

KWR 2022.084 | september 2022

Handvatten voor duurzame co-existentie van ondergrondse waterberging en open bodemenergie

Rapport

Handvatten voor duurzame co-existentie van ondergrondse waterberging en open bodemenergie

KWR 2022.084 | september 2022

Opdrachtnummer

403356-001

Projectmanager

dr. K.J. (Klaasjan) Raat

Opdrachtgever

Stichting Kennis in je Kas (Kijk) en Gemeente Westland

Dit onderzoek is tot stand gekomen in het kader van programma Kas als Energiebron, het innovatie- en actieprogramma van het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en Glastuinbouw Nederland, en mede gefinancierd door de Stichting Kennis in je Kas en de Gemeente Westland.

Auteur(s)

L.P. (Lennart) Brokx MSc, dr. ir. J.M. (Martin) Bloemendal, dr. N. (Niels) Hartog

Kwaliteitsborger(s)

dr. N. (Niels) Hartog

Dit rapport is niet openbaar en slechts verstrekt aan de opdrachtgevers van het adviesproject. KWR zal zich onthouden van verspreiding van dit rapport en het rapport derhalve niet verstrekken aan derden, tenzij partijen anders overeenkomen. Opdrachtgever is gerechtigd het rapport te verspreiden mits KWR daarvoor vooraf toestemming heeft verleend. Aan de toestemming voor de verspreiding van (onderdelen van) het rapport kan KWR voorwaarden verbinden.

Werkwijzen, rekenmodellen, technieken, ontwerpen van proefinstallaties, prototypen en door KWR gedane voorstellen en ideeën alsmede instrumenten, waaronder software, die in het onderzoeksresultaat zijn opgenomen, zijn en blijven het eigendom van KWR. Ook alle rechten die voortvloeien uit intellectuele- en industriële eigendom, alsmede de auteursrechten, blijven bij KWR berusten en derhalve eigendom van KWR.

Keywords

Ondergrondse waterberging (OWB), ASR, Open bodemenergie (OBES), ruimtelijke ordening

Jaar van publicatie

2022

Meer informatie

dr.ir. J.M. (Martin) Bloemendal

T 030-6069606

E martin.bloemendal@kwrwater.nl

PO Box 1072

3430 BB Nieuwegein

The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511

E info@kwrwater.nl

I www.kwrwater.nl

The logo for KWR (Knowledge Water Research) features the letters 'KWR' in a bold, blue, sans-serif font. The 'K' and 'W' are connected, and the 'R' is separate.

September 2022 ©

Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier.

Samenvatting

In tuinbouwgebieden wordt de ondergrond gebruikt voor zowel het opslaan van warmte en koude middels open bodemenergiesystemen (OBES) als het opslaan van zoet water middels ondergrondse waterberging (OWB). Over het algemeen wordt voor de plaatsing van beide type systemen óf gebruik gemaakt van verschillende watervoerende pakketten, óf worden beide systeemtypen op grote afstand van elkaar gehouden. In sommige gebieden, met een grote vraag naar zowel zoet water als bodemenergie en met één watervoerend pakket dat duidelijk geschikter is dan de andere watervoerende pakketten, is het echter interessant om zowel de opslag van warmte en koude als de opslag van zoet water in hetzelfde watervoerende pakket op kortere afstanden te kunnen laten plaatsvinden. Het doel van dit onderzoek was het in kaart brengen onder welke voorwaarden beide type systemen in hetzelfde watervoerende pakket aanwezig kunnen zijn zonder dat ze elkaar negatief beïnvloeden. In dat geval is duurzame co-existentie van OWB en OBES mogelijk.

Om de voorwaarden voor duurzame co-existentie tussen OWB en OBES te schetsen is er gezocht naar de minimale afstand tussen beide systemen die nodig is om de terugwinefficiëntie van beide systeemtypen niet negatief te beïnvloeden. Hierbij was de terugwinefficiëntie van de OWB leidend, omdat deze systemen door het relatief kleinere gemiddelde opslagvolume t.o.v. een OBES gevoeliger zijn voor de aanwezigheid van een OBES dan vice versa. Daarnaast wordt het eerste watervoerende pakket in bepaalde gebieden nu gereserveerd voor OWB (en brakwaterwinning), en zouden OBES-systemen hier dus nieuw in zijn. Deze afstandsregels zijn opgesteld aan de hand van een serie generieke simulaties. Hierbij is, rekening houdend met de temporele dynamiek van de systemen, telkens één (warme of koude) OBES-bron en één OWB-bron gesimuleerd, voor verschillende opslagvolumes van beide systemen en in een zoete en een brakke ondergrond. De afstand tussen beide bronnen werd hierbij uitgedrukt als de som van de hydraulische stralen van beide systemen (ΣR_h), een eenvoudig uit te rekenen parameter die de straal van de theoretische cilinder van het jaarlijks opgeslagen volume weergeeft.

