SPAARWATER

Eigen watervoorziening: Zoetwaterbeschikbaarheid

Deelrapport 2013-2015

MRT 2016

SPAARWATER

Samenvatting

Dit rapport 'Eigen watervoorziening - Zoetwaterbeschikbaarheid' is onderdeel van de serie rapporten van het project Spaarwater I. In deze rapportage worden de effecten van ondergrondse opslag met perceelseigen water uit de drainage beschreven, zoals getest in de pilotgebieden in Breezand en Borgsweer.

Zoetwatervoorziening in de Waddenregio niet vanzelfsprekend is. Deze regio kenmerkt zich namelijk door een ondiepe zoet-zout overgang in het grondwater en van nature brakke sloten. Zeker in droge tijden kan een tekort aan zoetwater optreden. Uit het onderzoek blijkt dat, het opslaan van het zoete drainagewater in de ondergrond in tijden van overschot, het mogelijk maakt om zelfvoorzienend te zijn in de zoetwatervoorziening.
Op jaarbasis is er genoeg water van goede kwaliteit beschikbaar om in de ondergrond op te slaan. Dit water kan op een goede manier worden opgeslagen in de ondergrond. Verder blijkt uit de pilots dat het goed mogelijk is om dit opgeslagen water terug te winnen. Uit de modelberekeningen blijkt dat 40 tot 90% van het opgeslagen water kan worden teruggewonnen. Dit terugwin rendement hangt mede af van het type en de grootte van het systeem.
Met dit systeem van ondergrondse opslag kan water van elke 1 ha worden gebruikt om 1,2 tot wel 2 ha land van water te voorzien. Zelfvoorzienendheid in de zoetwatervoorziening is daarmee mogelijk met een ondergrondse opslagssysteem.

Colofon

Documenttitel	.	Ondergrondse Opslag van perceelseigen water - kwantiteitsaspecten
Status	.	Achtergrondrapportage,
Datum	.	1 maart 2016
Projectnummer	.	534
Hoofdauteurs	.	Sieger Burger (Acacia Water), Maarten Waterloo (Acacia Water), Kyra Hu-a-ng (Acacia Water), Arjen Oord (Acacia Water)
Met bijdragen van		Arie Jan Broere (Broere Beregening), Danny van den Bosch (BE de Lier) Dick de Gelder (BE de Lier), Pieter Noordam (Teler Borgsweer), Thijs Langeveld (Teler Breezand), Guus Braam (Delphy), Wyncko Tonckens (Delphy), Michel Verbruggen (Acacia Water) Lieselotte Tolk (Acacia Water), Jouke Velstra (Acacia Water)

Disclaimer

Rapport: Aan dit rapport kunnen geen rechten worden ontleend. De auteurs zijn niet verantwoordelijk voor eventuele fouten of consequenties. Aanvullingen of verbeteringen zijn welkom via info@acaciainstitute.nl

Inhoudsopgave

1 Inleiding 2

2 Systemen en monitoring 6

2.1 Algemene aanpak opvangen, infiltreren en onttrekken 6

2.2 Specifieke systeemeigenschappen zand- en kleipercelen 7

2.2.1 Zandperceel Breezand 7

2.2.2 Kleiperceel Borgsweer 10

2.3 Monitoring 11

2.3.1 Zandperceel Breezand 11

2.3.2 Kleiperceel Borgsweer 12

3 Beschikbaarheid van perceelseigen water 14

3.1 Neerslag en verdamping 14

3.2 Perceelafvoer uit drains 16

3.2.1 Ingestelde drempelwaarden 16

3.2.2 Drainage zandperceel Breezand 17

3.2.3 Drainage kleiperceel Borgsweer 18

3.2.4 Impact drempelwaarden op opslag percentage 19

3.3 Waterbalansen van de proefpercelen 20

4 Infiltratie en onttrekking van water in de ondergrond 22

4.1 Zandperceel Breezand Infiltratie 22

4.2 Zandperceel Breezand onttrekking 22

4.3 Kleiperceel Borgsweer infiltratie 23

4.4 Kleiperceel Borgsweer onttrekking 24

4.5 Werking van de filters 24

5 Ontwikkeling van de zoetwaterbel 26

5.1 Zandperceel Breezand 26

5.2 Kleiperceel Borgsweer 29

6 Methode modelleren van ondergrondse opslag 32

6.1 Vormgeving model zandperceel Breezand 32

6.1.1 Kalibratie van het model Breezand 33

6.2 Vormgeving model kleiperceel Borgsweer 34

6.2.1 Kalibratie van het model Borgsweer 34

7 Gemodelleerde ontwikkeling en terugwinrendement van de zoetwaterbel 36
7.1 Breezand 36
7.1.1 Efficiëntie van terugwinning 37
7.2 Borgsweer 39
7.2.1 Berekeningen van efficiëntie van terugwinning 40
7.2.2 Toepassingen voor de tool 40
7.3 Conclusies terugwin rendementen 41
7.4 Factoren die de werking van ASR systemen beïnvloeden 41
7.4.1 Dichtheidscontrast, geologische opbouw en regionale stroming 41
7.4.2 ASR ontwerp 42
8 Modellering toepassing hele systeem 44
8.1 Methode 44
8.2 Uitwerking en kalibratie voor de pilots Borgsweer en Breezand 46
8.3 Scenario berekeningen 48
9 Syteem innovaties 50
9.1 Systeeminnovaties in Borgsweer 50
9.2 Systeeminnovaties in Breezand 51
10 Conclusies 52

Deze rapportage is onderdeel van onderstaande serie rapporten

Hoofdrapport
Spaarwater pilots rendabel en duurzaam agrarisch watergebruik in een verziltende omgeving van de Waddenregio, Resultaten 2013-2015

Achtergrondrapporten
- **Eigen watervoorziening – Zoetwaterbeschikbaarheid.**
- Effectief watergebruik met druppelirrigatie
- Verziltingsbestrijding met systeem gerichte drainage
- Eigen watervoorziening – Vastlegging en afbraak van nutriënten en bacteriën
- Eigen watervoorziening – Gewasbeschermingsmiddelen
- Technisch-juridische handreiking risicobeoordeling 'ondergrondse waterberging'
- Economische Haalbaarheid Spaarwater
- Verslag kennisdeling en communicatie

De rapportages zijn digitaal beschikbaar op www.Spaarwater.com

1 Inleiding

Project SpaarWater

Het gebied langs de Waddenzee leent zich bij uitstek voor landbouw en staat bekend als één van de beste landbouwgronden van Europa. De landbouw is een belangrijke economische motor in het gebied. Het Waddengebied kenmerkt zich echter ook door een ondiepe zoet-zout overgang in het grondwater en van nature zoute sloten. Dit zorgt ervoor dat de zoetwatervoorziening in dit gebied niet vanzelfsprekend is. Door klimaatverandering en een toenemende vraag naar zoetwater kan de zoetwatervoorziening onder druk komen te staan. Daarom worden in het project Spaarwater een aantal zoetwatermaatregelen ontwikkeld die verzilting tegengaan en lokaal zoetwater beschikbaar maken.

Spaarwater bestaat uit vier innovatieve onderdelen, die afzonderlijk of in combinatie kunnen worden toegepast: (1) Eigen watervoorziening door het opvangen van perceelseigen water, (2) Eigen watervoorziening door ondergrondse zoetwaterberging, (3) Effectief watergebruik met druppelirrigatie en (4) Verziltingsbestrijding met systeem gerichte drainage.

Op vier locaties worden pilots uitgevoerd. Op de proefpercelen Breezand en Borgsweer wordt een combinatie van ondergrondse zoetwaterberging van perceeleigen water en druppelirrigatie getest. In Hornhuizen en Herbaijum worden verschillende vormen van systeemgerichte drainage onderzocht.

Deze rapportage

Dit rapport is deel A van een serie Spaarwater rapporten. In deze rapportage wordt de ondergrondse zoetwaterberging van perceelseigen water zoals getest in de pilots in Breezand en Borgsweer beschreven. De doelstelling hiervan is het bepalen technische haalbaarheid voor het beschikbaar maken van zoetwater, begrip van de werking van het systeem, en het in beeld brengen van innovaties om het systeem beter te laten functioneren of te vereenvoudigen.

In dit rapport komen de kwantiteit aspecten aan bod. Voor de resultaten op het gebied van nutriënten, pathogenen en gewasbeschermingsmiddelen wordt verwezen naar rapport D in de Spaarwater reeks. Voor de resultaten op het gebied van gewasbeschermingsmiddelen wordt verwezen naar rapport E.

Achtergrond

De huidige landbouw is voor zijn waterbehoefte afhankelijk van een goede kwaliteit van het ondiepe grondwater, en van de beschikbaarheid van zoet water voor de beregening van de gewassen in perioden van droogte. Het grondwater in de waddenregio is, net als in veel andere deltagebieden, voor een groot deel brak tot zout. Dit komt door de nabijheid van de Noordzee en de Waddenzee en de recente geologische geschiedenis van West en Noord Nederland waarbij een groot gedeelte van het gebied regelmatig onder de zee lag (Stuyfzand, 1993). Het zoute grondwater zorgt ervoor dat de sloten doorgespoeld moeten worden om zoet te worden voor ze geschikt zijn voor beregening, en dat (ondiepe) grondwater onttrekking voor beregening niet mogelijk is.

Het doorspoelen van het oppervlaktewatersysteem wordt gedaan via een complex van gemalen waarbij zoet water uit het IJsselmeer gebruikt.

Door allerlei factoren, waaronder klimaatverandering, komt er echter een steeds grotere onbalans tussen de vraag naar water, en de hoeveelheid water van de juiste kwaliteit die geleverd kan worden uit het oppervlaktewatersysteem (Klein Tank en Lenderink, 2009; Vuurens en Speets, 2011; van Minnen en Ligtvoet, 2012).

Systeem

Lokaal is in principe door het jaar heen voldoende water beschikbaar, aangezien er voldoende neerslag valt om te voldoen aan de watervraag van de gewassen. Het grootste deel van de neerslag valt echter in de winterperiode of in pieken tijdens de zomerperiode. Dit zoete water wordt in de traditionele situatie voor een groot deel ongebruikt afgevoerd naar de sloten, waar het water zich kan mengen met oppervlakte water van slechtere kwaliteit. Daardoor wordt het ongeschikt voor beregening, bijvoorbeeld omdat het zoutgehalte te hoog wordt, of door het risico op ziekten zoals bruinrot waardoor beregenen met oppervlaktewater voor aardappelen verboden is in het Waddengebied.

De afhankelijkheid van het oppervlaktewater voor irrigatie van gewassen kan sterk verminderd worden door het overschot aan water in de winter op te slaan, zodat het in de zomerperiode gebruikt kan worden. Deze opslag kan in een bovengrondse berging. Deze vorm van opslag in een basin neemt echter de nodige ruimte in waardoor kostbare landbouwgrond verloren gaat, en heeft als nadeel dat er waterverlies optreedt door verdamping, en door golfslag tijdens harde wind (Antea Group en Acacia Water, 2015).

Daarom wordt binnen Spaarwater een andere vorm van berging onderzocht. Hierbij wordt het zoete water geborgen in de ondergrond, waarbij zoet water via een infiltratieput in een zandlaag ingebracht wordt (Fox, 2007). Hier vormt het water een zoete bel in het overigens zoute grondwater. Het voordeel van deze techniek is dat het weinig ruimte nodig heeft en geen last heeft van verliezen door verdamping. De efficiëntie van berging en terugwinning hangt van af van een aantal factoren, zoals de waterkwaliteit in het watervoerend pakket en de geologische opbouw van de ondergrond. Deze terugwin efficiëntie wordt in dit project geoptimaliseerd.

Ondergrondse zoetwaterberging is eerder toegepast in de glastuinbouw, maar de bredere toepassing in andere agrarische sectoren in Nederland is nieuw. Vaak wordt bij ondergrondse opslag daarom gedacht aan dure oplossingen van ondergrondse opslag uit het kassengebied. Acacia Water heeft in samenwerking met Dhaka University met financiering van Unicef een project uit in Bangladesh uitgevoerd waar is gebleken dat met heel eenvoudige middelen zoet water onder gravitatie kan worden geïnfiltreerd (Tolk et al., 2014). In Spaarwater worden de lessen die uit dit eerdere project in Bangladesh gecombineerd met de ervaringen in de glastuinbouw om een (kosten) effectief systeem te ontwikkelen.

De verbetering van de watervoorziening door zoetwatermaatregelen is van belang in gebieden waar de wateraanvoer niet voldoende of niet van de juiste kwaliteit is. Een belangrijke vraag is daarom: waarmee kan de zoetwateropslag worden gevuld? In de glastuinbouw wordt hiervoor het afstromend regenwater van de kassen gebruikt. Dat is in de vollegrondsteelt niet mogelijk. Daarom is er een alternatieve manier ontwikkeld om water beschikbaar te maken, door opvang van het perceelseigen water uit de drains. Deze innovatie is recent voor het eerst ontwikkeld en getest in de proef zelfvoorzienende zoetwaterberging op Texel (https://www.noord-holland.nl/web/Projecten/Proef-zoetwaterberging.htm) en wordt in Spaarwater verder ontwikkeld om water uit een andere bron dan de sloten beschikbaar te maken. De maatregel ligt dicht bij de gangbare praktijk van de landbouw in de Waddenregio, waar vrijwel alle percelen gedraineerd zijn.

Het Spaarwater systeem maakt dus gebruik van technieken die zich eerder hebben bewezen op één locatie (de opvang van perceelseigen water uit de drains) of voor één sector in Nederland (de ondergrondse zoetwaterberging).

Door de combinatie van beide technieken wordt een volledig nieuwe toepassing ontsloten: een eigen watervoorziening door ondergrondse opslag van perceelseigen water in de vollegrondsteelt. De toepassing wordt op twee locaties getest, in verschillend systeemconfiguraties, om hiermee kennis op te doen over het potentieel van de systemen voor een bredere toepassing bij verschillende bodems en gewassen.

De ondergrondse zoetwaterberging van perceelseigen water wordt bij twee bedrijven in praktijk getest: op pilotpercelen in Breezand (Noord-Holland) en in Borgsweer (Groningen). In beide gevallen is het primaire doel is aan te tonen of ondergrondse opslag van zoet water in Waddenregio mogelijk is en het systeem rendabel kan zijn voor reguliere akkerbouwbedrijven. Door de pilots op meerdere locaties uit te voeren kan worden beproeft hoe de methode onder verschillende omstandigheden succesvol kan zijn. Naast de ondergrondse zoetwaterberging van perceelseigen water wordt op deze percelen ook efficiënte beregening met gebruik van druppelirrigatie toegepast (zie rapport B).

Zandperceel Breezand

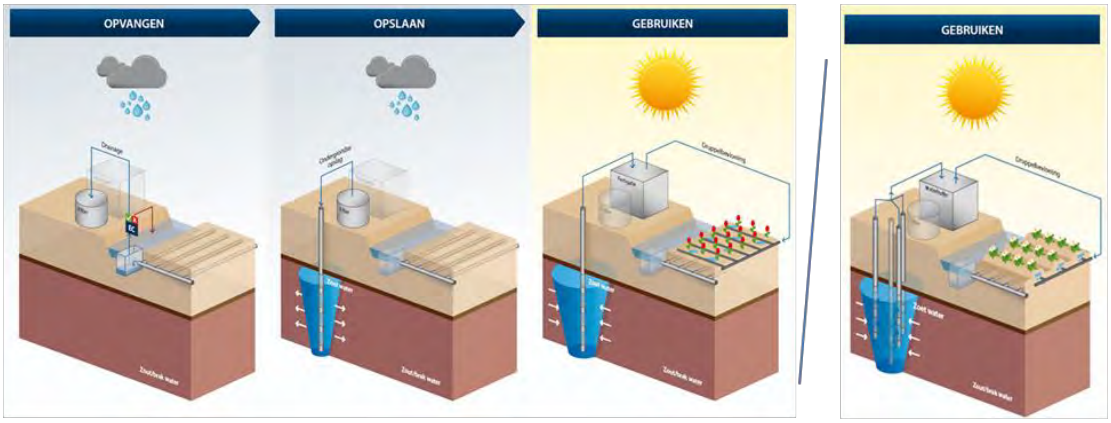
Breezand is gelegen in één van de noordelijkste polders van de Provincie Noord Holland (Figuur 1-1). Het beheer van de watersystemen in deze polder valt onder het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier. De pilotstudie Breezand vindt plaats op het perceel van bollenteler Langeveld. Het betreft een perceel van ongeveer 2,3 ha met bollenteelt op zandgrond. Voor de beregening van deze teelt is voldoende aanvoer van zoet water van belang.

Kleiperceel Borgsweer

Borgsweer is gelegen in noordoost Groningen, ten oosten van Delfzijl, op een kilometer van de zeedijk (Eems, Figuur 1-1). Het perceel ligt aan de zuidwestzijde van het dorp aan de voet van de terp of borg van Borgsweer. De studie vindt plaats op het perceel van agrariër Noordam, met een oppervlakte van ongeveer 1,5 ha. Op dit kleiperceel waren pootaardappelen de belangrijkste teelt. Vanwege de aanwezigheid van de bruinrot bacterie (*Ralstonia solanacearum*) was beregening met oppervlaktewater verboden, waardoor de pootaardappelen in de referentie situatie volledig van regenwater en bodemvocht afhankelijk waren.

Figuur 1-1. Ligging van de vier experimentele locaties die deel uitmaken van het Spaarwater programma.

2 Systemen en monitoring



Figuur 2-1. Opvang en selectie van perceelseigen water (eerste paneel), ondergrondse opslag (tweede paneel) en gebruik van ondergronds opgeslagen water (derde paneel zoals aangelegd in Breezand en vierde paneel zoals aangelegd in Borgsweer).

2.1 Algemene aanpak opvangen, infiltreren en onttrekken

De systemen voor de eigen watervoorziening met ondergrondse zoetwaterberging van perceelseigen water zijn voor een groot deel gelijk op beide pilotpercelen, maar wijken op enkele essentiële punten ook van elkaar af. Op beide proefpercelen werd de infrastructuur nodig voor de opvang van perceelwater uit de drains en voor de opslag en onttrekking van zoetwater in de ondergrond in 2013 aangelegd. Het proces is op te splitsen in drie fasen, namelijk die van het opvangen van water, het opslaan in de ondergrond, en het onttrekken en vervolgens gebruiken (Figuur 2-1). Deze algemene systeem onderdelen worden hieronder beschreven, in sectie 2.2 worden de systeem eigenschappen voor elk van de twee pilot locaties verder gespecificeerd.

Opvangen: Water dat als neerslag op het perceel valt infiltreert in het perceel en wordt via de drainage afgevoerd naar de sloten. Bij het Spaarwatersysteem wordt voorkomen dat het water in de sloten terechtkomt en daar met water van slechtere kwaliteit mengt. Daarom is een verzamelleiding op de drainage aangesloten die uitkomt in een reservoir. In dit reservoir wordt met een sensor continu het elektrische geleidbaarheid (EC) van het water gemeten.

De EC is afhankelijk van de hoeveelheid opgeloste stof in water en neemt toe met stijgende ionenconcentratie. Puur water heeft een EC van onder de 0,001 mS/cm, terwijl zeewater een EC-waarde van rond de 50 mS/cm heeft. De EC is in het algemeen een goede indicatie voor het zoutgehalte van water. Omdat de EC makkelijk continu te meten is vormden EC metingen de basis voor de bepaling van de kwaliteit van het drainwater in relatie tot het zoutgehalte.

Wanneer de EC van het drainwater boven een locatie-specifieke drempelwaarde komt, en het water derhalve te brak wordt geacht, wordt het drainwater via een kleppensysteem afgevoerd naar het oppervlaktewater. Als het water zoet genoeg is (een EC onder de locatie-specifieke drempelwaarde) wordt dit vanuit de drainput naar een opslagreservoir (inhoud 32 m^3) gepompt.

Opslaan: Als het opslagreservoir gevuld is met drainwater van de gewenste kwaliteit wordt het water door twee zandfilters gevoerd (een klein snel zandfilter en een groter zandfilter) ter verwijdering van sediment en andere vaste deeltjes, die op den duur de filters in de infiltratieput zou kunnen verstoppen. Het water uit het zandfilter wordt geïnfiltreerd in de zoute ondergrond (onder een afdichtende kleilaag). Hiervoor werd het water opgepompt in een opvoerbuis tot boven maaiveld, om daarna onder druk van de zwaartekracht via de infiltratieput in de ondergrondse berging te infiltreren. Door de continue instroom van zoet water in het zoute watervoerend pakket tijdens perioden met een neerslagoverschot, werd er rond de infiltratieput een steeds grotere zoetwaterbel gevormd.

Gebruiken: Wanneer het water nodig is voor irrigatie wordt het water opgepompt uit de zoetwaterbel in de ondergrond en opgeslagen in een tweede buffertank ter grootte van ongeveer de dagbehoefte aan water (ook van 32 m^3). Het gebruik van onttrokken water wordt in detail beschreven in het rapport over druppelirrigatie (rapport B).

2.2 Specifieke systeemeigenschappen zand- en kleipercelen

Er zijn twee belangrijke verschillen tussen de pilot locaties. Het eerste is het verschil in bodemtype. Dit heeft invloed heeft op het water dat uit de drains stroomt en opgevangen kan worden voor de eigen watervoorziening. Breezand is een zandperceel, terwijl Borgsweer een kleibodem heeft. Het tweede belangrijke verschil is de vormgeving van de systemen voor ondergrondse opslag en onttrekking. In Breezand werd gebruik gemaakt van één enkele put, bestaande uit vier afzonderlijke filters, die zowel voor infiltratie als onttrekking diende. In Borgsweer werd een alternatief systeem van vier putten aangelegd, met een centrale put, bestaande uit twee filters, voor infiltratie, en daaromheen in een gelijkzijdige driehoek drie onttrekkingsputten die elk op 5 m afstand van de centrale put lagen met ook weer ieder twee filters.

2.2.1 Zandperceel Breezand

Het zandperceel bij Breezand is voorzien van drainagebuizen die op 0,75 m onder maaiveld liggen met een onderlinge afstand van 8 meter. Deze drainage is aan het begin van het Spaarwaterproject nieuw aangelegd. Om goede aanvoer van het grondwater naar de drains te garanderen zijn de drains in een schelpenbed gelegd. De individuele drainagebuizen zijn aangesloten op een verzamelleiding die het perceelwater naar een verzamelput leidde.

De infiltratie en de onttrekking vond plaats in dezelfde putten. In Breezand zijn vlak naast elkaar vier putten geplaatst met filters op verschillende dieptes, die onafhankelijk van elkaar of allemaal tegelijk konden worden gebruikt. De bovenste 3 filters hebben een diameter van 75 mm, het diepste filter had een diameter van 90 mm. De lengte van de filters waardoor het water werd geïnfiltreerd of onttrokken is 4 m. De filters zijn geplaatst op:

1. 10,2 tot 14,2 m onder maaiveld
2. 15,2 tot 19,2 m onder maaiveld
3. 20,2 tot 24,2 m onder maaiveld
4. 25,2 tot 29,2 m onder maaiveld

De filters voor de ondergrondse zoetwaterberging staat allemaal in grotendeels goed doorlatende lagen onder de Holocene Deklaag (zie box 1).

De bovenste twee filters zijn in de formatie van Boxtel geplaatst, de derde filter staat op de overgang tussen de formatie van Eem en de formatie van Drente en de onderste filter staat volledig in de formatie van Drente. Dit zijn over het algemeen zandige formaties, met op enkele dieptes slecht doorlatende laagjes (box 1).

In de ondergrond was brak tot zout grondwater aanwezig. In Breezand was het zoutgehalte relatief laag op 2 mS/cm net onder de deklaag en nam sterk toe met de diepte in het watervoerend pakket tot ongeveer 10 mS/cm op 30m diepte. Dit maakte van Breezand een interessante proeflocatie, omdat de relatief lage concentratie aan de bovenkant van de zoetwaterbel gunstig was om veel water terug te kunnen winnen omdat het opdrijven van het geïnfiltreerde zoete water met een lagere dichtheid daardoor verminderd werd.

Box 1 – bodemformaties in Breezand (o.b.v. REGIS, aangevuld met sonderingen)

Holocene Deklaag: Vanaf maaiveld tot een diepte van circa -7 m NAP wordt de Holocene Deklaag aangetroffen. Deze deklaag bestaat uit zand met inschakelingen van klei en veen. De oppervlaktelaag is dekzand. In de omgeving van het onderzoeksgebied werd op diverse plaatsen een basisveenlaag aangetroffen volgens REGIS. Deze compacte basisveenlaag kan met een bepertke dikte voor een hoge weerstand zorgen.

Formatie van Boxtel: Direct onder de Holocene Deklaag werden zanden en kleien van de Formatie van Boxtel aangetroffen. De onderzijde van deze laag lag op een diepte van circa -19 m NAP. Deze laag bestond op de onderzoekslocatie grotendeels uit fijn zand, met plaatselijke dunne inschakelingen van kleiig zand en veenlaagjes. Dit pakket kan als goed doorlatende eenheid worden beschouwd. Uit de de sonderingen bleek dat op een diepte van -13 m NAP op verschillende plaatsen een slecht doorlatende laag werd aangetroffen.

Formatie van Eem: Op de onderzoekslocatie werden op een diepte van -19 tot -22 m NAP matig grofzandige afzettingen van de formatie van Eem aangetroffen. Op een diepte van -20 m NAP werd een dun slecht doorlatend laagje aangetroffen.

Formatie van Drente: Op een diepte van -22 m tot -31 m NAP werd een afwisselend pakket van matig grof zand tot zandige klei of leem aangetroffen, behorend tot de Formatie van Drente. Op een diepte van -27 m NAP werd in twee van de drie sonderingen een laagje met een beperkte doorlatendheid aangetroffen (<1 tot 2 m/d).

Formatie van Urk: Tussen -31 m en -88 m NAP werden afzettingen aangetroffen van de Formatie van Urk. Dit pakket bestond uit een afwisseling van matig grof zand en kleiig zand. Aan de bovenzijde was het pakket goed doorlatend (Kh van 10 tot 100 m/d). Vanaf een diepte van circa -46 m NAP had het pakket een wat lagere doorlatendheid.

Vanaf een diepte van -88 m tot -250 m NAP werden diverse goed doorlatende zandpakketten aangetroffen met een doorlaatendheid van 10 tot 100 m/d. Op een diepte van -250 m NAP werd de Formatie van Maassluis aangetroffen, met een hoge verticale weerstand. Deze laag werd als een ondoorlatende basis beschouwd.

