten	7.830
P. van der Wel	41.000	Tomaten	8.500
Groeneweg I	72.900	Tomaten	3.000
Van der Lans	63.000	Tomaten	4.800
Totaal	275.300		24.130

2.2 Opzet puttenveld

Twee ASR putten met ieder 3 filters zijn in oktober 2012 geïnstalleerd middels de zuigboormethode op een onderlinge afstand van 10 m. Er is voor een zuigboormethode gekozen om een relatief schoon boorgat van 350 mm te creëren, waarin 3 putfilters met een diameter van 75mm konden worden geïnstalleerd. Afdichtingen met bentoniet zijn aangebracht tussen de verschillende filters om kortsluiting via het boorgat te voorkomen. Door het installeren van twee putten is er voldoende capaciteit gecreëerd om in de winter indien nodig/mogelijk in korte tijd grote overschotten te infiltreren. Daarnaast kan er met 2 ASR-putten stroomopwaarts van de verwachte grondwaterstroming preferent worden geïnfiltreerd, en juist stroomafwaarts worden teruggewonnen.

Figuur 7: Bovenaanzicht puttenveld veldproef ondergrondse waterberging Westland. MW= monitoringsput, CPT= cone penetration test ('sondering'). De vermoedelijke grondwaterstroming is tevens aangegeven.

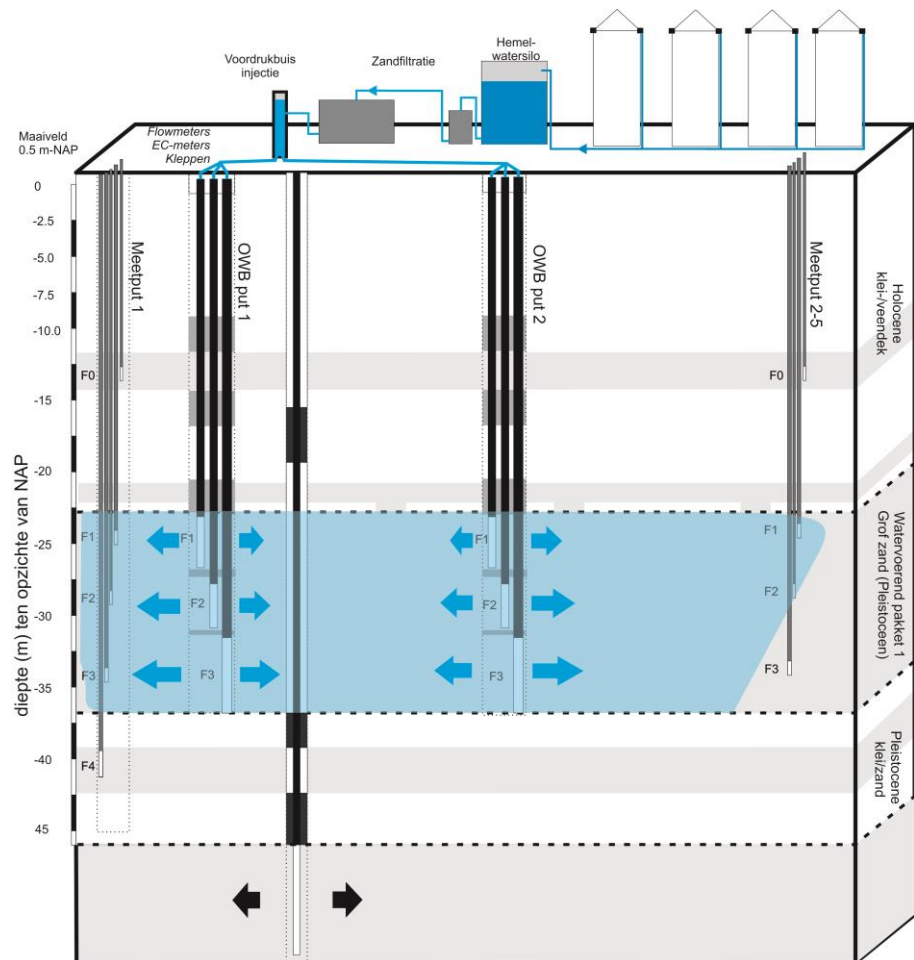


Rondom de ASR putten zijn in november 2012 in totaal vijf monitoringsputten ingericht. Hiervoor zijn boorgaten gepulst tot 50m (MW1) en 40m (MW2-5). In de gepulste boorgaten zijn op 5 tot 6 verschillende dieptes peilfilters met een lengte van 1m geplaatst (Figuur 8). Ook hier zijn afdichtingen met bentoniet aangebracht tussen de verschillende filters. Bij iedere monitoringsput zijn 3 waarnemingsfilters geplaatst in het OVB pakket. Ter plaatse van MW1 (op 5 m van de OVB putten) is tevens een diepe waarnemingsbuis aangebracht, om zo de effecten op grotere diepte te kunnen waarnemen. Iedere monitoringsput is voorzien van een waarnemingsfilter in de kleiige deklaag.

2.3 Karakterisatie ondergrond

Om de lokale bodemopbouw te bepalen zijn tijdens het pulsen van iedere meter een monster genomen. Daarnaast is ter plaatse van MW1 (Figuur 7) een ongestoorde kern gestoken van 20 tot 40 m-maaiveld, welke gebruikt is voor detailbeschrijving door de Rijksgeologische Dienst en uitgebreide monsternamen voor labanalyses. In totaal is van 178 monsters de korrelgrootte verdeling bepaald op de Vrije Universiteit (VU) Amsterdam door middel van laserdiffractie. Voorbereiding geschiedde hierbij volgens de methode van Konert en Vandenberghe (1997). Daarnaast zijn de gehalten aan organische stof en carbonaat van de 103 monsters van MW1 bepaald middels thermogravimetrische analyse (TGA). De resultaten zijn uitgebreid vergeleken met regionale studies van Buschers et al. (2005), waarvan de verslaglegging is gedaan door De Jong (2013).

Figuur 8: Zijaanzicht puttenveld veldproef ondergrondse waterberging Westland.



2.4 Monitoring tijdens veldproef

2.4.1 Monitoring verpompings ASR systeem

In de pompruimte van het ASR systeem zijn automatische loggers aangebracht om per bronlaag de geïnjecteerde en onttrokken hoeveelheden te meten en te registreren. Hiervoor is gebruik gemaakt van Signet 515 Rotor-X Paddlewheel Flow Sensoren (Georg Fischer Signet LLC). De totale injectie- en onttrekkingsvolumes zijn daarnaast geregistreerd met geijkte watermeters. De EC van het onttrokken water per laag en van het mengwater geleverd aan de bedrijven is gemeten middels EC meters. Alle metingen zijn elektronisch geregistreerd op halfuurbasis.

2.4.2 Monitoring zoetwaterbel in het doelpakket

Tijdens de veldproef zijn de temperatuur, elektrische geleidbaarheid (EC), en druk op kwartierbasis gemeten via CTD-Divers (Schlumberger Water Services) in MW1 en MW2 (beiden in F1 t/m 3).

Daarnaast heeft monitoring plaatsgevonden via bemonstering, waarbij in het veld in een doorstroomcell de EC (middels de WTW multi 350i, WTW), pH en temperatuur (Hanna 9126, Hanna Instruments), en zuurstof (Odeon, Neotek-Ponsel) zijn gemeten. Titratie voor bepaling van de alkaliniteit vond plaats op de VU middels Titralab 840 (Radiometer Analytical). Monsters voor labanalyse zijn in het veld gefiltreerd over een 0.45 µm membraan (Whatman FP-30, UK) en bij ca. 4 °C bewaard. Op de Vrije Universiteit Amsterdam zijn deze vervolgens geanalyseerd op Na, K, Ca, Mg, Mn, Fe, S, Si, P en sporenelementen middels ICP-OES (Varian 730-ES ICP OES, Agilent Technologies). Daarnaast vond analyse op F, Cl, NO₂, Br, NO₃, PO₄, en SO₄ plaats middels de Dionex DX-120 IC (Thermo Fischer Scientific Inc.) en NH₄ middels de LabMedics Aquakem 250.

Alle peilbuizen zijn voorafgaand aan de proef bemonsterd (begin december 2012: 'nulsituatie'). Vervolgens zijn de filters F1 t/m F3 ter plaatse van MW1 en MW2 8 maal bemonsterd tijdens de eerste maand van injectie. Tijdens de korte opslagfase (januari / februari) vond regelmatige bemonstering bij MW1, 2 en 4 plaats. Tijdens terugwinning (maart) zijn opnieuw enkele bemonsteringen uitgevoerd.

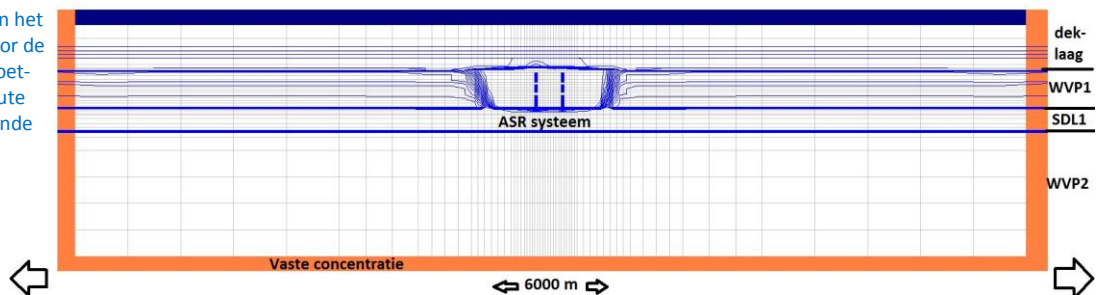
Als laatste zijn hoge resolutie boorgatmetingen met de Robertson DIL-39 probe uitgevoerd ter plaatse van MW1 en MW2. Hiermee is de elektrische geleidbaarheid van de ondergrond buiten de peilbuis gemeten. Door uitvoering van metingen op 28 november 2012 ('nulsituatie') en 6 maart 2013 (zoetwater geïnjecteerd) is de verspreiding van het zoete water in de ondergrond in kaart gebracht. Afnames in geleidbaarheid toonden aan waar zoutwater was vervangen door het zoete injectiewater.

2.5 Modellerings veldproef

Om de gemeten concentraties in het doelpakket en daarmee het gedrag van de geïnjecteerde zoetwaterbel te begrijpen, is een chemisch transportmodel opgezet. Hiervoor is gebruik gemaakt van SEAWAT V4 (Langevin et al., 2007), welke de modelcodes MODFLOW voor grondwaterstroming (Harbough et al., 2000) en MT3DMS (Zheng and Wang, 1999) voor stoftransport combineert. Het effect van dichtheidsstroming wordt hierbij gesimuleerd door in iedere cel de zoetwaterstijghoogte te berekenen op basis van de concentratie.

