



Experiment / pilot / Implementatie / in gebruik

> Ondergrondse waterberging

IDEE/VERKENNING



PROOF OF CONCEPT



EXPERIMENT/PILOT



IMPLEMENTATIE/IN GEBRUIK

INHOUD

INLEIDING
GERELATEERDE ONDERWERPEN EN DELTAFACTS
STRATEGIE: VASTHOUDEN, BERGEN, GEBRUIKEN!
SCHEMATISCHE WEERGAVE
TECHNISCHE KENMERKEN
GOVERNANCE
KOSTEN EN BATEN
PRAKTIJKERVARING EN LOPEND ONDERZOEK
KENNISLEEMTES
LITERATUUR/ LINKS
ERVARINGEN

INLEIDING

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., 2012a):



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.

De techniek wordt gebruikt wanneer het oorspronkelijke grondwater een ontoereikende kwaliteit heeft (doorgaans te zout), of in gebieden waar de kwaliteit al voldoet, maar waar door netto onttrekking schade kan ontstaan door verdroging. Toepassing in Nederland vindt met name plaats bij de drinkwaterbedrijven (Stuyfzand, 2005). Daarnaast wordt de techniek steeds meer toegepast in de glastuinbouw (Zuid-Holland, 2009), waar grote hoeveelheden regenwater met het kasdek worden opgevangen; een ideaal en goedkoop uitgangspunt voor irrigatie.

GERELATEERDE ONDERWERPEN EN DELTAFACTS

Trefwoorden: zoetwatervoorziening, verzilting
 Deltafacts: Regenwaterlenzen, Bodem als buffer, Waterreservoirs op bedrijfsniveau, Brakke kwel

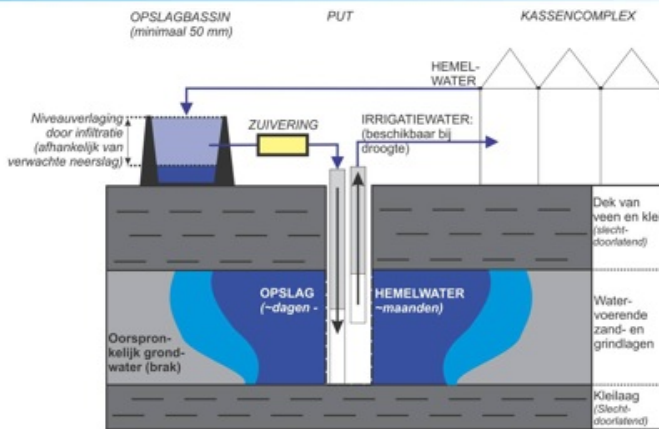
STRATEGIE: VASTHOUDEN, BERGEN, GEBRUIKEN!

Ondergrondse berging heeft als hoofddoel het overbruggen van perioden tussen wateraanbod en watervraag. Zo kan het

de zoetwaterbeschikbaarheid in perioden van droogte vergroten. In de land- en tuinbouw kan hierdoor schade in droge perioden voorkomen worden door beregening met zoetwater. Kortom: door ondergrondse waterberging kan het jaarlijkse overschot aan zoetwater effectief worden ingezet.

Aan de andere kant kan ondergrondse waterberging bijdragen aan waterveiligheid. Zo kan wateroverlast in stedelijke gebieden door intense neerslag worden voorkomen door het creëren van bergingsruimte door peilverlaging in bovengrondse bassins. Neerslag kan hierdoor bovengronds beter worden opgevangen en langzaam worden geïnfilteerd, waarmee dit zoete water ook beschikbaar blijft als zoetwaterbron in droge perioden.

SCHEMATISCHE WEERGAVE



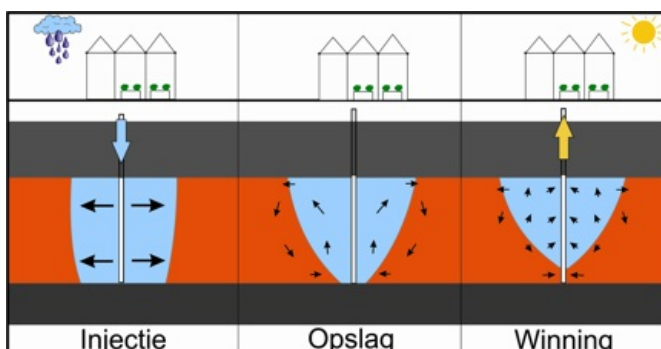
Figuur 1 Schematische weergave van ondergrondse waterberging ('ASR') ten behoeve van gietwatervoorziening in de glastuinbouw.