Aan de hand van de generieke simulaties is de minimale afstand bepaald, uitgedrukt in ΣR_h , die benodigd is tussen beide type systemen om het effect van de OBES op de terugwinefficiëntie van de OWB verwaarloosbaar te laten zijn. In een ondergrond met zoet grondwater is deze afstand minimaal 2-3 ΣR_h . Uit de simulaties bleek dat deze afstand geldt voor de afstand van een OWB naar zowel de warme als de koude put van een OBES. In de praktijk betekent dit dat bij een gemiddelde grootte OBES en OWB (resp. 250.000 en 50.000 m³ opslag volume) in een watervoerend pakket van 30 m dik, de onderlinge afstand tussen de 250 en 400 m moet zijn. In een brakke ondergrond is een OWB kwetsbaarder, doordat er meer opdrijving van het zoete water plaatsvindt en menging met het natuurlijke grondwater sneller leidt tot de overschrijding van de afkapconcentratie van het systeem. Uit de simulaties blijkt dan ook dat de minimale afstand tussen OWB en OBES in een brakke ondergrond minimaal 4 ΣR_h moet zijn. In de praktijk betekent dit dat bij een gemiddelde grootte OBES en OWB (resp. 250.000 en 50.000 m³ opslag volume) in een watervoerend pakket van 30 m dik, de onderlinge afstand meer dan 400 m moet zijn.

De geldigheid en praktische consequenties voor het toepassen van deze afstandsregels is getest in twee uitgevoerde casestudy's; één in het Westland in een ondergrond met brak water, één in de regio Aalsmeer in een ondergrond met zoet water. Voor de casus in het Westland werd een relatief kleine invloed van het OBES op de terugwinefficiëntie van de OWB gevonden voor een afstand van 4 ΣR_h , terwijl de invloed in de regio Aalsmeer al verwaarloosbaar was bij een onderlinge afstand van 2 ΣR_h . De bevindingen bij de casestudy's sluiten dus aan bij de afstandsregels die volgden uit de generieke simulaties.

Om inzicht te krijgen in de doorwerking van deze afstandsregels op de mogelijkheden voor co-existentie van OBES en OWB in de praktijk, is er voor een drietal kassen in de regio Aalsmeer een inpassingsexercitie uitgevoerd. Uit deze

exercitie bleek dat bij het gelijktijdige gebruik van OBES en OWB in hetzelfde watervoerende pakket door meerdere gebruikers onderlinge afstemming over de ruimtelijke inpassing nodig is om aan de afstandsregels te kunnen voldoen; grootschalige gezamenlijke systemen zijn hiervoor geschikter dan losse kleinere systemen. Daarnaast maakte de exercitie ook duidelijk dat zelfs met het hanteren van de afstandsregels ondergrondse ruimte voor de toepassing van zowel OWB als OBES schaars is, en dat ruimtelijke ordening van de ondergrond nodig is voor duurzame co-existentie tussen beide type systemen indien er vraag is naar zowel OWB als OBES bij meerdere partijen in een bepaald gebied.

Ter reflectie op de in dit onderzoek afgeleide afstandsregels en ter doorgronding van de toepasbaarheid hiervan bij beleidsvraagstukken is een workshop georganiseerd met de projectgroep, bestaande uit zowel bevoegd gezag als andere belanghebbenden. Bij deze workshop kwam een tweetal toepassingen van de hier opgestelde afstandsregels naar voren: Ten eerste als instrument voor initiatiefnemers voor een bepaald systeem om een eerste inzicht te krijgen in de ondergrondse ruimte die voor dit systeem beschikbaar is. Ten tweede als instrument dat ingezet kan worden door het bevoegd gezag bij de ruimtelijke ordening van een bepaald gebied.

Inhoud

Samenvatting	2	
1	Introductie	6
1.1	Aanleiding en Doel	6
1.2	Globale aanpak	6
2	Methode	8
2.1	Modelbeschrijving	8
2.1.1	SEAWAT	8
2.1.2	Ruimtelijke en temporele discretisatie en randvoorwaarden	8
2.1.3	Modelparameters	9
2.2	Beoordelingskader	10
2.2.1	Generieke uitdrukking voor de onderlinge afstand	10
2.2.2	Terugwinefficiëntie	11
2.3	Generieke simulaties	12
2.3.1	Opzet generieke simulaties	12
2.3.2	Scenario's	14
2.4	Casestudy's	15
2.4.1	Westland (Prominent)	15
2.4.2	Aalsmeer (Kudelstaart)	18
3	Resultaten	20
3.1	Generieke modellering	20
3.1.1	Interactie tussen OWB en OBES	20
3.1.2	Effect op terugwinefficiëntie OWB	21
3.1.3	Invloed OWB op efficiëntie van OBES	22
3.2	Casestudy's	23
3.2.1	Westland (Prominent)	23
3.2.2	Aalsmeer	24
4	Co-Existentie van OWB en OBES	27
4.1	Analytische exercitie voor meerdere naast elkaar gelegen kassen	27
4.1.1	Aanpak	27
4.1.2	Resultaten	28
4.2	Reflectie op afstandsregels en toepasbaarheid bij vergunningverlening	30
4.2.1	Ruimtelijke ordening en beleid	30
4.2.2	Vergunningverlening	31
4.2.3	Belangrijkste conclusies en openstaande vragen	31
5	Discussie	33
5.1	Beschouwing mogelijke andere invloeden op OBES-OWB interactie	33

5.1.1	Achtergrondstroming	33
5.1.2	Onbalans	33
5.1.3	Jaarfluctuaties Vraag	34
5.1.4	Effect van meest nabijgelegen OBES-bron	35
5.1.5	Overige complicerende praktijkcondities	36
5.2	Invloed opslagtemperatuur op ruimtebeslag OBES	36
6	Conclusies en aanbevelingen	38
6.1	Conclusies	38
6.2	Aanbevelingen	38
	Referenties	40
	Bijlagen	42
I	Geohydrologische opbouw casus Westland	42
II	Onderbouwing locaties casestudy's	43