De randen van het model hebben een vaste stijghoogte (water stroom in en uit het model) en bevinden zich op 3,000 m van de OWB putten om randeffecten te voorkomen (Figuur 9). Het water dat het model vanaf 200m afstand van de put binnenstroomt wordt een concentratie meegegeven die gelijk is de oorspronkelijke concentratie in het grondwater. Het zoete water komt tijdens de modellering niet verder dan ca. 100 m. Omdat ook het tweede watervoerende pakket is gemodelleerd, is tot een diepte van 100 m-NAP gemodelleerd.

Figuur 9: Opzet van het SEAWAT model voor de simulatie van de zoetwaterbel in het zoute eerste watervoerende pakket (WVP1).



De laaggrenzen van de geologische lagen in het model zijn gebaseerd op de waargenomen korrelgrootteverdeling ter plaatse van de MWs (paragraaf 3.1). Vervolgens is het model op de volgende eigenschappen gecalibreerd aan de hand van de veldmetingen tijdens verpomping:

1. Stijghoogteveranderingen bij aan en uitzetten van de injectie-/onttrekkingspomp met een bekend debiet: *hydrologische doorlatendheid 'K'* en de *specifieke bergingscoëfficiënt 'Ss'*;
2. Doorbraakcurve ter plaatse van MW1 en MW2: *effectieve porositeit 'n'* en de dispersiviteit '*D'*'.

Deze aanpak is eerder succesvol gebleken bij de veldproef Nootdorp en uitvoeriger beschreven in Zuurbier et al. (2014). In Sectie 4.1.1 zijn de hydrologische parameters weergegeven die volgden uit de calibratie.

Na calibratie van het model zijn de volgende scenario's gemodelleerd:

1. Te verwachten situatie op basis karakterisatie: met werkelijke verpompings zoals geregistreerd in de periode december 2012 t/m maart 2013, daarna is onttrekking voortgezet met 78 m³/d, waarbij 60% is onttrokken via AW1F1 en AW2F1, en 40% met AW1F2 en AW2F2.;
2. Vermoedelijke situatie: zoals in scenario 1, maar met aanpassingen in de bodemopbouw om dat de tweede scheidende laag onder het doelpakket lekkage vertoonde;
3. Simulatie zonder of na dichten lekkage voor enkele seizoenen:
 - a. Waarin de MPPW met name onderin injecteert, en bovenin terugwint;
 - b. Waarin met de MPPW ook tijdens winning een deel van het gewonnen water weer onderin het watervoerende pakket wordt gebracht ('retour')
 - c. Waarin met de onderste putten van de MPPW een 'Freshkeeper' wordt gemaakt, waarbij zoutwater wordt afgevangen alvorens het de ondiepe putten bereikt;
 - d. Een scenario zoals scenario 3c, maar met een verdubbeld volume.

3 Resultaten veldproef ASR Westland

3.1 Karakterisatie ondergrond

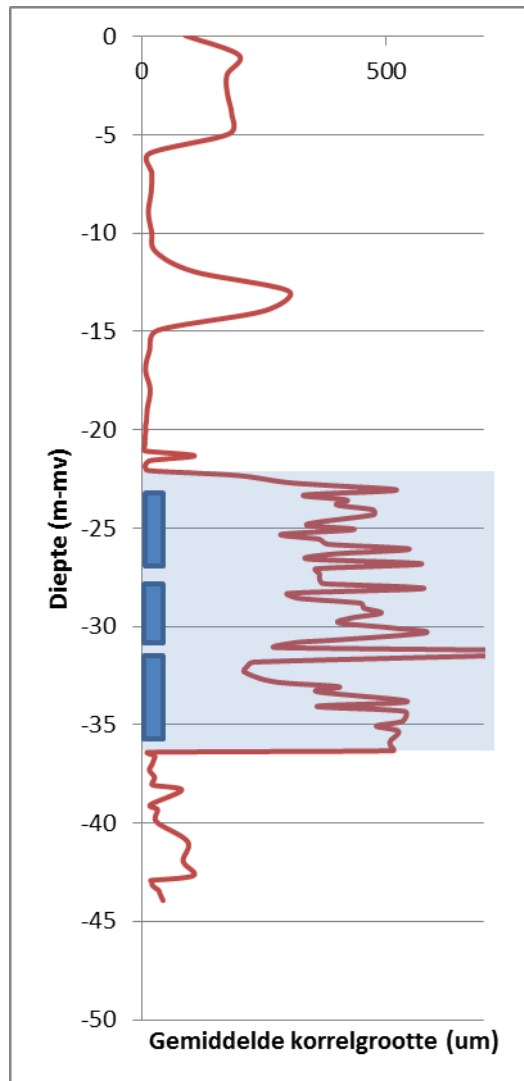
Het doelpakket is uitvoerig onderzocht middels sonderingen en door middel van analyses op het opgeboorde sediment door De Jong (2013) en TNO. Er zijn grofweg drie eenheden te onderscheiden (Tabel 2):

1. Een slecht-doorlatende onderlaag (vanaf -36.37 m-NAP) bestaande uit klei, veen en zandlagen en doorgaans kalkarm;
2. Het ca. 14 m dikke doelpakket voor opslag van -36.37 tot -22.63 m-NAP bestaat uit matig fijn tot zeer grof zand en grind. In de onderste 5 m van dit pakket zijn de zanden kalkarm (<1%), maar naar boven toe zijn zij kalkrijk (5 tot 10%). Hoewel afwisselingen in gemiddelde korrelgrootte zijn waargenomen (Figuur 10), is het doelpakket als geheel behoorlijk homogeen. Het is daarom niet te verwachten dat er duidelijke preferente stroombanen en/of stagnante zones zullen ontstaan;
3. De Holocene deklaag van -22.63 m-NAP tot +0.56 m-NAP (maaiveld) bestaat voornamelijk uit (kwelder)klei en vormt zo de relatief ondoorlatende afsluiting naar het topsysteem.

Tabel 2: Aangetroffen lithologische eenheden ter plaats van ASR systeem (MW1). Binnen de gestippelde lijnen is het doelpakket aangegeven.

Van m-NAP	Tot m-NAP	Omschrijving	Hoofdlithologie
0.56	-14.44	- Formatie van Naaldwijk	Klei, fijn zand
-14.44	-19.46	- Formatie van Naaldwijk of Formatie van Echteld	Klei, fijn zand
-19.46	-21.47	- Formatie van Echteld	Klei, zandlaagjes
-21.47	-22.63	- Formatie van Kreftenheye, Laag van Wijchen of Formatie van Echteld	Klei
-22.63	-23.8	- Formatie van Kreftenheye	Zand
-23.8	-31.36	- Formatie van Kreftenheye, Laagpakket van Ockenburg	Grof zand
-31.36	-36.37	-Formatie van Kreftenheye	Grof zand
-36.37	-42.77	Formatie van Stramproy of Formatie van Waalre, mogelijk Stramproy op Waalre	Veen, klei, fijn zand
-42.77	-44.44	Formatie van Waalre	Veen, leem

Figuur 10: Gemiddelde korrelgrootte (in μm) ter plaatse van MW1. De diepte van het doelpakket en de 3 ASR filters is weergegeven in blauw. Zowel boven als onder het doelpakket bevinden zich kleilagen die het pakket afsluiten.



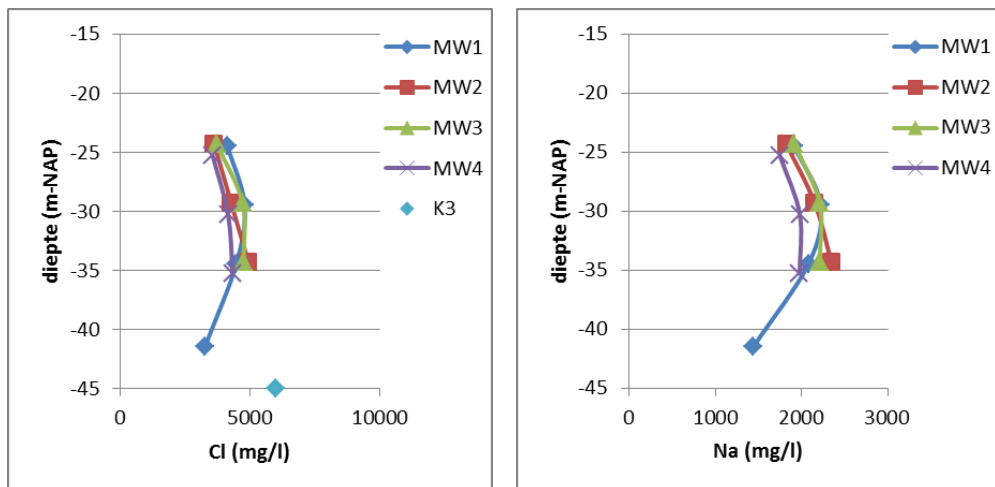
Tot op ca. 65 m van de ASR bronnen zijn sonderingen uitgevoerd en ook sedimentmonsters van de pulsboringen geanalyseerd. Hieruit blijkt dat er in de omgeving van de ASR bronnen nauwelijks variaties aanwezig zijn in diepteligging en/of samenstelling van het doelpakket. Er kan daarom verondersteld worden dat de heterogeniteit van de ondergrond in de horizontale richting dermate beperkt is dat hiermee in de verdere modellering geen rekening gehouden hoeft te worden. Het doelpakket is 13.8 m dik. De gemiddelde hydraulische conductiviteit (K) wordt op basis van de korrelgrootteverdeling (Bear, 1972) geschat op 30 - 40 m/d. De KD (dikte $\times K$) komt hiermee uit op 400 a 550 m^2/d . Deze waarden komen overeen met eerste schattingen op basis van geologische modellen (Zuurbier et al., 2012), ondanks dat het pakket enkele meters dunner blijkt te zijn.

3.2 Kwaliteit oorspronkelijke grondwater

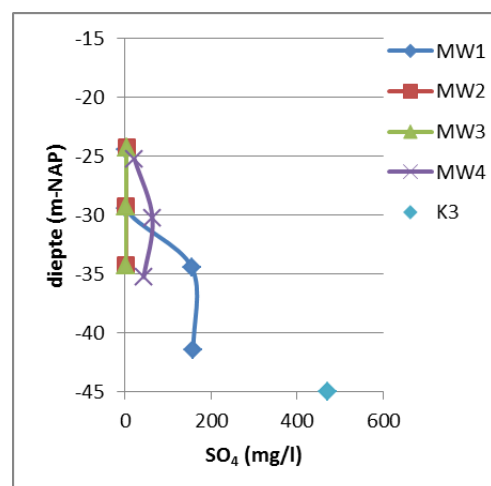
Het oorspronkelijke water ter plaatse van de onderzoekslocatie is volgens de classificatie van Stuyfzand (1993) van het type “b5NaCl-”. Kenmerkend hiervoor is:

- Het water is zeer brak (gemiddelde Cl-concentratie: ~4,300 mg/l);
- Het water heeft een hoge alkaliniteit (~1,150 mg HCO₃/l);
- Na is het dominante cation, Cl het dominante anion;
- De samenstelling van het grondwater duidt op verzilting, een bekend verschijnsel in het Westlandse gebied (Faneca Sánchez et al., 2012).