Box 2 – bodemformaties in Borgsweer (o.b.v. REGIS, aangevuld met sonderingen)

Holocene Deklaag: Vanaf maaiveld tot een diepte van circa -8 m NAP werd de Holocene Deklaag aangetroffen, die hier bestaat uit een opeenvolging van klei en veenlagen. Bovenin dit pakket bevindt zich zoet water met een EC tot 1.5 mS/cm, maar dieper in de deklaag stijgt de EC en wordt het water steeds zouter.

Formatie van Boxtel: Direct onder de Holocene Deklaag worden zanden van de Formatie van Boxtel aangetroffen. De onderzijde van deze laag lag op een diepte van circa -20 m NAP volgens REGIS. Deze laag bestaat ter plaatse van de onderzoekslocatie grotendeels uit fijn tot matig grof zand, met plaatselijke dunne inschakelingen van kleiig zand en veenlaagjes (zoals aangetroffen op 18 m diepte). Dit pakket kan als een goed doorlatende eenheid worden beschouwd en bevat zout water met een EC tussen de 5 en 8 mS/cm.

Peelo formatie: De formatie van Peelo ligt op een diepte van -20 tot -35 m NAP en bestaat uit een afwisseling van fijn zand, klei en siltig materiaal. Dit pakket kon worden beschouwd als zeer slecht doorlatende laag. Uit de sonderingen is deze formatie niet naar voren gekomen.

Diepe ondergrond: Onder de Formatie van Peelo, vanaf een diepte van NAP -30 m tot circa -120 m NAP worden diverse goed doorlatende zandpakketten aangetroffen, waarvan de doorlatendheid varieert tussen 10 tot 100 m/dag.

2.2.2 Kleiperceel Borgsweer

In Borgsweer is de bestaande drainage gebruikt en aangesloten op een verzamelleiding. De drainage ligt hier iets dieper (op 1 m onder maaiveld), en iets verder uit elkaar (ongeveer 12 m drain afstand) dan in het zandperceel te Breezand. In tegenstelling tot het drainwater uit het zandperceel, wat vrij was van sediment in suspensie, bevatte het drainwater uit het kleiperceel veel fijn sediment. Daarom zijn tijdens het project een aantal systeemverbeteringen doorgevoerd (zie hoofdstuk 10).

Na zuivering van het water via het snelle en het grote zandfilter werd het water in het kleiperceel Borgsweer geïnfiltreerd in een centrale put. De twee infiltratiefilters zijn geïnstalleerd op:

1. 10,5 tot 16,4 m onder maaiveld
2. 17,5 tot 21,0 m onder maaiveld

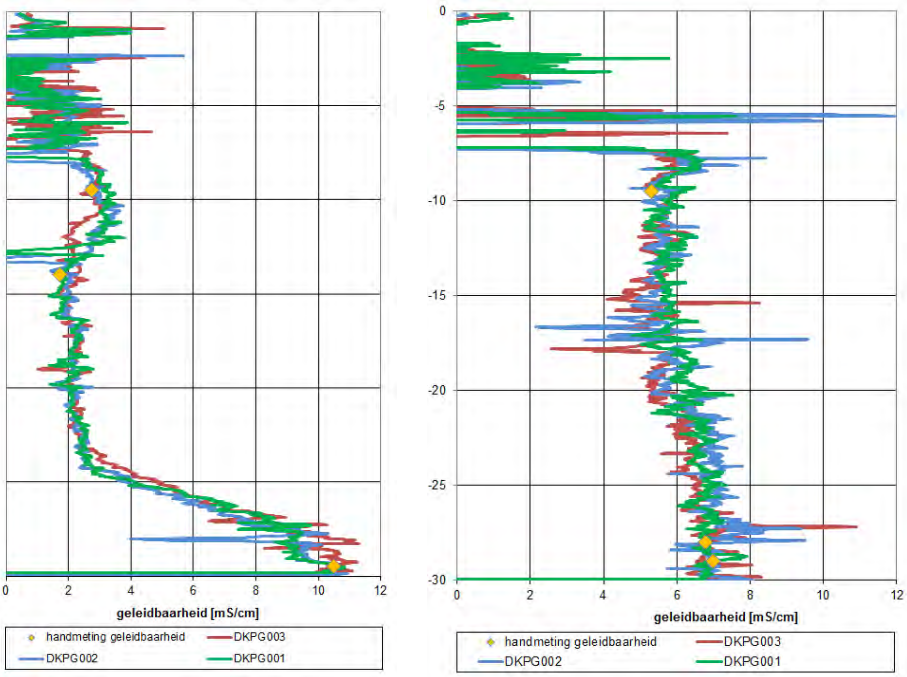
Deze hebben de volgende diameteropbouw:

Filterbuis 1		Filterbuis 2	
0 tot 9,5 m	110 mm	0 tot 8,5 m	110 mm
9,5 tot 11,25m	90 mm	8,5 tot17,5 m	90 mm
10,5 tot 16,40	75 mm	17,5 tot21 m	90 mm

Om een bodempassage te forceren werd in Borgsweer het water onttrokken via drie bronnen die op gelijke afstand in een cirkel om de infiltratie bron staan met een afstand van 5 m vanaf de infiltratiebron. De onttrekkingsfilters staan op dezelfde diepte als de infiltratiefilters. Het systeem is zodanig ontworpen en aangelegd dat er kan worden gekozen welke van de drie bronputten, maar ook op welke diepte water wordt onttrokken; er kan worden gekozen voor onttrekking uit 1 tot en met 6 filters, verspreid over 3 putten. Hierdoor kunnen bepaalde filters worden afgesloten, bijvoorbeeld als al het zoete water rond het filter is onttrokken.

Ook hier zijn de filters geplaats in een grotendeels goed doorlatende lagen onder de Holocene deklaag (zie box 2). Het bovenste filter ligt volledig en het onderste filter vrijwel geheel in de formatie van Boxtel. Deze laag bestaat uit fijn tot matig grof zand, met plaatselijke dunne inschakelingen van kleiig zand en veenlaagjes. Een laagje met een slechtere doorlatendheid bevindt zich op 18m onder maaiveld, deze wordt dus doorsneden door het onderste filter.

In Borgsweer is vanaf een diepte van 8 m, dat is net onder de Holocene deklaag, tot een diepte van circa 30 m water met een zoutgehalte van 4 - 7 mS/cm gevonden. Vanwege de geologische geschiedenis van het gebied, met recente zeewaterintrusies en daaropvolgende verzoeting van de drooggevallen stukken land, wordt op grotere diepte een verdere toename in het zoutgehalte van het grondwater verwacht.

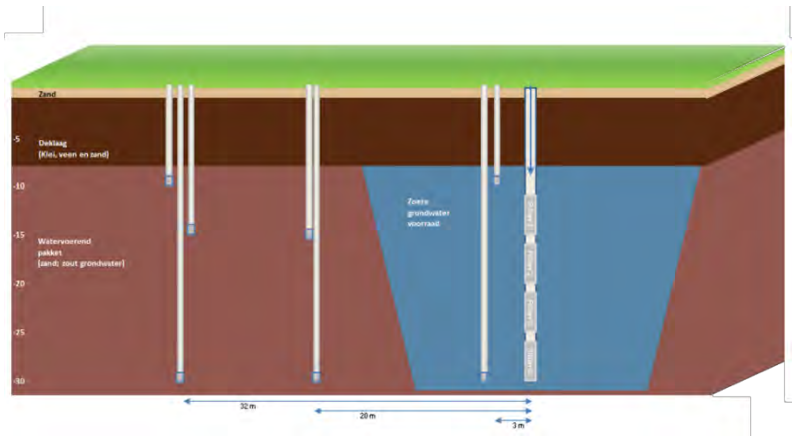


Figuur 2-2. Elektrische geleidbaarheid van het water in de bovenste 30 m van de ondergrond in het zandperceel Breezand (links) en kleiperceel Borgsweer (rechts), zoals verkregen uit drie sonderingen en handmetingen in peilbuizen.

2.3 Monitoring

2.3.1 Zandperceel Breezand

Bijna alle stappen van het proces van opvangen, opslaan en onttrekken worden continu gemonitord. In het opvang reservoir worden debieten en EC van het water gemeten, en de hoeveelheid en de kwaliteit van het geïnfiltreerde water wordt per filter gemeten. Om de grootte, groei en krimp van de zoetwaterbel in de tijd te bepalen zijn peilbuizen geïnstalleerd op verschillende afstanden van het infiltratiesysteem met filters op verschillende dieptes in het watervoerend pakket, waarin de EC van het water wordt gemeten. De peilbuis plaatsing is weergegeven in Figuur 2-3. Ook van het onttrokken water zijn de debieten en de geleidbaarheid gemeten. Hierdoor kon goed worden bepaald hoeveel zoet water er rond de verschillende filters maximaal aanwezig was, en of er eventuele opdrijving van zoet water of upconing van zout water door onttrekking plaatsvond.



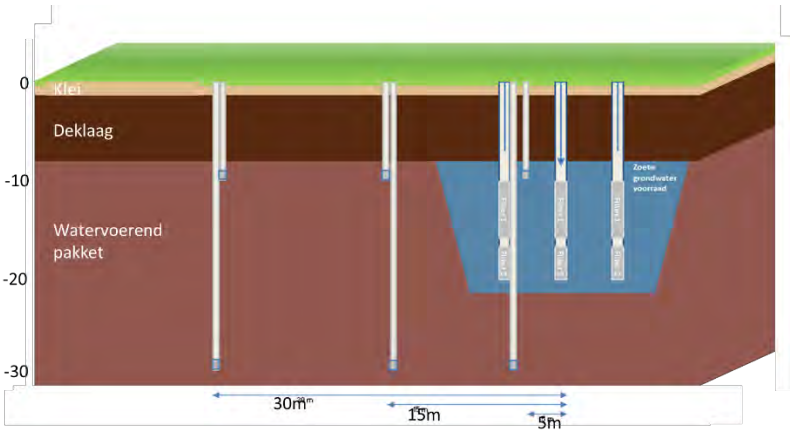
Figuur 2-3. Schematische weergave van het infiltratiesysteem en de monitoringsputten in het perceel in Breezand.

Tabel 1: Gegevens over de observatie peilbuizen waarin het grondwater gemonitord werd in Breezand. Filters zaten aan de onderkant van de peilbuis.

Peilbuis	Diepte [m]	Niveau	Afstand tot infiltratie put [m]
MF001	-30	diep	32
MF002	-15	ondiep	32
MF003	-10	ondiep	32
MF004	-30	diep	20
MF005	-15	ondiep	20
MF006	-30	diep	2
MF007	-10	ondiep	2

2.3.2 Kleiperceel Borgsweer

De monitoring van Borgsweer was vergelijkbaar met die van het systeem in Breezand, ook hier werden de geleidbaarheid en de debieten van het afstromende water continue gemeten, en werden de debieten en de geleidbaarheid van het geïnfiltreerde water per filter gemeten. Een schematisch overzicht van het infiltratie en monitoringssysteem is gegeven in Figuur 2-4, terwijl details over de plaatsing en diepte van de observatiepeilbuizen in Tabel 2 gegeven worden. De onttrekking gebeurde hier per filter op gelijke diepte, en hiervan werd de geleidbaarheid van het water onttrokken uit zowel het ondiepe als het diepe filter samen gemeten. De debieten werden wel per individueel filter gemeten. Om de ontwikkeling van de groei en krimp van de bel te volgen werd verder de geleidbaarheid van het grondwater in peilbuizen rond de bel gemeten.



Figuur 2-4. Schematisch overzicht van de opstelling van het infiltratiesysteem en de monitoringspeilbuizen in Borgsweer.

Tabel 2: Gegevens over de observatie peilbuizen waarin het grondwater gemonitord werd in Borgsweer. Filters zaten aan de onderkant van de peilbuis.

Peilbuis	Diepte [m]	Niveau	Afstand tot infiltratie put [m]
MF001	-29	diep	5
MF002	-10	ondiep	5
MF003	-28	diep	15
MF004	-10	ondiep	15
MF005	-29	diep	30
MF006	-10	ondiep	30

Geofysica

Om de verandering in de vorm en reikwijdte van de door infiltratie gevormde zoetwaterbel rond de infiltratieput in het kleiperceel te Borgsweer te bepalen zijn aanvullend aan de metingen in de peilbuizen geofysiche metingen uitgevoerd. Kleilagen en zandige lagen gevuld met zout water zijn elektrisch goed geleidbaar, en hebben daardoor een lage elektrische weerstand, terwijl een zandige laag met zoet water een aanmerkelijk hogere weerstand heeft. Tijdens de vorming van een zoetwaterbel, waarbij zout water in de poriën van het zandige watervoerend pakket verdrongen wordt door zoet water, verandert lokaal de elektrische weerstand van de ondergrond. Door infiltratie van zoet water in een zout watervoerend pakket ontstaat er een dus ruimtelijke variatie in elektrische weerstand om de infiltratieput heen, en ontstaat er contrast tussen het gebied met zoet water en dat waar zout water voorkomt. Tijdens infiltratie wordt de zone gevuld met zoet water (i.e. de zoetwaterbel) rond de infiltratieput vergroot, terwijl deze weer afneemt tijdens onttrekking. Geo-elektrische metingen kunnen worden gebruikt om zulke contrasten in elektrische weerstand in de ondergrond te meten.

Continuous Vertical Electrical Soundings (CVES) metingen werden uitgevoerd met een SAS 4000 Terrameter met 64 elektroden LUND Resistivity Imaging System (ABEM Instrument AB, Zweden). Bij een vertical electrical sounding wordt een elektrische spanning (potentiaal) op twee elektroden gezet die op enige afstand van elkaar in de bodem geplaatst zijn. Dit genereert een elektrisch veld in de ondergrond wat een stroom tot resultaat heeft in twee andere elektroden die tussen de potentiaalelektroden in de bodem geplaatst zijn. Hiermee kan de weerstand van de ondergrond bepaald worden. De diepte waarop gemeten wordt hangt af van de onderlinge afstanden tussen de elektroden. Bij een CVES worden 64 elektroden op regelmatige afstand langs een transect in de bodem geplaatst, en worden alle mogelijke combinaties van elektrodenafstand doorgemeten. Hierdoor wordt er een 2-dimensionaal beeld gegenereerd van de weerstandsvariaties in de ondergrond, waarbij de onderlinge elektrodenafstand de lengte van het transect, de maximale diepte van de meting en de ruimtelijke resolutie bepaald. In Breezand was er op het perceel geen ruimte om CVES metingen te verrichten.

3 Beschikbaarheid van perceelseigen water

De beschikbaarheid van perceelseigen water wordt bepaald door de hoeveelheid water die door de drainage tot afvoer komt en het zoutgehalte van het drainagewater. De theoretische zoetwaterbeschikbaarheid op het perceel kan uit de waterbalans afgeleid worden. De maximaal beschikbare afvoer uit de drains van een perceel is namelijk de jaarlijkse neerslag minus de verdamping, plus de invoer van kwelwater en eventuele andere aanvoer via bijvoorbeeld slootpeilopzet. Door de jaarlijkse gang van deze componenten en de variatie in het zoutgehalte van het drainwater in beschouwing te nemen, kunnen uitspraken gedaan worden over de hoeveelheid water die beschikbaar is voor ondergrondse opslag, en in welke periode van het jaar dit water beschikbaar is.

3.1 Neerslag en verdamping

De neerslag varieert sterk over het jaar. Over het algemeen is de gemiddelde dagelijkse neerslag het hoogst in de zomer en het najaar. Ook de verdamping toont een duidelijk seizoenaal patroon met hoge verdamping in de zomer en lage verdamping in de winterperiode. Op basis van de neerslag en verdampingsgegevens is het cumulatieve maandelijkse neerslagoverschot berekend (de som in de tijd van neerslag minus verdamping) voor zowel Borgsweer als Breezand (Figuur 3-1 Boven). In de zomer is het cumulatieve neerslagoverschot negatief (verdamping hoger dan neerslag). In een gemiddeld jaar is er vanaf augustus een neerslagoverschot en het cumulatieve neerslagoverschot wordt positief rond eind november. Wanneer er water tot afvoer komt van het perceel is niet alleen afhankelijk van het neerslagoverschot, maar ook van de verzadiging van het perceel. Bij volledige compensatie van het neerslagtekort middels irrigatie is er in een gemiddeld jaar vanaf augustus afvoer van drainagewater te verwachten. Zonder compensatie van het neerslagtekort zal eerst het tekort moeten worden aangevuld, voordat het perceel water gaat afvoeren.

Het neerslag overschot in een bepaald jaar hangt sterk samen met de hoeveelheid neerslag in dat jaar, aangezien de verdamping aanzienlijk minder variatie vertoont tussen jaren. Uit de grote standaard deviatie van het neerslag overschot (Figuur 3-1 Boven) blijkt dat het neerslag overschot aanzienlijk kan variëren tussen jaren. Extremen van het neerslag overschot aan het einde van de winter variëren tussen een overschot van enkele mm aan het eind van een droog jaar, zoals 1976-1977 of 1996-1997, tot rond de 500 mm overschot in een nat jaar, zoals 1998-1999 (Figuur 3-1 Boven).

Ook binnen het jaar kan een sterke variatie optreden. Dit wordt geïllustreerd door het hydrologisch jaar 2011-2012 (Figuur 3-1 Boven links). Dit jaar had een zeer droog voorjaar, vergelijkbaar met het droogte recordjaar 1976-1977. Hierdoor was het tijdens het groeiseizoen van de bollen in Breezand erg droog. In de zomer daarentegen viel zodanig veel regen dat het neerslagtekort volledig werd aangevuld, de hoeveelheid neerslag in de zomer was vergelijkbaar met het zeer natte jaar 1966-1967. Het uiteindelijke cumulatieve neerslagoverschot was positief en vergelijkbaar was met een gemiddeld jaar. Dit jaar laat het belang van het bufferen van water zien: 2011-2012 was op jaarbasis een gemiddeld jaar, maar binnen dit jaar kwamen wel een zeer droog voorjaar en een zeer natte zomer kunnen samen voor.

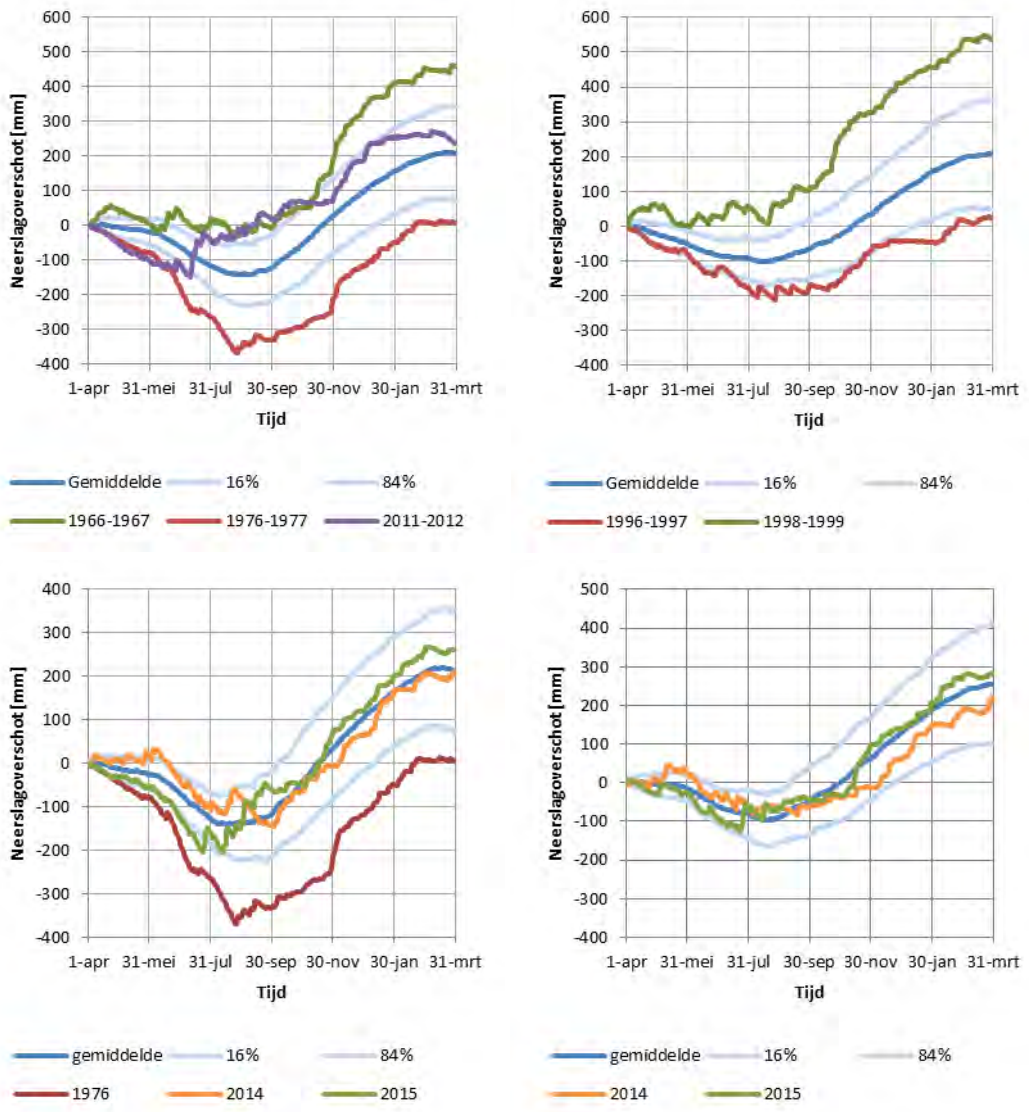
Correctie voor gewasfactoren verdamping

Bij bovenstaande analyse van het neerslagoverschot in normale en extreme jaren is gebruik gemaakt van de referentieverdamping zonder correcties voor de werkelijke verdamping van het gewas. Het werkelijke neerslagoverschot aan het einde van de winter zou wat hoger uit kunnen vallen voor onbebouwde grond, indien de werkelijke, wat lagere verdamping gebruikt zou worden. Voor de proefpercelen is de Makkink verdamping gecorrigeerd voor die van de geteelde gewassen. Gewasfactoren voor aardappelen en bloembollen tijdens het groeiseizoen zijn gepubliceerd in Feddes (1987), en deze zijn weergegeven in Tabel 3. In deze studie is een factor van 0.7 voor de verdamping van onbebouwde grond gebruikt voor de wintertijd, gelijk aan de gewasfactoren voor de eerste en laatste decade voor aardappel (Tabel 3), en in navolging van de Ad Hoc Groep Verdamping (1984). Deze factor voor onbebouwde grond is iets lager genomen dan de factor 1.0 die voor de winterperiode voor grasland wordt aanbevolen door de Bruin (1987).

De met gewasfactoren gecorrigeerde neerslagoverschotten voor het kleiperceel Borgsweer en het zandperceel Breezand voor de groeiperioden in 2014 en 2015 zijn weergegeven in Figuur 3-1 Onder. De grafiek rechts onder laat de situatie in Borgsweer zien. Te zien is dat 2014 een nat voorjaar had, maar dat vanaf begin mei, op het moment dat de aardappels gaan groeien er niet veel water is gevallen. Zowel 2014 als 2015 zijn beide jaren geweest waarbij het een redelijk droog groeiseizoen was. In 2014 werd het groeiseizoen begonnen met een klein overschot, in 2015 werd met een tekort noch overschot begonnen. De situatie in Breezand is weergegeven in Figuur 3-1 links onder. De situatie was in Breezand anders dan in Borgsweer. Gedurende het groeiseizoen in het voorjaar van 2014 werd het tekort als gevolg van verdamping steeds gecompenseerd door neerslag, waarna een relatief droge zomer volgde. In 2015 was het voorjaar zeer droog, en volgde het neerslagtekort de droogte van 1976-1977. Dit droge voorjaar werd echter gevolgd door een behoorlijk natte zomer.

Tabel 3. Gewasfactoren per decade voor aardappel en bloembollen (Feddes, 1987). Voor de winter is een uniforme waarde van 0.7 gebruikt.

Gewas	Mei	Juni	Juli	Augustus	September
Aardappel	- 0.7 0.9	1.0 1.2 1.2	1.2 1.1 1.1	1.1 1.1 1.1	0.7 - -
Bollen	- 0.5 0.7	0.9 1.2 1.2	1.2 1.2 1.2	1.2 1.2 1.2	1.2 1.2 1.2



Figuur 3-1. Boven: Dagelijks gemiddeld cumulatief neerslagoverschot met standaard deviatie (obv periode 1992 – 2015) in de omgeving van Breezand (links) en van Borgsweer (rechts). De onderste twee panelen geven het neerslag overschotten gecorrigeerd voor gewasverdamping en ingezoomd op het groeiseizoen. Het cumulatieve neerslagtekort is berekend vanaf de eerste dag van het hydrologisch jaar (1 april). (Op basis van KNMI gegevens).

3.2 Perceelafvoer uit drains

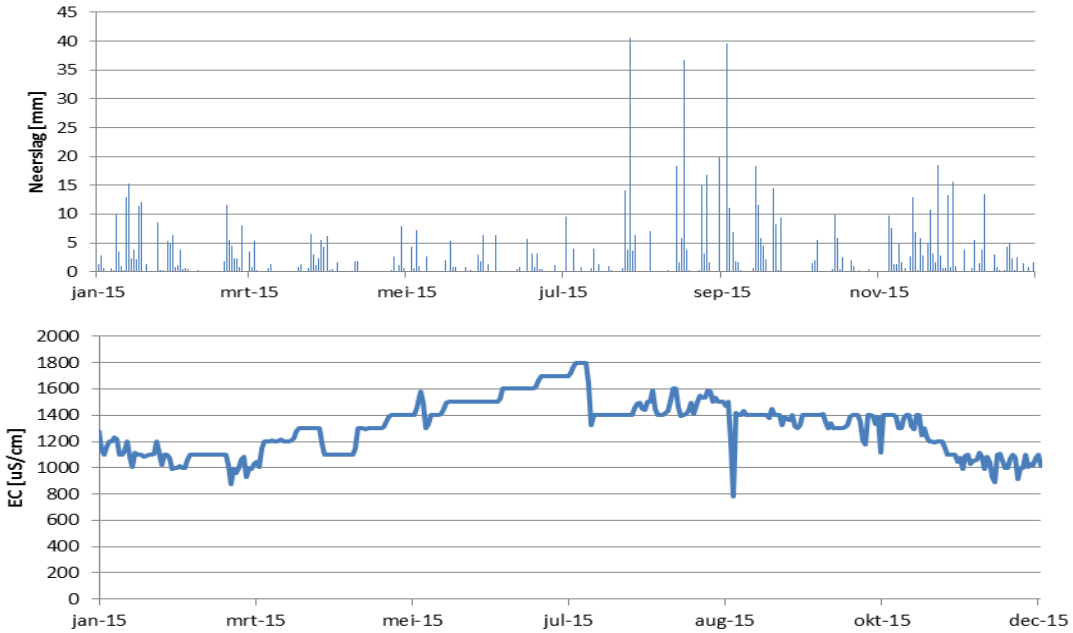
3.2.1 Ingestelde drempelwaarden

Op basis van de tolerantie van het gewas ten aanzien van het zoutgehalte in water dat gebruikt wordt voor beregening is de drempelwaarde bepaald onder welke het water gebruikt kon worden voor infiltratie in de ondergrond. Deze drempelwaarde bepaalt de hoeveelheid water die beschikbaar is voor infiltratie in de ondergrond. Een lagere drempelwaarde leidt tot een grotere hoeveelheid drainagewater dat naar het oppervlaktewater afgevoerd moet worden, een hogere drempelwaarde leidt tot een grotere hoeveelheid drainagewater dat kan worden opgeslagen in de ondergrond. Op basis van literatuurgegevens (van Dam et al., 2007) zijn deze drempelwaarden ingesteld op 1,3 mS/cm voor de bloembollenteelt op het zandperceel Breezand, en op 1,2 mS/cm voor de pootaardappelenteelt op het kleiperceel Borgsweer. Tijdens de pilot zijn, in overleg met de betrokken agrariërs en Delphy, op basis van praktijk ervaringen met deze gewassen de drempelwaarden verhoogd.