1 Introductie

1.1 Aanleiding en Doel

In tuinbouwgebieden worden watervoerende pakketten gebruikt voor zowel de winning en opslag van water voor de gietwatervoorziening als ook voor de opslag van warmte en koude voor verwarming en koeling van de kassen. Omdat er onvoldoende inzicht is in hoe deze verschillende vormen van ondergronds ruimtegebruik elkaar beïnvloeden, worden deze systemen ofwel niet in dezelfde watervoerende pakketten toegestaan door het bevoegd gezag, ofwel op zeer grote afstand van elkaar geplaatst. In beide gevallen wordt de potentieel beschikbare ruimte in de aanwezige watervoerende pakketten niet optimaal benut. De ondergrondse ruimte die geschikt is voor opslag van zowel warmte als water is echter beperkt, waardoor exclusieve toepassing van ofwel warmte- ofwel wateropslag in een bepaald watervoerend pakket mogelijk leidt tot suboptimale benutting van de ondergrond. Een voorbeeld hiervan is het Westland, waar de plaatsing van open bodemenergiesystemen (OBES) momenteel alleen is toegestaan in het tweede watervoerend pakket. Kan OBES ook worden toegepast in het eerste watervoerende pakket, waarin ondergrondse waterberging (OWB) al wordt toegepast, zonder dat beide type systemen elkaar negatief beïnvloeden? Oftewel, onder welke condities kan er sprake zijn van “duurzame co-existentie”? Om deze vraag te beantwoorden is het nodig om inzichtelijk te maken onder welke condities warmte- en wateropslag binnen een watervoerend pakket elkaar in welke mate beïnvloeden.

Het werk gepresenteerd in dit rapport heeft als doel om de interactie tussen OWB en OBES te kwantificeren en op basis daarvan generieke handvatten te ontwikkelen voor de ruimtelijke ordening van de ondergrond en bij de vergunningverlening voor systemen voor ondergrondse opslag van warmte en water. Hiermee dragen de resultaten van dit onderzoek bij aan een optimale en duurzame benutting van de ondergrond voor de toepassing van OWB en OBES.

1.2 Globale aanpak

De aanpak van dit onderzoek bestaat grofweg uit 3 verschillende stappen:

1. Om gedetailleerd inzicht te verkrijgen in hoe OWB en OBES elkaar beïnvloeden, is de onderlinge interactie gekwantificeerd met behulp van modelsimulaties. De focus ligt hierbij op de invloed van het introduceren van een OBES op de terugwinefficiëntie van een OWB, aangezien OWB systemen over het algemeen kleiner zijn en daardoor kwetsbaarder van de nabijheid van een OBES dan vice versa. Daarnaast is in sommige gebieden, zoals het Westland, het eerste watervoerende pakket nu gereserveerd voor OWB en brakwaterwinning, en zou de toepassing van OBES hier dus nieuw in zijn. Voor een range van representatieve praktijkcondities is berekend hoe de verschillende typen systemen elkaar beïnvloeden:
 - a. OWB van verschillende groottes en in zoete en zoute/brakke watervoerende pakketten.
 - b. OBES van verschillende groottes

Op basis van de resultaten van de generieke modelresultaten zijn afstandsregels vastgesteld waarbij er verwaarloosbare nadelige interactie tussen deze systeemtypen optreedt.

2. Aan de hand van een tweetal casestudy's, bij een kassencomplex in het Westland (zoet-in-brak) en Aalsmeer (zoet-in-zoet) is er gekeken naar de praktische toepasbaarheid van de afstandsregels en zijn de afstandsregels gevalideerd.
3. Om verder te verkennen hoe de implementatie van deze afstandsregels in de praktijk effect heeft op het ruimtebeslag en de praktische inpasbaarheid, is er voor de casestudy in Aalsmeer een inpassingsoefening uitgevoerd maar 3 naast elkaar gelegen kassen.

4. Met stakeholders uit de glastuinbouw en vergunningverleners van de provincie (het bevoegde gezag voor vergunningverlening van OWB en OBES) zijn de modelresultaten van stap 1 en 2 geëvalueerd en is er gereflecteerd op de praktische en beleidsmatige (on)mogelijkheden, op basis waarvan een perspectief voor praktijktoepassing van co-existentie van warmte- en wateropslag kan worden vastgesteld.