Opvallend is dat het grondwater in de onderliggende kleilaag iets zoeter is. Mogelijk is de verzilting in deze laag door zijn geringere doorlatendheid minder vergevorderd. Een andere opvallende waarneming is dat het water in het eerste watervoerende pakket doorgaans SO₄-loos is (diep anoxisch), terwijl het diepere grondwater SO₄-rijk is (anoxisch). Wel is opvallend dat ook in het doelpakket ter plaatse van MW1 (filter 3) een duidelijke verhoging aan SO₄ is waargenomen.



Figuur 11: Gemeten concentraties aan Cl, Na en SO₄ voorafgaand aan de proef ter plaatse van MW1-4. Voor Cl en SO₄ zijn ook analyses uitgevoerd op water van het tweede watervoerende pakket (K3).



3.3 Kwaliteit injectiewater

In [Tabel 3](#) is de gemeten chemische waterkwaliteit van het injectiewater weergegeven op basis van macroparameters. Het geïnjecteerde water (dus na 2 filtratiestappen) was zeer zoet, hoewel in lage concentratie toch enkele zouten worden aangetroffen. Dit is typisch voor de neerslag in kustnabije regio's (Stuyfzand, 1993), waarbij de hoogste concentraties aan zouten worden waargenomen bij wind vanaf zee (westenwind). Antropogene luchtverontreiniging vormt de hoofdbron voor NO_3 en SO_4 . Bij eenmalige analyse op bestrijdingsmiddelen is $0.55 \mu\text{g/l}$ Pyrimethanil aangetroffen. Dit was vermoedelijk veroorzaakt door condenswater in het bassin van Groeneweg I of II. Deze condenswaterstromen zijn pas sinds oktober 2012 afgekoppeld van het hemelwaterbassin. Eind 2013 werd slechts nog $0.06 \mu\text{g/l}$ Pyrimethanil aangetroffen. Overige bestrijdingsmiddelen zijn niet aangetroffen. Opvallend zijn de hoge pH en de relatief hoge concentraties Ca en HCO_3 , althans voor regenwater. Kalkoplossing tijdens de langzame zandfiltratie wordt hiervoor verantwoordelijk gehouden.

Tabel 3: Macrochemische kwaliteit van het geïnjecteerde hemelwater op basis van 5 bemonsteringen tussen 18-12-12 en 11-2-13.

Monstercode	AW_in	
Datum	18-12-12 t/m 11-2-13	
EC	41	$\mu\text{S/cm}$ (bij 20 C)
Temp	6.2	$^{\circ}\text{C}$
pH	8.8	
O_2	12.5	mg/L
Na	3.8	mg/L
Cl	6.8	mg/L
K	0.4	mg/L
Ca	3.0	mg/L
Mg	0.5	mg/L
Fe	0.03	mg/L
Mn	0.03	mg/L
NH_4	0.3	mg/L
SiO_2	0.4	mg/L
SO_4	1.89	mg/L
HCO_3	13.8	mg/L
NO_3	2.0	mg/L
NO_2	0.03	mg/L
PO_4	0.1	mg/L
F	0.15	mg/L

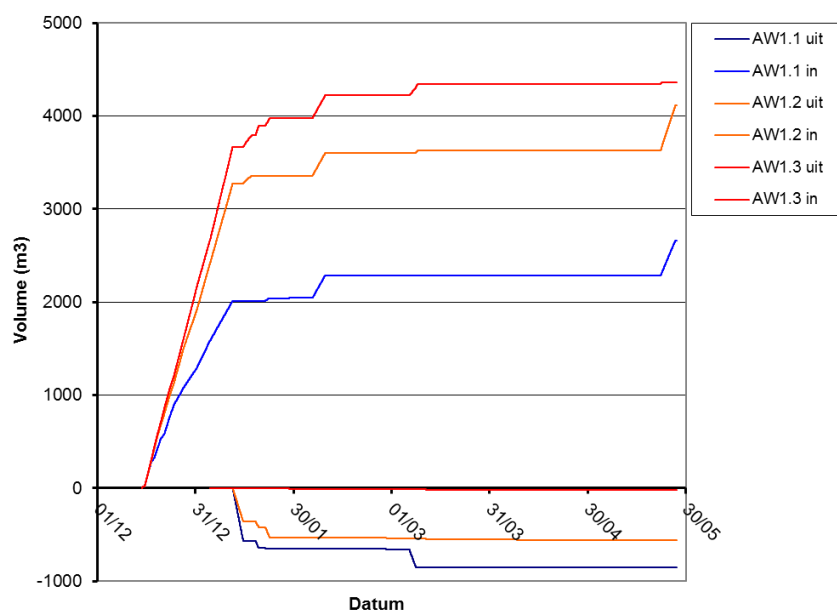
3.4 Verpompings door ASR systeem

De geregistreerde verpompings via de verschillende filters zijn weergegeven in [Figuur 12](#) en [Figuur 13](#). De totale geïnjecteerde en onttrokken volumes zijn weergegeven in [Figuur 14](#). De belangrijkste zaken zijn:

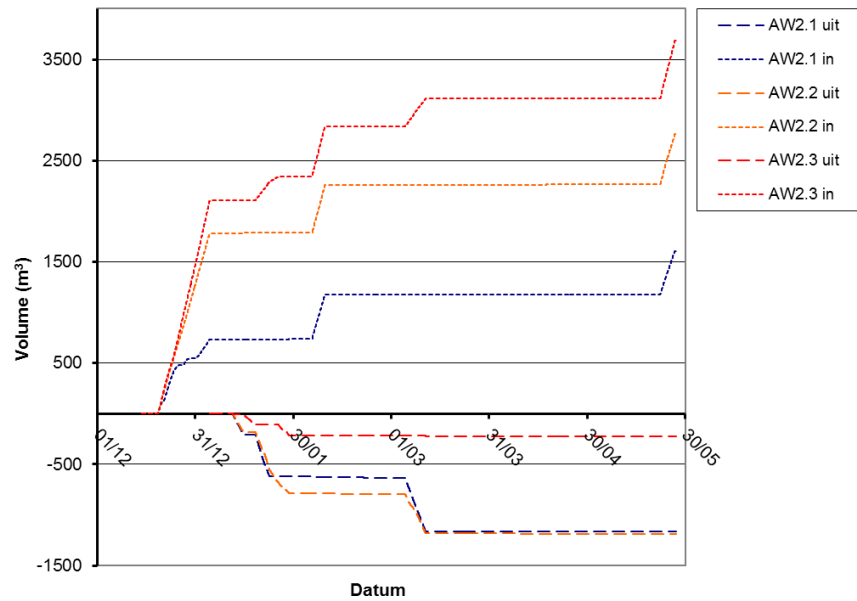
- Zoals gepland heeft injectie zich geconcentreerd op de diepere filters, de terugwinning juist op de ondiepe filters;
- Er zijn twee terugwinperiodes geweest: de eerste vond plaats half januari, de tweede half maart;
- Aan het einde van de eerste ASR cyclus (half maart) is 15.518 m^3 geïnjecteerd, tegen een terugwinning van 3.110 m^3 . Dit betekent dat 19.8% van het geïnjecteerde water is teruggewonnen;
- Eind mei is in een natte periode nog eens 2.824 m^3 geïnjecteerd toen de bassins dreigden over te lopen. Er is hierop volgend geen terugwinperiode geweest.

De totale injectie van 18.342 m^3 betekent dat ca. 68 mm neerslagoverschot is opgevangen en geïnjecteerd. Dit is slechts een derde van het geplande overschot van ca. 55.000 m^3 , wat is veroorzaakt door de relatief late start in het natte seizoen (half december) en een relatieve droge tweede helft van de winter.

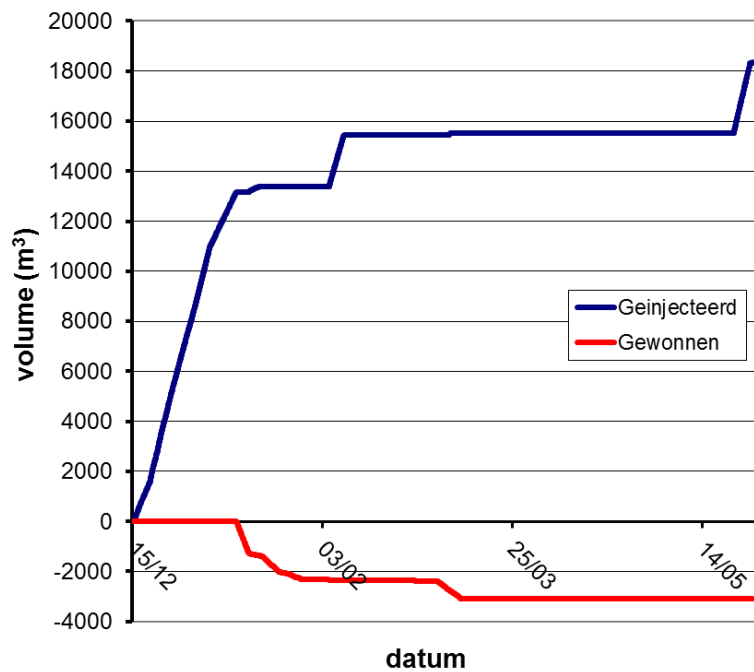
Figuur 12: Verpompings van de verschillende filters van ASR put 1 (AW1).



Figuur 13: Verpompings van de verschillende filters van ASR put 2 (AW2).



Figuur 14: Totale verpompings tijdens eerste jaar van de ASR proef Westland.