TECHNISCHE KENMERKEN

Opgevangen hemelwater, ingenomen oppervlaktewater en/of gezuiverd afvalwater wordt in perioden van overvloed geïnjecteerd in watervoerende pakketten. In het geval van hemel- en/of oppervlaktewater wordt dit water aanvullend gezuiverd (bijvoorbeeld door een zandfilter). Hierbij wordt met name zwevend stof verwijderd om zo putverstopping te voorkomen. Indien vraag en aanbod van zoetwater in evenwicht zijn, wordt er geen water geïnjecteerd of onttrokken en wordt gesproken van een 'opslagfase'. Is er sprake van een zoetwatertekort, dan wordt via putten het zoete water weer onttrokken voor gebruik als drink- of irrigatiewater. Dit proces is volledig te automatiseren, hetgeen in de glastuinbouw bijvoorbeeld wordt gedaan door het meten van het waterniveau in de hemelwateropslag: overschrijdt dit door neerslag een maximumniveau dan start infiltratie. Bij overschrijding van een minimumniveau (door watergift in de kas) zal het systeem juist water gaan onttrekken.

Bij ondergrondse waterberging is het terugwinrendement (deel van het geïnjecteerde water dat kan worden teruggewonnen met acceptabele kwaliteit) uiteraard van belang. Vooral in brakke of zoute pakketten kan het terugwinrendement tegenvallen. Hieraan liggen twee oorzaken ten grondslag:

1. Het geïnjecteerde zoete water stroomt in een gebied met aanzienlijke achtergrondstroming horizontaal af, waardoor al snel zouter (ongeschikt) water van stroomopwaartse zijde wordt gewonnen;
2. Het geïnjecteerde zoete water drijft opwaarts in het zoute water, waardoor aan de onderzijde van de put(ten) zout water wordt teruggewonnen. Dit maakt het terug te winnen mengwater ongeschikt.



Figuur 2: Injectie, opslag en winning van zoetwater in een brakke of zoute aquifer, waarbij verzilting aan de onderzijde van de put het winwater uiteindelijk ongeschikt maakt.

Het terugwinrendement door bovenstaande aspecten (opdrijving/afdriving) hangt af van de locatie. Belangrijke

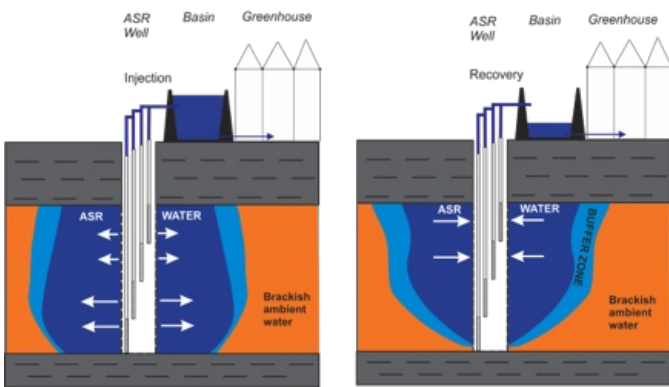
controlerende parameters zijn de dikte en doorlatendheid ('grofheid') van het pakket, het zoutgehalte van het oorspronkelijke grondwater, de snelheid van eventuele achtergrondstroming en de afsluiting van het doelpakket door klei-/veenlagen aan boven- en onderzijde.

Daarnaast is ook schaalgrootte van belang: wanneer een groot volume geïnjecteerd wordt en een grote bel wordt gevormd, zal ook het terugwinrendement toenemen. De grootte van de zoetwaterbel is dus limiterend voor het succes in gebieden met brak of zout grondwater. Aan de hand van de minimale schaalgrootte voor succesvolle ondergrondse waterberging is dan ook af te lezen hoe geschikt een bepaalde regio is voor deze techniek. In de Greenport Oostland-Westland, bijvoorbeeld, blijken kleinschalige systemen vooral geschikt in het binnenlandse Oostland, terwijl opschaling vereist is in de kustregio van het Westland (Zuurbier et al., in press).



Figuur 3: Vereiste injectiedebiet voor succesvolle ondergrondse waterberging in de Greenport Oostland-Westland (Zuurbier et al., in press).