2 Methode

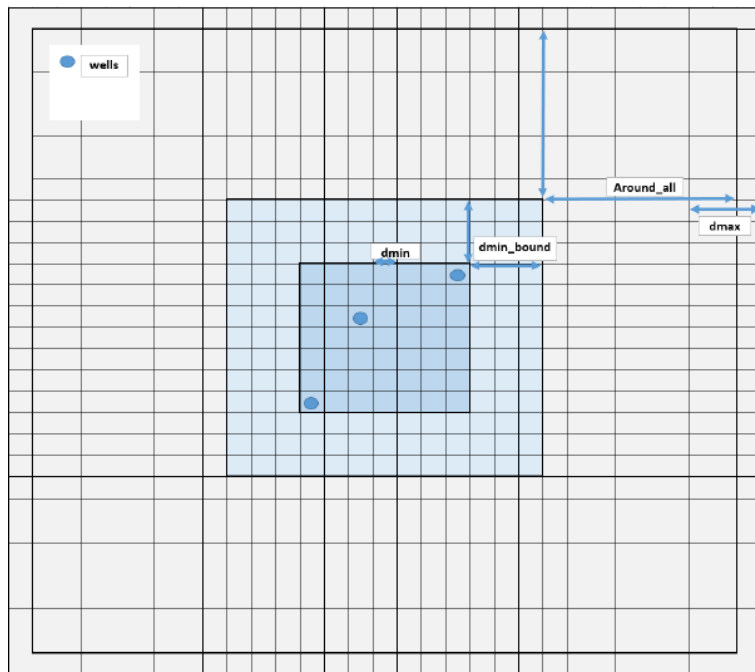
2.1 Modelbeschrijving

2.1.1 SEAWAT

Met SEAWAT (Langevin et al., 2003) kunnen MODFLOW (Harbaugh, 2005) en MT3DMS (Zheng & Wang, 1999) dynamisch worden gekoppeld zodat de optredende processen van grondwaterstroming, stoftransport en warmtetransport (Hecht-Méndez et al., 2010; Langevin et al., 2010) simultaan worden meegenomen in de berekeningen. Dit is nodig omdat de dichtheid en viscositeit van het grondwater beide afhangen van de temperatuur en het zoutgehalte, daarom moeten deze variabelen elke tijdstap worden bepaald, zodat hun effect op de grondwaterstroming wordt meegenomen. In het hier gebruikte grondwatermodel wordt chlorideconcentratie gebruikt als proxy voor het zoutgehalte van het grondwater.

2.1.2 Ruimtelijke en temporele discretisatie en randvoorwaarden

De ruimtelijke discretisatie in horizontale richting is zoals weergegeven in Figuur 2-1. Deze horizontale discretisatie is gebaseerd op een vaste celgrootte ('dmin') die tot een bepaalde afstand van de gesimuleerde bronnen ('dmin_bound') constant blijft en daarna logaritmisch toeneemt richting de buitenrand ('Around_all'). Om de minimale horizontale celgrootte te bepalen is de locatie en breedte van het grensvlak van zoet en zout na één infiltratiecyclus doorgerekend voor celgroottes van respectievelijk 2x2, 4x4, 5x5 en 10x10 meter. Uit deze simulaties blijkt dat een horizontale discretisatie bij een celgrootte van 4x4 meter de analytische oplossing voor doorbraakcurve onder invloed van dispersie zoals gedefinieerd door Gelhar & Collins (1971) benaderd wordt. Deze celgrootte wordt dan ook toegepast in het meeste verfijnde gedeelte van het model. Op een afstand van 100 m van de bronnen worden de cellen groter (tot 400m) richting de rand van het model volgens een logaritmisch profiel in minimaal 20 stappen. De rand van het model bevindt zich op ca. 2,5 km afstand van het verfijnde gedeelte. De verticale celgrootte is casus-specifiek en wordt verder besproken bij de bijbehorende hoofdstukken (Paragraaf 2.3.2, 2.4.1 & 2.4.2). Zowel aan de buitenranden als de boven- en onderrand van het model worden de stijghoogte, temperatuur en chlorideconcentratie, constant gehouden tijdens de simulatie. Het model wordt doorgerekend met tijdstappen van 1 dag, om zo per dag te kunnen controleren of de afkapconcentratie van de OWB-systemen overschreden wordt (Paragraaf 2.3.1).



Figuur 2-1: Schematische weergave van de horizontale discretisatie van het model.

2.1.3 Modelparameters

De constante modelparameters zijn weergegeven in Tabel 2-1.

Tabel 2-1: Parameters gebruikt tijdens de modellering.

Parameter	Waarde	Referentie
Warmtecapaciteit water	4130 J/kg/°C	Bloemendal et al. (2020)
Warmtecapaciteit matrix	920 J/kg/°C	Côté & Konrad (2005)
Referentiedichtheid water	1.000 kg/m ³	Bloemendal et al. (2020)
Dichtheid zand	2.640 kg/m ³	Bloemendal et al. (2020)
Thermische geleidbaarheid water	0,58 W/m/°C	van Lopik et al. (2016)
Thermische geleidbaarheid zand	3,0 W/m/°C	Côté & Konrad (2005)
Thermische geleidbaarheid klei	1,0 W/m/°C	Midttømme et al. (1998)
Thermische distributiecoëfficiënt	2,3E-4 m ³ /kg	Hecht-Méndez et al. (2010)
Porositeit	0,3	Bloemendal et al. (2020)
Longitudinale dispersie	0,5 m	van Lopik et al. (2016)
Transversale dispersie	0,05 m	van Lopik et al. (2016)
Verticale dispersie	0,005 m	Bloemendal et al. (2020)
Moleculaire diffusie	8,64E-5 m ² d ⁻¹	Hassanizadeh (2017)

2.2 Beoordelingskader

2.2.1 Generieke uitdrukking voor de onderlinge afstand

Om goed hanteerbare regels te creëren voor de minimale afstand tussen een open bodemenergiesysteem (OBES) en een ondergrondse waterberging (OWB), is het belangrijk om de deze afstandsregels op te stellen aan de hand van relatief eenvoudig te bepalen eigenschappen van de ondergrond en de beide systemen. Om deze reden wordt er voor gekozen om op zoek te gaan naar de afstandsregels op basis van de hydraulische straal van de opslagsystemen. Deze parameter is gelijk aan de straal van het volume wat in een enkele opslagcyclus geïnjecteerd wordt, als er vanuit gegaan wordt dat stroming vanaf het filter enkel horizontaal is en gelijk naar alle kanten. In andere woorden: het opslagvolume is dus cilindervormig (Figuur 2-2). De hydraulische straal is gedefinieerd als:

$$R_h = \sqrt{\frac{V}{n\pi L}} \quad (1)$$

Met R_h de hydraulische straal (m), V het (gemiddelde) opslagvolume (m^3/jaar), n de porositeit van het watervoerende pakket (-) en L de filterlengte van de bron (m).