3.5 Terugwinning van zoetwater

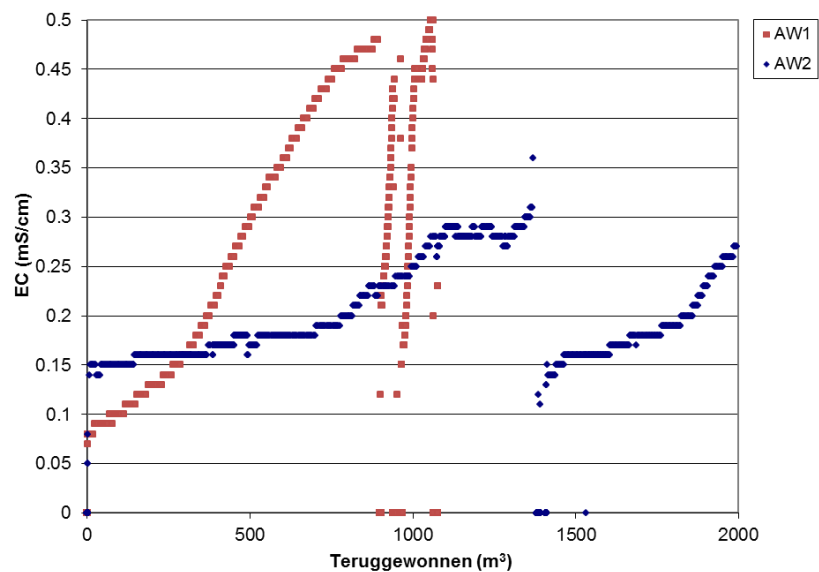
3.5.1 EC-metingen op pompunit

In [Figuur 15](#) is het verloop van de EC tijdens twee terugwinperiodes tegen de teruggewonnen hoeveelheid water weergegeven voor beide ASR putten. Duide-

lijk is aan de EC te merken dat het water gewonnen via AW1 snel verzilt: vanaf de aanvang van de winning loopt de EC al op, ondanks dat (met name in de eerste terugwinfase) de zoetwaterinjectie pas net is stopgezet. AW2 is langer in staat om geïnjecteerd zoetwater terug te winnen, maar verzilt in een later stadium alsnog.

Het feit dat dat AW1 (waar de bulk van het zoete water is geïnjecteerd, [Figuur 12](#)) eerder en heftiger verzilt dan AW2 duidt erop dat de waargenomen verzilting niet is ontstaan door oprijving van de gehele zoetwaterbel. Een lokale bron van zoutwater nabij AW1 of een sterke laterale stroming richting AW2 zijn mogelijke oorzaken.

Figuur 15: Geregistreerde elektrische geleidbaarheden (EC) op de pompunit tijdens terugwinning met ASR put 1 (AW1) en 2 (AW2).



3.5.2 Chemische analyses teruggewonnen water

Als indicator voor zoet (injectie)water en zout grondwater is gebruik gemaakt van chloride (Cl). De reden hiervoor is dat Cl doorgaans laag is in het regenwater (gemiddeld ongeveer 7 mg/l, [Tabel 3](#)), maar juist hoog in het oorspronkelijke grondwater (3,700 – 4,800 mg/l). De resultaten hiervan worden vergeleken met de modelresultaten en zijn daarom besproken in hoofdstuk 4.

4 Modelling ASR cyclus

4.1 Simulatie op basis verzamelde ondergrondgegevens

4.1.1 Opzet model

Op basis van de karakterisatie en de waarnemingen tijdens verpompings is het SEAWAT-model opgezet. De belangrijkste geohydrologische parameters zoals verwerkt in het model zijn weergegeven in [Tabel 4](#). De dispersiviteit (D) is op basis van de doorbraakcurves vastgesteld op 0.1m.

Tot 11 maart 2013 zijn de werkelijke verpompings gesimuleerd, daarna is onttrekking voortgezet met 78 m³/d, waarbij 60% is onttrokken via AW1F1 en AW2F1, en 40% met AW1F2 en AW2F2. Omdat er nauwelijks grondwaterstroming te verwachten was in het gebied, deze uit metingen niet naar voren kwam en de gemodelleerde periode relatief kort is, is achtergrondstroming niet gesimuleerd.

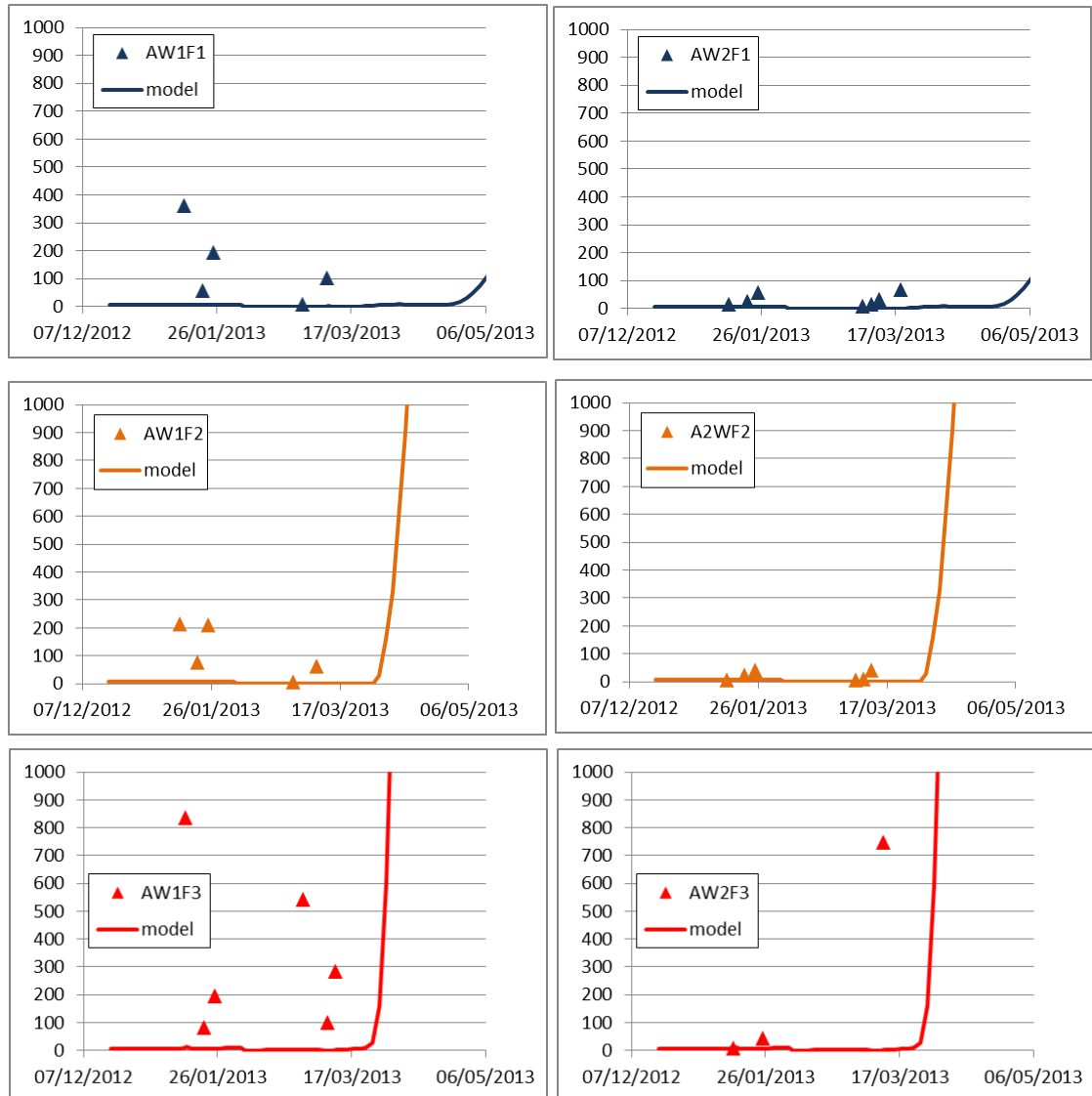
Tabel 4: Vertaling geologische eenheden naar modellagen in het SEWAT model.

Geologische eenheid	Van – tot (m-NAP)	Aantal modellagen	Kh/Kv	n (-)	Cl (mg/l)
Deklaag	0.56 - -21.63	6	0.1/0.01 1/0.1	0.2	2100 - 3000
WVP1	-21.63 - -36.37	15	35/35	0.3	3000 – 4800
SDL	-36.37 - -47.63	8	0.2/0.02 10/10 0.05/0.005	0.2	3300
WVP2	-47.63 – 82.44	5	30/30	0.35	6000

4.1.2 Vergelijking meetresultaten met modelsimulatie (SEAWAT)

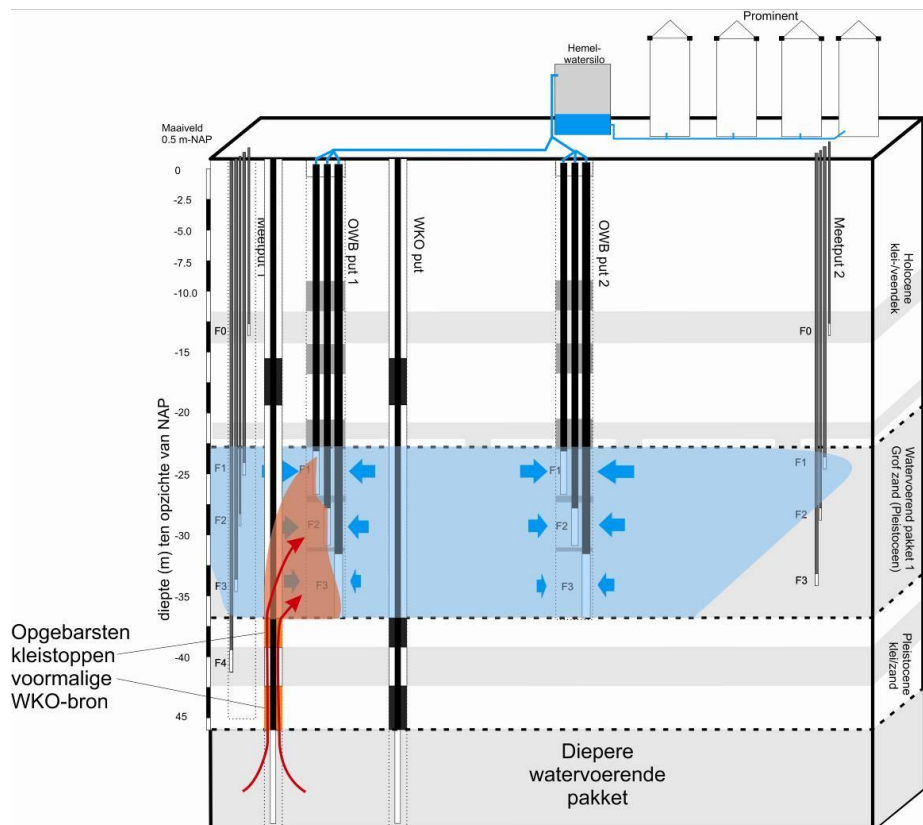
In [Figuur 16](#) zijn de resultaten voor Cl van de metingen en van het SEAWAT model weergegeven. De belangrijkste uitkomst van de vergelijking tussen beiden is dat de gemeten Cl al zeer snel zeer hoog opliep, met name bij AW1, waar dit door het model niet wordt voorspeld. Dit bevestigt dat opdroging (wel in het model) vermoedelijk niet de oorzaak is van deze vroegtijdige verzilting. Het proces dat de verzilting wel veroorzaakt zit niet in het model, ondanks dat deze gebaseerd is op uitvoerige karakterisatie van de ondergrond. Als oorzaak is gekeken naar de omgeving van AW1, waar de verzilting het duidelijkst en als eer-