Naast schaalvergroting blijkt uit recent onderzoek dat ook de putconfiguratie het terugwinrendement kan vergroten. Zo blijkt het gebruik van meerdere onvolkomen putten boven elkaar in 1 boorgat voordelig, omdat hiermee het zoete water preferent onderin het pakket ingebracht kan worden, terwijl de terugwinning beperkt kan worden tot de bovenzijde van de aquifer. Het gevolg is dat verzilting van de winputten wordt uitgesteld en het terugwinrendement aanzienlijk wordt verhoogd (Zuurbier and Stuyfzand, 2012b; Zuurbier et al., submitted).



Figuur 4: Gebruik van meerdere onvolkomen putten in 1 boorgat voor injectie en terugwinning van zoetwater in brakke pakketten (Zuurbier and Stuyfzand, 2012b)

Verdere optimalisaties zijn denkbaar wanneer ook het opkegelende brakwater wordt onttrokken, zodat dit de winputten niet bereikt (interceptieput of 'zoethouderconcept'). Omdat dit water ongeschikt is voor gebruik, dient dit te worden geloosd (indien mogelijk), ontzilt of elders weer in het grondwater te worden geïnjecteerd (bijvoorbeeld Van der Valk, 2011; Van Ginkel, 2007; Vink et al., 2010).

GOVERNANCE

In het huidige grondwaterbeheer zijn de Waterschappen bevoegd gezag voor ondergrondse waterberging ten behoeve van beregening, terwijl de Provincies bevoegd gezag zijn voor drinkwatertoepassingen.

Op basis van advies van de Technisch Commissie Bodem (Technische Commissie Bodem, 2009) en het beleid van de provincie Zuid-Holland en het Hoogheemraadschap van Delfland kan met betrekking tot ondergrondse infiltratie en onttrekking van hemelwater het volgende worden geconcludeerd (Zuurbier et al., 2012a):

- Het toepassen van ondergrondse infiltratie en onttrekking is onder bepaalde voorwaarden beleidsmatig goed mogelijk. In de praktijk blijkt dit ook het geval daar er in Nederland voor verschillende locaties vergunningen zijn afgegeven (bv. locaties in het glastuinbouwgebied van het Oostland, Agriport A7 etc.);
- Het TCB advies is terughoudend ten aanzien van infiltratie van hemelwater. Belangrijke overweging hierbij is de zorg dat verontreinigingen via het hemelwater in het diepere grondwater terecht kunnen komen. Ook het beleid van het Hoogheemraadschap van Delfland geeft aan dat er geen negatieve effecten mogen optreden. Voor de duurzaamheid van een infiltratiesysteem is het ook belangrijk dat het ingebrachte water zo schoon mogelijk is. Vooral zwevende stof deeltjes, waaraan zich ook het merendeel van de verontreinigingen hecht, dienen voordat injectie plaatsvindt verwijderd te worden. Daarmee voorkomt men ook putverstopping.
- Op basis van de gebiedsgerichte berekeningen, welke uitgevoerd moeten worden bij de vergunningaanvraag, zal duidelijk worden of er negatieve effecten te verwachten zijn op de gebruiksfuncties en/of andere systemen. Hoogheemraadschap Delfland heeft hiertoe een checklist opgesteld. In de praktijk blijkt dat er weinig negatieve effecten

optreden bij de al vergunde systemen.

Tot op heden wordt het gebruik van de ondergrond slechts in beperkte mate gestuurd/gereguleerd en concurreert ondergrondse waterberging met andere gebruiksmogelijkheden van aquifers, zoals warmte- koude opslag (WKO) en onttrekkingen en injecties ten behoeve van omgekeerde osmose-installaties. Gezien de voordelen, maar ook specifieke eisen aan de aquifer van ondergrondse waterberging (welke minder gelden voor de overige toepassingen), is het aan te bevelen geschikte aquifers preferent te gebruiken voor ondergrondse waterberging in gebieden met een grote zoetwatervraag (zoals glastuinbouwgebieden).

Daarnaast dient de kwaliteit van het injectiewater dusdanig te zijn dat duurzaam gebruik van de ondergrond gegarandeerd is. Dit kan worden bereikt door de juiste bereiding van het injectiewater, bijvoorbeeld door scheiding van de verschillende waterstromen in de glastuinbouw (waarbij alleen puur hemelwater overblijft voor injectie) en selectieve inname van zoet oppervlaktewater (buiten groei-/spuitseizoen). Indien nodig kan aanvullende zuivering plaatsvinden. De vraag is echter of de kostprijs is zo'n geval concurrerend blijft ten opzichte van andere manieren van zoetwatervoorziening. Monitoring is noodzakelijk om te kunnen handhaven op de kwaliteit van het injectiewater.