Voor het zandperceel Breezand naar 1,4 mS/cm (half november 2014 tot half oktober 2015) en vervolgens naar 1,7 mS/cm (vanaf half oktober 2015). Voor het kleiperceel Borgsweer is de drempelwaarde verhoogd naar 1,5 mS/cm (half november 2014 tot half oktober 2015) en vervolgens verder verhoogd naar 1,7 mS/cm (vanaf half oktober 2015).

3.2.2 Drainage zandperceel Breezand

Op het zandperceel in Breezand is er gedurende het hele jaar regelmatig afvoer vanuit de drains uit het zandperceel gemeten, ook tijdens de zomer in regenachtige perioden. Het verloop van de EC van het drainage water is weergegeven in de onderste figuur van Figuur 3-2. Hierin is goed te zien hoe de EC van het drainagewater fluctueerde gedurende het jaar: in de zomer liep de EC van het water dat afgevoerd werd via de drainage op; in het najaar werd het perceel eerst doorgespoeld en de EC van het drainagewater steeds verder afneemt.
Het water uit de drains van het zandperceel was helder en had een verwaarloosbare hoeveelheid materiaal in suspensie voor het naar het zandfilter getransporteerd werd. In deze zin was de kwaliteit van het uittredende water zeer goed.



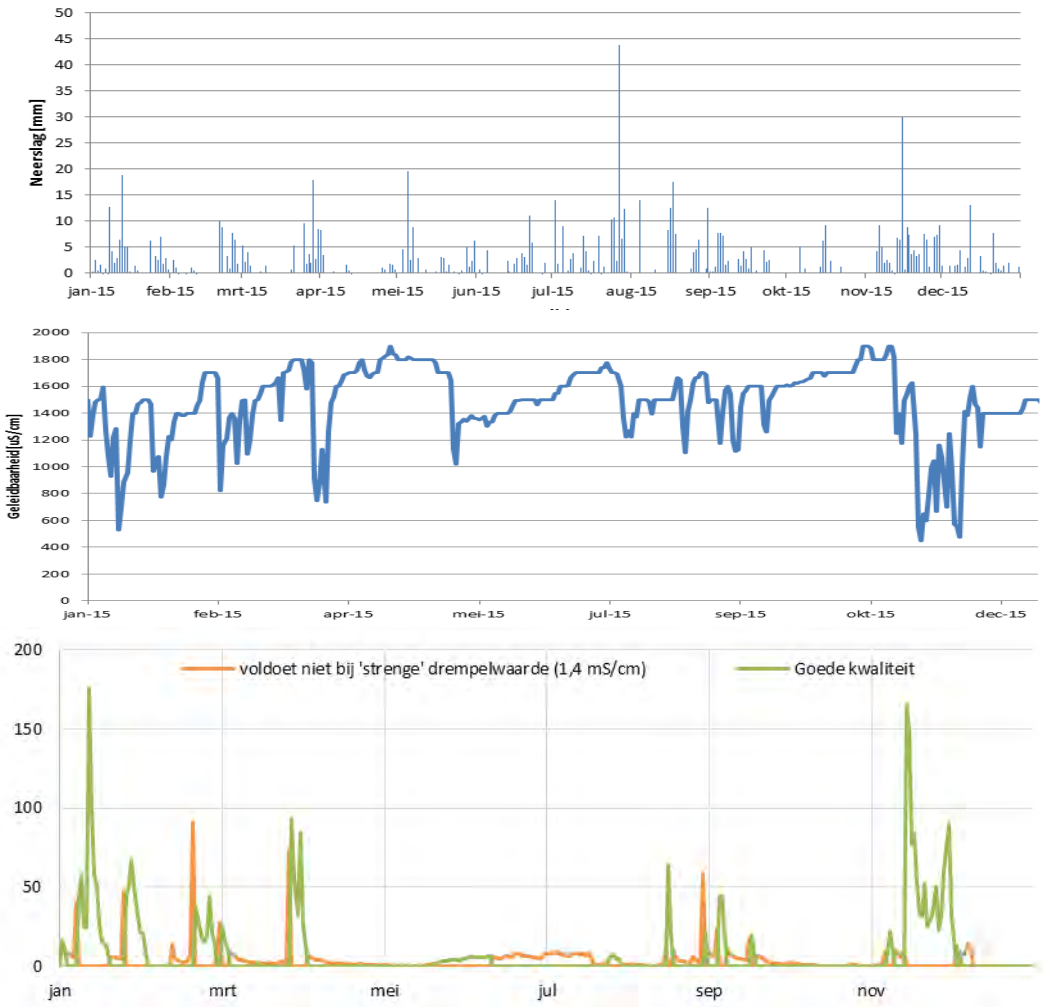
Figuur 3-2. Verloop van de neerslag bij KNMI station de Kooij (boven) en de EC van het drainwater uit het zandperceel Breezand (onder) in de periode januari 2015 tot december 2015.

De maximale hoeveelheid drainwater dat werd afgevoerd in een dag bedroeg 360 m³, op 17 augustus 2015 toen er 46 mm aan neerslag viel. In deze natte periode van 6 dagen, waarin 92 mm neerslag viel, werd 999 m³ naar het oppervlaktewatersysteem afgevoerd. Het maximum dat dagelijks naar het infiltratiesysteem werd afgevoerd was 246 m³ op 3 november 2014 na een neerslag van 29 mm.
De winterneerslag in 2015-2016 was relatief laag, wat leidde tot een beperkte drainafvoer, waarvan 100% naar het infiltratiesysteem geleid werd.
In de zomer van 2015 (april - november) werd 79% van het water naar het oppervlaktewater geleid, terwijl dit percentage in het jaar daarvoor, met minder neerslag, slechts 39% was.
Tussen april 2014 en maart 2015 is er totaal 10414 m³ water uit de drains afgevoerd, waarvan 7504 m³ (72%) voldeed aan de gestelde kwaliteitseisen en in de ondergrond werd opgeslagen.
Tussen 10 april 2015 en 22 januari 2016 werd 6972 m³ vanuit het perceel afgevoerd, waarvan 44% werd geïnfiltreerd. Door een verkeerde afstelling in het systeem werd in de zomer en het najaar van 2015 (tot 23 november) 3.822 m³ water van goede kwaliteit toch naar het oppervlaktewater afgevoerd. Indien dit water wel ter infiltratie zou zijn aangeboden zou echter 99% van het perceelwater geïnfiltreerd zijn geweest.

De EC van het drainagewater varieerde tussen 0,8 en 1,8 mS/cm, met een naar drainafvoer (Q_d) gewogen gemiddelde (voor gegevens waar Q_d > 0,1 m³/d en EC > 0,6 mS/cm) van 1,2 mS/cm over de hele periode. Met de huidige EC limiet die begon op 1,3 mS/cm en geleidelijk is verhoogd tot 1,7 mS/cm werd over de hele periode van 652 dagen 61% (10558 m³) van het drainwater geïnfiltreerd, wat gelijk stond aan gemiddeld 0,60 mm/d. Indien gecorrigeerd wordt voor het afgevoerde goede drainwater naar oppervlaktewater als gevolg van verkeerde afstelling in het system in 2015, zou over de hele periode (2014 en 2015) 83% van het perceelwater voor infiltratie beschikbaar zijn geweest, of 0,8 mm/d.

3.2.3 Drainage kleiperceel Borgsweer

De verandering van de EC van het drainagewater uit het kleiperceel in Borgsweer vertoont andere karakteristieken dan het zandperceel in Breezand. Waar het perceel in Breezand "schoonspoelt" in het najaar, waarna het water van goede kwaliteit is, heeft elke redelijk grote neerslaggebeurtenis in Borgsweer een sterke daling van de EC van het drainagewater tot gevolg. Hierbij daalt de EC in korte tijd sterk, waarna deze langzaam weer oploopt richting de hogere EC-waarde van voor de neerslag. Dit patroon is weergegeven in het middelste figuur in Figuur 3-3 voor het 2015.



Figuur 3-3. Verloop van de neerslag van station Nieuwe Beertha en van de EC van het drainagewater uit het kleiperceel Borgsweer in de periode 1 januari 2015 tot en met 31 december 2015. Het onderste figuur toont de tijdserie van de hoeveelheden drainwater die vanuit het kleiperceel Borgsweer naar het oppervlaktewater systeem afgevoerd werden en die geïnfiltreerd werden.

De basiswaarde van het drainagewater buiten de neerslaggebeurtenissen is boven de ingestelde limiet voor infiltratiewater van 1,8 mS/cm. Als gevolg hiervan is het eerste deel van de neerslag dat tot afstroom komt nog iets zouter. Deze first flush is te zien in de onderste figuur in Figuur 3-3. In deze figuur is een fictieve limiet van 1,4 mS/cm gehanteerd. Hierbij is te zien is dat er juist aan het begin van de afvoer drainagewater niet voldoet aan de gestelde limiet.

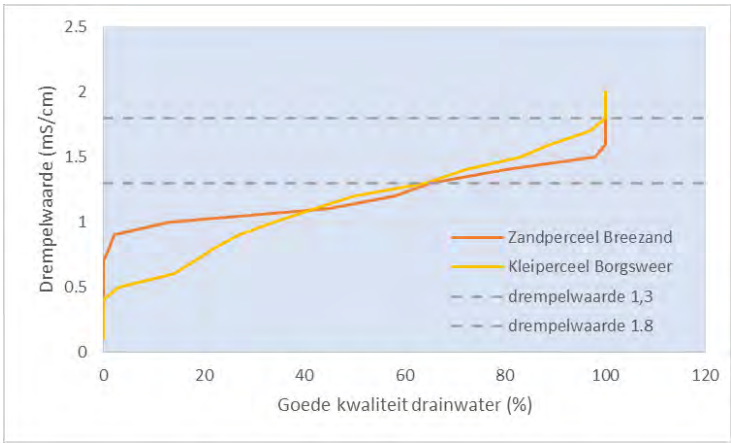
De maximaal dagelijks afgevoerde hoeveelheid drainwater in Borgsweer bedroeg 176 m^3, op 12 januari 2015 toen er 19 mm aan neerslag viel. Dit viel samen met het dagelijkse maximum (175 m^3) wat naar het infiltratiesysteem werd afgevoerd.

Tussen midden april 2014 en midden april 2015 werd 507 m^3 naar het oppervlaktewater afgevoerd, terwijl dat tussen midden april 2015 en eind januari 2016 maar 99 m^3 was. Het meeste water uit de drains had een EC onder de grenswaarde, en hierdoor werden 3213 m^3 in 2014-2015 en 2114 m^3 in 2015-2016 naar het ASR systeem gevoerd ter infiltratie. De hoeveelheid geïnfiltreerd water bedroeg in deze perioden respectievelijk 86% en 96% van het water dat uit het perceel gedraineerd was. Indien de hele periode van 661 dagen wordt beschouwd was 90% van het perceelseigen water van de gewenste kwaliteit en is dit geïnfiltreerd. Infiltratie vond zowel in het voorjaar en de zomer, als in de winter plaats. Er was een aanzienlijke variatie in hoeveelheid geïnfiltreerd water, waarbij de hoeveelheid water in de zomer sterk varieerde afhankelijk van de verdeling van de hoeveelheid neerslag in de tijd en de intensiteit van de neerslag.

De EC varieerde tussen de 0,45 en 2,1 mS/cm, met een naar drainafvoer (Q_d) gewogen gemiddelde (voor gegevens waar Q_d > 0,1 m^3/d en EC > 0,45 mS/cm) over de hele periode van 1,15 mS/cm, wat nog ver onder de gekozen grenswaarde lag. Met de gehanteerde grenswaarden die geleidelijk verhoogd zijn tot de huidige waarde van 1,7 mS/cm werd over de hele periode van 652 dagen 90% (5.327 m^3) van het drainwater geïnfiltreerd, wat gelijk staat aan gemiddeld 0,54 mm/d.

3.2.4 Impact drempelwaarden op opslag percentage

Of het water geschikt is om te infiltreren hangt dus in Breezand vooral af van het moment van het jaar, terwijl het in Borgsweer voornamelijk afhangt van de hoeveelheid en duur van de neerslag. De belangrijkste randvoorwaarde echter is de ingestelde limiet waaraan het water moet voldoen.
Hoe de limiet samenhangt met het geschiktheidspercentage is te zien in Figuur 3-4. Deze figuur laat zien dat bijvoorbeeld bij een ingestelde drempelwaarde van 1,3 mS/cm rond de 65% van het water zoet genoeg is. Als de drempelwaarde echter wordt verhoogd naar 1,8 mS/cm is bijna 100% van het water zoet genoeg om te worden geïnfiltreerd.



Figuur 3-4. Verloop van de EC in relatie tot de hoeveelheid drainagewater. Afhankelijk van de gekozen drempelwaarde is een bepaald percentage geschikt voor infiltratie.

De extreme EC-waarden van het geïnfiltreerde water zowel aan de boven als aan de onderzijde zullen waarschijnlijk niet terug te vinden zijn bij het onttrokken water. Allereerst wordt het water gebufferd in de opslagtank, waar het water wordt gemengd. Vervolgens wordt het water in de ondergrond opgeslagen. In het hart van de bel vind een verdere mening van het geïnfiltreerde water plaats. De verwachting is daarom dat in het onttrokken water de EC waarden rondom de gemiddelde EC waarde van het geïnfiltreerde water zullen liggen. Voor beide locaties liggen de gemiddelde EC waardes tussen de 1 en de 1,3 mS/cm. Als inderdaad niet de dagelijkse waarden, maar lange-termijn gemiddelden bepalend zijn voor de waterkwaliteit kan met een lagere drempelwaarde toch 100% van het drainagewater worden gebruikt.

3.3 Waterbalansen van de proefpercelen

Een samenvatting van de waterbalanscomponenten van de proefpercelen op jaarbasis is gegeven in Tabel 4. Uit analyse van de neerslag, met gewasfactoren (Tabel 3) gecorrigeerde verdamping en drainagegegevens is gebleken dat het drainwater van het zandperceel Breezand voor 30% uit kwel, inlaatwater (door opzet via de drains met slootwater) en verandering van buffering in het perceel bestond, en voor de rest uit geïnfiltreerd regenwater. De gemiddelde hoeveelheid ingelaten water en kwelwater in dit zandperceel bedroeg gemiddeld 0.6 mm/d.

In de periode 2014-2015 werd in Breezand 326 mm (gemiddeld 0.9 mm/opgeslagen in de ondergrond. Deze hoeveelheid is nagenoeg gelijk aan het totale voor bollen gecompenseerde neerslagtekort van 1976-1977 (1 van de meest droge jaren) van 360 mm. In de kortere periode van 1 april 2015 tot 21 januari 2016 (296 dagen) kon gemiddeld 1.0 mm/d geïnfiltreerd worden, waarbij aangetekend dient te worden dat het te verwachten is dat infiltratie gedurende de maanden februari en maart 2016 nog zou kunnen leiden tot een hogere waarde.

Zowel neerslag op het kleiperceel Borgsweer als verdamping waren 5-10% lager dan in Breezand. De drainage afvoer uit het kleiperceel in Borgsweer was echter 49% (2015-2016) tot 55% (2014-2015) lager dan die uit het zandperceel Breezand. Dit verschil is dus deels te verklaren uit het feit dat het droger is geweest in Borgsweer dan in Breezand. De belangrijkste verklaring voor dit verschil is echter dat er bij het perceel in Borgsweer geen water is ingelaten vanuit het watersysteem om het neerslagtekort te compenseren.

Tabel 4: Waterbalanscomponenten voor het zandperceel Breezand en het kleiperceel Borgsweer over de perioden 30 april 2014 – 31 maart 2015 en 1 april 2015 – 21 januari 2016. De neerslag en verdamping (gecorrigeerd voor gewasverdamping) zijn gemeten op het perceel en op de KNMI stations de Kooy voor Breezand en Nieuw Beertha voor Borgsweer (bron: KNMI). De drainage is het totaal van het gedeelte dat naar het oppervlaktewater werd gevoerd, en dat naar de infiltratieput werd geleid. Voor Breezand 2015-2016 zijn de oppervlaktewater en ASR fluxen gecorrigeerd voor abusievelijk transport van drainwater naar het oppervlaktewater. De kwelflux is als restterm uit de waterbalans afgeleid.

Jaar	Neerslag [mm]	Verdamping [mm]	Kwel, inlaat en verandering in berging [mm]	Drainage [mm]	Oppervlakte-water [mm]	ASR [mm]
Breezand						
2014-2015	930	583	106	453	127	326
2015-2016*	721	540	122	303	4	299
Borgsweer						
2014-2015+	727	513	34	248	34	214
2015-2016*	670	490	-32	148	7	141

+Onvolledig jaar, periode van 336 dagen, *periode van 296 dagen

Doordat minder water beschikbaar was, is de geïnfiltreerde waterhoeveelheid ook lager. Op dagbasis was dit gemiddeld 0,5 mm/d. Het verschil in de hoeveelheid drainage zat hier in de hoeveelheid kwel (gemiddeld 0,0 mm/d), die in Borgsweer in grote mate beperkt werd door de dikke deklaag van zware zavel.

De grootste onzekerheid in de getoonde waterbalans is de verdamping. Indien de Makkink referentieverdamping werd genomen, in plaats van de met gewasfactoren gecorrigeerde verdamping, moest de kwel voor een sluitende waterbalans worden verhoogd tot gemiddeld 0.7 mm/d voor het zandperceel Breezand en 0,2 mm/d voor het kleiperceel Borgsweer.

4 Infiltratie en onttrekking van water in de ondergrond

Infiltratie in het grondwater werd in het kleiperceel Borgsweer geregeld via 1 put met filters op twee diepten, terwijl in het zandperceel Breezand infiltratie via 1 put met filters op vier diepten verliep. Infiltratie verliep via drukverval onder zwaartekracht.

4.1 Zandperceel Breezand Infiltratie

Vanaf januari 2014 werd er zoet water geïnfiltreerd in de ondergrond van het zandperceel Breezand. Door toevoer van zoet water werd een zoetwaterbel opgebouwd in het oorspronkelijk zoute watervoerend pakket. Het perceel heeft een oppervlakte van 2,3 ha. In totaal werd er sinds het begin van de pilot ruim 15000 m^3 water geïnfiltreerd voor ondergrondse opslag; 3500 m3 werd geïnfiltreerd tot 31 maart 2014. Ongeveer 7650 m^3 werd in de periode 1 april 2014 – 31 maart 2015 opgeslagen. Tussen 1 april 2015 en 21 januari 2016 werd ruim 3650 m^3 geïnfiltreerd. De lagere hoeveelheid infiltratie in 2015 – 2016 werd veroorzaakt door abusievelijke afvoer van 3800 m^3 van het perceelseigen water naar het oppervlaktewater. De cumulatieve hoeveelheden geïnfiltreerd water in de op verschillende diepte geplaatste filters in het watervoerend pakket zijn afgebeeld in Figuur 4-1. De hoeveelheid geïnfiltreerd water nam toe met de diepte waarop het filter geplaatst was, waarbij het diepste filter de hoogste infiltratie had.

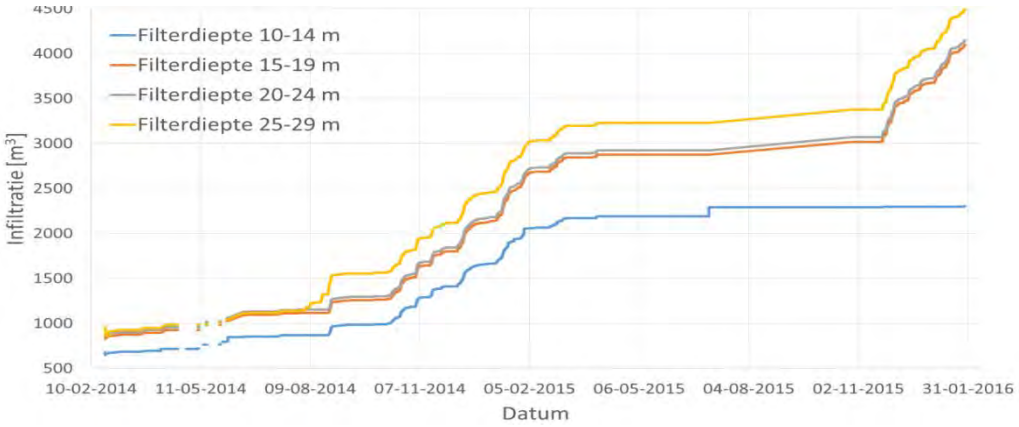
4.2 Zandperceel Breezand onttrekking

Om de zoetwaterbel de mogelijkheid te geven om zich te ontwikkelen, werd in het eerste groeiseizoen een beperkte onttrekking van 760 m^3 uitgevoerd. In de daaropvolgende winter van 2014-2015 werd de infiltratie doorgezet. In de zomer van 2015 is vervolgens water onttrokken om te gebruiken voor fertigatie van het perceel.

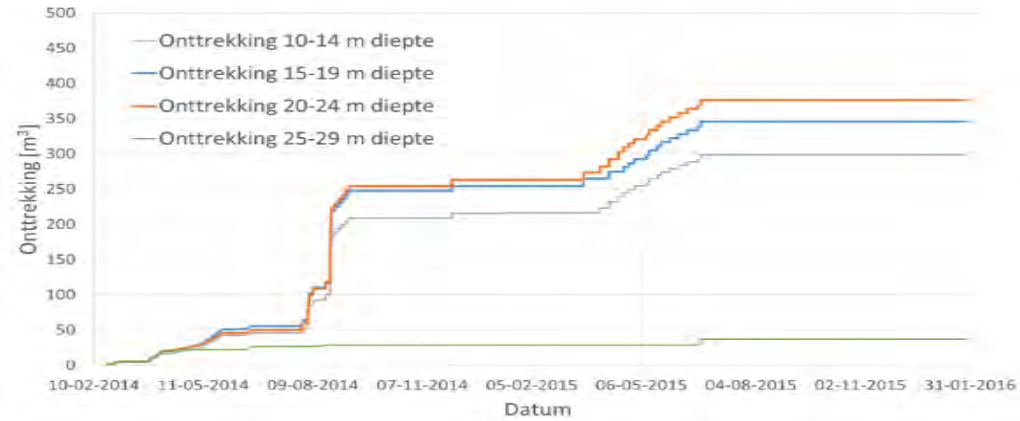
Het verloop van de onttrekking in de tijd voor de periode 21 februari 2014 tot 21 januari 2015 is weergegeven in Figuur 4-2, uitgesplitst naar de vier filters op dieptes tussen de 10 en 29 m. In totaal werd er 1052 m^3 onttrokken voor irrigatie van 0,7 ha, waarvan 747 m^3 onttrokken werd tussen 1 april 2014 – 31 maart 2015. Hiermee werd een beregening gerealiseerd van 107 mm. De overige 276 m^3 werd onttrokken tussen 1 april 2015 – 21 januari 2016 en bedroeg 39 mm.

Net als voor infiltratie, nam onttrekking uit de vier putten toe met diepte, van 298 naar 396 m^3 in totaal. Onttrekking uit diepste put (initieel met het hoogste zoutgehalte) werd in 2014 gestopt ter voorkoming van het aantrekken van brak water zodat een grotere efficiëntie van het systeem gerealiseerd kon worden. Hierna was bij deze hoeveelheid onttrekking geen beperking voor wat betreft de waterkwaliteit. Het watergebruik in Breezand is beperkt gebleven tot irrigatie en fertigatie, zodat de zoet water voorraad kon worden ontwikkeld. Daardoor is de terugwinning zeer laag: voor beide perioden respectievelijk 6,5% en 9,0% van het geïnfiltreerde water. Dit is ver onder de potentiële terugwinning.

Hierdoor is ook de EC van het onttrokken water dat vergelijkbaar gebleven met die van het geïnfiltreerde water. Het water dat is gemengd met het brakke water - wat zich aan de randen van de zoetwaterbel bevindt- is dus ook niet onttrokken.



Figuur 4-1. Verloop van de cumulatief geïnfiltreerde hoeveelheid water in elk van de vier filters in het watervoerend pakket in het zandperceel Breezand.



Figuur 4-2. Cumulatieve onttrekking uit de vier filters van het ASR systeem van het zandperceel Breezand.

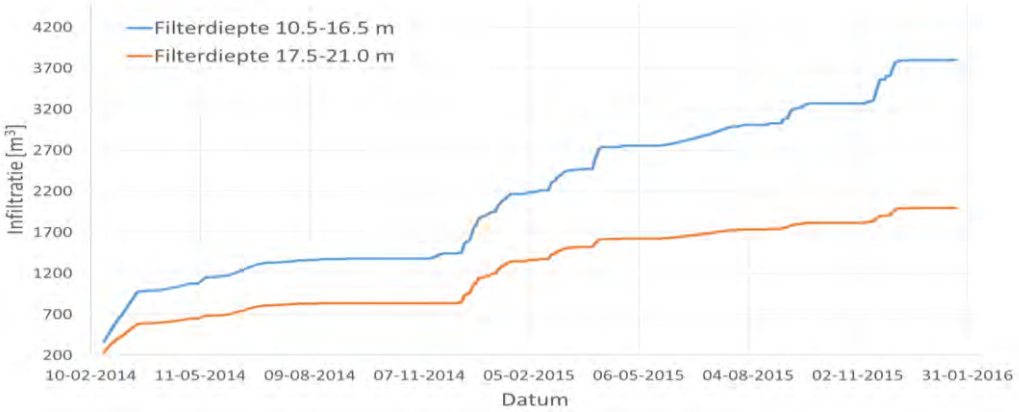
4.3 Kleiperceel Borgsweer infiltratie

Ruim 5700 m³ perceelseigen water werd geïnfiltreerd voor ondergrondse opslag in het kleiperceel Borgsweer in de periode februari 2014 – januari 2016. In proefjaar 2014 – 2015 werd van het 1,5 ha grote perceel ruim 4100 m³ opgevangen. Dit water werd via het ondiepe en het diepe filter geïnfiltreerd in de ondergrond (Figuur 4-3), waardoor een ondergrondse zoetwaterbel gevormd werd. Om de zoetwaterbel de mogelijkheid te geven zich te ontwikkelen, is in deze periode een beperkte onttrekking van 800 m³ uitgevoerd. De infiltratie is doorgezet in het winterseizoen 2015 - 2016, waarbij tot 21 januari 2016 nog 1600 m³ geïnfiltreerd werd.