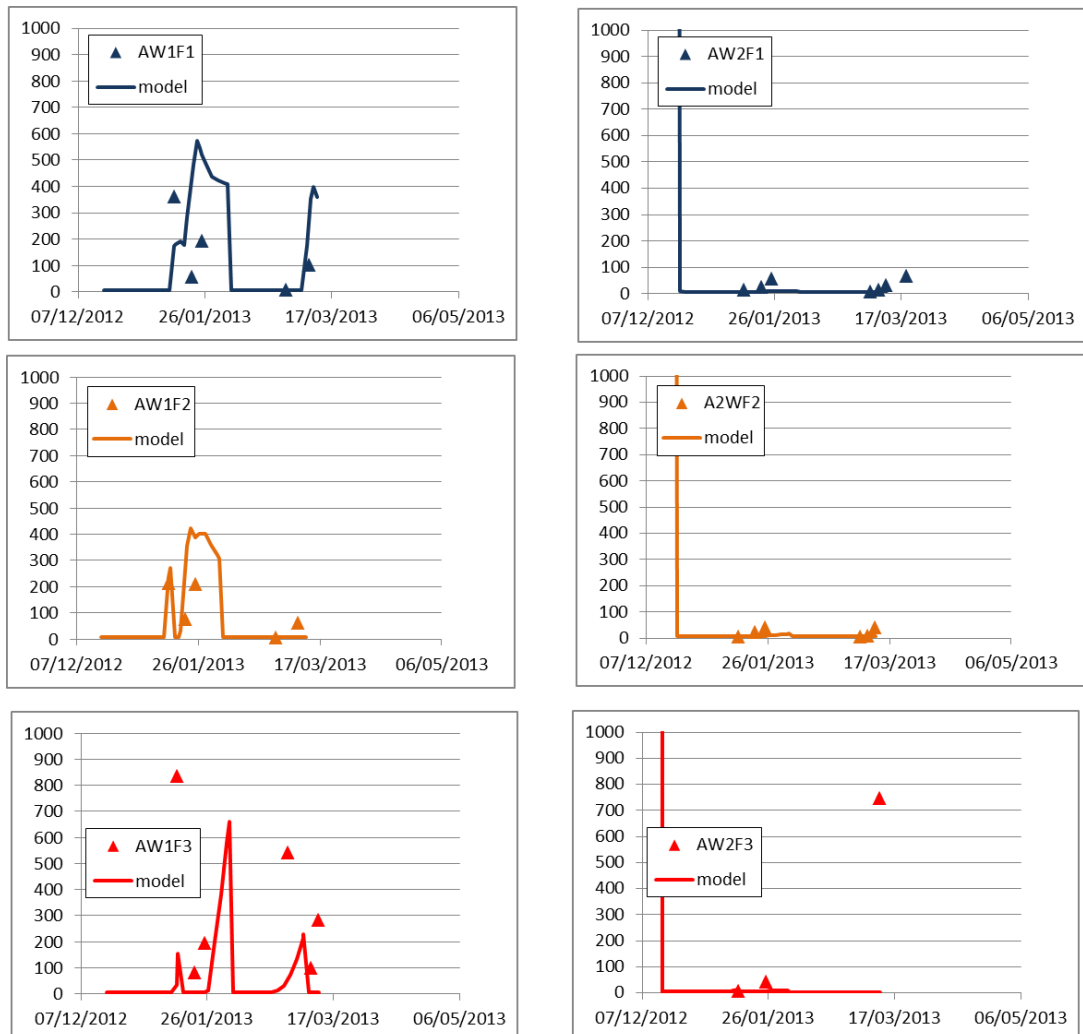
ste optrad. In de volgende sectie is gerekend aan de meest waarschijnlijke oorzaak.



Figuur 16: Resultaten van het SEAWAT model en de metingen voor de Cl-concentratie ter plaatse van de winputten van het OWB systeem.

Figuur 17: Kortsluiting vanuit het diepere watervoerende pakket via een oude opgebarsten put vormt waarschijnlijk de bron voor indringing van zoutwater in de zoete bel.



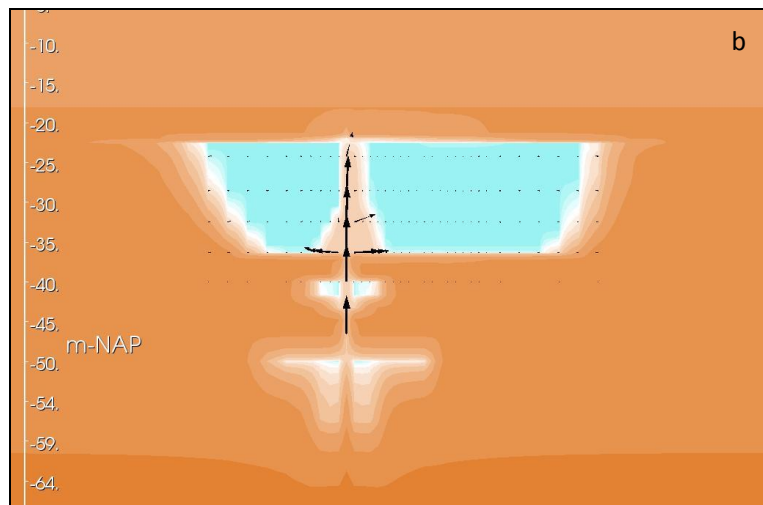
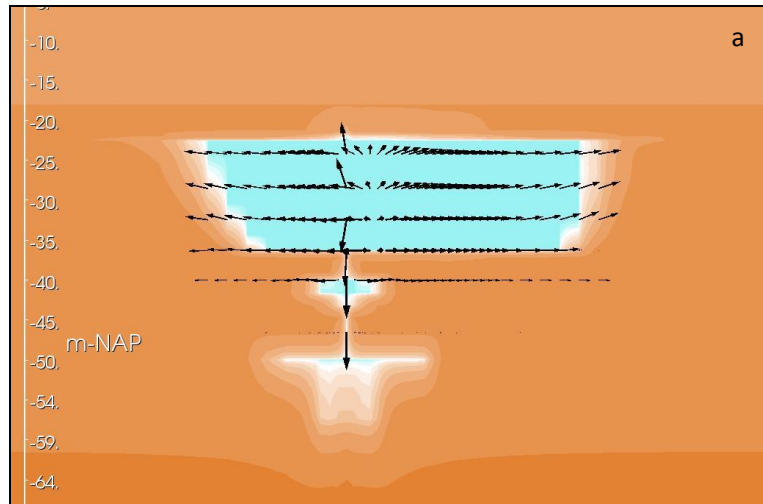


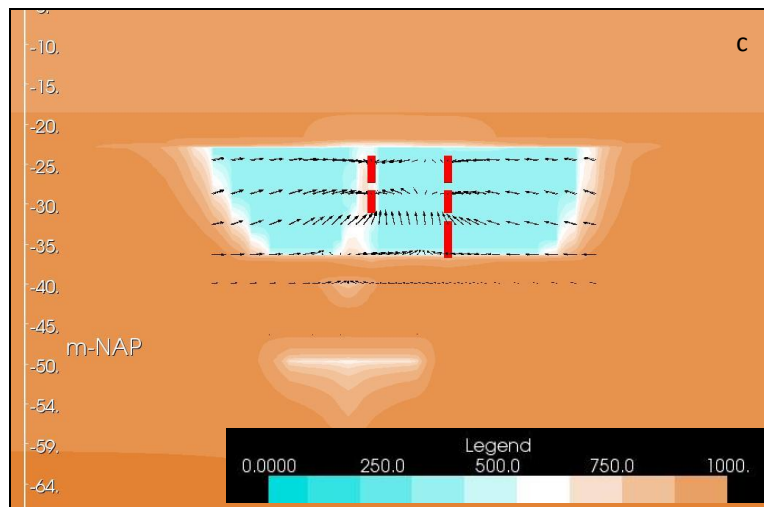
Figuur 18: Resultaten van het SEAWAT model en de metingen voor de Cl-concentratie ter plaatse van de winputten van het OWB systeem waarbij rekening is gehouden met een lekkage in de onderliggende kleilaag

De modelresultaten in [Figuur 16](#) laten zien dat de lekkage vanuit het diepere watervoerende pakket de vroegtijdige verzilting vermoedelijk heeft veroorzaakt. Een dergelijke lekkage zorgt ervoor dat eerst een (klein) deel van het zoete injectiewater naar het tweede watervoerende pakket wordt gedrukt. Door de beperkte druk van het (inmiddels) zoete water in het eerste watervoerende pakket tijdens opslag en met name terugwinning vindt er echter een veel sterker transport plaats van zoutwater vanuit het tweede watervoerende pakket. De sterk verhoogde SO_4 -concentraties (24 tot ruim 300 mg/l) bevestigen dit beeld: dit water kan alleen vanuit diepere pakketten toestromen. Aanrijking van SO_4 uit pyriet (toename <10 mg/l waargenomen in het geïnjecteerde water) wordt uitgesloten voor deze mate van verhoging. De lekkage van het zoute

water moet dus gezocht worden in de diepte, waarbij de voormalige WKO-bron het meest verdacht is. Hoe een dergelijke lekkage ondergronds er precies uitziet (afmetingen, doorlatendheid, aantal lekstromen) is echter niet duidelijk. Ook in de literatuur zijn hiervan geen voorbeelden bekend.

Figuur 19 a t/m c: Kortsluiting/lekkage naar het diepere watervoerende pakket zorgt eerst voor wegzijging zoetwater (a), maar vervolgens voor sterke opkegeling van zoutwater via het oude boorgat bij terugwinning (b). Hierdoor vindt verzilting plaats bij de winputten (c).





4.3 Simulatie zonder / na dichten lekkage voor volledig seizoen

Om met de huidige kennis van de ondergrond een beter gefundeerde uitspraak te doen over de potentie van ondergrondse waterberging op deze locatie is een drietal seizoenen gemodelleerd. Hierbij is aangenomen dat de kleilaag volledig gedicht is en dat het operationele schema zoals in Fase A (Zuurbier et al., 2012a) geldt:

- 120 dagen injectie (totaal 60.000 m³; was 120.000 m³ in Fase A);
- 60 dagen opslag;
- 120 dagen onttrekking.

Op 3 manieren is geprobeerd zo veel mogelijk zoetwater (i.e. concentratie Cl <0.5 mmol/l) te onttrekken. De debieten voor AW1 en AW2 zijn hierbij gelijk.

Tabel 5: Verwachte terugwinning in percentages van het jaarlijks geïnjecteerde water voor de ASR proef Westland bij verschillende strategieën. Aangegeven is voor ieder putfilter van de MPPWs hoe het totale debiet is verdeeld (in percentages volgens laag1/laag2/laag3), of wanneer hiermee een deel van het zoute water is afgevangen.