Het voordeel van het gebruiken van de hydraulische straal als afstandsmaat is dat deze bij voorbaat vrij eenvoudig in te schatten is. De filterlengte van de bronnen en het gemiddelde opslagvolume van een OWB of OBES is namelijk vaak van te voren al bekend. Voor de porositeit van een watervoerend pakket kan in Nederland over het algemeen uitgegaan worden van een waarde rond de 0,3 (Bloemendal & Hartog, 2018).

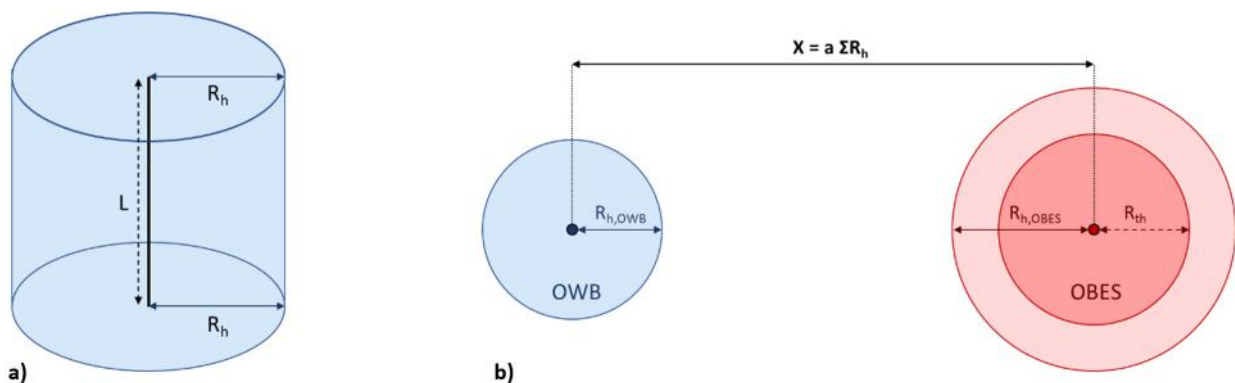
Omdat zowel het opslagvolume van de OWB als het OBES van belang zijn voor de onderlinge interactie tussen de twee systemen, is er voor gekozen om de onderlinge afstandsregels op te stellen aan de hand van de som van de hydraulische stralen van de twee type systemen waartussen de interactie moet worden voorkomen (ΣR_h):

$$\Sigma R_h = R_{h,OWB} + R_{h,OBES} \quad (2)$$

Hierbij wordt in het geval van het OBES altijd uitgegaan van de bron die het dichtst bij de bron het OWB-systeem ligt, ongeacht of dit een koude of een warme bron is. Er wordt gezocht naar een generieke uitdrukking die de minimale afstand tussen de twee systemen (X in meters) uitdrukt in de vorm van deze som maal een factor (a):

$$X = a \Sigma R_h \quad (3)$$

Figuur 2-2 geeft de hierboven gehanteerde definities voor de zoektocht naar deze generieke afstandsregels weer.



Figuur 2-2 a): Schematische weergave van de definitie van hydraulische straal voor een opslagvolume. b): Overzicht van de termen aan de hand waarvan er in deze studie naar een generieke uitdrukking wordt gezocht.

Vergelijkbaar met de hydraulische straal is voor open bodemenergiesystemen ook de thermische straal R_{th} (m) van belang, die gelijk is aan de straal van het cilindervormige volume met de injectietemperatuur van de betreffende bron:

$$R_{th} = \sqrt{\frac{c_w V}{c_{aq} \pi L}} \quad (4)$$

Waar c_w en c_{aq} respectievelijk de volumetrische warmtecapaciteit van het water en het watervoerende pakket ($J/m^3/K$) zijn. De thermische straal is gelijk aan ca. 0,66 maal de hydraulische straal (Bloemendal & Hartog, 2018). Binnen Nederland wordt hierbij over het algemeen gehanteerd dat de koude en warme bron minstens 3 R_{th} uit elkaar moeten liggen ($\pm 2 R_h$).

Het opslagvolume van een OBES-bron is afhankelijk van de hoeveelheid warmte/koude E (J) die opgeslagen wordt en het temperatuurverschil ΔT (K) tussen de koude en de warme bron, volgens:

$$V = \frac{E_{in}}{c_w \Delta T} \quad (5)$$

2.2.2 Terugwinefficiëntie

Voor OWB-systemen geldt dat het onttrokken grondwater vaak aan strenge kwaliteitseisen moet voldoen om nuttig te kunnen worden gebruikt door de afnemer. Een deel van het geïnfiltreerde zoete water kan niet worden teruggewonnen, doordat het vermengd raakt met het bijvoorbeeld het omringende grondwater, dat niet aan de kwaliteitseisen voor de gebruiker van het grondwater voldoet, door dispersie en diffusie of van de bron wegstroomt door natuurlijke grondwaterstroming of beïnvloeding van andere putten. Wanneer het verschil in zoutgehalte tussen het natuurlijke grondwater en het geïnfiltreerde grondwater groot is, zorgt dichtheidsstroming voor nog meer verliezen. In dit geval wordt als indicator voor de kwaliteit van het onttrokken water uit de OWB de chlorideconcentratie gebruikt. Indien deze concentratie boven een bepaalde grenswaarde (de afkapconcentratie) komt, is het onttrokken water niet meer nuttig te gebruiken door de afnemer. Op dat moment wordt de bron stilgelegd tot aan de volgende infiltratieperiode.