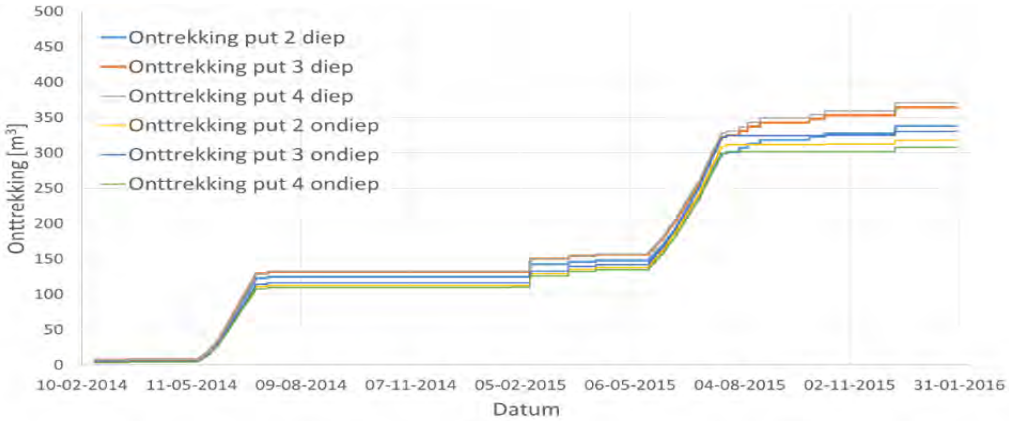
De meeste infiltratie (in totaal 3800 m3 over de hele periode) vond in het ondiep geplaatste filter plaats. De maximale infiltratie bedroeg 3,8 m3/uur in het ondiepe filter, en deze waarde lag wat lager op 2,75 m3/uur voor het diepe filter. Infiltratievolumes van boven de 2,0 m3/uur werden over de hele periode waargenomen voor het ondiepe filter, en van boven de 1,7 m3/uur voor het diepe filter. De infiltratiecapaciteit leek af te nemen voor het diepe filter, maar leek na afpomping in januari 2016 weer op de oorspronkelijke capaciteit te komen. Dit wijst erop dat de problemen veroorzaakt door suspensie van kleideeltjes in het geïnfiltreerde water (zie sectie 4.5) nog nauwelijks permanente invloed heeft gehad op de werking van de filters.

4.4 Kleiperceel Borgsweer onttrekking

Het verloop van de onttrekking van grondwater in Borgsweer over de periode 20 februari 2014 tot 21 januari 2015 is weergegeven in Figuur 4-4. In totaal werd er 2028 m³ onttrokken voor irrigatie van 0,5 ha, waarvan 824 m³ (165 mm) onttrokken werd tussen 1 april 2014 – 31 maart 2015, en 1206 m³ (241 mm) tussen 1 april 2015 – 21 januari 2016. De onttrekking was gelijkmatig uit de zes onttrekkingsfilters in de ondergrond, en varieerde tussen de 308 en 370 m³, waarbij iets hogere onttrekkingen plaatsvonden uit de diepe filters. De terugwinhoeveelheden bedroegen voor het kleiperceel Borgsweer respectievelijk 22% en 53% van het geïnfiltreerde water voor beide periodes.



Figuur 4-3. Verloop van de cumulatief geïnfiltreerde hoeveelheid water in het ondiepe en het diepe filter in het watervoerend pakket in het kleiperceel Borgsweer.



Figuur 4-4. Cumulatieve onttrekking uit de zes ondiepe en diepe filters van het ASR systeem van het kleiperceel Borgsweer.

4.5 Werking van de filters

Het water uit de drains van het kleiperceel was bij hoge afvoerdebieten troebel van uitspoelende klei (zie Figuur 4-5). Dit veroorzaakte problemen in het zandfilter (verstopping) en het is zeer wel mogelijk dat er kleideeltjes door het zandfilter heen getransporteerd zijn en in de infiltratieput terecht zijn gekomen. Aangezien de efficiëntie van infiltratie omlaag ging in de tijd zijn in januari 2016 zowel de ondiepe als de diepe infiltratieput vanaf de bodem afgepompt. Hierbij kwam klei naar boven. De diepe put gaf na 20 minuten pompen helder water, maar de ondiepe put leverde na een uur pompen nog steeds enigszins troebel water. Deze langere pomptijd wordt mede veroorzaakt omdat ruim 65% van het water in het ondiepe filter is geïnfiltreerd. Het ondiepe filter is dus ook belast met meer klei dan het ondiepe filter.

Aangezien na 1 uur pompen nog geen helder water werd onttrokken is het waarschijnlijk dat kleideeltjes mede in het watervoerend pakket neergeslagen zijn, wat de efficiëntie verlaagd kan hebben. Maatregelen zijn genomen om het bezinken van klei reeds in het bufferreservoir te bevorderen, en om een lagere stroomsnelheid in de drains zelf te bevorderen zodat er minder klei uit de drains zelf komt. Deze innovaties zijn verder toegelicht in hoofdstuk 9. De slechte kwaliteit van het drainwater in de zin van sedimentlast is dus mogelijk een punt van zorg voor de exploitatie van een ASR in kleigebieden.

Figuur 4-5. Links zoals het drainwater met klei er uitziet direct na opvangen, geheel rechts nadat de klei is neergeslagen.

In het zandperceel Breezand was het water dat uit het perceel kwam helder, en bevatte weinig deeltjes die tot verstopping zouden kunnen leiden. Op dit perceel bleek geen noemenswaardig verschil te zitten in de infiltratiecapaciteit tussen beide winterseizoenen voor de onderste drie filters, het bovenste filter vertoonde echter een lagere infiltratiecapaciteit in het tweede winterseizoen. De reden hiervoor is onduidelijk, maar dit had weinig invloed op de totale infiltratiecapaciteit van het systeem. De dimensionering van de vier putten was genoeg voor een maximum infiltratie van 11,6 m^3/uur. De maximum infiltratie per filter steeg met de filterdiepte van 2,3 m^3/uur voor het ondiepe filter tot 3,9 m^3/uur voor het diepste filter. Deze putten dienden zowel voor infiltratie als onttrekking, en de regelmatige omkering van de stromingsrichting van het water in de put zou wellicht ook een positieve invloed kunnen hebben gehad op de werking van de filters.

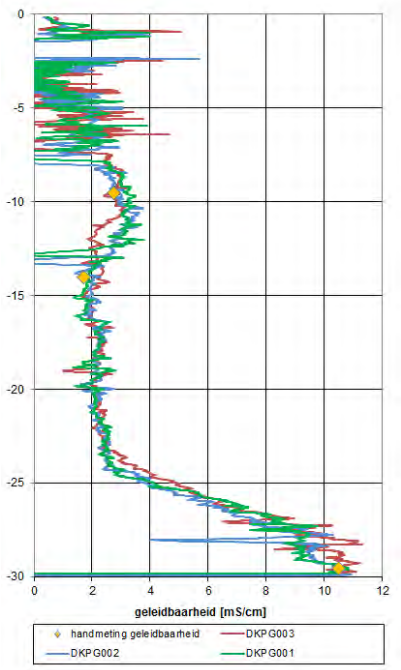
Hoewel de set van vier filters over-gedimensioneerd lijkt, omdat de infiltratie meestal onder het geobserveerde maximum lag, maakt de aanwezigheid van apart te selecteren filters op verschillende diepten in het watervoerend pakket het mogelijk te sturen op het niveau waar infiltratie (of onttrekking) plaatsvindt. Dit kan de terugwinefficiëntie van het systeem vergroten omdat met infiltratie en onttrekking via bepaalde filters in zekere mate ingespeeld kan worden op de vorm van de zoetwaterbel in relatie tot dichtheidsstroming waarbij zoet water heeft de neiging op te drijven vanwege de lagere dichtheid ten opzichte van zout water (zie verder hoofdstuk 7 en 8).

5 Ontwikkeling van de zoetwaterbel

5.1 Zandperceel Breezand

De vorming en ontwikkeling van het zoetwaterlichaam werd in Breezand geobserveerd door continue metingen van het zoutgehalte gemeten in peilbuizen geplaatst op 2 m, 20 m en 32 m afstand van de infiltratieput, met filters op diepten tussen de 10 en 30 m. De ontwikkeling van de zoutconcentratie gaf informatie over het gedrag van de zoetwaterbel in een zoutere omgeving.

De EC metingen van het water in peilbuizen geplaatst op verschillende afstanden en dieptes van de infiltratieput gaven een inkijk in het gedrag van de zoetwaterbel in de ondergrond. De EC metingen werden gestart nadat infiltratie was begonnen. Het beeld van het verloop van de EC variatie met de diepte is verkregen op basis van de sonderingen. Dit verloop is weergegeven in Figuur 5-1. Te zien is dat de geleidbaarheid het grondwater van eerste 25 m matig brak is (tussen de 2 en 4 mS/cm), terwijl deze beneden de 25 m toeneemt tot rond de 10 mS/cm op 30 m diepte.



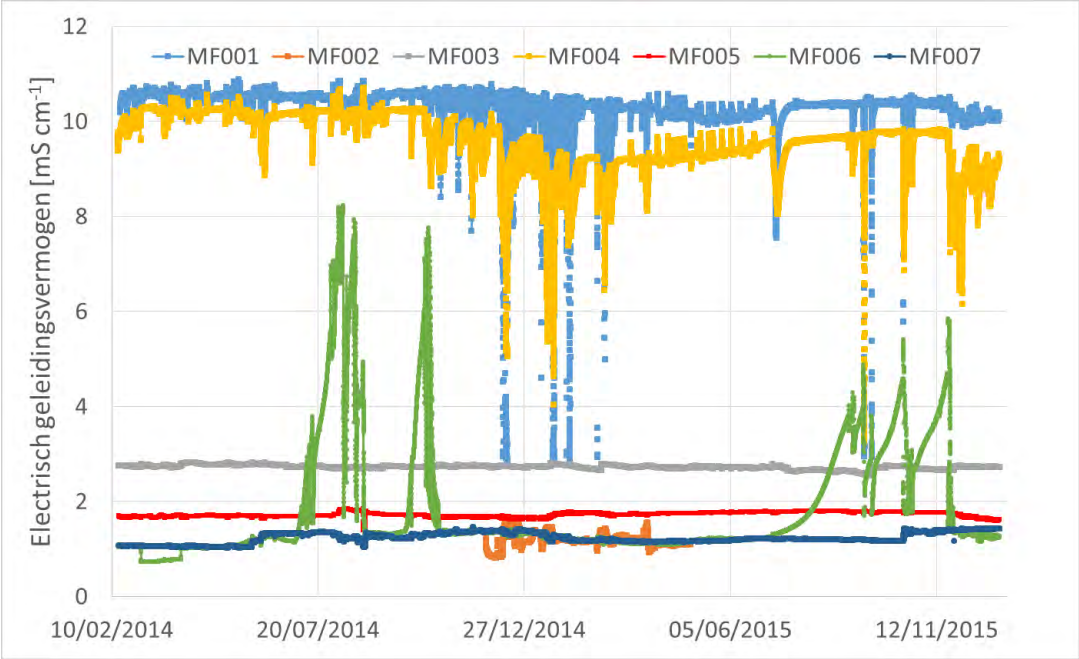
Figuur 5-1. Elektrische geleidbaarheid van het water in de bovenste 30 m van de ondergrond in het zandperceel Breezand zoals verkregen uit drie sonderingen en handmetingen in peilbuizen.

De variatie van de EC waarden in de tijd van het grondwater in deze peilbuizen is getoond in Figuur 5-2. Peilbuizen MF001, MF002 en MF003 op 32 m afstand van de infiltratieput vertoonden EC

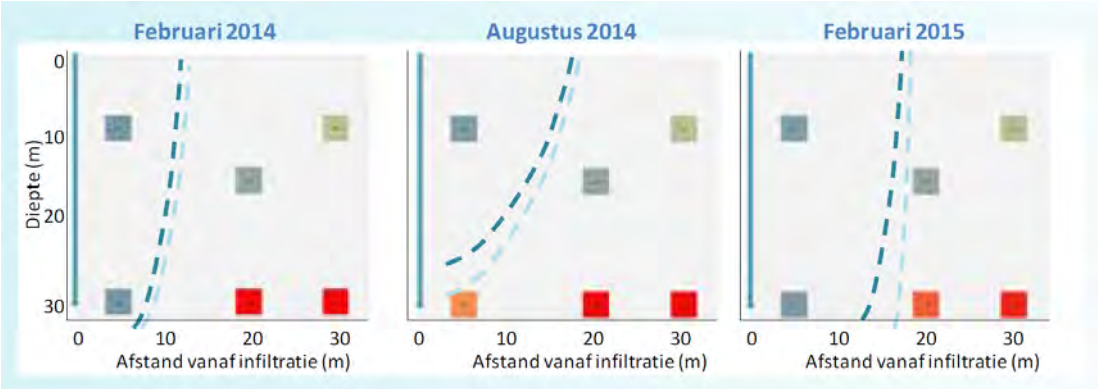
waarden in de tijd met gemiddelden van 2,7±0,0 mS/cm op 10 m diepte (MF003), 1,2 ±0,1 mS/cm op 15 m diepte (MF002) en 10,3±0,6 mS/cm op 30 m diepte (MF001). Ook de EC metingen in de peilbuizen op 20 m afstand van de infiltratieput waren vrij constant in de tijd met waarden van 1,7±0,1 mS/cm op 15 m diepte (MF005) en 9,6±0,7 mS/cm op 30 m diepte (MF004). De EC waarden van water uit de peilbuis geplaatst op 2 m van de infiltratieput en op 10 m diepte (MF007) vertoonde weinig variatie in de tijd en had een EC waarde van 1,2±0,1 mS/cm, die vergelijkbaar was aan die van het geïnfiltreerde water. De ondiepe peilbuis MF005 vertoonde een lichte daling in de EC in de infiltratieperioden, vanaf december 2015 leek de peilbuis in de invloedszone van de bel te komen, aangezien hier een duidelijke daling van de EC begon op te treden.

Het geïnfiltreerde water veroorzaakte geen permanente verzoeting van het grondwater in de diepe peilbuizen op 30 m diepte in de periode tussen februari 2014 en januari 2015. Het water in de diepe peilbuis (MF006) vertoonde duidelijke veranderingen in de tijd (Figuur 5-2). In deze diepe peilbuis was de EC tijdens perioden van infiltratie gelijk aan die van het geïnfiltreerde water (1,2 mS/cm), waarna in de zomer de EC langzaam weer opliep naar 8 mS/cm. Ook de EC-waarden van het grondwater in de diepe peilbuizen op grotere afstand vertoonden effecten van de infiltratie. Lichte dalingen in de EC werden gemeten tijdens beide infiltratieperioden in 2014-2015 en 2015-2016, met kortdurende scherpere dalingen tot een minimum EC van 3-4 mS/cm (MF001, MF004) tijdens perioden van infiltratie. Mogelijk zijn dit effecten waarbij het geïnfiltreerde zoete water het aanwezig brakke water wegdrukte, waarbij het licht-brakke water in de ondiepere lagen, het brakkere water in de diepere water opzij drukte (zie Figuur 5-1).
De perioden waarin de EC steeg in deze peilbuis vielen niet altijd samen met perioden van onttrekking. De verandering in EC in de diepe peilbuizen tijdens perioden waarin niet onttrokken werd kan verklaard worden door het opdrijven van het zoete water op deze diepte door het verschil in dichtheid met het zoute water. Het zoet-zout grensvlak leek scherp, aangezien er binnen relatief korte tijd grote veranderingen in de EC konden worden geobserveerd in de diepe peilbuizen, zoals in MF006 na een korte periode van infiltratie in Augustus 2014.

In totaal werd er ruim 15500 m^3 geïnfiltreerd tot februari 2016, en werd er 1057 m^3 onttrokken, wat een netto opslag van ongeveer 14500 m^3 betekent. Een schatting van de straal van het zoetwaterlichaam kan worden verkregen door aan te nemen dat deze cilindrisch van vorm zou zijn rond de infiltratieput (hoogte 20 m), en een porositeit van het watervoerend pakket aan te nemen van 25 tot 35%. Bij deze aannames zou de zoetwaterbel zich in een straal van 25 tot 30 m rond de infiltratieput bevinden. Aangezien het zoete water opdrijft is het aannemelijk dat er ook in de toekomst geen grote verzoeting van het grondwater in de diepe peilbuizen die verder van de infiltratieput af staan zal optreden. Een schematisch overzicht van de ontwikkeling van de zoetwaterbel in het eerste jaar is getoond in Figuur 5-3.



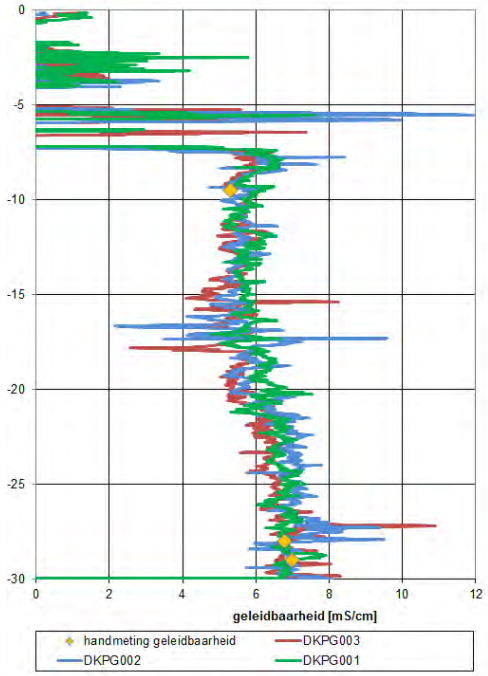
Figuur 5-2. Variatie in de EC waarden van het grondwater in de ondiepe peilbuizen op 2 m afstand (MF007), 22 m afstand (MF005) en 32 m afstand (MF002, MF003) en in de diepe peilbuizen op 2 m afstand (MF006), 20 m afstand (MF004) en op 32 m afstand (MF001) van de infiltratie- en onttrekkingsput.



Figuur 5-3. Schematisch overzicht van de ontwikkeling van de zoetwaterbel in Breezand in het eerste jaar van infiltratie en onttrekking.

5.2 Kleiperceel Borgsweer

Om de ontwikkeling van de zoetwaterbel in Borgsweer te monitoren zijn er continue EC metingen gedaan in peilbuizen op afstanden van 5 m, 15 m en 30 m vanaf de infiltratieput, en op dieptes van 10 en 29 m onder het oppervlak. De monitoring is gestart na het begin van de infiltratie. Het verloop van de EC in de peilbuizen is weergegeven in Figuur 5-5.
Het verloop van de EC van het grondwater met de diepte, voordat de infiltratie begon is bepaald op basis van de sonderingen en is weergegeven in Figuur 5-4. Te zien is dat in Borgsweer de watervoerende laag een stuk brakker is dan in Breezand: direct onder de deklaag was het water al brak (rond de 6 mS/cm) en met de diepte was er een beperkte toename van de EC tot ongeveer 7 mS/cm.

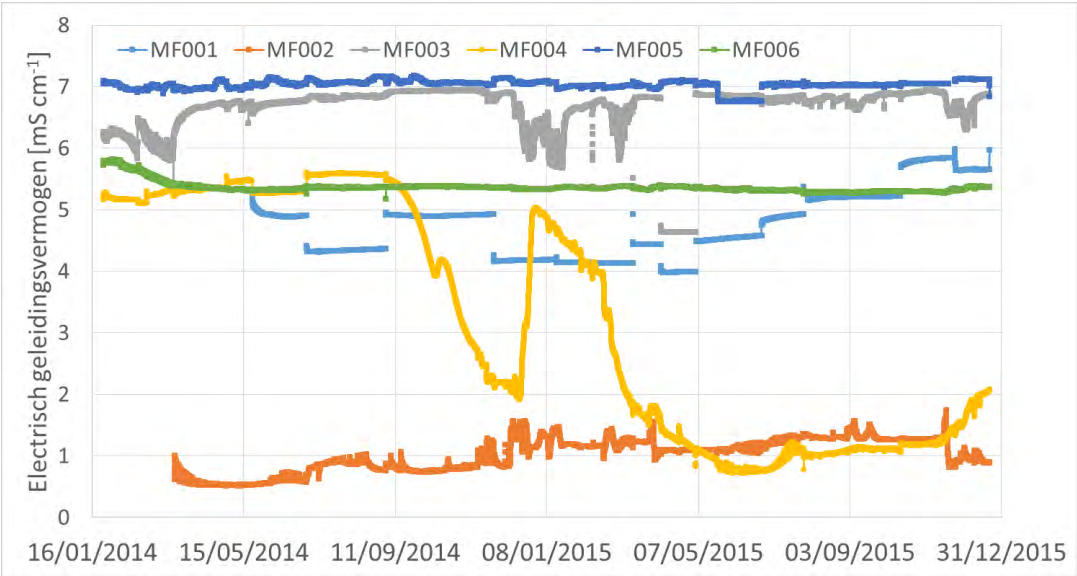


Figuur 5-4. Elektrische geleidbaarheid van het water in de bovenste 30 m van de ondergrond in het kleiperceel Borgsweer (rechts), zoals verkregen uit drie sonderingen en handmetingen in peilbuizen.

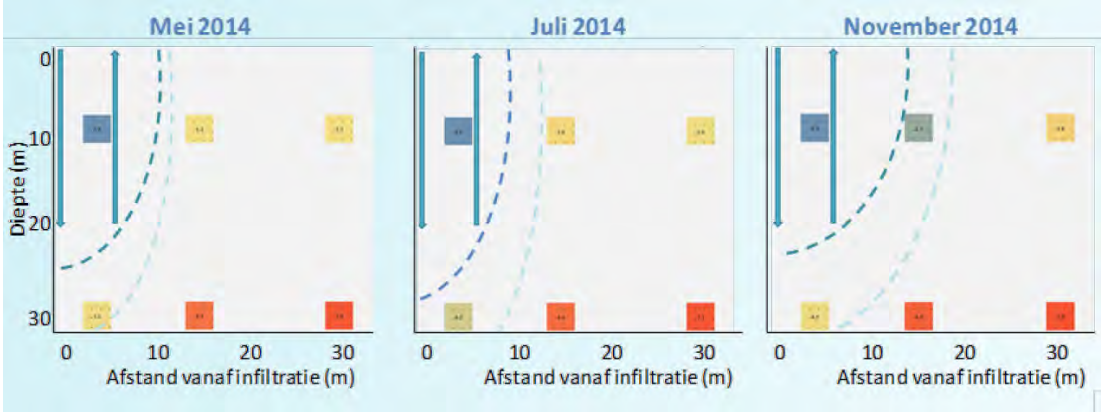
Tussen de infiltratieput en de onttrekkingsputten op 5 m afstand is na de eerste infiltratie continu zoet water aanwezig met een EC van gemiddeld 1.0±0.3 mS/cm, zoals te zien is in de aan de EC metingen gedaan in het ondiepe filter van peilbuis MF002 (Figuur 5-5). Op 15 m afstand van de infiltratieput op 10 m diepte (MF004) trad ook een eerste verzoeting op in september 2014, waarna er echter in de winter weer verzilting optrad, en pas in het voorjaar van 2015 de EC van het water gelijk werd aan dat van het geïnfiltreerde water. Aan het einde van 2015 vond er weer een stijging van de EC plaats. Het grondwater in de ondiepe peilbuis op 30 m (MF005) afstand vertoonde geen enkele invloed van de zoetwaterinfiltratie en bleef constant op een EC van 5.4±0.1 mS/cm. Dit toont aan dat de zoetwaterbel zich ontwikkeld had in een straal van ongeveer 15 m rond de infiltratieput. De EC van het water in de diepe peilbuis op 15 m afstand (MF003) toonde ook een lichte daling tijdens perioden van infiltratie, waarbij de EC voor korte tijd van 7 mS/cm naar onder de 6 mS/cm daalde. Dit komt mogelijk doordat het water van geringere diepte (wat iets minder brak is) werd weggedrukt naar diepere lagen. Het grondwater op 29 m diepte in de peilbuis op 30 m afstand van de infiltratieput bleef constant op een waarde van 7,0±0,1 mS/cm.
In Figuur 5-6 is op basis van de metingen voor drie momenten een indicatie geven van de vorm van de zoetwaterbel in de ondergrond.

Ter verificatie werd, naast de continue metingen van de EC van het grondwater voor het volgen van de ontwikkeling van de zoetwaterbel, ook op drie verschillende tijdstippen een 2-dimensionaal weerstandsprofiel gemeten van de ondergrond volgens de geofysische CVES methode. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 5-7. De metingen geven duidelijk aan dat de weerstand van het watervoerend pakket lokaal verhoogd was door de injectie van zoet water (er is meer blauw gekleurd). Het zoete water was met name geconcentreerd in een zone op 20 m diepte in augustus 2014. Op een afstand van 20 a 30 is ook een gebied met een verhoogde weerstand. Dit is waarschijnlijk grof materiaal (grof zand of grind) dat eveneens een hogere weerstand heeft. Na winterinfiltratie was in april de weerstand verder toe genomen en had de bel zich lateraal uitgebreid, waarbij de zone met de hoogste weerstand op een diepte van ongeveer 15 m lag. Na de onttrekking van water in de zomer (oktober 2015) was de weerstand afgenomen en leek er ook nog laterale uitbreiding te zijn geweest naar de linkerkant in het profiel, hoewel er geen infiltratie had plaatsgevonden. Deze verdere laterale verspreiding van het zoete water werd derhalve veroorzaakt door een proces onafhankelijk van de infiltratie en onttrekking. Waarschijnlijk is deze ontwikkeling te verklaren door het opdrijven van het zoete water. De zoetwaterbel spreidt zich hoger in het watervoerend pakket dan in de breedte uit, zodat op een grotere afstand van de infiltratieput zoet water wordt gemeten.