Strategie	Verpompings laag 1/2/3	Resultaat
Onderin injectie, bovenin herwinnen	In: 10/20/70% (jaar 1) In : 0/20/80% (jaar 2-3) Uit: 70/30/0% (jaar 1-3)	Jaar 1: 16% Jaar 2: 23% Jaar 3: 28%
+ retour tijdens winning	In: 10/20/70% (jaar 1) In : 0/20/80% (jaar 2) Uit: 70/30/0% (jaar 1-3) Retour: 1/6 v.d. onttrekking	Jaar 1: 19% Jaar 2: 26% Jaar 3: 31%
+ 'freshkeeper'	In: 10/20/70% (jaar 1) In : 0/20/80% (jaar 2) Uit: 70/30/0% (jaar 1-3) Afvang laag 3: 200 m ³ /d	Jaar 1: 36% Jaar 2: 42% Jaar 3: 46% (54%)

+ verdubbeling volume	In: 10/20/70% (jaar 1) In : 0/20/80% (jaar 2) Uit: 70/30/0% (jaar 1-3) Afvang laag 3: 200 m ³ /d	Jaar 1: 40% Jaar 2: 45% Jaar 3: 49%
-----------------------	--	---

Wat opvalt is dat de terugwinning van zoetwater moeizaam gaat, zeker wanneer geen gebruik wordt gemaakt van een 'Freshkeeper'. Met de Freshkeeper wordt onderliggende zout grondwater afgevangen, waarmee wordt voorkomen dat het zoutwater de zoete onttrekkingsput bereikt. Met wat optimalisatie tijdens de onttrekking in de derde cyclus is hiermee de zoetwaterwinning te vergroten tot 54%.

Uiteindelijk lijkt voor dit scenario (met liefst 60 dagen opslag) het rendement op te lopen van 30 naar ca. 60%. Ten opzichte van de verkenning (Zuurbier et al., 2012a) valt dit enigszins tegen. Dit wordt veroorzaakt door:

- Een kleiner volume van 60.000 m³ (in Fase A zijn scenario's doorgerekend van 120.000 m³/jaar injectie) wordt geïnjecteerd, omdat de verwachting is dat meer water niet beschikbaar is met de huidige opzet (combinatie van neerslag, watergebruik, bassingrootte);
- Een relatief dun en grof doelpakket, waardoor het effect van de MPPWs verder van de bronnen zeer bescheiden is.

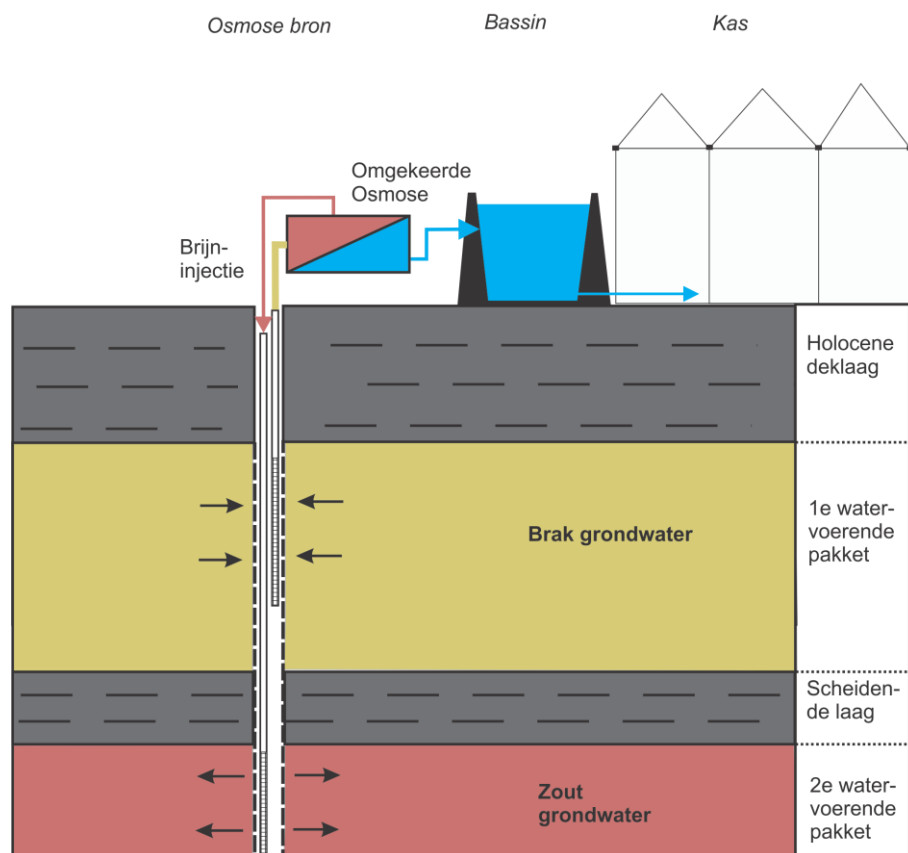
Wanneer het volume vergroot kan worden heeft dit een positief effect en kunnen enkele procenten extra worden teruggewonnen. Aanvullende scenario's kunnen verdere optimalisaties aan het licht brengen, maar kosten tijd in verband met de rekentijd van het SEAWAT model (ca. 1 dag).

5 Continuering terugwinning na verzilting via omgekeerde osmose

5.1 Aanpak

De terugwinning van ongemengd zoetwater voor direct gebruik werd gevolgd door de winning van zoetwater gemengd met zout grondwater. Dit water is daarna ontzilt via omgekeerde osmose. Doordat onvoldoende water geborgen was en lekkage plaatsvond vanuit een dieper pakket (sectie 4.2), moest eerder dan verwacht dit mengwater gewonnen en ontzilt worden. Het water hiervoor werd gewonnen op ca. 25 m afstand van de ASR bronnen (RO-wininput, [Figuur 7](#)). Hier bevond zich op dat moment (begin april 2013) de rand van de geïnjecteerde zoetwaterbel, met name in de bovenzijde van het pakket. Het voedingswater van de osmose en de concentraatstromen van de verschillende stappen zijn regelmatig bemonsterd. Hieruit is de recovery (aandeel van het opgepompte water dat werd omgezet naar zoetwater) van de omgekeerde osmose bepaald. Voordat het voedingswater naar de membranen wordt geleid vindt filtratie plaats via een kaarsenfilter. Hiermee worden vooral siltdeeltjes ($> 5 \mu\text{m}$) afgevangen

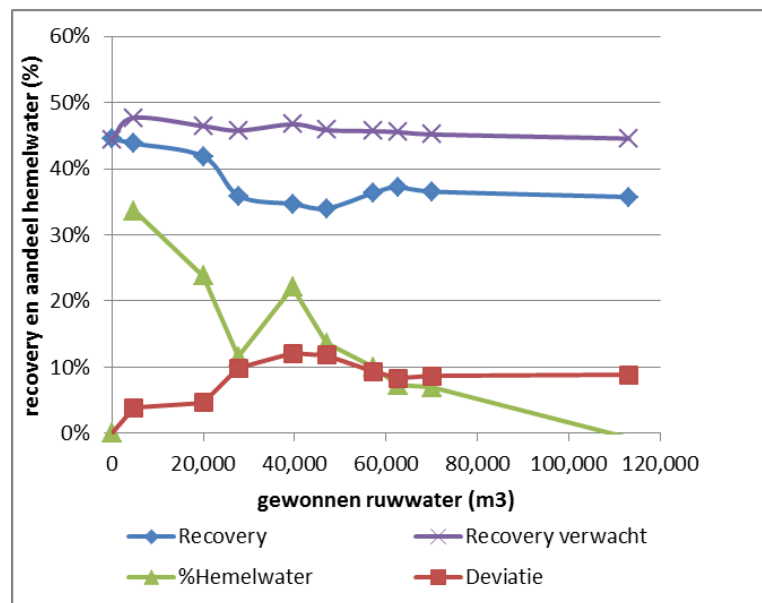
Figuur 20: Opzet van het systeem voor omgekeerde osmose, waarbij zoetwater wordt geproduceerd en een concentraat- (of brijn)stroom dieper wordt geïnjecteerd.



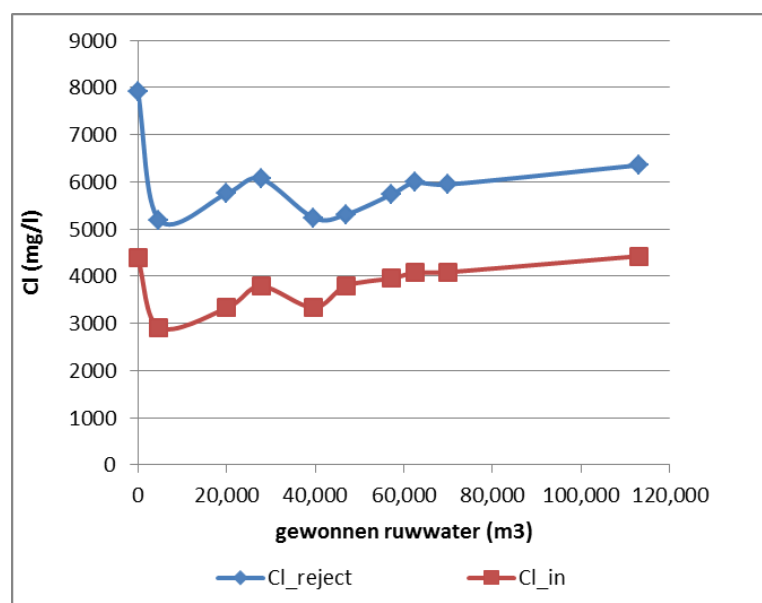
5.2 Resultaten toepassen omgekeerde osmose op mengwater

Frequente monitoring van het systeem voor omgekeerde osmose duidt erop dat de recovery van de membranen afnam (Figuur 21). Dit wil zeg dat een kleiner deel van het brakwater werd omgezet naar zoet gietwater, en dat de installatie langer moest draaien om eenzelfde volume zoetwater te produceren. Op basis van het voedingswater (steeds zoeter) werd juist een hogere recovery verwacht. De concentratie van het te injecteren concentraat (zoute reststroom) nam daardoor wel af (Figuur 22). Een behandeling van de membranen voor ijzereerslagen met citroenzuur (bij 47,000 m³, op 11 juni 2013) verbeterde de recovery weer enigszins, maar bracht deze niet op het oorspronkelijke niveau.

Figuur 21: Verwachte en behaalde efficiëntie van het omgekeerde osmosesysteem bij het winnen van hemelwater. Het aandeel hemelwater is tevens aangegeven.



Figuur 22: Chlorideconcentraties in het voedingswater (Cl_{in}) en het concentraat/brijn (Cl_{reject}).