KOSTEN EN BATEN

Recent zijn de kosten van water vanuit ondergrondse waterberging berekend in twee studies. Allereerst is gekeken naar de kostprijs per m^3 en baten bij opslag van hemelwater in de glastuinbouw (Zuurbier et al., 2012a), in geval van een eenvoudig systeem op geschikte locatie (lage kostprijs, reeds bewezen technieken), en een geclusterd systeem met een geoptimaliseerd putontwerp op een minder geschikte locatie met een lager rendement (hogere kostprijs, techniek nog in ontwikkeling). Uit deze studie kwam naar voren:

- Kostprijs van ondergronds opgeslagen water komt uit op 0,20 tot 0,70 euro/ m^3 en is gunstig ten opzichte van drinkwater ($\sim 1,20$ euro/ m^3) en water verkregen door lokale ontzilting (omgekeerde osmose, 0,60 tot 1,00 euro/ m^3);
- Kwaliteit is beter dan drinkwater, oppervlaktewater, bassinwater;
- Er zijn geen kosten voor afvoer van afvalstromen.

Voor ondergrondse opslag van zoet oppervlaktewater in Zeeland middels de zogenaamde 'Freshmaker' is een kostprijs van 0,35 euro/ m^3 berekend (Vink et al., 2010). Dit is goedkoper dan watervoorziening via de lokale landbouwwaterleiding van Evides (ca. 0,60 euro/ m^3). Deze techniek staat echter nog in de kinderschoenen (zie 'Praktijkervaring en lopend onderzoek').

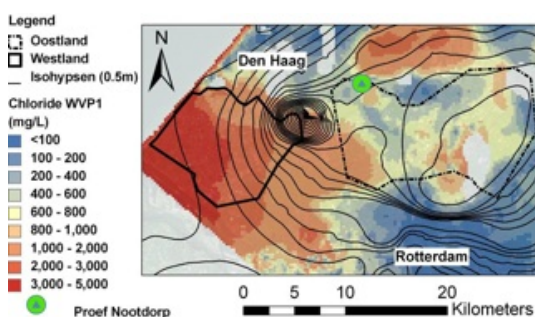
PRAKTIJKERVARING EN LOPEND ONDERZOEK

In gebieden waarvan bekend is dat de techniek rendeert en het water in de ondergrond dus goed behouden blijft, vindt toepassing al geruime tijd plaats. Voorbeelden van deze gebieden zijn het Oostland (omgeving Bleiswijk, sinds jaren '80), Aalsmeer en de Wieringermeer (sinds ~ 2007). Daarnaast wordt in gebieden waar ondergrondse waterberging minder potentie heeft (Zeeland, Westland) gekeken naar manieren om het opgeslagen zoete water toch zo goed mogelijk terug te winnen. Hieronder worden de belangrijkste pilots belicht (allen uitgevoerd binnen Kennis voor Klimaat):

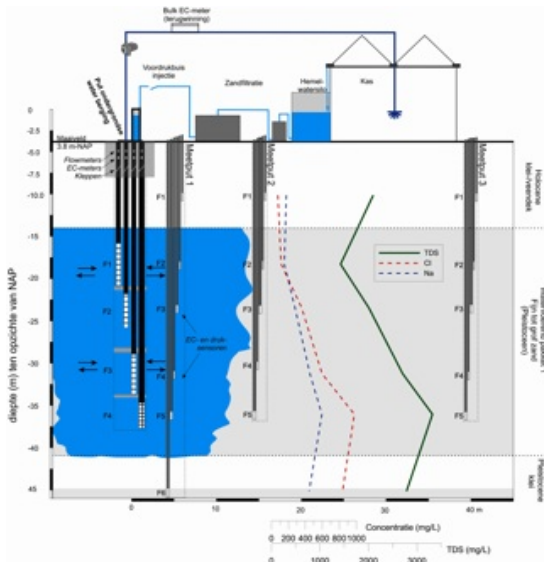
Optimale ondergrondse waterberging in brak pakket, op kleine schaal: Veldproef Nootdorp

In Nootdorp wordt bij een Orchideeënkwekerij (2 hectare, watervraag $\sim 50\%$ v.d. neerslag) onderzocht of zelfvoorzienendheid in zoet gietwater bereikt kan worden door het winterse zoetwateroverschot op te slaan in een brak watervoerend pakket. Terugwinning van het opgeslagen zoete (hemel)water is hier theoretisch beperkt door het spontane opdrijven van de kleine zoetwaterbel in de brakke aquifer (Figuur 2). Een putstelsel dat in theorie het terugwinrende ment van ondergrondse waterberging sterk zou moeten verbeteren wordt hier samen met tuinder en installateur B-E De Lier in de praktijk getest.