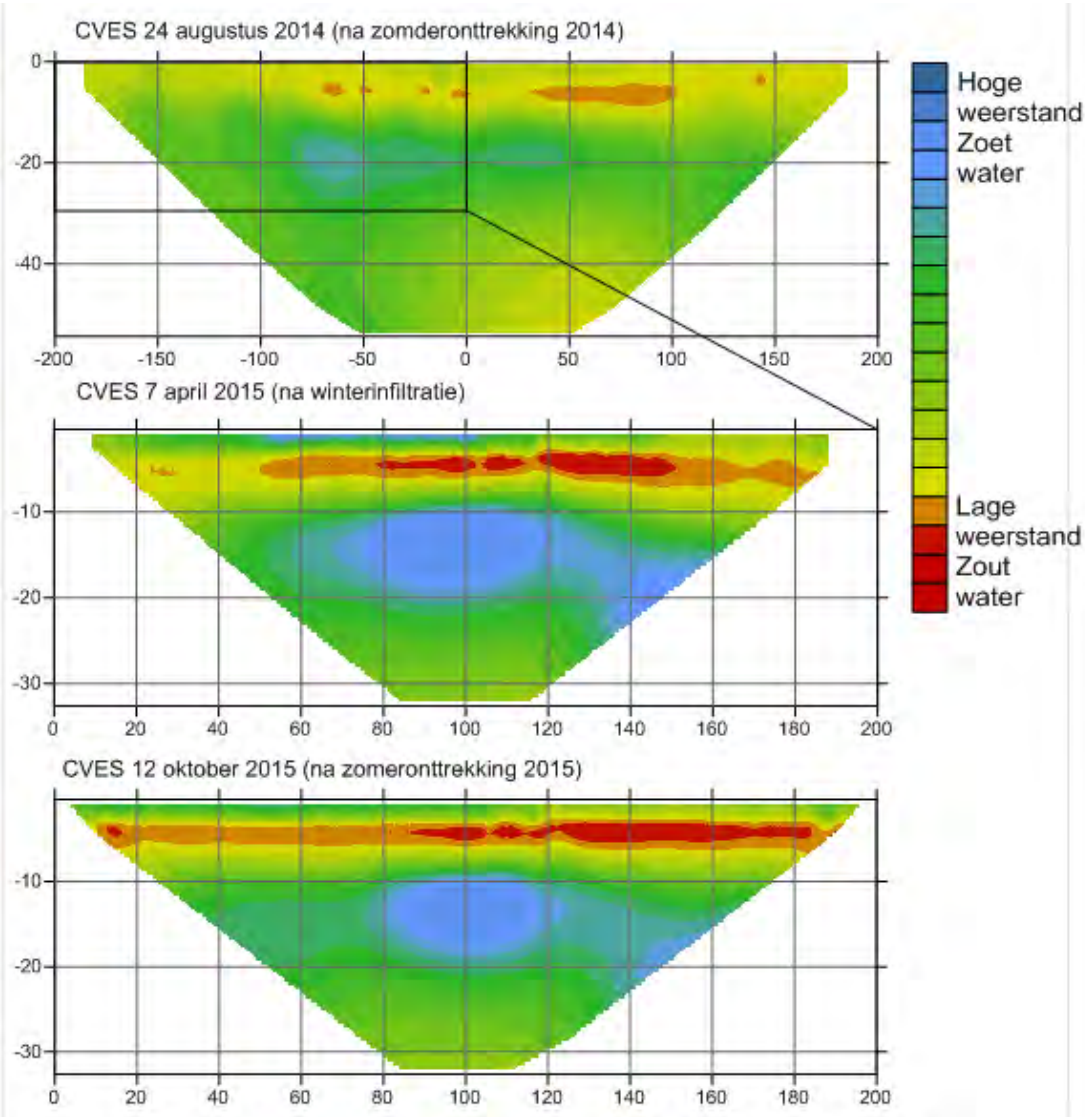
In totaal werd er 6168 m³ geïnfiltreerd tot februari 2016, en werd er 2042 m³ onttrokken. Dit betekent dat er een zoetwatervoorraad van ongeveer 4000 m³ is in de ondergrond. Indien we aannemen dat het zoetwaterlichaam cilindrisch van vorm is rond de infiltratieput (10,5 m diepte), en dat de porositeit van het watervoerend pakket 25 tot 35% is, zou de zoetwaterbel zich in een straal van ongeveer 19 tot 22 m rond de infiltratieput bevinden. Dit komt overeen met de gemeten waarden op 15 m afstand van de infiltratieput, die verzoeting laten zien, en die op 30 m die geen verzoeting aangaven.



Figuur 5-5. Variatie in de EC waarden van het grondwater in de ondiepe peilbuizen op 5 m afstand (MF002), 15 m afstand (MF004) en 30 m afstand (MF006) en in de diepe peilbuizen op 5 m afstand (MF001), 15 m afstand (MF003) en op 30 m afstand (MF005) van de infiltratieput in het kleiperceel Borgsweer.



Figuur 5-6. Schematisch overzicht van de ontwikkeling van de zoetwaterbel in Borgsweer in de eerste periode van infiltratie en onttrekking.



Figuur 5-7. Veranderingen in de weerstand in de ondergrond zoals geobserveerd in geofysische CVES metingen gedaan over het kleiperceel Borgsweer op verschillende tijdstippen. De x- en y-assen van de grafieken zijn in m afstand en de legenda is een maat voor de weerstand dan wel geleidbaarheid. Het zoete water is minder geleidend en de vorm en ontwikkeling van de zoetwaterbel is in blauw weergegeven. De deklaag van klei is geleidend en is rood-geel gekleurd. N.B. de lengte van het eerste profiel was 400 m (boven) en dit werd later verkleind naar 200 m (midden en onder).

6 Methode modelleren van ondergrondse opslag

Het numeriek grondwatermodel SEAWAT (Versie 4; Langevin et al., 2003; Langevin, 2009) werd gebruikt om de infiltratie en daaropvolgende extractie van zoet water in het zoute watervoerend pakket te modelleren om zo de werking van het ASR-systeem te simuleren en schattingen te krijgen over de efficiëntie. De efficiëntie van een ASR systeem wordt uitgedrukt als percentage terug te winnen water ten opzichte van het volume geïnfiltreerd water. De simulaties met SEAWAT maken het mogelijk om verschillende scenario's door te rekenen en zo uitspraken te doen over optimalisaties en verwachte terugwinefficiënties.

6.1 Vormgeving model zandperceel Breezand

Aangezien in het zandperceel een enkele infiltratie en onttrekkingsput werd gebruikt kon hier een axisymmetrisch numerieke grondwatermodel worden gebruikt. Dit hield in dat een doorsnedemodel werd gemaakt, waarbij de invoerparameters werden aangepast om te compenseren voor de toename van het stromingsgebied met de radiale afstand vanaf de put. De rekentijden zijn hierbij vele malen kleiner dan bij een 3D of quasi 3D model. Het uitgangspunt is wel dat de ondergrond in alle richtingen symmetrisch is. Voor het ASR systeem Breezand, dat in een relatief homogene ondergrond en op een vrij grote afstand van de duinen, de zee , diepe polders of andere onttrekkingen was aangelegd volstond deze benadering om het systeem te beschrijven.

De ondergrond werd opgedeeld in 48 lagen, waarbij in de bovenste 35 m een laagdikte van 1 m werd aangehouden, en de laagdikte met de diepte toenam. Horizontaal werd het doorsnedemodel verdeeld in cellen, met een celbreedte van een meter nabij de put, toenemend met de afstand, tot een maximale celbreedte van 123 m. De afstand van de put tot de modelrand was 1300 m, wat ongeveer gelijk was aan de afstand van de infiltratieput tot de Waddenzee. Op de modelrand mocht grondwater vrij het model in en uitstromen, afhankelijk van de stijghoogte nabij de modelrand (constant head boundary of Cauchy randvoorwaarde). De modelrand had een vaste stijghoogte van -1.2 m NAP.

Aan de modellagen werd een doorlaatfactor (Kh) toegekend, op basis van sondeergegevens tot circa 30 m diepte, en op basis van REGISII op grotere diepte (Tabel 5). In het gehele model is een verticale anisotropiefactor van 5 gehanteerd. Voor de achtergrond concentratie zijn de gemeten EC waardes gebruikt (zie Figuur 2-2 in hoofdstuk 2). Op grotere diepte word naar verwachting zout grondwater aangetroffen. Om de variaties in stijghoogten in de diepere ondergrond, ten gevolge van regionale drukeffecten veroorzaakt door neerslag en verdamping, te kunnen simuleren, werd kunstmatig neerslag en verdamping opgelegd in het bovenste watervoerend pakket. Voor het invoeren van de neerslag en verdamping werd gebruik gemaakt van de gegevens van het meteorologisch station De Kooy (KNMI). Voor de porositeit werd een waarde van 0,3 aangehouden, en voor de specifieke berging Ss een waarde van 10^{-5} /m).

Het model werd tijdsafhankelijk doorgerekend. De ontwikkeling van de zoetwaterbel hing nauw samen met de balans tussen het infiltreren en onttrekken van grondwater. De debieten van het systeem worden per uur geregistreerd. Om te lange rekentijden te voorkomen werd het model op dagbasis doorgerekend voor de periode van 15 december 2013 (moment van oplevering van het systeem) tot 3 juli 2015, het moment van het rooien van de bollen in het teeltseizoen 2015. In het model werden de infiltratie- en ontrekkingsdebieten van dag tot dag gevarieerd op basis van de meetgegevens.

Tabel 5. Formaties en bijbehorende hydrologische parameters gebruikt voor de modellering van de zoetwaterbel in de ondergrond van het zandperceel Breezand.

Geologische Eenheid	Diepte [m NAP)	Kh REGIS [m/d]	Kh Sonde [m/d]	Weerstand REGIS [dag]
Holocene Deklaag	0 - -7	-	-	2000*
Formatie van Boxtel	-7 - -17	10 – 40	2 – 15	300
Formatie van Drente	-17 - -31	17 – 45	10 – 20	-
Formatie van Urk	-31 - -88	5 – 17	-	-
Formatie van Appelscha	-88 - -100	25	-	-
Formatie van Peilze/Waalre	-100 - -240	33 - 39	-	-
Formatie van Maassluis	< -240	-	-	Zeer hoog

* geschat

6.1.1 Kalibratie van het model Breezand

Het grondwatermodel werd gekalibreerd op het verloop van de stijghoogten in de monitorings-peilbuizen en de EC-waarde gemeten in dezelfde peilbuizen (zie hoofdstuk 5). Na kalibratie kon de algemene dynamiek van de stijghoogten in perioden van intensieve infiltratie en onttrekking goed worden gesimuleerd. Het model was echter niet goed in staat om het uitzakken van de grondwaterstanden te simuleren op het moment dat het systeem in rust was.

De EC metingen op 30m diepte vertonen pieken in het zoutgehalte die worden verklaard door het opdrijven van zoet water en het daarmee omhoog komen van zout water tot in het filter van de peilbuis (zie hoofdstuk 7). Het model slaagde er in om deze pieken veroorzaakt door opdrijving te modelleren. Er waren wel enige afwijkingen tussen het model en de metingen. De opdrijving trad vaker op en duurde langer in het model dan uit de metingen bleek. Dit kan deels verklaard worden door een vertraging in de metingen, omdat het zoute water om het peilbuisfilter langzaam mengt met het water in de peilbuis (door dichtheidsverschillen kan er stratificatie optreden in de peilbuis, het grondwater in peilbuizen wordt slechts in beperkte mate ververst). Daarnaast geeft dit aan dat de modelresultaten over de terugwin-rendementen aan de conservatieve kant zullen zijn.

Het model simuleerde correct de lichte verzoeting die vanaf half oktober 2014 op 20 m van de infiltratie plaatsvond op een diepte van 30 m. Uit de metingen bleek dat de transitie van zoet geïnfiltreerd water naar zout grondwater scherp bleef en een scherpe overgang werd ook in de model simulaties waargenomen. Hieruit kunnen we concluderen dat het model goede overeenkomsten had met de waarnemingen, en dat modelresultaten voor verschillende scenario's derhalve een betrouwbare weergave waren van de veranderingen die optraden in de zoetwaterbel.

6.2 Vormgeving model kleiperceel Borgsweer

Ook voor het grondwater in Borgsweer is een modelsimulatie gemaakt om inzicht te krijgen in de ontwikkeling van de zoetwaterbel in de tijd onder invloed van infiltratie en onttrekking. Vanwege de assymetrische opstelling van het ASR systeem is gekozen voor het modelleren van de zoetwaterbel met het SEAWAT 3D grondwatermodel. De ondergrond werd hiervoor opgedeeld in 40 lagen in de verticaal tot een diepte van -240 m NAP. De dikte van de bovenste 20 lagen varieerde tussen de 1 en 2 m om veranderingen in de vorm van de zoetwaterbel in het zoute aquifer beter weer te kunnen geven. Voor de diepere lagen werden diktes tot 10 m gebruikt. In de horizontaal werd de doorsnede verdeeld in cellen, met een celbreedte van een meter nabij de put, toenemend met de afstand van de put tot een maximale celbreedte van 500 m. De afstand van de centrale put tot de modelrand was 1.5 km, wat 1.5 maal de spreidingslengte op basis van een deklaagweerstand van 3000 dagen en een KD waarde van 70 m^2/dag voor de Boxtel formatie. Op de modelrand mocht het grondwater vrij het model in en uitstromen, afhankelijk van de stijghoogte nabij de modelrand (constant head boundary of Cauchy randvoorwaarde). De modelrand had een vaste stijghoogte van -0.30 m NAP.

Aan de modellagen is een doorlaatfactor (Kh) toegekend op basis van sondeergegevens tot circa 30 m diepte en op basis van REGISII op grotere diepte(tabel 6). In het gehele model is een verticale anisotropiefactor van 5 gehanteerd. Voor de achtergrond concentratie zijn de gemeten EC waarden gebruikt (zie Figuur 2-2 in hoofdstuk 2).

Het model werd tijdsafhankelijk doorgerekend. Net als voor de simulaties in het zandperceel Breezand hing de ontwikkeling van de zoetwaterbel nauw samen met de balans tussen het infiltreren en onttrekken van grondwater, en de debieten van het ASR systeem werden per uur geregistreerd. Om te lange rekentijden te voorkomen werd het model echter op dagbasis doorgerekend. De simulatieperiode was vanaf 1-1-2014 tot 13-7-2015, waarbij in de eerste maand constant werd geïnfiltreerd, zodat ongeveer 600 m^3 zoet water in de ondergrond werd gebracht voordat de meetgegevens ingevoerd werden. In het model werden de infiltratie- en ontrekkings-debieten van dag tot dag gevarieerd op basis van de meetgegevens. Uit een analyse van de stijghoogten bleek dat de dynamiek in de ondergrond samenhing met de neerslag- en verdamping. Hiervoor werden de gegevens van het meteorologisch station Delfzijl (bron: KNMI) als invoer in het model gebruikt.
Voor de porositeit van het watervoerend pakket werd een waarde n = 0,30 gebruikt, en voor de specifieke berging $S_s = 10^{-5}$ /m.

Tabel 6: Formaties en bijbehorende hydrologische parameters gebruikt voor de modellering van de zoetwaterbel in de ondergrond van het kleiperceel Borgsweer.

Geologische Eenheid	Diepte [m]	Kh REGIS [m/d]	Kh sonde [m/d]	Kv [m/d]	Weerstand REGIS (dagen)
Holocene Deklaag	0 - -8	-	-		3000*
Formatie van Boxtel	-8 - -30	10	10-30	2.5	
Overige formaties Peelo etc.	-30 - -240	10		2.5	

* MIPWA gegevens

6.2.1 Kalibratie van het model Borgsweer

Het model werd gekalibreerd en gevalideerd op basis van gemeten stijghoogten in verschillende diepe en ondiepe peilbuizen, en op basis van EC-waarden van sensoren onderin deze peilbuizen. Uit de metingen bleek dat het spanningswatersysteem snel reageerde op infiltratie en onttrekkingen, wat in de tijdseries van de variatie in stijghoogten ten gevolge van infiltratie en onttrekking van de verschillende monitoringspeilbuizen goed zichtbaar was, vooral in de laatste periode.

Op een diepte van 17-18 m is een weerstandslaag geobserveerd in de sondering die op het perceel uitgevoerd is. Zonder deze laag simuleerde het model een te hoge grondwaterstand ten opzichte van de waargenomen stand in de ondiepe puilbuizen. Om het stijghoogteverloop goed te kunnen simuleren werd een weerstandslaag geïntroduceerd in het watervoerend pakket. De weerstandslaag op 18 m diepte had zichtbaar invloed op de gemodelleerde stijghoogtes in de ondiepe peilbuizen, waarvan de amplitudes goed overeenkwamen met de gemeten amplitudes. Om de stijghoogten in de diepe peilbuizen beter te simuleren was het nodig om een weerstandslaag te introduceren met een weerstand van 1000 dagen op 30-35 m diepte (hierover zijn geen meetgegevens aangezien dit onder de diepte van de sondering is). Een vergelijking van de gemeten en gesimuleerde stijghoogten is weergegeven in Figuur 6.

De simulaties voor vooral de ondiepe peilbuizen gaven plotselinge dalingen in stijghoogte aan die niet zichtbaar zijn in de metingen, dit komt doordat in de eerste periode in de metingen over langere tijd geaccumuleerde fluxen voorkomen. Omdat de amplitudes en seizonale variaties goed werden gemodelleerd werd de invloed van deze verschillen op het modelresultaat verwaarloosbaar geacht, deze sterke verlagingen kunnen derhalve genegeerd worden. Ook voor de diepe peilbuis werd wel de algemene trend en timing goed gemodelleerd. De grotere variaties in de stijghoogte in de simulaties werden veroorzaakt doordat de gemeten onttrekkingen, die als invoer in het model werden gebruikt, in de zomer van 2014 soms als som over een periode van enkele dagen geregistreerd werd, in plaats van als dagelijkse onttrekking. Net als voor bij de simulaties voor in het zandperceel werden hier ook structurele verschillen in de gemeten en gemodelleerde stijghoogten waargenomen, wat zou kunnen liggen aan onzekerheden in de diepte van de druksensor.

De simulatie van de EC in de ondiepe peilbuizen gaf een goede representatie van de observaties. In het model bereikte de zoetwaterbel peilbuis MF004 in november 2014, met een vertraging van enkele weken ten opzichte van de waargenomen aankomst in de metingen. In december vond er verdere verzoeting plaats na de start van infiltratie. Simulaties voor het diepere grondwater waren minder succesvol. Hier leek in de metingen op 10 m onder de infiltratiezone nog verzoeting plaats te vinden, wat op neerwaartse verticale stroming zou duiden. Zulke neerwaartse stroming was onwaarschijnlijk vanwege de hogere dichtheid van het zoute water op diepte ten opzichte van die van het geïnfiltreerde water. Verlaging van de K_h in het model zou invloed kunnen hebben op de amplitudes, maar een dergelijke verlaging werd niet ondersteund door de resultaten van de sonderingen. Aangezien de EC metingen in peilbuizen waren gedaan die niet afgepompt werden, is het mogelijk dat processen in de peilbuis zelf tot te lage EC metingen in deze peilbuizen hebben geleid.

Aangezien zowel de variatie in stijghoogten, als de verspreiding van het zoete water in de ondiepere ondergrond (Figuur 7-4) de gemeten waarden goed representeerden, werden de modelresultaten na de kalibratie en validatie betrouwbaar geacht.

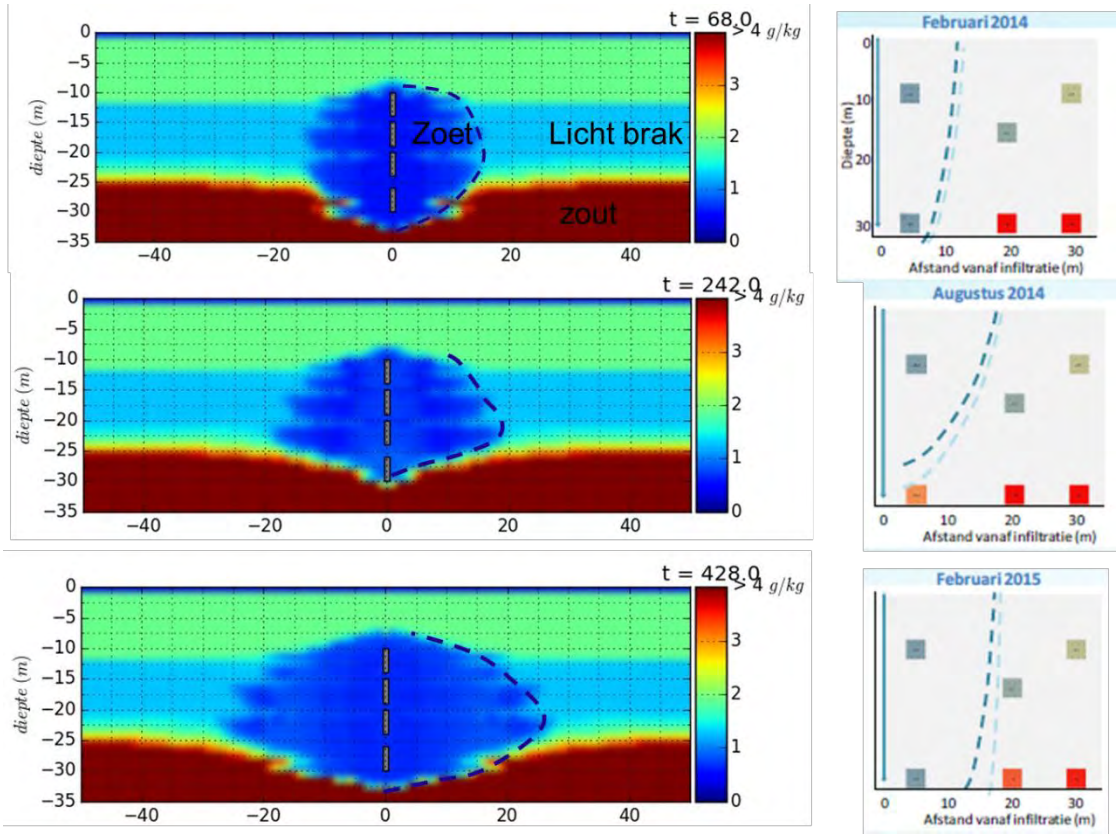
7 Gemodelleerde ontwikkeling en terugwinrendement van de zoetwaterbel

7.1 Breezand

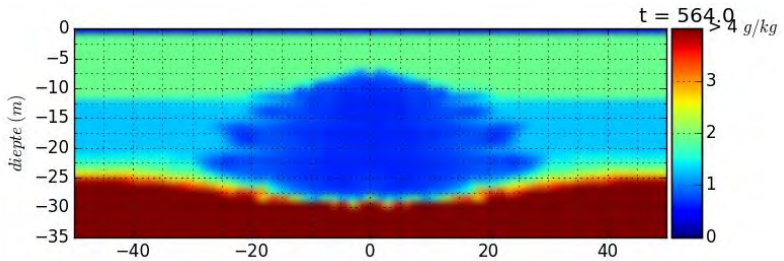
Tussen december 2013 en juli 2015 werd er op het zandperceel Breezand 11200 m^3 geïnfiltreerd en 1057 m^3 onttrokken. In Figuur 7-1 is de groei van de zoetwaterbel in de tijd weergegeven, zoals berekend met het model tot aan het eind van de rekenperiode in juli 2015. In de beginperiode vormde zich een cirkelvormige bel rondom de infiltratieput, die naarmate de tijd verstreek vooral onderin, waar het dichtheidscontrast het grootst was het zoutere water opzij duwde, waardoor de bel een meer elliptische vorm kreeg, met uiteindelijk een maximale diameter van ongeveer 50-60 m op een diepte van 20-25 m (Figuur 7-2).

De verschillende zandlagen hadden een verschillende doorlatendheid. De dunne kleilagen in de afzettingen die het watervoerend pakket vormen in Breezand, zoals waargenomen in de sonderingen (Figuur 2-2), veroorzaakt een grotere anisotropie in het watervoerend pakket, waarbij de verticale verzadigde doorlatendheid lager is dan die in de horizontale richting. Het model toonde dat dit de laterale verspreiding van het water beïnvloedt en leidt tot ruimtelijke verschillen in de uitbreiding van de zoetwaterbel. Door de lagere dichtheid vertoont zoet water de neiging om op te gaan drijven wanneer het in een watervoerend pakket met zout water geïnjecteerd wordt. Uit de modellering blijkt dat de kleilagen die in het pakket aanwezig zijn de opdrijving verhinderen, waardoor de spreiding van zoet water lateraal onder deze kleilagen plaatsvindt. Dunne kleilagen kunnen daarmee een grotere diameter van het zoetwaterlichaam tot gevolg hebben. Deze grotere laterale groei van de bel in een pakket met kleilagen heeft een positief effect op de maximaal haalbare efficiëntie van terugwinning, die zeker 10% hoger kan liggen dan in een isotroop pakket.

Uit de analyses blijkt duidelijk dat het onttrekken van grondwater uit alle vier de filters een negatieve invloed had op de kwaliteit van het onttrokken water, en de efficiëntie van het systeem dus lager werd. Indien uit de bovenste drie filters wordt onttrokken bleef de kwaliteit van het grondwater over de gehele periode goed. In het eerste seizoen werd vrij snel geconstateerd dat het onttrekken van water via alle vier de filters een negatieve invloed had op de gemiddelde kwaliteit van het irrigatiewater. Hierom werd besloten alleen te onttrekken via de bovenste drie filters, terwijl infiltratie wel via alle vier de filters plaatsvond. Deze observatie die op basis van de metingen is vastgesteld komt over met de resultaten uit de modellering (Figuur 7-3).



Figuur 7-1. gemodelleerde ontwikkeling van de zoetwaterbel in het zandperceel Breezand over een periode van 428 dagen.



Figuur 7-2: Omvang van de zoetwaterbel aan het einde van de rekenperiode.