5.3 Oorzaken voor membraanverstopping bij ontzilting mengwater

De teruglopende recovery lijkt te wijten aan verstopping van het membraan, getuige de toename in drukval (van 0.5 naar 1.7 bar) tussen voeding en uitstroom van de membranen. Gezien de verzadigingsindices voor verschillende mineralen van het gewonnen mengwater van brakgrondwater en hemelwater lag deze verstopping niet voor de hand. Omdat het gewonnen voedingswater na verblijf in de ondergrond duidelijk zuurstofloos is, kan ook biofouling en vorming van ijzerneerslagen door gelijktijdige winning van ijzer- en zuurstofrijk water via 1 lang filter worden uitgesloten.

Gebaseerd op veldwaarnemingen blijven twee opties voor de ontstane verstopping overeind:

1. Mobilisatie / dispersie van klei aanwezig in het pakket (ca. 1% van totale sediment) door verzoeting van het watervoerende pakket. Dit verschijnsel is eerder waargenomen (Konikow et al., 2001), met name bij kleien van het type montmorilloniet. Het treedt op wanneer een brak/zout watervoerend pakket doorspoeld wordt met (zeer) zoetwater en kleideeltjes water adsorberen, waarbij de electrostatische dubbellaag rondom de kleideeltjes toeneemt en de deeltjes vrij kunnen bewegen. Ook bentoniet, op de locatie met name gebruikt bij stabilisatie van de boorgaten van de WKO-bronnen, bestaat voornamelijk uit montmorilloniet;
2. Vorming van colloïdaal ijzer: doordat zuurstofhoudend water wordt geïnjecteerd en het oorspronkelijke water opgelost Fe(II) bevat (welke ook door pyrietoxidatie extra beschikbaar komt). Bij menging van beide watersoorten in de put maar ook daarbuiten (bijvoorbeeld in de mengzone tussen injectiewater en grondwater) ontstaan ijzerneerslagen, waarbij Fe(II) wordt geoxideerd tot Fe(III). Hierbij wordt zuurstof verbruikt. Deze ijzerneerslagen of ijzeroxides kunnen enige tijd in het water in colloïdale ('zwevende') toestand blijven. Dit colloïdale ijzer heeft een grotere diameter dan stoffen in oplossing, maar kunnen wel door het watervoerende pakket worden getransporteerd. Zo kunnen ze via de bron voor omgekeerde osmose de membranen bereiken, maar deze niet passeren. Een verstopping met dergelijke ijzerneerslagen zou kunnen verklaren waarom de behandeling met citroenzuur zorgde voor verbetering van de recovery.

Mobilisatie van deeltjes is waargenomen ter plaatse van MW1 en 2 bij het passeren van de het eerste zoete water (december 2012). Hierbij was het nauwelijks mogelijk om de grondwatermonsters te filtreren over 0.45 μm . Het osmosesysteem heeft echter een voorfilter met een ondergrens van 5 μm , onvoldoende om deze fijne deeltjes te verwijderen. Het is dus goed mogelijk dat de-

ze deeltjes het membraan bereikt hebben en daar vastgelegd worden en voor verstopping zorgen. De recovery neemt in dat geval af.

5.4 Mogelijke oplossingen voor membraanverstopping bij terugwinning van ondergronds opgeslagen hemelwater

Verstopping van de membranen leidt tot afname van de recovery van de osmose-installatie, waardoor productie achterblijft en de levensduur van de membranen wordt verkort. Om dit te voorkomen kan worden gedacht aan:

- Zeer fijne voorfiltratie, bijvoorbeeld Ultrafiltratie (UF). Gezien de kosten (orde van grootte: kosten voor omgekeerde osmose zelf), is dit geen interessant alternatief om toe te voegen aan de bestaande installatie. Indien deze bij nieuwbouw tegelijkertijd met de osmose-installatie gerealiseerd wordt, kan dit een interessant alternatief zijn;
- Regeneratie van membranen: vervuiling van membranen kan via verschillende technieken worden verwijderd. Ook voor verstopping met klei-/colloïdale delen bestaan regeneratietechnieken. Belangrijke onderzoeksvraag hierbij is of de membranen hiermee telkens weer volledig terug op capaciteit gebracht kunnen worden. Ook zijn uiteraard de (terugkerende) kosten van belang;
- Voorkomen dat ongemengd hemelwater richting onttrekkingsbron voor osmose stroomt, bijvoorbeeld door alleen onder de geïnjecteerde zoetwaterbel het brakke water te winnen. Het ongemengde hemelwater (waarin de gemobiliseerde kleideeltjes en colloïdaal ijzer kan worden verwacht) blijft dan bovenin het pakket aanwezig en kan worden gewonnen middels de ASR bronnen (=‘Freshkeeper’ concept);
- Vergroten afstand tussen injectie zoet hemelwater en onttrekking brak grondwater zodat gemobiliseerde deeltjes worden ingevangen in het pakket. Doordat de verblijftijd in de ondergrond hiermee wordt vergroot is de verwachting dat ijzer volledig neerslaat en achterblijft in het pakket, en niet in colloïdale vorm voor verstopping kan zorgen.

5.5 Aanbevelingen rondom membraanverstopping

Om de oorzaak van membraanverstopping bij winning via omgekeerde osmose te bepalen wordt navolgende aanbevolen:

- Analyse op afgefilterd materiaal van grondwatermonsters genomen tijdens de injectiefase (december 2012 en seizoen 2013/2014). Bepalen samenstelling zwevende delen;
- Regeneratie membraan en analyse van veranderingen in recovery hierop volgend;
- Autopsie van (verstopte) membranen zodra deze in de toekomst worden vervangen.

6 Conclusie en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Op basis van een uitvoerige haalbaarheidsstudie (KWR2012.003) is gebleken dat het ondergronds opslaan van tijdelijke zoetwateroverschotten voor later gebruik (ASR) in zoute grondwatersystemen (zoals in het Westland) gekenmerkt wordt door lage rendementen. Dit betekent dat slechts een beperkt deel van het geïnjecteerde zoetwater kan worden herwonnen. Uit de studie blijkt echter dat door aanpassingen in het putontwerp (gebruikt van MPPWs) dit rendement sterk kan worden verhoogd. Dit leidt dan ook tot een ASR-systeem dat gietwater met een concurrerende kostprijs kan leveren. Daarnaast blijkt deze techniek op grote schaal juridisch / beleidsmatig haalbaar.

In 2012 is in 's Gravenzande (Westland) een aquifer storage and recovery (ASR) systeem aangelegd om de theoretische meerwaarde van MPPWs in dit zoute gebied te valoriseren. Bij dit ASR-systeem zijn multiple partially penetrating wells (MPPW) gebruikt, waarmee het water op verschillende diepten in het wattervoerende pakket kan worden geïnfiltreerd en worden onttrokken.

1. Installatie functioneert conform verwachting

Eind 2012 is de installatie in bedrijf genomen, waarna gedurende twee maanden een klein volume (ruim 15.000 m³) zoet hemelwater is verzameld vanaf vier bedrijven en geïnjecteerd. Daarna is het opgeslagen water teruggewonnen voor direct gebruik en vervolgens voor gebruik na ontziltiging. Geconcludeerd wordt dat de verschillende technische onderdelen van het geavanceerde ASR-systeem in de praktijk goed functioneren.

2. Terugwinrendement lager dan verwacht

In het eerste seizoen was een kleiner deel van teruggewonnen zoetwater direct inzetbaar voor gebruik, ondanks dat laterale afstroming niet werd waargenomen. Belangrijke redenen hiervoor zijn geweest:

- Er is in het opstartseizoen minder water geïnfiltreerd
Geraamd was om jaarlijks ca. 55.000 m³ te infiltreren. Uiteindelijk is tot half maart slechts 15.518 m³ geïnfiltreerd, mede door de droge periode vanaf januari. Een relatief groot deel hiervan ging 'verloren' door menging met brak/zout grondwater. Optimaal was geweest als het gehele neerslagoverschot in de periode van ongeveer september was geïnfiltreerd. Het contractueel rondkomen van het project, het plaatsen van de installatie (in een zeer natte tijd) en het verkrijgen van de vergunning heeft echter veel tijd gekost. Uiteindelijk is daardoor pas half december 2012 begonnen

met infiltratie, met hulp van een gedoogbeschikking van het waterschap;

- Kortsluitstroming zoutwater door de onderliggende kleilaag langs oude bron
Een andere belangrijke reden voor een lagere terugwinrendement is de lekkage van zouter water door de onderliggende kleilaag. Deze lekkage is ontstaan langs een opgebarsten, voormalige bron voor warmte-koude opslag (WKO) nabij het systeem voor ondergrondse waterberging. Er is dus sprake van 'kortsluiting' tussen het eerste en tweede watervoerende pakket.

In het seizoen 2012/2013 is uiteindelijk minder dan 19.8% van het geïnjecteerde hemelwater als kwalitatief direct geschikt gietwater teruggewonnen. Dit water is direct verpompt naar de bassins. De rest van het geïnjecteerde water is wel teruggewonnen, maar na ontzilting via het osmosesysteem geschikt gemaakt als gietwater.

Het verschijnen van zout vanuit diepere pakketten via de lekkage in de onderliggende kleilaag maakte het ook zeer lastig om het grondwatermodel goed te kalibreren. Het is immers onduidelijk hoe de lekkage op 40 à 50 m diepte er precies uitziet.

Wel is duidelijk dat het toepassen van een 'Freshkeeper', waarbij de onderste filters worden ingezet om onderliggend zoutwater af te vangen, uiteindelijk tot de hoogste rendementen zal leiden (richting 60% terugwinning per jaar). Daarnaast is een aanpak bedacht om de lekkage van zoutwater tegen te gaan via injectie van beton op een diepte van 40 tot 50 m beneden maaiveld. Deze winter moet blijken hoe goed deze afdichting functioneert.

3. Terugwinnen van zoet/zout water via de omgekeerde osmose niet zonder risico

Terugwinning via omgekeerde osmose verliep moeilijker doordat ontzilting van het gemengde hemelwater en zoute grondwater sneller tot membraanverstopping leidde. Mobilisatie van kleideeltjes en/of de vorming van ijzercolloïden in het grondwater lijken hiervoor verantwoordelijk. Gebruik van voorzuivering voorafgaand aan osmose en/of regelmatige behandeling van de membranen kan hiertegen soelaas bieden, maar vereisen een nadere haalbaarheidsanalyse (met name kostentechnisch). Een strategische plaatsing van de onttrekkingsbron voor het te ontzilten water is daarom vermoedelijk een betere oplossingsrichting. Het is nog niet bekend hoe lang de mobilisatie van klei en/of vorming van ijzercolloïden in het pakket überhaupt een rol blijven spelen.