Het nieuwe type ondergrondse waterberging is geïnstalleerd in de periode november 2011 tot en met januari 2012. De locatie is gelegen in het noordwesten van de regio Oostland op ca. -4 m-NAP; een gebied met brak en relatief stagnant grondwater in de gekozen aquifer (Figuur 5). De viervoudige put is uitgerust met regelkleppen en flow- en EC-meters. Daarnaast zijn 3 peilbuisnesten geïnstalleerd om het injectiewater in het pakket te volgen. Ook is een 27 m lange kern gesto ken met sediment van de doelaquifer voor beschrijving door TNO en analyse op korrelgrootte, carbonaat- en organische stofgehalte en elementaire samenstelling (XRF).



Figuur 5: Locatie van de Nootdorp veldproef. Chlorideconcentraties in doelaquifer zijn gebaseerd op Oude-Essink et al. (2010).

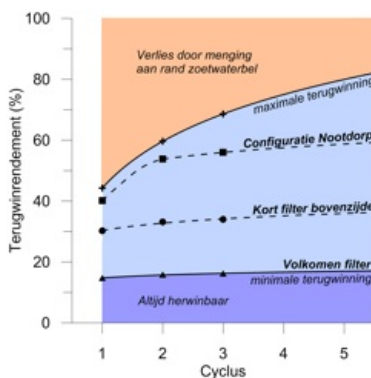


Figuur 6: Dwarsdoorsnede van de veldproef toont de logistiek van de ondergrondse waterberging en de meetpunten. Tevens is de chemie van het oorspronkelijke grondwater weergegeven. Cl = chloride, TDS = totaal aan opgeloste stoffen.

ONDERIN INJECTEREN, BOVENIN TERUGWINNEN

Injectie van zoetwater start automatisch zodra de hemelwatersilo bij neerslag een vooraf gedefinieerd peil overstijgt. Terugwinning start zodra de silo voor watergift ('dagvoorraad') beneden zijn gedefinieerde minimumpeil daalt. De diepte waarop geïnjecteerd en gewonnen wordt is flexibel door de viervoudige put ondergronds en aansturing bovengronds. Na een eerste injectie- en winfase via alle filters is overgeschakeld op een schema waarbij voornamelijk diep in de aquifer zoetwater wordt ingebracht, terwijl juist bovenin de terugwinning geschiedt. Hiermee wordt getracht het brakke water dat door opdrijving en kwel omhoog beweegt zo ver en zo lang mogelijk van de winputten te houden.

In het eerste jaar heeft dit ertoe geleid dat ruim 40% van het geïnjecteerde water zeer zoet (chloride <18 mg/l) werd teruggewonnen, terwijl dit volgens modellering slechts 15% zou zijn geweest bij gebruik van een conventionele put. In de hierop volgende jaren neemt het rendement toe naar ongeveer 60% (Figuur 7), meer dan voldoende om de tuinder van zoetwater te voorzien. Een hoger rendement is met dit kleinschalige systeem niet te behalen: ongeveer 40% zal structureel aan menging verloren gaan bij het verdringen van het brakke water aan de onderzijde. Als gekozen zou zijn voor een kort enkelvoudig putfilter in de bovenste helft van de aquifer zou het rendement ook verhoogd zijn. Echter, het rendement zou in dat geval blijven steken op ~35% en blijft daarmee fors achter bij de nu gekozen configuratie.



Figuur 7: Het terugwinrendement van de verschillende putconfiguraties zoals gemodelleerd voor de veldproef Nootdorp. Een klein deel (<20%) is eenvoudig terug te winnen. De gekozen configuratie haalt echter ~60% van het geïnjecteerde water terug (Zuurbier et al., submitted).

De looptijd van de veldproef Nootdorp is 2 jaar. Hierna zal het systeem in gebruik blijven voor de gietwatervoorziening van de tuinder.