Aan de hand van het hier boven beschrevene kan de terugwinefficiëntie (of het opslagrendement) van het OWB-systeem (η_{OWB}) worden uitgedrukt als de relatieve hoeveelheid van het opgeslagen grondwater dat kan worden onttrokken (Ward et al., 2007):

$$\eta_{OWB} = \frac{V_{uit}}{V_{in}} * 100\% \quad (6)$$

Hier is V_{in} het opgeslagen watervolume tijdens een bepaalde cyclus ($m^3/jaar$) en V_{uit} het volume dat daaropvolgend kan worden onttrokken voordat de afkapconcentratie bereikt wordt ($m^3/jaar$).

De thermische efficiëntie van een OBES-bron (η_{OBES}) wordt gedefinieerd als de ratio tussen onttrokken en geïnfiltreerde hoeveelheid energie ($E_{in/uit}$) per bron:

$$\eta_{OBES} = \frac{E_{uit}}{E_{in}} = \frac{\int \Delta T Q_{uit} dt}{\int \Delta T Q_{in} dt} = \frac{\Delta \bar{T}_{uit} V_{uit}}{\Delta \bar{T}_{in} V_{in}} \quad (7)$$

De efficiëntie van de OBES hangt dus af van de infiltratie- en onttrekkingstemperaturen $\Delta T_{in/uit}$ (K) in combinatie met opgeslagen en teruggewonnen volume grondwater $V_{in/uit}$ (m^3). Waarbij Q (m^3/u) het brondebiet is gedurende tijdstap t en $\Delta \bar{T}$ (K) het gewogen gemiddelde temperatuurverschil over de opslagcyclus. De infiltratietemperaturen zijn

constant en vanwege de te realiseren thermische balans kan er dus vanuit worden gegaan dat het opgeslagen volume ook wordt onttrokken ($V_{in} = V_{uit}$). In dat geval bepaalt de onttrekkingstemperatuur dus de terugwinefficiëntie.

2.3 Generieke simulaties

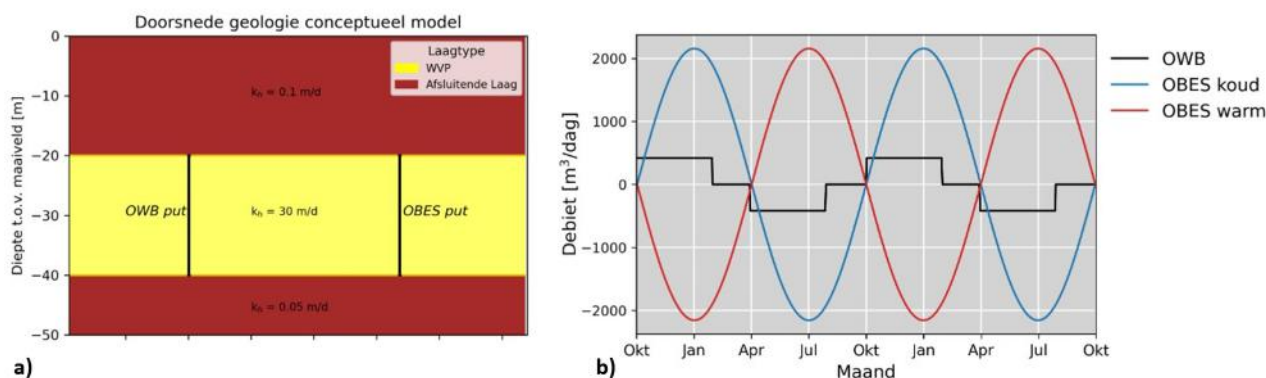
2.3.1 Opzet generieke simulaties

De geohydrologische lagenopbouw die gebruikt wordt voor het conceptuele grondwatermodel is weergegeven in Figuur 2-3a. Deze opbouw is gebaseerd op de ondergrond van het Westland en het Oostland zoals gekarakteriseerd in de ondergrondmodellen REGIS II v2.2 (Vernes & van Doorn, 2005) en GeoTOP v1.4 (Stafleu et al., 2013), en verschillende voorgaande studies in en nabij de genoemde kassengebieden (van Doorn et al., 2013; Zuurbier et al., 2017; Zuurbier & Paalman, 2014; Zuurbier & Stuyfzand, 2017; Zuurbier & Van Dooren, 2019). In deze gebieden bestaat de ondergrond uit een deklaag en een eerste watervoerend pakket die beide 20 meter dik zijn, met daar onder een scheidende laag van 10 meter dik. De overige geohydrologische eigenschappen van het conceptuele model zijn samengevat in Tabel 2-2. Achtergrondstroming wordt bij de generieke simulaties buiten beschouwing gelaten, om de effecten van onderlinge interactie tussen beide systeemtypen duidelijker in beeld te krijgen.

Met het conceptuele model wordt de onderlinge interactie tussen twee bronnen onderzocht: één OWB-bron en één (warme óf koude) OBES-bron. Beide bronnen hebben een volkomen filter over de gehele diepte van het watervoerende pakket (Figuur 2-3a). De afstand tussen de beide bronnen (X) wordt gevarieerd volgens a in vergelijking (3). Hierbij wordt de afstand gevarieerd tussen $X = 1 \Sigma R_h$ en $X = 9 \Sigma R_h$. Als referentiesituatie wordt ook een simulatie met alleen een OWB-systeem gesimuleerd voor elk scenario (Paragraaf 2.3.2).