7.1.1 Efficiëntie van terugwinning

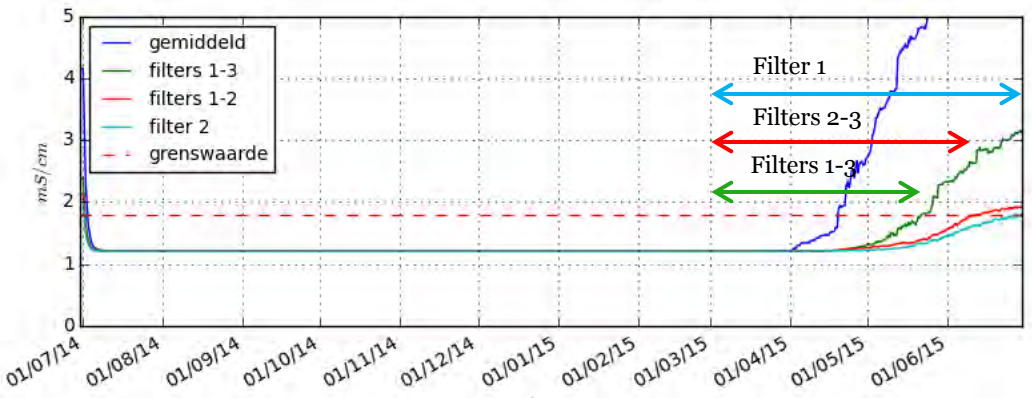
Om een inschatting te maken van de hoeveelheid water die met een optimaal onttrekkingsregime teruggewonnen zou kunnen worden, zijn met het model scenario berekeningen uitgevoerd met verschillende configuraties voor het terugwinnen van water. Alle scenario's hebben als uitgangspunt dat 7000 m³ water werd geïnfiltreerd in de periode van 1 juli tot 1 juli (gebaseerd op het seizoen 2014 - 2015). De kwaliteit van het geïnfiltreerde water was 1,2 mS/cm (gemiddelde over de het seizoen 2014 - 2015). Getracht werd dan weer 7000 m³ water te onttrekken in de periode van 1 april tot 1 juli, waarbij werd beoordeeld wanneer het onttrokken water niet meer gebruikt kon worden voor bevloeiing (EC van meer dan 1,8 mS/cm). In maart werd geen water onttrokken of geïnfiltreerd en dit was een periode waarin de zoetwaterbel kon opdrijven (gebaseerd op de situatie in maart 2014).

In Tabel 7 is een overzicht van de verschillende scenario's weergegeven en de bijbehorende efficiënties. Het maximale resultaat qua terugwinefficiëntie, namelijk 88%, werd behaald indien in eerste instantie over de drie bovenste filters water onttrokken werd, waarna werd overgeschakeld op de bovenste twee filters, en in de laatste periode van het seizoen alleen uit filter 2 werd onttrokken. De resultaten in termen van de veranderingen in de EC van het onttrokken water zijn geïllustreerd in Figuur 7-3.

Een ander scenario dat doorgerekend werd, is hoe de efficiëntie beïnvloed zou worden indien er een spaarjaar werd ingesteld. Dat wil zeggen dat het eerste jaar alleen geïnfiltreerd werd om een buffer op te bouwen en dat infiltratie pas begon na de infiltratie van het tweede winterseizoen. In dit geval werd de efficiëntie van het systeem sterk verhoogd naar boven de 95%. Het instellen van een spaarjaar zou derhalve de robuustheid van het systeem sterk kunnen verhogen en het mogelijk maken een buffer op te bouwen voor droge jaren.

Tabel 7: overzicht terugwinefficiëntie van verschillende scenario's

Scenario	Debiet (m^3/d)	Volume (m^3)	Efficiëntie
4 filters hele periode	19		<10%
3 filters hele periode	25 – 26	4.000	58%
3 filters tot 2 filters	25 – 39	5.400	77%
3 tot 2 tot 1 filter	25 – 39	6.200	88%
Met een spaarjaar			>95%

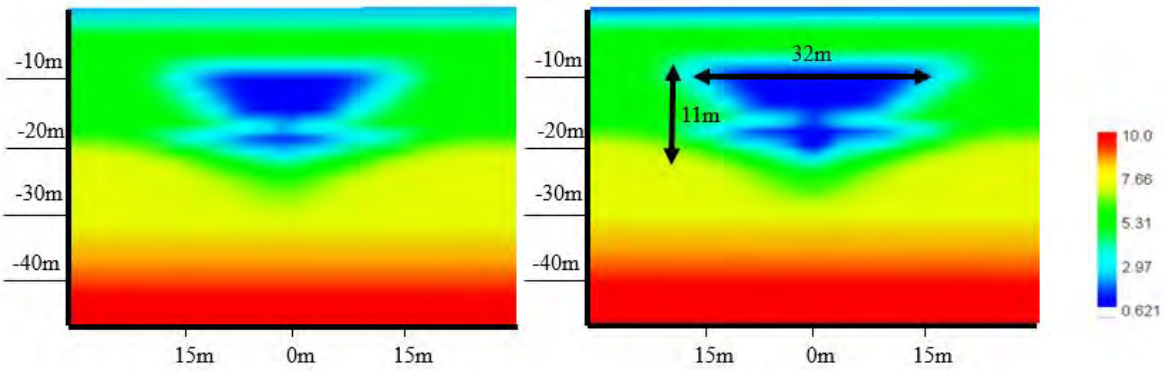


Figuur 7-3: Gemiddelde kwaliteit van het gemodelleerde onttrokken grondwater op basis van de EC per filtertraject waarover wordt onttrokken. De rode stippellijn geeft de gebruikte grenswaarde van 1,2 mS/cm weer. De pijlen geven aan wanneer een bepaald filter verzilt raakt en afgeschakeld dient te worden.

7.2 Borgsweer

Het systeem op het kleiperceel van Borgsweer is gereed gekomen in het najaar van 2013. Vanaf het najaar 2013 tot begin juli 2015 is 4500 m³ water opgeslagen (geïnfiltreerd). Figuur 7-5 geeft de vorming van deze zoetwater bel weer zoals berekend door het model met beschikbare data van infiltreren en onttrekken uit het veld. De kleilaag op 18 meter zorgde voor een duidelijke scheiding tussen de ondiepe en de diepe zoetwater bel. Daarnaast krijgt de bel een trechtervorm door de grote dichtheidsverschillen tussen het geïnfiltreerde water en het originele water uit het watervoerend pakket, waardoor het zoete water naar boven drijft. Hierdoor is de maximale zoet waterbel diameter ongeveer 30 meter op een diepte van -10 meter.

Een ander belangrijk resultaat is dat de mengzone aan de rand van de zoetwaterbel ongeveer even groot blijft, onafhankelijk van het infiltratievolume. Dit suggereert dat de 'oplading' die afgelopen jaar heeft plaatsgevonden, met veel infiltratie en weinig onttrekking, van belang is voor goede terugwin resultaten. Met het huidig systeem en uitgaande van een grenswaarde van 1,8 mS/cm voor het te gebruiken onttrokken irrigatie water kan een terugwinrendement behaald worden van 25%. Dit lage rendement wordt sterk beïnvloed door de grote dichtheidsverschillen, kleilagen en de systeemconfiguratie met twee filters waarbij onttrokken wordt aan de randen van de bel. De snelle verzilting trad op doordat op drie locaties aan de randen van de bel wordt onttrokken uit het diepe pakket waar de dikte van de bel dun is door opdrijving, waardoor als snel zout water onttrokken werd.



Figuur 7-4: Modelweergave van de verspreiding van het zoete water in het met zout water gevulde watervoerend pakket in de ondergrond in Borgsweer tussen november 2014 (links) en augustus 2015 (rechts). De legenda is in mS/cm. De deklaag van klei, en het dunne laagje op 18 m hadden grote invloed op de vorm van het zoetwatervoorkomen.

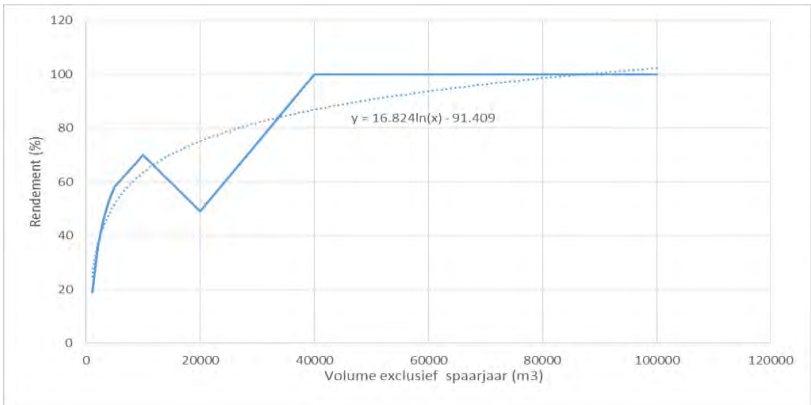
7.2.1 Berekeningen van efficiëntie van terugwinning

Om een inschatting te maken van de hoeveelheid water die met een optimaal onttrekkingsregime teruggewonnen zou kunnen worden, zijn met het model scenario berekeningen uitgevoerd met verschillende configuraties voor het terugwinnen van water. Voor alle scenario's is gerekend met een totale infiltratie volume van 4500 m^3, die gedurende de wintermaanden werd geïnfiltreerd. Gedurende het groeiseizoen van 3.5 maanden van 1 april tot 1 juli, werd getracht weer in totaal 4500 m^3 te onttrekken op verschillende manieren. De onttrekking vond plaats totdat de grenswaarde voor het gebruik van het water voor bevloeiing (EC van meer dan 1,8 mS/cm) werd bereikt. In maart werd geen water onttrokken of geïnfiltreerd dit was een periode waarin de zoetwaterbel kon opdrijven (gebaseerd op de situatie in maart 2014). Tabel 9 geeft een overzicht weer van de verschillende scenario's en de bijbehorende efficiënties.

Tabel 9: overzicht terugwinefficiëntie van verschillende scenario's voor Borgsweer

Scenario	Efficiëntie
Omgekeerd systeem	37%
Spaarjaar	42%
Alleen ondiep onttrekken	40%
Combinatie spaarjaar+ omgekeerd systeem+ alleen ondiep onttrekken	60%

Bij het omgekeerd systeem werd 4500 m^3 geïnfiltreerd in de buitenste drie putten en werd alleen onttrokken uit de middelste put, door het toepassen van dit omgekeerd systeem is een toename van 12% van de efficiëntie ten opzichte van het regulier systeem wat nu in werking is. Deze toename in efficiëntie wordt veroorzaakt doordat er uit het midden van de bel wordt onttrokken en niet bij de randen waar het sneller zout wordt.
Bij een combinatie van een spaarjaar, een omgekeerd systeem waarbij in het diepe en ondiepe pakket werd geïnfiltreerd maar alleen in het ondiepe pakket werd onttrokken kan de hoogste efficiëntie worden behaald van 60%. Bij een spaarjaar wordt in het eerste jaar alleen geïnfiltreerd om een buffer op te bouwen in het daaropvolgende jaar wordt geïnfiltreerd en onttrokken.
Figuur 7-6 toont de relatie tussen infiltratie volumes en het terugwinrendement gebaseerd op het gecombineerde onttrekkingsregime met een spaarjaar en alleen onttrekken uit het ondiepe pakket (systeem voor de tool). Hieruit volgt dat het terugwinrendement verder toe neemt naarmate het volume van het te infiltreren water groter wordt.



Figuur 7-6: Relatie tussen infiltratie volume en terugwin rendementen voor Borgsweer berekend met het grondwatermodel

7.2.2 Toepassingen voor de tool

Voor de tool werd gebruik gemaakt van de optimale situatie die nu geïmplementeerd kan worden. Dit houdt in dat de terugwin rendementen van de tool gebaseerd zijn op een systeem waarbij een spaarjaar en alleen onttrekken uit het ondiepe systeem geïmplementeerd zijn (zie Figuur 7-6).

7.3 Conclusies terugwin rendementen

Voor Breezand werd geanalyseerd dat het onttrekken uit alle vier de putten een negatief gevolg had op de terugwinefficiëntie. Het beste onttrekkingsregime werd behaald door het combineren van een spaarjaar samen met onttrekken uit de bovenste drie filters. In eerste instantie werd alleen uit de bovenste drie filters onttrokken, daarna werd over geschakeld op de bovenste twee en in de laatste periode van het seizoen werd alleen uit de tweede filter onttrokken. Dit leverde een terugwinefficiëntie van meer dan 95%.
Het lage terugwinrendement van 25% in Borgsweer wordt sterk beïnvloed door de hoge EC achtergrondconcentratie en de aanwezigheid van een kleilaag en de systeemconfiguratie met onttrekkingsfilters op twee in plaats van vier dieptes, zoals in Breezand, op enige afstand van de infiltratieput.
Voor Borgsweer is door het combineren van een spaarjaar, een omgekeerd systeem en alleen ondiep onttrekken een rendement van 60% te behalen. Bij het vergroten van het te infiltreren volume neemt ook het terugwinrendement toe waardoor rendementen van meer dan 95% gerealiseerd kunnen worden.

7.4 Factoren die de werking van ASR systemen beïnvloeden

De twee gebruikte ASR systemen waren verschillend van ontwerp, de plaatsing van de putten en het aantal filters, en werden geplaatst in watervoerende pakketten met een verschil in zoutgehalte van het grondwater. Dit maakte het mogelijk om verschillende scenario's door te rekenen waarvan de terugwinefficiëntie kon worden bepaald. De terugwinefficiëntie bleek af te hangen van zowel de condities in het watervoerend pakket zoals de gelaagdheid en het zoutgehalte, als het ontwerp van het systeem.

7.4.1 Dichtheidscontrast, geologische opbouw en regionale stroming

Het contrast in dichtheid (neemt toe met zoutgehalte) van het geïnjecteerde zoete perceelwater en het oorspronkelijke brakke water in de ondergrond heeft invloed op de vorm van de zoetwaterbel. In het kleiperceel Borgsweer veroorzaakte het grotere contrast in dichtheid tussen het zoete geïnfiltreerde water en het zoute water in het watervoerend pakket een grotere neiging tot opdrijven van het geïnfiltreerde zoete water (Figuur 7-4), ten opzichte van de situatie met een kleiner dichtheidscontrast in het zandperceel Breezand, waar de zoetwaterbel een rondere vorm had.

In beide gebieden werden via de sonderingen dunne lagen van fijn zand, klei of veen met een lagere doorlatendheid in het watervoerend pakket aangetroffen. De effecten van deze dunne lagen, die een barrière vormen tegen het opdrijven van zoet water, waren zichtbaar in de modelsimulaties en waren van invloed op de ruimtelijke verspreiding van het zoete water. Zowel dichtheidscontrasten als de gelaagdheid van het watervoerend pakket hadden consequenties voor de terugwin efficiënties. Door het sneller opdrijven van het zoete water gingen met name dieper geplaatste filters eerder zout water aantrekken, omdat in een zoutere omgeving het zoetere water gaat opdrijven en zich sneller zal verzamelen direct onder minder doorlatende lagen in het pakket. De gelaagdheid heeft in situaties met hoog contrast in dichtheid dus invloed op de verspreiding van het zoete water en daarom ook op de optimale plaatsing van de filters. Bij het ontwerp van een ASR systeem, en met name de plaatsing van de filters, dient derhalve rekening te worden gehouden met zowel het zoutgehalte in de ondergrond als met de aanwezigheid van lagen met een lagere doorlatendheid die een barrière vormen voor het opdrijven van het zoete water.

In de huidige studie werden beide systemen geplaatst in gebieden waar grondwaterstroming minimaal was. Indien systemen opgezet worden in gebieden waar significante regionale grondwaterstroming plaatsvindt, zal hier rekening mee gehouden worden omdat er dan een pluim van zoet water zal ontstaan die zich uit gaat strekken in de richting van de stroming.

In dit geval is een opstelling met minimaal twee putten, waar de infiltratieput stroomopwaarts geplaatst wordt van de extractieput, de mogelijkheid bieden om toch water op te slaan en te onttrekken. De mate van lateraal afdrijven van de gevormde zoetwaterbel hangt dan samen met de horizontale stroomsnelheid in het watervoerend pakket. In dit geval moet derhalve zowel de stroomsnelheid als de stromingsrichting bepaald worden voor het ontwerp van de installatie.

7.4.2 ASR ontwerp

In het kleiperceel Borgsweer was de terugwinefficiëntie lager vanwege het grotere contrast in dichtheid tussen het geïnjecteerde zoete water en het zoute grondwater, maar ook door beperkingen in de keuze van de infiltratie en onttrekkingsfilters (langere filters op geplaatst op twee diepten), ten opzichte van het systeem in Breezand (kortere filters geplaatst op vier diepten). Indien infiltratie in Borgsweer gebeurde in de drie onttrekkingsputten op 5 m afstand van de centrale put, werd een betere verspreiding gerealiseerd van het zoete water in de ondergrond. De terugwinefficiëntie kan in dit geval verbeterd worden door met meerdere korte filters geplaatst op verschillende diepten te werken in de put, waarbij de filters in de tijd naar afnemende diepte afgekoppeld worden, zoals ook werd gedaan ter verhoging van de terugwinefficiëntie in Breezand. Waar het met de huidige filterconfiguratie (6 m lang ondiep filter) mogelijk was een terugwinefficiëntie van 50% te halen, zou dit met twee boven elkaar geplaatste filters van elk 3 m lang ruim boven de 60% moeten komen te liggen. Indien het diepste filter na een periode van onttrekking dan zout water aantrekt, kan dit afgekoppeld worden en kan extractie van zoet water nog steeds plaatsvinden uit het ondiepste filter.

De opstelling met een enkele putlocatie met filters op verschillende diepte, waarin zowel injectie als onttrekking plaatsvond, werkte uitstekend voor het lagenpakket in Breezand bij het geobserveerde contrast in zoutgehaltes aldaar. In een locatie met hogere dichtheidsverschillen kan de sterconfiguratie, zoals gebruikt in Borgsweer, voor een betere ruimtelijke verspreiding zorgen van het opgeslagen zoete water in de zoute ondergrond. Hierbij dient infiltratie bij voorkeur dan plaats te vinden in de diepe en ondiepe filters van de buitenste putten, en dient onttrekking plaats te vinden uit de centrale put, waarbij uit steeds minder diepe filters water onttrokken dient te worden om verzilting van het onttrokken water te voorkomen.

Het instellen van een spaarjaar waarin alleen geïnfiltreerd zou worden zou de robuustheid van het systeem sterk kunnen verhogen, daar efficiëntie van boven de 95% dan realistisch worden.

8 Modellering opvang, opslag en gebruik

Op basis van de resultaten is een model ontwikkeld waarmee het gehele systeem van opvangen, opslaan en gebruiken (analyse van volledige zelfvoorzienendheid) kan worden doorgerekend. Het waterbalans-model berekent hoeveel areaal geïrrigeerd kan worden met het opgevangen perceelseigen water. In het model zijn de resultaten van alle pilotonderdelen gecombineerd, met het rendement van ondergrondse zoetwaterberging (hier met de aanname van het instellen van een spaarjaar (zie hoofdstuk 7)) en voor druppelirrigatie het watergebruik om het neerslagtekort aan te vullen en een ingestelde drempelwaarde van 1,7 mS/cm. Met het model zijn langjarige reeksen doorgerekend, zodat ook droge jaren in de analyse zijn meegenomen.

In dit hoofdstuk behandelen we het proces en systeembegrip door middel van een waterbalans. Het doel van de waterbalans is om te begrijpen hoe het watersysteem werkt op de pilot locaties, om vervolgens scenario's te simuleren met betrekking tot optimaliseren van het systeem, met andere dimensies en in de toekomst. In de volgende paragrafen wordt een uitleg gegevens van de methode die is gebruikt voor het ontwikkelen van de waterbalans en een beschrijving van de werking en de resultaten van de balans. In de scenario berekeningen worden de volgende vragen beantwoord:

- Kan het systeem echt zelfvoorzienend worden, oftewel wat is de verhouding tussen het areaal waarvan het water wordt opgevangen en het areaal dat daarmee kan worden geïrrigeerd?
- Wat is het effect van klimaatscenario WH?
- Wat is het effect van peilopzet?
- Wat is de reductie van de afvoer naar het oppervlaktewater tijdens piek evenementen?

8.1 Methode

Voor het ontwikkelen van de waterbalans is het watersysteem in drie onderdelen verdeeld, het perceel, de ondergrondse opslag en irrigatiemethode. Binnen de balans zijn al keuze vrijheden mogelijk voor bijvoorbeeld het type gewas, het te irrigeren areaal en irrigatiemethode.

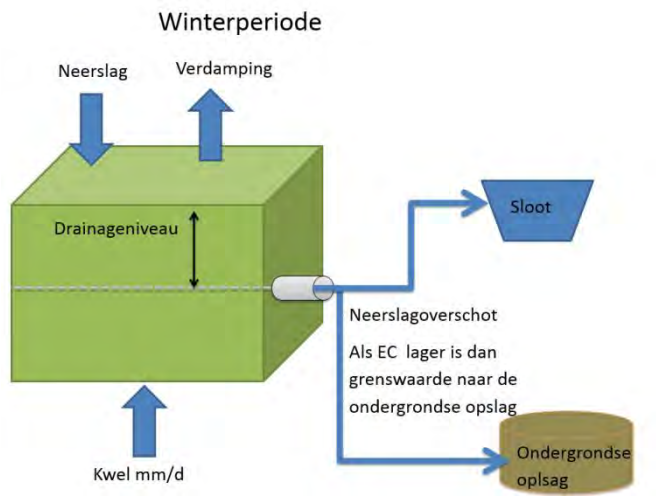
Het perceel

Het perceel is het eerste onderdeel in de waterbalans, met daarin neerslag, verdamping, gewasfactor, drainage en kwel. Bij de berekeningen voor het perceel wordt het zoutgehalte en de stijghoogte van het systeem iteratief berekend. De werking van het perceel is als volgt in de waterbalans geschematiseerd. Neerslag valt direct op het perceel, een deel verdampt door gewasverdamping die wordt gegeven door verdampingsgetallen van het KNMI te vermenigvuldigen met gewasfactoren (afkomstig van Vademecum, 2002; zie hoofdstuk 3). De kwel flux wordt berekend op basis van de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket en de stijghoogte in het perceel en een weerstand. Een positieve kwel betekent dat er kwel is en een negatieve kwel betekent dat er wegzijging is. Het neerslagoverschot (neerslag- gewasverdamping +/- kwel), sijpelt door naar de grondwaterspiegel.

Als de grondwaterspiegel hoger is dan het drainageniveau wordt het perceel gedraineerd, anders wordt niet gedraineerd tot de grondwaterspiegel weer hoger is dan het drainageniveau.

De neerslag en de kwel hebben gedurende de berekeningen een vaste chloride concentratie. De concentratie van het bodemvocht wordt berekend aan de hand van de in en uit fluxen van volumes met een chloride concentratie. De aanname is dat er volledige menging optreedt in de bodem. Dit betekent ook dat het gedraineerde water een chloride concentratie heeft dat gelijk staat aan de bodem concentratie.

Het gedraineerde water kan twee kanten op, of naar de ondergrondse opslag of naar de sloot. Als de chloride concentratie van het water onder de opgegeven grenswaarde is, wordt het water geleid naar de ondergrondse opslag. Als de concentratie boven de grenswaarde is, wordt het water naar de sloot geleid.



Figuur 8-1: Schematische weergave van de waterbalans op het perceel in de winterperiode

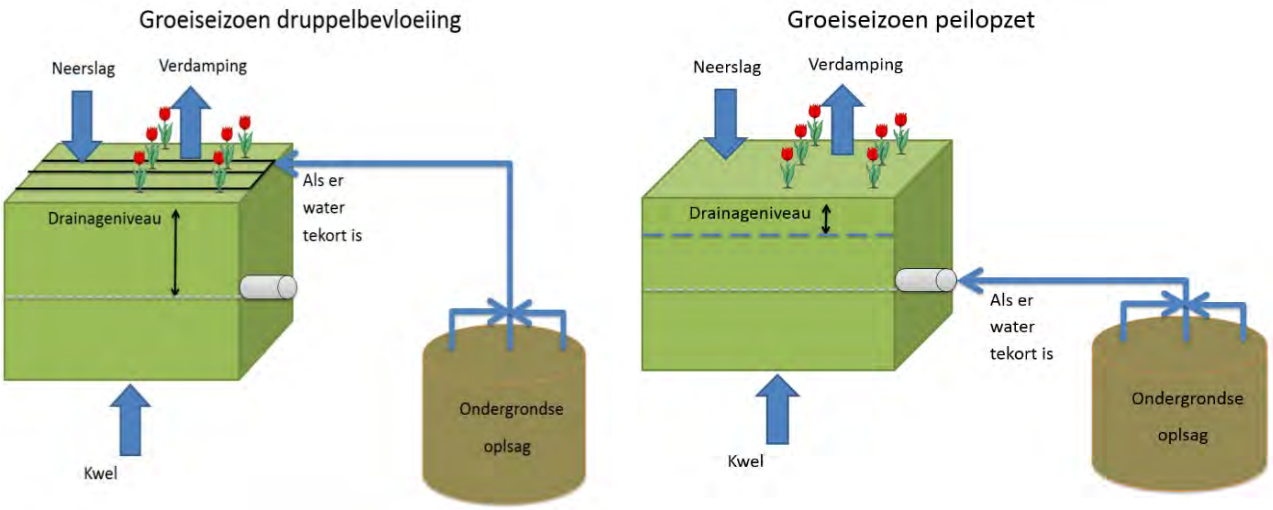
Ondergrondse opslag

Het water van 'goede kwaliteit', dus onder de grenswaarde, wordt naar de ondergrondse opslag geleid. De ondergrondse opslag is in de waterbalans geschematiseerd als een oneindig grote bak, er zitten geen beperkingen aan de toegestane volumes. De berekeningen van de ondergrondse opslag zijn gekoppeld aan de grondwatermodellen (zie hoofdstuk 6 en 7) door middel van een metamodel dat de relatie geeft tussen het volume geïnfiltreerd water en het percentage water dat terug gewonnen kan worden voor irrigatie. Voor Borgsweer is het gekalibreerde grondwatermodel is gebruikt voor het berekenen van een range aan infiltratie volumes. De aannames voor deze simulaties zijn het volgende. We gaan uit van de optimale situatie zoals toepasbaar zou zijn in de pilots, namelijk de introductie van een spaarjaar, infiltreren in de twee filters in het midden en alleen onttrekken in de bovenste filters van de buitenste filters. In het spaarjaar wordt in december 2013 tot en met februari 2014 een bepaald volume geïnfiltreerd, in het eerste jaar wordt niet onttrokken. De daarop volgende december 2014 tot en met februari 2015 wordt hetzelfde volume geïnfiltreerd en wordt ditzelfde volume onttrokken in de maanden april 2015 tot en met juni 2015. Deze simulatie is gedaan voor volumes van 1000 m^3 tot en met 100.000 m^3. Hieruit volgt een relatie tussen volume en rendement weergegeven in figuur 7-6 deze relatie wordt vervolgens in de waterbalans geïncorporeerd. Voor Breezand is met het grondwatermodel berekend het terugwin rendement wanneer een spaarjaar wordt ingesteld > 95%, onafhankelijk van het volume dat wordt geïnfiltreerd (zie hoofdstuk 7).

Irrigatiemethode

De waterbalans is geschematiseerd voor twee irrigatiemethodes: druppelirrigatie en peilopzet. Het water uit de ondergrondse opslag wordt gebruikt in de groeimaanden van het geselecteerde gewas.