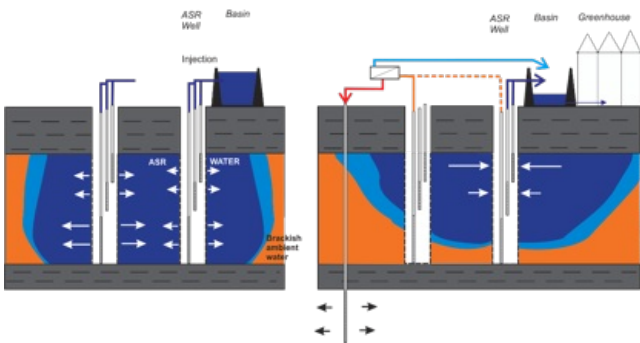
Optimale ondergrondse waterberging in zout pakket, op grote schaal: Veldproef Westland

Deze veldproef lijkt op de veldproef Nootdorp, maar kent ook enkele belangrijke verschillen:

- Het doelpakket is aanzienlijk zouter (ruim 4.000 i.p.v. maximaal 1.000 mg/l);
- Er worden 4 bedrijven gekoppeld, zodat bijna 30 hectare kasoppervlak benut wordt voor opvang van hemelwater ('opschaling');
- Via 2 boorgaten (met ieder 3 filters) wordt het hemelwater preferent onderin en stroomopwaarts in het pakket

- geïnjecteerd, terwijl terugwinning voornamelijk bovenin en stroomafwaarts plaatsvindt;
- De diepste filters kunnen na verzilting gebruikt blijven worden voor onttrekking (afvang) van het zoute water onder de bel, om zo verzilting van de winputten te voorkomen ('zoethouderconcept').

Deze veldproef is eind 2012 gestart en loopt nog tot (in ieder geval) 2014.



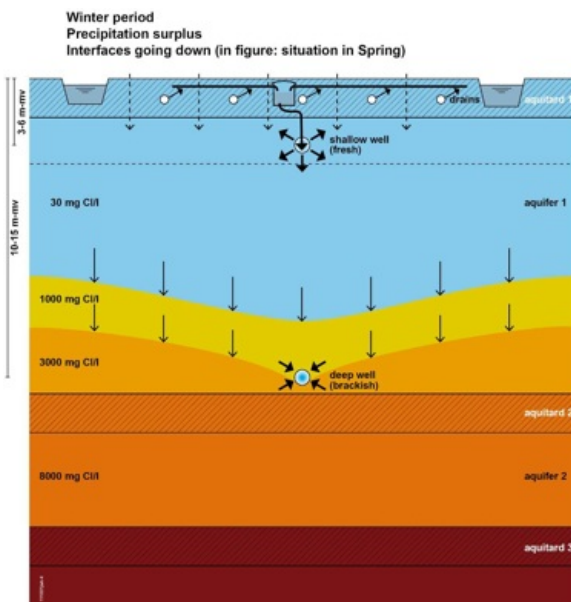
Figuur 8: Opzet van de veldproef Westland met twee putten (elk 3 filters) en mogelijke afvang van dieper zoutwater. Dit zoutwater kan eventueel worden ontzilt om zo meer gietwater te produceren.

Optimale ondergrondse waterberging in een ondiep zout pakket met horizontale putten: De Freshmaker

Dit concept is in de winter van 2012/2013 geïnstalleerd in Ovezande (Zuid-Beveland, Zeeland). Gebruikmakend van twee horizontale putten (aangelegd middels horizontaal gestuurde boringen) wordt beoogd:

- Op 7 m-mv zoetwater uit een nabijgelegen zoete watergang na een korte voorzuivering te infiltreren (natte perioden);
- Zoutwater op ~15 m-mv af te vangen en voor afvoer via oppervlaktewater of injectie in zout grondwaterpakket;
- Zoetwater terug te winnen voor beregening van een boomgaard (droge perioden).

De natuurlijke zoetwaterlens van zo'n 10 m dikte wordt door de berging over een lengte van ca. 70 m ~5 m dikker. In het voorjaar van 2013 wordt voor het eerst zoetwater geïnjecteerd, waarna in de zomer van 2013 terugwinning plaats moet vinden. Door monitoring en modellering wordt beoogd de efficiëntie van deze zoetwateropslag in beeld te brengen. Modelberekeningen vooraf tonen aan dat vrijwel al het geïnjecteerde water herwinbaar kan zijn.



Figuur 9: Werking van de Freshmaker. Zoetwater wordt met een horizontale put ondiep ingebracht, terwijl op grotere diepte zoutwater met een tweede horizontale put wordt onttrokken. Hierdoor wordt de zoetwaterlens vergroot en is zoetwater beschikbaar in de zomer.