Voor het simuleren van de OWB-bron wordt uitgegaan van een zogenaamd 'blokschema' (Figuur 2-3b), dat bestaat uit een infiltratieperiode en een onttrekkingsperiode met constante debieten, en twee tussenliggende rustperiodes. Op basis van eerdere studies van OWB-systemen in Nederland (Ros & Zuurbier, 2017; Zuurbier et al., 2013, 2015; Zuurbier & Stuyfzand, 2017) wordt gebruik gemaakt van een infiltratieperiode van 120 dagen, startend op 1 oktober, gevolgd door een rustperiode van 60 dagen, een onttrekkingsperiode van (maximaal) 120 dagen en een rustperiode van (minimaal) 65 dagen. De onttrekkingsperiode kan korter dan 120 dagen uitvallen wanneer de onttrokken chlorideconcentratie tijdens deze periode boven de afkapconcentratie uitstijgt. In dat geval wordt de onttrekking stopgezet en zal de laatste rustperiode dus verlengd worden tot aan het begin van de daaropvolgende infiltratieperiode. De OWB-bron infiltreert zoetwater met een chlorideconcentratie van 5 mg/l, vergelijkbaar met de waarden bij OWB-systemen in het Westland en Nootdorp (Zuurbier et al., 2017).

Het debiet van de OBES-bron wordt over het jaar verdeeld volgens een sinusaal verloop (Figuur 2-3b). De koude bron infiltreert hierbij water van 6 °C en de warme bron van 18 °C in het watervoerende pakket met een achtergrondtemperatuur van 12 °C (Tabel 2-2). De koude bron van het OBES-systeem is in fase met de OWB-bron; beide systemen infiltreren tegelijkertijd en onttrekken tegelijkertijd. De warme bron is juist in tegenfase met de OWB-bron.



Figuur 2-3 a): Schematische weergave van de geohydrologie gebruikt voor de generiek simulaties. b): Verdeling van de infiltratie- en onttrekkingsdebieten over het jaar voor de beide typen systemen. De weergegeven debieten zijn voor het de scenario's 'Basis Warm' en 'Basis Koud' (Paragraaf 2.3.2).

De focus van het onderzoek ligt op de invloed van het introduceren van een OBES op de terugwinefficiëntie van een bestaande OWB, op basis van het volgende:

- De aanleiding van het onderzoek: De huidige praktijk is dat watervoerende pakketten gereserveerd worden voor zoetwatervoorziening, en niet zozeer voor bodemenergie. De meest relevante onderzoeksvraag is dus of het mogelijk is om OBES ruimte te geven binnen deze gereserveerde watervoerende pakketten.
- De verwachte effecten: De aanname is dat het effect van een OWB op de terugwinefficiëntie van een OBES kleiner is dan vice versa. Dit zou betekenen dat indien een OBES geen negatief effect heeft op de terugwinefficiëntie van een OWB, een OWB ook geen negatief effect heeft op de terugwinefficiëntie van een OBES. Aan deze aanname liggen de volgende argumenten ten grondslag:
 - Open bodemenergiesystemen hebben over het algemeen een groter opslagvolume dan OWB-systemen. Ze hebben daardoor een groter invloedgebied en meer invloed op het opslagvolume van het OWB-systeem dan andersom.
 - Warmte en koude wordt deels opgeslagen in de korrelmatrix van het watervoerend pakket, waardoor het in een relatief compact volume op wordt geslagen ten opzichte van het invloedgebied ($R_{th} \approx 2/3 R_h$). Hierdoor is er bij een OBES relatief naar het volume water dat verpompt wordt sprake van een compacter gebied dat van belang is voor beïnvloeding door een nabijgelegen systeem, waardoor het minder kwetsbaar hiervoor is.
 - Bij OWB-systemen levert een kleine hoeveelheid vermenging van het geïnfiltreerde water met het grondwater al een te lage waterkwaliteit op om het te kunnen gebruiken als gietwater of drinkwater. Bij bodemenergiesystemen is deze marge veel groter. Dit blijkt ook uit de manier waarop de terugwinefficiënties van beide systemen berekend worden (Paragraaf 2.2.2).

Ten eerste omdat het eerste watervoerende pakket in sommige gebieden (zoals het Westland) nu gereserveerd is voor OWB (en brakwaterwinning), en OBES-systemen hier dus nieuw in zouden zijn. Ten tweede omdat OBES-systemen over het algemeen aanzienlijk groter zijn dan OWB-systemen, en daardoor is de verwachting dat de invloed van OBES-systemen op OWB-systemen groter is dan vice versa. Ter verificatie is deze aanname gedurende het onderzoek getoetst (Paragraaf 3.1.3).

Tabel 2-2: Geohydrologische parameters gebruikt voor de gebruikt voor de generieke simulaties. K_h/K_v = horizontale/verticale doorlatendheid, T_a = achtergrondtemperatuur van de laag, n = porositeit.

Laag	Dikte (m)	K_h (m/d)	K_v (m/d)	T_a (°C)	n (-)
Deklaag	20	0,1*	0,01	12	0,3
WVP1	20	30	30	12	0,3
Scheidende laag	10	0,05*	0,01	12	0,3

2.3.2 Scenario's

Om een goed beeld te krijgen van de invloed van een OBES op een OWB worden verschillende scenario's doorgerekend. De verschillende scenario's zijn samengevat in Tabel 2-3. Onderstaand worden de afwegingen die zijn gemaakt en de achtergrondinformatie die is gebruikt bij het samenstellen van de verschillende scenario's verder toegelicht.