Voor druppelirrigatie wordt water uit de ondergrondse opslag gebruikt wanneer de potentiele en actuele verdamping verschilt wat betekent dat het gewas een watertekort heeft. Dit watertekort wordt aangevuld als er voldoende water beschikbaar is in de ondergrondse opslag, zie Figuur 8-2.
Voor peilopzet wordt het peil van het perceel verhoogd via het drainagesysteem. Als er voldoende water in de ondergrondse opslag is wordt dit gebruikt om te zorgen dat het peil op het geselecteerde niveau blijft. Tijdens peilopzet wordt het verschil tussen de grondwaterstand en het verhoogde peil gebruikt om te bepalen hoeveel water nodig is uit de ondergrondse opslag. Daarnaast geldt hiervoor ook dat wanneer de grondwaterstand hoger is dan het verhoogde peil, het perceel gedraineerd wordt tot het verhoogde peil.



Figuur 8-2:Schematische weergave van de waterbalans op het perceel in de zomerperiode

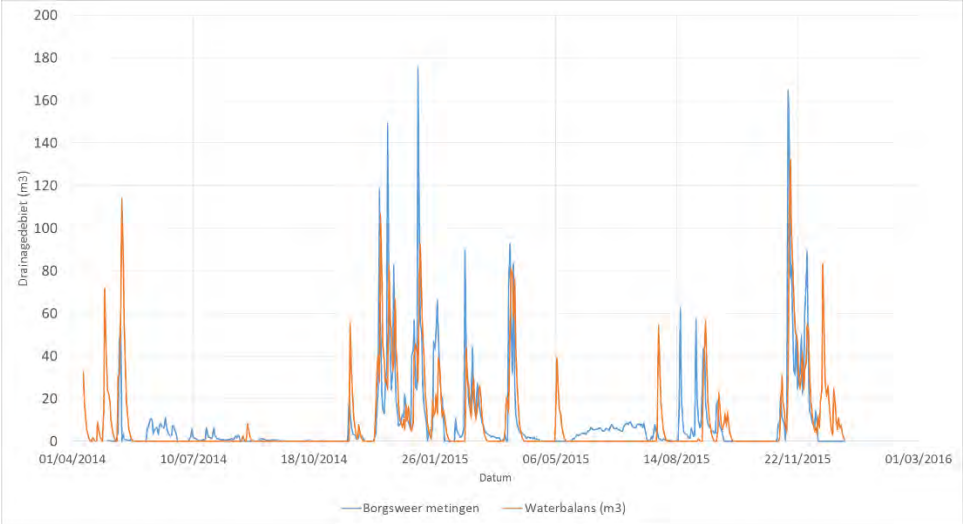
8.2 Uitwerking en kalibratie voor de pilots Borgsweer en Breezand

De waterbalans is toegepast voor de locaties Borgsweer en Breezand. De tool is voor deze twee percelen geverifieerd voor de periode 2014 tot en met 2015 op basis van metingen van de drainage afvoer en drainage EC (zie hoofdstuk 3). Een tweede controle is gevoerd door de waterbalans resultaten voor de stijghoogte, drainage afvoer en drainage EC te vergelijken met SWAP berekeningen voor de pilot locaties.

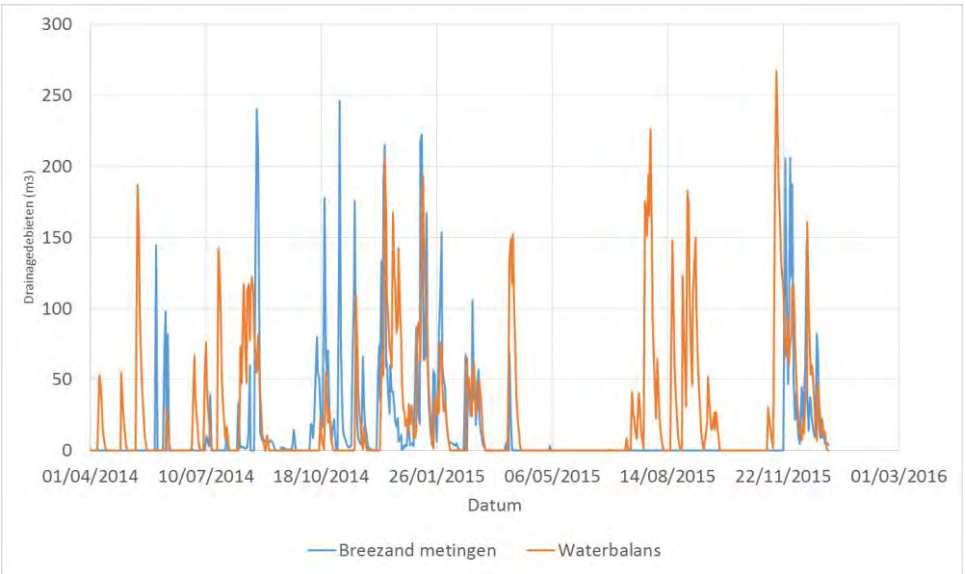
Figuur 8-3 toont de drainagedebieten voor Borgsweer van de metingen en de toolresultaten. Over het algemeen worden de afvoerpieken goed gesimuleerd door het model en komen de modelresultaten goed overeen met de gemeten waarden. De afvoer wordt in de zomer soms onderschat door de tool, dit is te verklaren doordat het optreden van kleischeuren in de zomer, waarbij water direct in verbinding kan staat met de drainagebuizen, niet is opgenomen in het model.

Figuur 8-4 toont de drainagedebieten voor Breezand van de metingen en de toolresultaten. Breezand reageert heel snel op veranderingen in concentratie omdat je met een zandige bodem te maken hebt. Uit de kalibratie blijkt dat wat kwel nodig is om de chloride concentratie in de bodem goed te krijgen. Dit is in lijn met eerdere bevindingen voor het perceel in Breezand (zie hoofdstuk 3).

Voor de twee locaties van Borgsweer en Breezand is de kalibratie goed gelukt. Belangrijke parameters die veel invloed hebben op het systeem zijn de drainageweerstanden, slootweerstanden en kwelfluxen. Drainage-en slootweerstanden zorgen dat het perceel droog of nat blijft. De kwelflux heeft invloed op de chloride concentratie van de bodem en daardoor ook op de hoeveelheid water van goede kwaliteit.



Figuur 8-3: Berekende en gemeten drainagedebieten voor het perceel in Borgsweer



Figuur 8-4: Berekende en gemeten drainagedebieten voor het perceel in Breezand

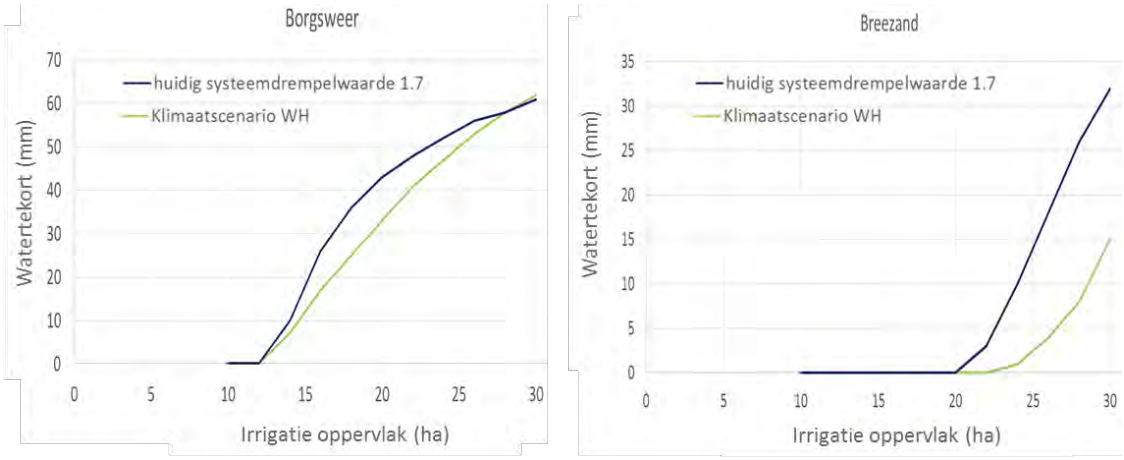
8.3 Scenario berekeningen

Het gekalibreerd model is gebruikt om verschillende scenario's te berekenen waarmee een aantal vragen kunnen worden beantwoord. De resultaten op deze vragen worden hieronder één voor één behandeld. Alle onderwerpen zijn voor de twee locaties Borgsweer en Breezand uitgewerkt. Om te bepalen hoeveel areaal we van water kunnen voorzien met een opvangareaal van 10 ha, is het te irrigeren areaal in het model gevarieerd kan van 10 tot 30 hectare (Figuur 8-). Daarbij is het waterterkot als maat gebruikt om te bepalen of er voldoende water beschikbaar is om volledig te voorzien in de watervraag. De volgende scenario's zullen allemaal volgens deze manier weergegeven worden om het effect van de veranderingen weer te geven.

Kan het systeem echt zelfvoorzienend worden, oftewel wat is de verhouding tussen het areaal waarvan het water wordt opgevangen en het areaal dat daarmee kan worden geïrrigeerd?
Voor Breezand is een verhouding van 10:20 hectare te realiseren wat betekent dat met een opvangareaal van 10 hectare een irrigatie areaal van 20 hectare van water voorzien kan worden zonder watertekort. Voor Borgsweer is deze verhouding 10:12.

Wat is het effect van klimaatscenario WH?
Voor de klimaatscenario zijn neerslag en verdampingsdata van het KNMI website http://www.klimaatscenarios.nl/toekomstig_weer/transformatie/index.html gedownload voor de klimaatscenario WH. Het WH klimaatscenario simuleerd hevigere regenbuien in de winter en zomer en meer droge zomers.

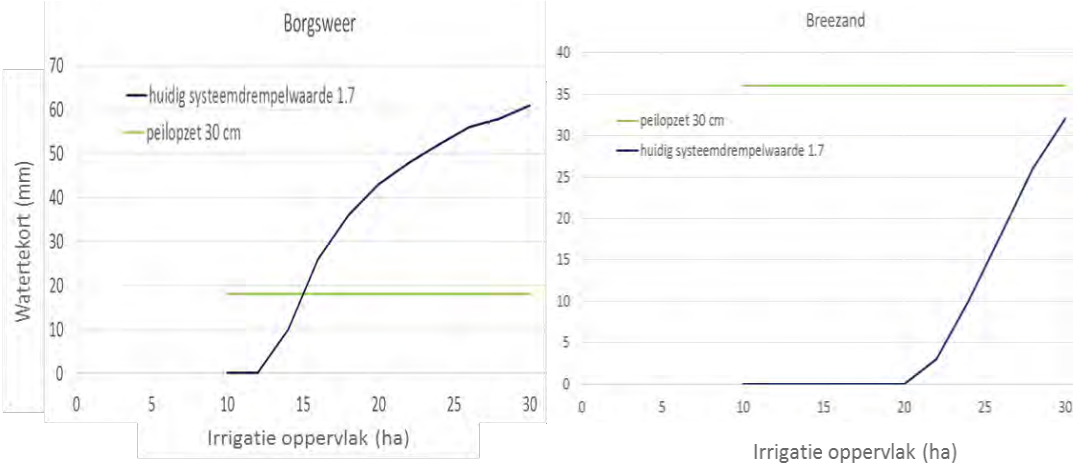
Voor het kleiperceel van Borgsweer zal het ondergrondse opslagsysteem in de klimaatscenario WH dezelfde verhouding van 10:12 houden. Bij grotere irrigatie arealen loopt het watertekort sneller op bij het klimaatscenario. Dit heeft te maken met het feit dat voor een kleiperceel een runoff factor van 20% is geïntroduceerd waardoor alleen 80% van een regenbui naar de opslag kan gaan. Bij hevigere regenbuien betekent dit ook dat je aanzienlijke hoeveelheden neerslag aan runoff kwijt bent omdat het niet snel genoeg de grond in kan infiltreren. Dit effect is ook meteen te zien bij het zand perceel waarbij er geen runoff is, dus alle het water infiltreert in de bodem waardoor het gedraineerd kan worden en ook ten goede kan komen als ondergrondse opslag. Daarom is voor het zand perceel Breezand voor de WH scenario een verhouding van 10:22 te behalen in plaats van 10:20 onder het huidig klimaat. Voor grotere irrigatie arealen daalt het watertekort met ongeveer de helft.



Figuur 8-5: Grafieken met het verschil tussen het huidig systeem en klimaatscenario WH. Op de x-as staat het te irrigeren areaal op de y-as staat het watertekort in mm.

Wat is het effect van peilopzet?

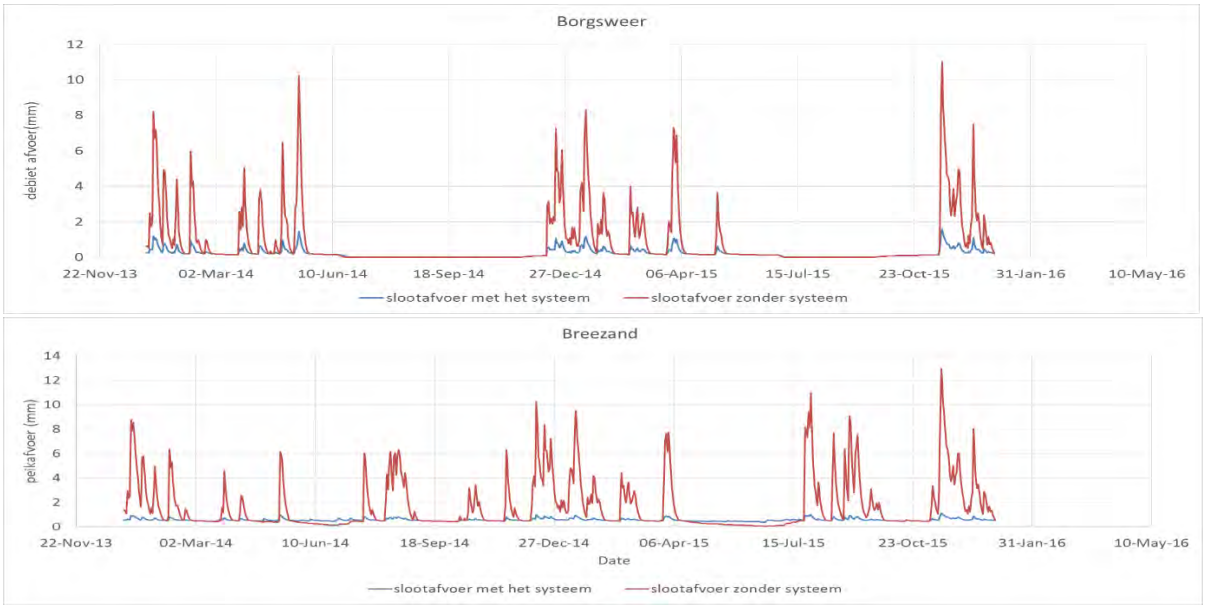
Als in plaats van druppelirrigatie wordt gekozen voor het toedienen van water op het irrigatie perceel via peilopzet (Drainage Infiltratie) geeft dit een ander beeld. Figuur 8-6 geven het watertekort met een peilopzet van 30 centimeter weer ten opzichte van drupelirrigatie. Het effect van peilopzet verandert niet bij vergroting van het irrigatie areaal van 10 tot en met 30 hectare, wel is een toename van watertekort als het irrigatie areaal >50 hectare wordt. Voor het klei perceel van Borgsweer wordt het bij irrigatie arealen van meer dan 15 hectare gunstig om met een peilopzet te werken omdat het watertekort niet zal toenemen. Bij het zand perceel van Breezand is bij peilopzet een grotere watertekort omdat de capilaire werking van de bodem minder goed is dan een klei perceel waardoor het water niet altijd ten goede komt aan het gewas.



Figuur 8-6: Grafieken met het verschil in watertekort en verhouding tussen het huidig druppelirrigatie en peilopzet (DI).

Wat is de reductie van de afvoer naar het oppervlaktewater tijdens piek evenementen?

Bij het gebruiken van een ondergrondse opslag gaat een deel van de netto neerslag niet meer naar het oppervlaktewatersysteem. Figuur 8-7 toont het verschil tussen oppervlaktewaterafvoer bij wel en geen ondergrondse opslag. Voor Borgsweer is een gemiddelde reductie van ongeveer 75% en voor Breezand is een gemiddelde reductie van 67% van de afvoer op het oppervlaktesysteem als de ondergrondse opslag in werking wordt genomen. Voor de piekafvoeren is de reductie ongeveer 85%.



Figuur 8-5: Berekende en gemeten drainagedebieten voor het perceel in Breezand

9 Syteem innovaties

De systemen in Breezand en Borgsweer functioneerden zeer verschillend. Het zandperceel in Breezand voerde een verwaarloosbare hoeveelheid sediment mee in het drainagewater. Dit zou het mogelijk moeten maken het zandfilter te verkleinen, of dit water zelfs direct ter infiltratie aan te bieden zonder passage door een zandfilter, aangezien het zandperceel zelf al als filter blijkt te functioneren.

9.1 Systeeminnovaties in Borgsweer

De toepassing van ondergrondse zoetwaterberging bij het kleiperceel Borgsweer bleek een uitdaging. Het water dat uit de ondergrond kwam bleek te weinig zuurstof te bevatten voor het gewas, hierdoor verslechterde de gewasopbrengst in het eerste pilotjaar. Een innovatie in de opvangtank voor het opgepompte water zorgde voor een sterke verbetering. Hierbij is het systeem zodanig aangepast dat het opgepompte water in de tank wordt gesproeid zodat maximale beluchting plaatsvindt; tevens is de onttrekking verplaatst naar bovenin de tank, waar het water de grootste zuurstofconcentratie heeft. Mede hierdoor kon in het tweede pilotjaar een opbrengst vermeerdering worden gerealiseerd.

Daarnaast zorgde de klei die mee kwam met het water uit de drains voor een snelle verstopping van het zandfilter en daardoor hoge onderhoudskosten. Het water uit het kleiperceel in Borgsweer voerde, zeker bij piekbuien, en zeer hoog gehalte aan fijne deeltjes mee. Het bestaande water had een zodanig hoog gehalte van sediment in suspensie dat het zandfilter diverse malen verstopte en gespoeld moest worden. Het initiële ontwerp van de ASR systemen was direct vanuit de tuinbouw overgenomen waar het regenwater van glasdaken altijd helder is. Voor toepassing in het kleiperceel met de mogelijkheid van aanvoer van troebel drainwater zijn derhalve aanpassingen in het systeem nodig om de werking te optimaliseren.

Figuur 9-1. Toegepaste systeem innovaties in Borgsweer. Links: toegevoegd schot in de regenwatertank om instroom te verbeteren en daardoor bezinking te bevorderen. Rechts: aanpassing van de onttrekking vanuit de bodem naar een drijver.

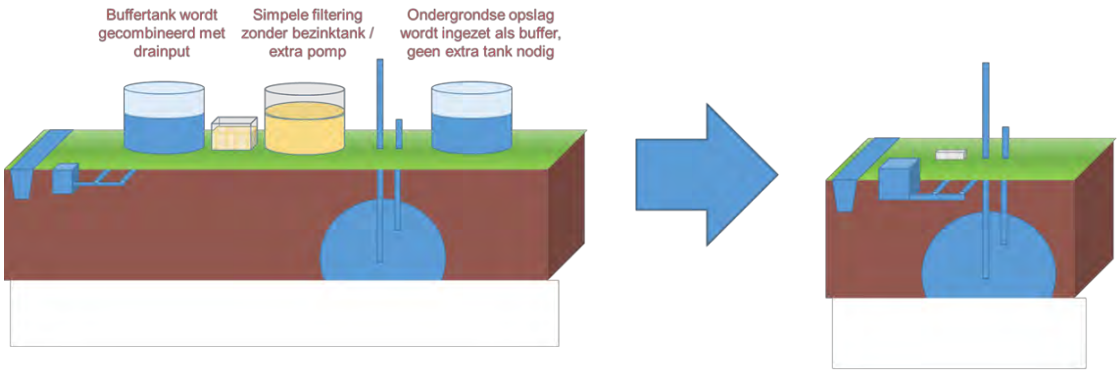
Hiervoor zijn veel verschillende oplossingen onderzocht. De meeste kansrijke is voorkomen dat de klei tot afstroming komt in de drains. Dit wordt gerealiseerd door een aanpassing in het opvangsysteem waarmee de stroomsnelheid wordt gereduceerd.
Allereerst zijn in de regenwatertank een aantal aanpassingen uitgevoerd. De instroom van het water in de regenwatertank is rustiger gemaakt, door het plaatsen van een schot met gaten (zie Figuur 9-1). Verder is de onttrekking van het water uit de regenwatertank drijvend gemaakt, zodat altijd het bovenste water werd onttrokken, in dit water heeft de meeste bezinking plaatsgevonden (zie Figuur 4-5). Tenslotte is de afvoer van het water uit de drains beperkt. Hierdoor werden piekbuien langzamer afgevoerd, doordat de stroomsnelheid van het instromende water was verlaagd, is daardoor het meegevoerde sediment beperkt.

9.2 Systeeminnovaties in Breezand

In Breezand is het water dat uit de drains stroomt al van vrij goede kwaliteit. Daarom is er slechts een beperkte filtering nodig. Bovendien kan het perceel zelf als een buffer worden gebruikt. Daarnaast wordt slechts een pomp gebruikt voor de infiltratie, wordt de sensor in de drainput ook als indicatie voor het grondwaterniveau gebruikt, en wordt het aantal peilbuizen dat op diepte moet worden geplaatst gereduceerd tot twee.

De pompen die het water uit de ondergrondse opslag naar boven halen kunnen direct worden gebruikt voor druppelirrigatie of voor peilopzet in de drainput. De watervraag van de druppelwaterirrigatie is nu nooit groter dan het debiet van de onttrekking, dus de pomp kan rechtstreeks daarvoor worden gebruikt. Daarmee vervalt ook de noodzaak voor een dagbuffer en kan de ondergrondse opslag direct als buffer voor de druppelbevloeiing worden gebruikt.

De vereenvoudigde vormgeving van het systeem is zo dat er relatief weinig pompen nodig zijn en dat het pompen zonder grote pieken kan gebeuren. Daardoor is het piekstroomverbruik relatief klein. Een mogelijke verdere innovatie is om het stroomverbruik met een zonnepaneel op te wekken.



Figuur 9-2. Systeem innovaties toegepast in Breezand

10 Conclusies

Hoeveelheid zoetwater uit de drainage

Het opgevangen water uit de drains vormt een substantiële bron van zoetwater. Van het Zandperceel Breezand voldeed 9.000 m3 en het Kleiperceel Borgsweer 4.000m3 van het water dat uit de drains is opgevangen in 2015 aan de kwaliteitseisen. Het percentage dat geschikt is voor ondergrondse opslag is afhankelijk van de ingestelde drempelwaarde. Tijdens de proef is hiermee gevarieerd om een indruk te krijgen van het effect op de op te vangen waterhoeveelheden. In Borgsweer is een drempelwaarde van de EC (electrische geleidbaarheid) toegepast van 1,1 tot 1,8 mS/cm en in Breezand van 1,3 tot 1,7 mS/cm. Het verschil in volume tussen Borgsweer en Breezand wordt, naast andere factoren, veroorzaakt door een combinatie van verschil in kweldruk en het opzetten van het peil boven het drainniveau in Breezand.

Welke drempelwaarde uiteindelijk kan worden toegepast is afhankelijk van het gebruik van het opgeslagen water. Omdat het water wordt toegediend met druppelirrigatie (zie hoofdstuk 5) is een hoger zoutgehalte toegestaan dan bij traditionele beregening. Voor pootaardappelen (Borgsweer) is de schadedrempel in het bodemvocht volgens de literatuur 4,3 mS/cm, waarbij in de proef gestart is met een veilige waarde voor beregening werd aangehouden van 1,3 mS/cm wat later is verhoogd naar 1,7 mS/cm. Voor tulpen en hyacint (Breezand) gelden literatuurwaarden van 1,0-1,3 mS/cm. In de dagelijkse praktijk blijkt voor bollen een wat hogere waarde te worden gehanteerd. Inn overleg met de teler is daarom gekozen voor een hogere drempelwaarde.

Op het Zandperceel Breezand voldeed met een drempelwaarde van 1,3 mS/cm ongeveer 65% van het drainagewater in 2015 aan de kwaliteitseisen, terwijl bij een drempelwaarde van 1,7 mS/cm bijna 100% van het drainagewater in 2015 voldeed. Hoewel heel verschillende percelen worden dezelfde percentages gevonden. Een kleine verhoging van de drempelwaarde leidt dus tot een sterke verhoging van de geschiktheid van het water uit de drains en daarmee de zoetwaterbeschikbaarheid.

Vorming van de zoetwaterbel

Het opbouwen van de zoetwaterbel in het overige brakke tot zoute grondwater is op beide locaties gelukt. In de twee jaar dat de systemen in gebruik zijn is in totaal 15000 m3 in Breezand en 5700m3 in Borgsweer geïnfiltreerd. Deze infiltratie is afgewisseld met onttrekkingen in het teeltseizoen van in totaal 1050 m3 in Breezand en 2030 m3 in Borgsweer. Een inkijkje in de ondergrond wordt gegeven met geofysische metingen en continue metingen in peilbuizen, waarin de bel duidelijk zichtbaar is tegen de achtergrond concentratie. Hieruit blijkt dat de bel groeit in de winterperiode als wordt geïnfiltreerd, en krimpt bij onttrekking in de zomerperiode. In de metingen is te zien dat het zoetwater dat het niet teruggewonnen zoete water als een compacte zoetwaterbel aanwezig. De opeenvolgende infiltratie en onttrekking creëert dus een compacte, ‘ademende’ zoetwaterbel in de zoute ondergrond.

Tijdens de infiltratie vormt zich de zoetwaterbel rondom de volledige diepte van de infiltratieput. De vorm van de bel is echter niet constant in de tijd. Aan de onderkant van de bel (op 30m diepte in Breezand) wordt na verloop van tijd de concentratie weer hoger. Wanneer de infiltratie weer start wordt het zoet-zout grensvlak opnieuw omlaag geduwd en ontwikkeld de bel zich verder. Tijdseries van de zoutconcentraties op verschillende dieptes en afstanden van de infiltratiebron laten zien dat het

zouter worden van de zoete bel op een diepte van 30m in Breezand niet samenvalt met de momenten dat onttrokken wordt. Interessant is dat de concentratie verandering juist samenvalt met momenten dat er nauwelijks is onttrokken en geïnfiltreerd. Dit geeft aan dat er opdrijving plaatsvindt, waarbij de zoete bel omhoog wordt gedreven door het verschil in dichtheid tussen het zoete en zoute water.