6.2 Aanbevelingen en handelingsperspectieven

De veldproef ondergrondse waterberging Westland toont aan dat er nog een weg te gaan is voordat ASR in een zoute omgeving met zekerheid kan worden toegepast. Wel heeft de veldproef tot nu toe al veel nieuwe inzichten opgeleverd en relevante vervolgvragen opgeroepen. Belangrijkste zaak is nu om de ondervonden problemen om te buigen naar oplossingen. Hiervoor is handelingsperspectief, maar de effectiviteit van de te nemen maatregelen is nog niet gekwantificeerd. De belangrijkste richtingen hierbij zijn:

1. Het afdichten van of omgaan met lekkage in onderliggende kleilagen, die door het veelvuldige gebruik van de ondergrond in het Westland vermoedelijk op meerdere plaatsen aanwezig zullen zijn. Een eerste poging tot afdichting middels een innovatieve opzet voor injectie van beton op grote diepte is ter plaatse van de proef Westland al ondernomen in augustus 2013. Indien deze afdichting succesvol blijkt, biedt dit ook perspectief voor andere locaties waar kortsluitstroming tot problemen leidt;
2. Het verder optimaliseren van de terugwinning van zoetwater uit het dunne, zoute pakket. Denk hierbij vooral aan de toevoeging van een Freshkeeper;
3. Het gebruiken van opgeslagen hemelwater (in lichte mate gemengd met zout grondwater) voor ontzilting via omgekeerde osmose, zonder dat dit leidt tot membraanverstopping. Voordelen hier moeten zijn: een lager energieverbruik, minder concentraat/brijn en/of lagere concentraties in het concentraat, daardoor ook minder verzilting. Dit vindt plaats binnen het EU-project DESSIN (2014-2018);
4. Het inzetten van aanvullende (goedkope) zoetwaterbronnen om het volume van de zoetwaterbel (en daarmee het beschikbare zoetwater in de zomer) te vergroten. Immers, het hemelwateraanbod is voor teelten met een grote watervraag onvoldoende, zeker wanneer een deel hiervan in de ondergrond verloren gaat. Sinds het opstarten van de proef in 's Gravenzande zijn veel initiatieven gestart en/of versneld door de mogelijkheid van ondergrondse berging. Denk hierbij aan gezuiverd effluent ('Delft Blue Water') en het gebruik van dakwater van industrie-/veilingterreinen (o.a. het ABC-terrein, Glasparel+)

Het verder ontwikkelen en uitzoeken van bovenstaande punten zal tijd kosten, maar brengt een robuuste, hoogwaardige en duurzame zoetwatervoorziening een grote stap dichterbij. Het onderzoeksconsortium heeft dan ook de ambitie om dit de komende jaren verder uit te werken. Hiervoor is het zaak om de proefopstelling de komende jaren in bedrijf te houden en stap voor stap te op-

timaliseren. De eerste drie punten zullen in de praktijk als eerste aandacht verdienen. Het vinden van aanvullende zoetwateroverschotten voor vergroting van de zoetwaterbel kan op de lange termijn echter van groot belang zijn als beoogd wordt een watervoorziening te realiseren zonder aanvullende ontzilting.

7 Tot slot

De proef ‘ondergrondse waterberging Westland’ heeft tot meer resultaten geleid dan beschreven in dit rapport. Het concept van ondergronds bergen is bij veel gebruikers van zoetwater (land- en tuinbouw, industrie, drinkwater) nog onvoldoende bekend. De aandacht gegenereerd via krantenartikelen en vakbladartikelen rondom deze proef en andere gerelateerde proeven gericht op ondergronds bergen in de Zuidwestelijke Delta (zie: www.go-fresh.info) hebben ertoe geleid dat (mogelijke) gebruikers nu meer kennis hebben en antwoord op vragen als: Hoe ziet het systeem eruit? hoe lopen de waterstromen? waarom kan het op de ene locatie zonder problemen, maar moeten we elders deze proeven opstarten?

Dergelijke basiskennis over ondergronds bergen is ook overgebracht via bijeenkomsten op de proeflocatie en elders, bijvoorbeeld tijdens de officiële opening en vervolgens met specifieke groepen (waterschap, statenleden, gemeenten, etc.). Het gevolg is dat de ondergrond beter in beeld is wanneer nagedacht wordt over het inrichten van (met name glastuinbouw)gebieden. Lokale, tijdelijke zoetwateroverschotten vanaf bijvoorbeeld nabijgelegen daken, oppervlaktewater of van gezuiverd afvalwater worden interessant als de ondergrond een goedkoper opslagmedium biedt. De voordelen zoals genoemd in de inleiding blijven met de uitkomsten van de proef ‘ondergrondse waterberging Westland’ overeind, terwijl de nadruk op kennis rondom de terugwinbaarheid verder is vergroot.

Rondom de terugwinbaarheid wordt in het Westland duidelijk een grens opgezocht. De ondergrond is in principe niet ideaal, hetgeen van tevoren bekend was (Zuurbier et al., 2013). Goed en matig geschikte gebieden voor ondergrondse berging waren in de regio voorhanden maar kenden daardoor echter respectievelijk geen noodzaak tot onderzoek (Bleiswijk) of werden al onderzocht (Nootdorp). De Westlandse ondergrond blijkt ook niet totaal ongeschikt, hetgeen duidelijk wordt uit het feit dat een aanzienlijk deel van het zoete water toch terug te winnen is. De vraag of dit voldoende is in droge zomers hangt af van zowel de uiteindelijke, maximale terugwinbaarheid, als het aanbod van (allerlei) tijdelijke zoetwateroverschotten. Hoe de balans tussen beiden uitkomt zal de komende jaren moeten blijken.

Als laatste kan de vraag worden gesteld hoe er überhaupt met zoetwateroverschotten moet worden omgegaan. In een situatie waarin de ondergrond meer en meer verzilt kan het, los van de directe terugwinbaarheid, verstandiger zijn om zoetwateroverschotten op enige diepte te infiltreren dan om deze zo snel mogelijk oppervlakkig af te voeren en uit te malen.

8 Literatuurverwijzingen

- Agrimaco, 2010. Alternatieven voor brijn in Zuid-Holland, kosten en milieueffecten, Agrimaco.
- Bear, J., 1972. Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier, New York, U.S.A.
- Busschers, F.S. et al., 2005. Sedimentary architecture and optical dating of Middle and Late Pleistocene Rhine-Meuse deposits – fluvial response to climate change, sea-level fluctuation and glaciation. *Netherlands Journal of Geosciences*, 84(1): 25-41.
- De Jong, V., 2013. Targeting the Aquifer for Aquifer Storage and Recovery (ASR) - Analyses (sedimentological, chemical and physical) and correlation of an aquifer in South-Holland, the Netherlands., Vrije Universiteit, Amsterdam.
- Faneca Sánchez, M., Raat, K.J., Klein, J., Paalman, M. and Oude Essink, G., 2012. Effecten van brijnlozing op de grondwaterkwaliteit in het Westland.
- Harbough, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C. and McDonald, M.G., 2000. Modflow-2000, the U.S. Geological Survey modular groundwater model - User guide to modularization concepts and the Groundwater Flow Process. Open-File Report 00-92, U.S. Geological Survey.
- Konert, M. and Vandenberghe, J., 1997. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology*, 44(3): 523-535.
- Konikow, L.F., August, L.L. and Voss, C.I., 2001. Effects of Clay Dispersion on Aquifer Storage and Recovery in Coastal Aquifers. *Transport in Porous Media*, 43(1): 45-64.
- Langevin, C.D., Thorne, D.T., Dausman, A.M., Sukop, M.C. and Guo, W., 2007. SEAWAT version 4: a computer program for simulation of multi-species solute and heat transport. In: U.S.G.S. (Editor), *Techniques and Methods*, book 6, Reston, Virginia, USA.
- Pyne, R.D.G., 2005. Aquifer Storage Recovery - A guide to Groundwater Recharge Through Wells. ASR Systems LLC, Gainesville, Florida, USA, 608 pp.
- Stuyfzand, P.J., 1993. Hydrochemistry and Hydrology of the Coastal Dune area of the Western Netherlands, Vrije Universiteit, Amsterdam, The Netherlands, 366 pp.

- Stuyfzand, P.J. and Doomen, A., 2005. The dutch experience with MARS (Managed Aquifer Recharge and subsurface Storage): a review of facilities, techniques and tools. Kiwa Report 05.001, Nieuwegein.
- Stuyfzand, P.J., Nienhuis, P., Antoniou, E.A. and Zuurbier, K.G., 2012. Haalbaarheid van ondergrondse berging via A(S/T)R in Hollands kustduinen. 2012.082, KWR.
- Ward, J.D., Simmons, C.T., Dillon, P.J. and Pavelic, P., 2009. Integrated assessment of lateral flow, density effects and dispersion in aquifer storage and recovery. *Journal of Hydrology*, 370(1-4): 83-99.
- Zheng, C. and Wang, P.P., 1999. MT3DMS: a modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwatersystems; Documentation and user's guide. In: U.S. Army Corps of Engineers (Editor), Tuscaloosa, Alabama.
- Zuid-Holland, P., 2009. Provinciale waterplannen 2010-2015, Provincie Zuid-Holland.
- Zuurbier, K., Bakker, M., Zaadnoordijk, W. and Stuyfzand, P., 2013. Identification of potential sites for aquifer storage and recovery (ASR) in coastal areas using ASR performance estimation methods. *Hydrogeology Journal*, 21(6): 1373-1383.
- Zuurbier, K.G., Paalman, M. and Zwinkels, E., 2012. Haalbaarheid Ondergrondse Waterberging Glastuinbouw Westland. KWR 2012.003, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- Zuurbier, K.G., Zaadnoordijk, W.J. and Stuyfzand, P.J., 2014. How multiple partially penetrating wells improve the freshwater recovery of coastal aquifer storage and recovery (ASR) systems: A field and modeling study. *Journal of Hydrology*, 509(0): 430-441.

9 Begeleidingscommissie Veldproef ASR Westland

- Guus Meis (LTO-Noord Glaskracht)
- Rob Ruijtenberg (STOWA)
- Carl Pauwe (HH Delfland, Waterbuffer)
- Robert Kielstra (Agriport A7, ECW)
- Hester van Gent (PT)
- Kees van Herk (voormalig B-E de Lier)



Ontwikkelen van wetenschappelijke en toegepaste kennis voor een
klimaatbestendige inrichting van Nederland en het creëren van een
duurzame kennisinfrastructuur voor het omgaan met klimaatverandering

Contactinformatie

Programmabureau Kennis voor Klimaat

Secretariaat:

p/a Universiteit Utrecht

Postbus 85337

3508 AH Utrecht

T +31 88 335 7881

E office@kennisvoorklimaat.nl

Communicatie:

p/a Alterra, Wageningen UR

Postbus 47

6700 AA Wageningen

T +31 317 48 6540

E info@kennisvoorklimaat.nl

www.kennisvoorklimaat.nl