Ondergrondse waterberging op de hoge zandgronden: De Stippelberg

Voor het verkennen van de mogelijkheden om ondergrondse waterberging in freatische aquifers te realiseren is in 2012 een pilotstudie voor de Stippelberg gestart. De Stippelberg is een droog en verdroogd bosreservaat in het oosten van de provincie Noord-Brabant. Ondergrondse waterberging is kansrijk in dit gebied, omdat (1) agrariërs, terreinbeheerders en de waterbeheerder meerwaarde onttelen aan een verminderde droogtegevoeligheid van het gebied, en (2) de sponswerking van dit verdroogde natuurgebied naar verwachting beter benut kan worden, onder andere vanwege de aanwezigheid van isolerende geologische breuken.

In deze studie wordt de potentie van twee concepten voor het benutten van de sponswerking van natuurgebieden onderzocht. Het eerste concept is het conserveren van het lokale neerslagoverschot door het opstuwen of verontdiepen van regionale drainagemiddelen. Het tweede concept is het aanvoeren en infiltreren van extern water door diepinfiltratie of oppervlakkige infiltratie. Verkennende berekeningen worden uitgevoerd om de effectiviteit van deze maatregelen in te schatten. Tevens gaat in mei 2013 een veldexperiment naar de effectiviteit en effecten van oppervlakkige infiltratie van start. De doelen van dit experiment zijn om (1) de effectiviteit van deze bergingsmaatregel en (2) de effecten op grondwaterstanden en patronen in grondwaterkwaliteit te verifiëren.

KENNISLEEMTES

- **Opschaling:** wat zijn de te verwachten terugwinrendementen in verschillende regio's? Op dit moment is alleen in de omgeving Oostland en Aalsmeer de ASR techniek breed bewezen, met circa 100 geïnstalleerde systemen (de eersten dateren van 1983). Studies naar het rendement van deze systemen zijn echter beperkt (Zuurbier et al., in press). In andere gebieden waar ASR nog niet in gebruik is maar waar de techniek wordt overwogen om watertekorten te bestrijden, dient vooraf een inschatting te worden gemaakt van de te verwachten terugwinrendementen. Ook de mate waarin kunstmatige infiltratie van oppervlaktewater schade door verdroging op de hoge zandgronden (door beregening en drinkwaterwinning) kan beperken is niet gekwantificeerd.
- **Optimalisatie:** wat leveren opschaling en verbeterde putconfiguraties op? Binnen Kennis voor Klimaat wordt sinds 2011 voor het eerst geprobeerd om theoretische verbeteringen in ASR-systemen in brakke/zoute gebieden verder uit te werken en in de praktijk te brengen. Dit levert snel inzicht op over de mogelijkheden, maar ook nieuwe inspiratie voor verbeteringen. Duidelijk is ook dat het tijd kost voordat nieuwe concepten in de praktijk (breed) worden toegepast.
- **Geochemische reacties en ontwikkeling waterkwaliteit**
Bekend is dat er waterkwaliteitsveranderingen plaatsvinden tijdens verblijf in de ondergrond. Dit heeft wereldwijd in sommige gevallen ertoe geleid dat het water ongeschikt werd voor drinkwater. Met name metalen en sporenelementen zoals arseen kunnen mobiliseren vanuit het sediment. In hoeverre dit het water ook ongeschikt maakt als gietwater wordt nog onderzocht binnen de proeven van Kennis voor Klimaat.
- **Wetgeving**
De werking en impact van ASR systemen zijn niet goed bekend bij de waterbeheerder (doorgaans de Waterschappen). Ook sluit de regelgeving vaak niet goed aan bij het kleinschalige karakter van de systemen. Hierdoor kan het zijn dat er strenge monitoringseisen worden opgelegd (die bijvoorbeeld opgesteld zijn voor grootschalige infiltratie in drinkwatergebieden), waardoor het opslagsysteem economisch onrendabel wordt. Passende regelgeving die de risico's op grootschalige grondwaterverontreiniging ondervangt, maar ook economisch rendabele bedrijfsvoering mogelijk maakt is daarom gewenst.

LITERATUUR/ LINKS

Antoniou, E.A., van Breukelen, B.M., Putters, B. and Stuyfzand, P.J., 2012. [Hydrogeochemical patterns, processes and mass transfers during aquifer storage and recovery \(ASR\) in an anoxic sandy aquifer](#). Applied Geochemistry, 27(12): 2435-2452.