Terugwin rendement

Voor de effectieve onttrekking speelt deze opdrijving een belangrijke rol. In Breezand is vrij snel het regime ingesteld waarbij de onderste put alleen voor infiltratie werd gebruikt en niet voor onttrekking, om te voorkomen dat er zoutwater uit de ondergrond wordt gehaald. Hiermee kan veel efficiënter water worden onttrokken dan wanneer alle filters tegelijk worden gebruikt. Om de terugwin efficiëntie verder te onderzoeken zijn voor beide percelen grondwatermodellen gemaakt, die zijn gekalibreerd op de beschikbare metingen. Hiermee kan worden is berekend hoe het systeem op grotere schaal kan worden toegepast en hoe het terugwin rendement kan worden geoptimaliseerd.

Uit de modellen blijkt dat in Breezand de terugwinefficiëntie kan worden geoptimaliseerd wanneer eerst uit de drie bovenste filters water wordt onttrokken, daarna werd overgeschakeld op de bovenste twee filters, en in de laatste periode van het seizoen alleen nog uit de bovenste filter wordt onttrokken. Hiermee kan het rendement theoretisch worden verhoogd tot ruim 80%. Dit is specifiek voor de situatie in Breezand waar de achtergrond zoutconcentratie relatief laag is (uit eerdere internationale studies bleek dat zelfs een terugwin rendement van boven de 100% kan worden gehaald als de afwijking tussen de achtergrond concentratie en de gewenste concentratie niet te groot is). In de setting met de meervoudige putten in Borgsweer komt uit de modellen naar voeren dat bij de hoeveelheden zoals die nu worden geïnfiltreerd een maximaal rendement kan worden gerealiseerd van ongeveer 50%. Dit is in lijn met de terugwin rendementen die zijn gevonden bij studies in bijvoorbeeld het Westland. Dit lagere theoretische rendement in Borgsweer dan in Breezand komt door de combinatie van een hogere achtergrondconcentratie en de aanwezigheid van een kleilaagje en de systeem configuratie met ontrekkingsputten op 2 in plaats van 4 dieptes op enige afstand van de infiltratieput. Bij een aanpassing van het systeem kan dit rendement verder worden verhoogd.

Het blijkt dat, naast de opdrijving, de mengzone aan de rand van de bel van belang is voor het rendement. Wanneer het water vermengd is met het zoutere grondwater is het niet meer terug te winnen omdat het te zout is geworden. Een mengzone is bijvoorbeeld gemeten in de peilbuizen waar de tijdseries een geleidelijke overgang laat zien tussen de concentratie van het grondwater en het geïnfiltreerde water. Een oplossing om het rendement te verhogen blijkt het instellen van een zogenaamd ‘Spaarjaar’: een eerste jaar waarin wel wordt geïnfiltreerd, maar niet wordt onttrokken. De mengzone blijft beperkt tot de rand van bel, zodat als er al een buffer is opgebouwd deze de kern van de bel waarin wordt geïnfiltreerd en onttrokken niet meer raakt. Hiermee kan voor de situatie in Breezand zelfs bij kleine volumes de terugwinefficiëntie worden verhoogd naar boven de 95%.

Met de setting zoals in Borgsweer loopt het gesimuleerde rendement snel op wanneer in combinatie met een Spaarjaar grotere volumes worden geïnfiltreerd en onttrokken. Bij een volume van ongeveer 50000m3 kan volgens het model een terugwin rendement van ruim 90% worden gehaald. De toepassing op schaal kan dus sterk bijdragen aan de efficiëntie. Bij kleinere volumes wordt daarom de configuratie zoals in de Breezand pilot geadviseerd, terwijl bij grotere volumes beide configuraties kansrijk zijn.

Areaal opvang ten opzichte van areaal irrigatie

Het blijkt dat voor de situatie in Borgsweer (kleiperceel met pootaardappelen) het perceelseigen water van 10 ha voldoende is om 12 ha zo te irrigeren dat er zich in de afgelopen 50 jaar nooit een vochttekort zou hebben voorgedaan. In de situatie in Breezand (zandperceel met bollenteelt) is het perceelseigen water van 10 ha voldoende voor het volledig irrigeren van maar liefst 20 ha. In een veranderend klimaat (doorgerekend met het sterke klimaatverandering, WH scenario) blijft deze verhouding hetzelfde voor Borgsweer en wordt nog positiever voor Breezand.

Aanleg en functioneren van het systeem

Voor het toepasbaar maken van het systeem voor de vollegrondsteelt zijn allerlei praktische innovaties doorgevoerd in deze eerste pilotjaren. Vooral de toepassing bij het kleiperceel Borgsweer bleek een uitdaging. De systeem innovaties zijn geïnstalleerd en wordt op dit moment in de praktijk getest. Bij het zandperceel Breezand bleek het water dat uit de drains komt vrijwel geen deeltjes te bevatten die eruit moeten worden gefilterd. Het perceel zelf werkt daar al als een soort zandfilter. Dit gaf veel ruimte voor innovaties. Door deze vereenvoudigingen wordt het systeem compacter en kosten efficiënter. Dit brengt een brede uitrol voor vooral zandpercelen dichterbij.

Effect op het oppervlaktewater

Piekafvoer. Een groot bijkomend voordeel van de opvang van perceelseigen water is de reductie van de piekafvoer van het perceel naar de sloot. Doordat het overgrote deel van het water wordt opgevangen en opgeslagen worden afvoerpieken verminderd tot slechts zo'n 15% van de pieken die optreden zonder het systeem. Dat betekent dat het oppervlaktewatersysteem veel minder belast wordt bij een piekafvoer.

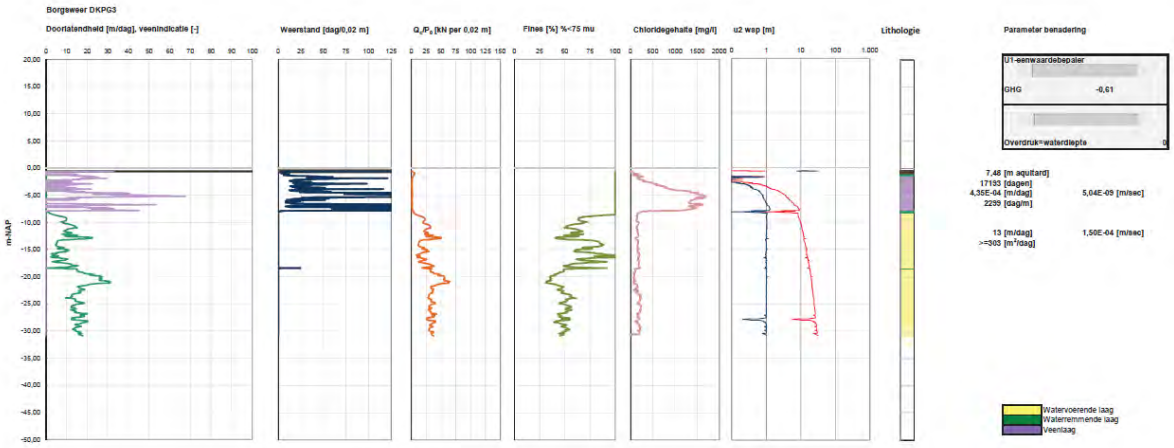
Zoutbelasting. Door de opvang van het water uit de drains komt er minder zoet water in de sloten terecht. Hierdoor zullen de sloten relatief zouter worden. Dit kan voordelig zijn, bijvoorbeeld voor de ontwikkeling van zoute natuur in de sloten, maar kan ook een nadeel zijn. Als de landbouw verderop in het watersysteem nog wel zoet water uit de sloten nodig heeft, dan kan de opvang van perceelseigen water leiden tot een grotere doorspoelbehoefte. Daarom kan het voordelig zijn om de opvang van perceelseigen water te clusteren, zodat de sloten kunnen worden afgekoppeld van het doorspoelregime.

Vervolg

De systemen moeten voor ze optimaal worden toegepast en klaar zijn voor een brede markttoepassing nog verder worden ontwikkeld. Daarom lopen de pilots door in het vervolgproject Spaarwater 2, waarin langere meetreeksen en specifieke onderdelen verder worden onderzocht. Daarnaast worden ook de systeemverbeteringen getest, zoals de sterke vereenvoudiging van het systeem die in Breezand toegepast.

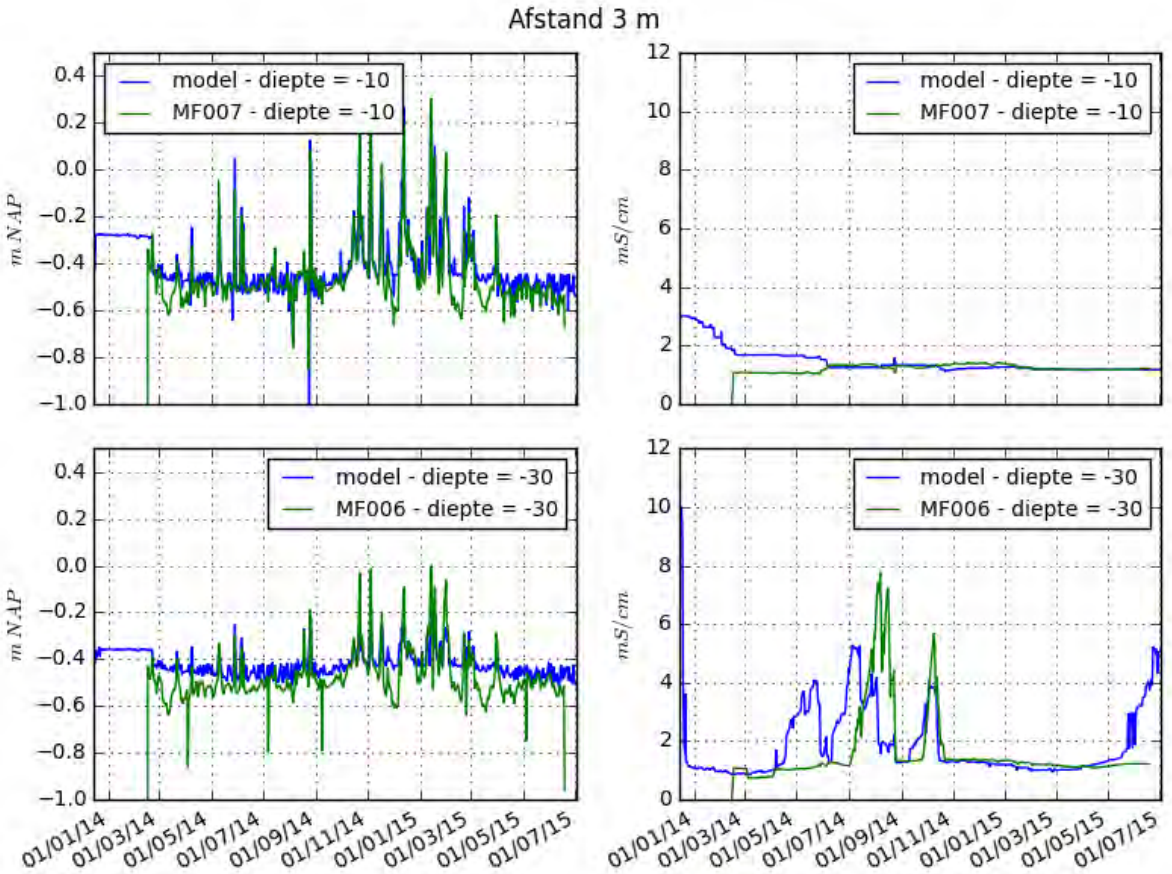
Het systeembegrip op basis van de metingen en modellen kan worden opgeschaald buiten de vier pilotlocaties waar de systemen tot nu toe zijn toegepast. De kansrijkheid van de systemen wordt in Spaarwater 2 voor de hele Waddenregio in kaart gebracht en in drie pilotpolders gedetailleerd met de lokale agrariërs en beheerders worden verkend op fysisch en (bedrijfs)economisch vlak. Hiermee worden de systemen verder ontwikkeld richting een kansrijke toepassing in verziltende deltaregio's.

Bijlage 1 – sondering Borgsweer

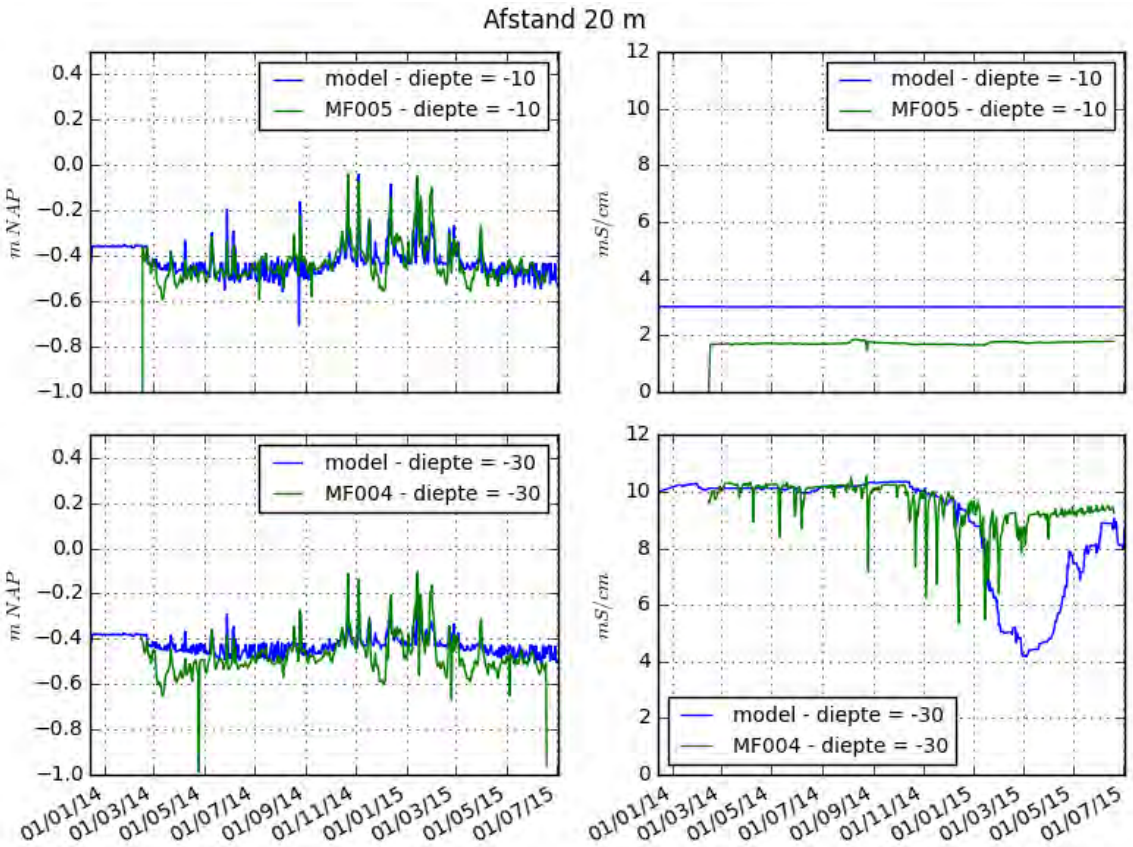


Figuur 1. Sondering uitgevoerd op het kleiperceel Borgsweer.

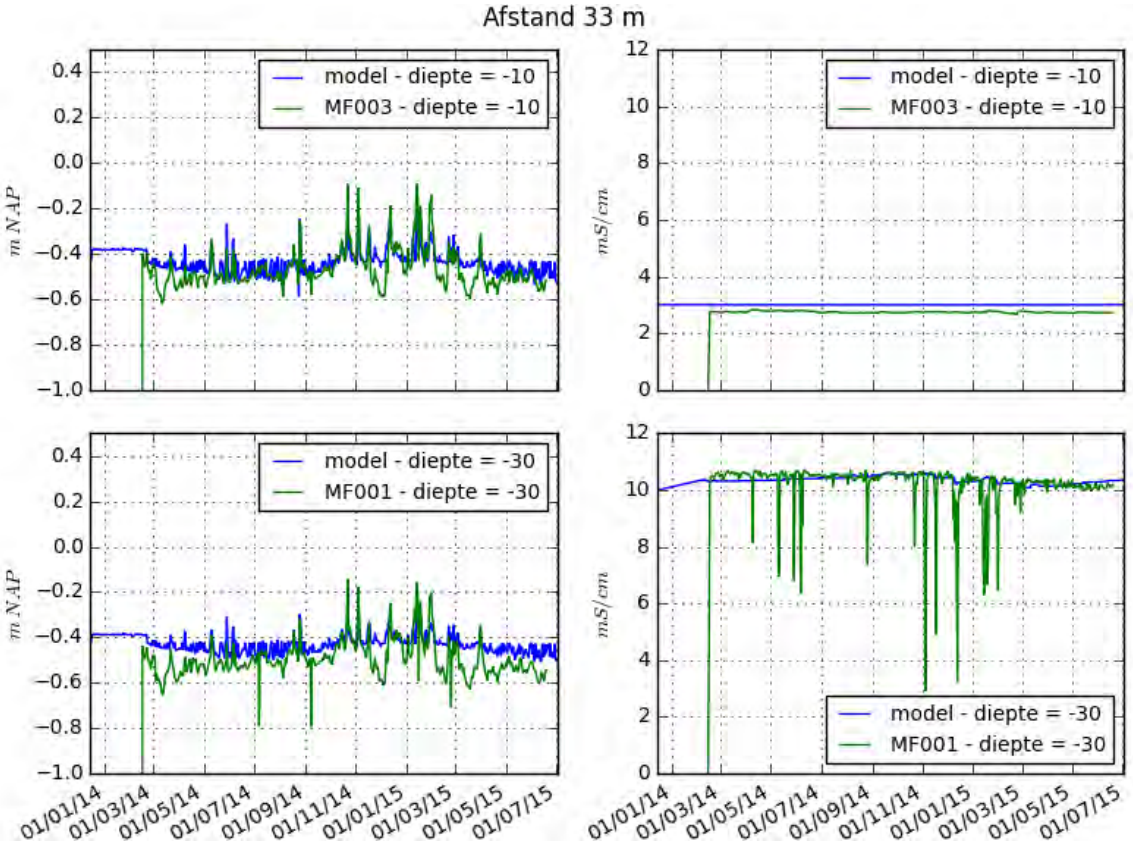
Bijlage 2 – Vergelijking metingen en model Breezand



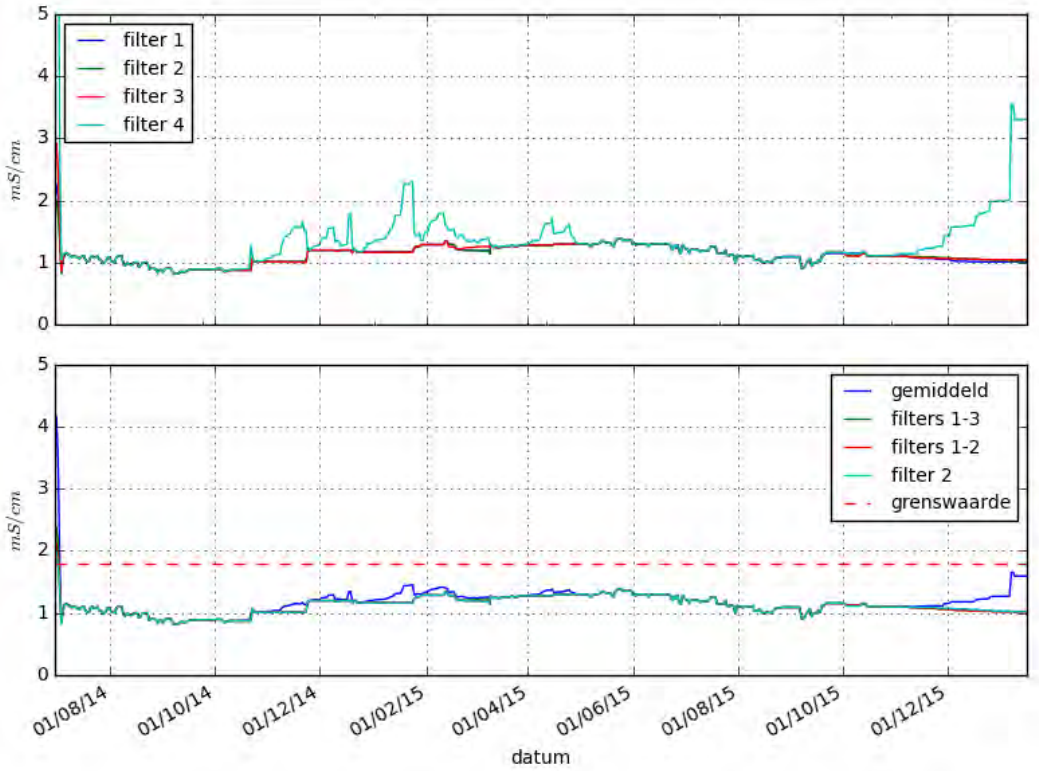
Figuur 2: Gemodelleerde en gemeten (dag) waarden van de stijghoogten (links) en EC waarden (rechts) in peilbuizen op 3 m afstand van de put. N.B. de abrupte dalingen in de stijghoogtemetingen zijn veroorzaakt door het uitlezen van de sensor.



Figuur 3. Gemodelleerde en gemeten (dag) waarden van de stijghoogten (links) en EC waarden (rechts) in peilbuizen op 20 m afstand van de put.

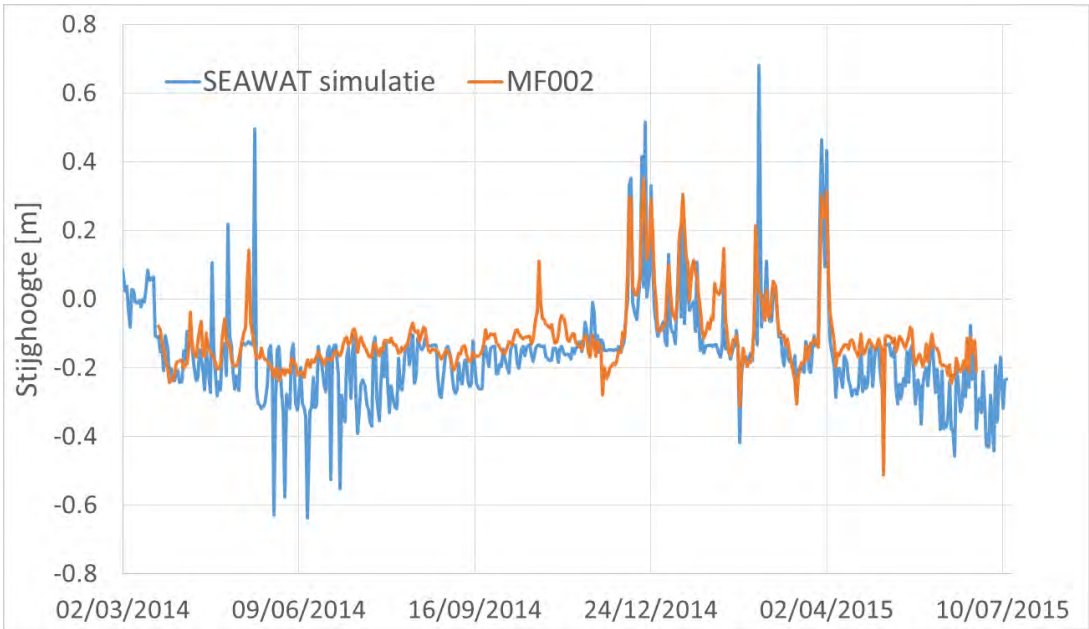


Figuur 4. Gemodelleerde en gemeten (dag) waarden van de stijghoogten (links) en EC waarden (rechts) in peilbuizen op 33 m afstand van de put.

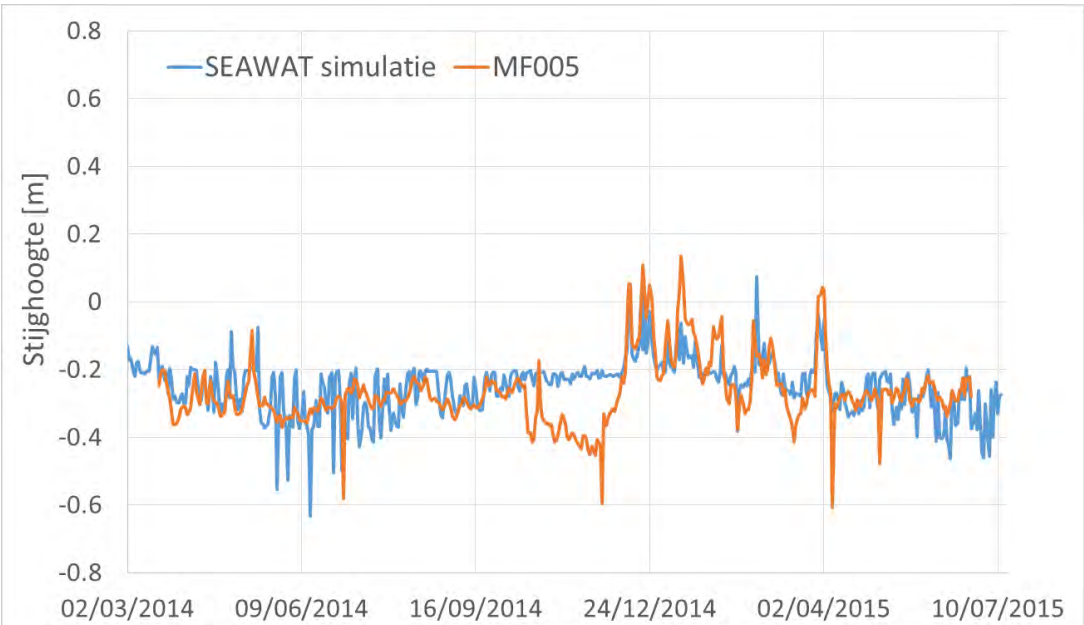


Figuur 5: Gemodelleerde EC van het water per filtertraject (boven) en gemiddeld over verschillende filtertrajecten (onder).

Bijlage 3 – Vergelijking metingen en model Borgsweer



Figuur 6. Vergelijking van de stijghoogten in peilbuis MF002 (ondiep) en de SEAWAT modelsimulatie over een periode waarin zowel infiltratie en onttrekking plaatsvond. Voor deze simulatie werd een weerstandslaag op 18 m diep in het model ingebracht.



Figuur 7. Vergelijking van de stijghoogten in peilbuis MF005 (diep) en de modelsimulatie over een periode van ongeveer 500 dagen, waarbij infiltratie en onttrekking plaatsvond. Voor deze simulatie werd een weerstandslaag op 18 meter diep in het model ingebracht.

Acacia Institute
Van Hogendorpplein 4
2805 BM Gouda

Telefoon: 0182 – 686424
Internet: www.acaciawater.com
Email: info@acaciawater.com