Antoniou, E.A., Hartog, N., van Breukelen, B.M. and Stuyfzand, P.J., 2014. [Aquifer pre-oxidation using permanganate to mitigate water quality deterioration during aquifer storage and recovery](#). Applied Geochemistry, 50: 25-36

Oude Essink, G.H.P., van Baaren, E.S. and de Louw, P.G.B., 2010. [Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands](#). Water Resources Research, 46: W00F04.

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., 2005. [The Dutch Experience with MARS](#). 306315 300, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.

Technische Commissie Bodem, 2009. [Diepinfiltratie van afvloeiend hemelwater](#). TCB A047(2009).

Van der Valk, M., 2011. [A fresh-keeper for Noord Burgum](#), TU Delft, Delft.

Van Ginkel, M., 2007. [Feasibility study for fresh water storage in saline aquifers by means of the Fresh Storage Saline Extraction well, with a focus on the Red Sea coast, Egypt](#), Delft University of Technology, Delft, 82 pp.

Vink, K., Rambags, F. and Gorski, N., 2010. [Freshmaker: Technologie voor een duurzame zoetwatervoorziening](#), KWR.

Zuid-Holland, P., 2009. [Provinciale waterplannen 2010-2015](#), Provincie Zuid-Holland.

Zuurbier, K.G., Bakker, M., Zaadnoordijk, W.J. and Stuyfzand, P.J., accepted. [Identification of potential sites for small-scale aquifer storage and recovery \(ASR\) in coastal areas using ASR performance estimation tools](#). Hydrogeology Journal.

Zuurbier, K.G., Paalman, M. and Stuyfzand, P.J., 2011. [Making innovative water technologies feasible in practice: use of Aquifer Storage and Recovery \(ASR\) in irrigation water supply and water reuse](#), International Water Week 2011,

Amsterdam.

Zuurbier, K.G., Paalman, M. and Zwinkels, E., 2012a. [Haalbaarheid Ondergrondse Waterberging Glastuinbouw Westland](#). KWR 2012.003, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.

Zuurbier, K.G. and Stuyfzand, P.J., 2012b. [Optimizing small- to medium-scale aquifer storage and recovery in coastal aquifers for irrigation water supply](#), Saltwater Intrusion Meeting (SWIM) 22, Armacao dos Buzios, Brazil, pp. 144-146.

Zuurbier, K.G., Zaadnoordijk, W.J. and Stuyfzand, P.J., submitted. How multiple partially penetrating wells improve the freshwater recovery of coastal ASR systems: a field and modeling study. *Journal of Hydrology*.

www.kwrwater.nl/zoetinzout

www.kennisvoorklimaat.nl

<http://knowledgeforclimate.climateresearchnetherlands.nl/climateprooffreshwater>

<https://publicwiki.deltares.nl/display/ZOETZOUT/GO-FRESH+-+Valorisatie+kansrijke+oplossingen+robuuste+zoetwatervoorziening>

<http://www.wetsus.nl/research/research-themes/underground-water-functions-and-well-management>

Deze Deltafact is opgesteld door KWR Watercycle Research Institute, maart 2013 en gewijzigd in januari 2016.

Auteurs: Koen Zuurbier, Marcel Paalman, Arnout van Loon, Pieter Stuyfzand

ERVARINGEN

- Goede ervaringen in glastuinbouwregio's Oostland en Aalsmeer (relatief zoet), waar sinds 1983 al circa 100 systemen zijn gerealiseerd;
- Minder goede rendementen worden voorspeld en op kleine schaal ervaren in zoutere gebieden, maar kunnen mogelijk voor een groot deel worden tegengegaan door opschaling en verbeterde putconfiguraties;
- De meerwaarde van zo'n verbeterde putconfiguratie is tot nu toe alleen gekwantificeerd in de Nootdorp proef binnen Kennis voor Klimaat en wordt verder onderzocht voor andere locaties/configuraties;
- Kwaliteitsverandering door reactiviteit van de ondergrond kunnen het water ongeschikt maken voor drinkwater. Zie bijvoorbeeld de proef ASR Herten (drinkwaterbedrijf WML): water door mobilisatie metalen niet geschikt als drinkwater (Antoniou et al., 2012). Antoniou (2014) heeft een methode ontwikkeld en succesvol getest om deze mobilisatie tegen te gaan;
- Goede resultaten in Australië (sinds 2000) met ondergrondse opslag van gezuiverd effluent t.b.v. gebruik als irrigatiewater.