- Opslagvolumes
 - De range aan opslagvolumes van de OWB-bron zijn bepaald op basis van de waarden gevonden in de literatuur en uit praktijkervaring in het veld.
 - De range aan opslagvolumes van de OBES-bron zijn gebaseerd op de verzamelde data door Bloemendal & Hartog (2018).
 - OBES systemen zijn, afhankelijk van het scenario, gesimuleerd alsof één warme of één koude bron, ook als er bij de gehanteerde volumes in de praktijk meerdere relatief dicht bij elkaar geplaatste bronnen nodig zouden zijn.
 - De scenario's 'OWB groot + OBES klein' en 'OWB klein + OBES groot' zijn ingestoken met uiterste opslagvolumes van beide systemen om de invloed van de volumes van beide systemen op de terugwinefficiëntie goed te kunnen duiden.
- Zoutgehalten (chlorideconcentraties)
 - Bij zoete condities in de ondergrond wordt uitgegaan van een achtergrondconcentratie van 200 mg/l chloride, wat zeer licht brak is. Deze achtergrondconcentratie is vergelijkbaar met die in het eerste watervoerende pakket in het Oostland (van Doorn et al., 2013). Als afkapconcentratie wordt een chlorideconcentratie van 20 mg/l gehanteerd, gebaseerd op de gehanteerde afkapconcentratie van 18 mg/l bij de ASR pilot in Nootdorp (Zuurbier et al., 2014).
 - Bij brakke condities in de ondergrond wordt uitgegaan van een achtergrondconcentratie van 5.000 mg/l chloride. Deze waarde is ongeveer de bovenwaarde die wordt aangetroffen in het Westland (van Doorn et al., 2013; Zuurbier & Stuyfzand, 2017). De injectie- en afkapconcentratie zijn hier hetzelfde dan in de simulaties onder zoete condities, respectievelijk 5 en 20 mg/l.
- Dichtheidsstroming
 - In het 'Ideale MPPW'-scenario wordt ervan uitgegaan dat alle verliezen door dichtheidsstroming bij de infiltratie van zoet water in een brakke/zoute aquifer volledig gecompenseerd kunnen worden door gebruik van 'Multiple Partially Penetrating Wells' (MPPW) voor de OWB. Bij MPPW is er sprake van een bron met meerdere filters onder elkaar, die onafhankelijk worden aangestuurd. Volledige compensatie is niet realistisch en daarom kunnen de hiervoor gemodelleerde zoet-in-brak scenario's met zonder dichtheidsstroming als 'best-case' beschouwd worden.
 - In het 'Worst-case' scenario is juist het tegenovergestelde het geval; over de gehele lengte van de bron wordt evenveel geïnfilterd, waardoor dichtheidsstroming hier een sterk effect heeft. In dit scenario is dichtheidsstroming dan ook meegenomen in de modellering. Om de dichtheidsstroming goed te simuleren, is er in 'Worst-case' scenario gebruik gemaakt van een verticale celgrootte van 2 m. Voor alle andere scenario's is dit 5 m.
 - In alle andere scenario's onder zoete condities wordt dichtheidsstroming niet meegenomen, omdat de concentratieverschillen en daardoor de dichtheidsverschillen tussen het natuurlijke grondwater en het geïnfilterde water te klein zijn om voor sterke opdrijving te zorgen. Voor de OBES-bronnen geldt dat de temperatuurverschillen klein genoeg zijn om ook niet tot significante dichtheidsstroming te leiden. Dit wordt pas het geval bij temperatuurverschillen van meer dan 25°C (Ma & Zheng, 2010).
- Inwerkperiode ASR
 - Om de invloed van een OBES op een OWB goed te kunnen beschouwen, wordt uitgegaan van een al bestaande OWB-bron die stabiel functioneert. Daarom wordt eerst de OWB-bron voor een aantal jaren gesimuleerd, totdat de terugwinefficiëntie van de OWB-bron min of meer stabiel is. Vervolgens wordt de

OBES ingeschakeld en wordt er nog 7 jaar gesimuleerd om het effect van de OBES op de terugwinefficiëntie van het OWB-systeem in beeld te brengen. Het aantal jaar dat het OWB-nodig heeft om tot een stabiele terugwinefficiëntie te komen is afhankelijk van de lokale condities.

- In alle gevallen is de terugwinefficiëntie van de OWB stabiel na 8 jaar, behalve in het ‘Worst-case’ scenario, waar het 11 jaar duurt. De OBES-bron is hier dus in jaar 12, in plaats van jaar 9 aangezet en in totaal zijn voor dit scenario dus 18 in plaats van 15 jaar gesimuleerd.

Tabel 2-3: Opzet van de verschillende scenario's voor de generieke simulaties

Scenario	OBES-bron	Ondergrond	Dichtheidsstroming in model	Injectievolume OWB (m ³ /jaar)	Injectievolume OBES (m ³ /seizoen)
Basis Warm	Warm	Zoet	Nee	50.000	250.000
Basis Koud	Koud			250.000	50.000
OWB Groot + OBES Klein		10.000	1.000.000		
OWB Klein + OBES Groot		50.000	250.000		
Ideale MPPW		Brak			
Worst-Case			Ja		

2.4 Casestudy's

De uit de generieke simulaties afgeleide afstandsregels worden getest aan de hand van 2 casestudy's. De selectie van de cases Westland en Aalsmeer wordt toegelicht in Bijlage II. De locatie van de twee casestudy's wordt weergegeven in Figuur 2-4. De verdere uitwerking van de twee casussen wordt in de volgende paragrafen besproken.

2.4.1 Westland (Prominent)

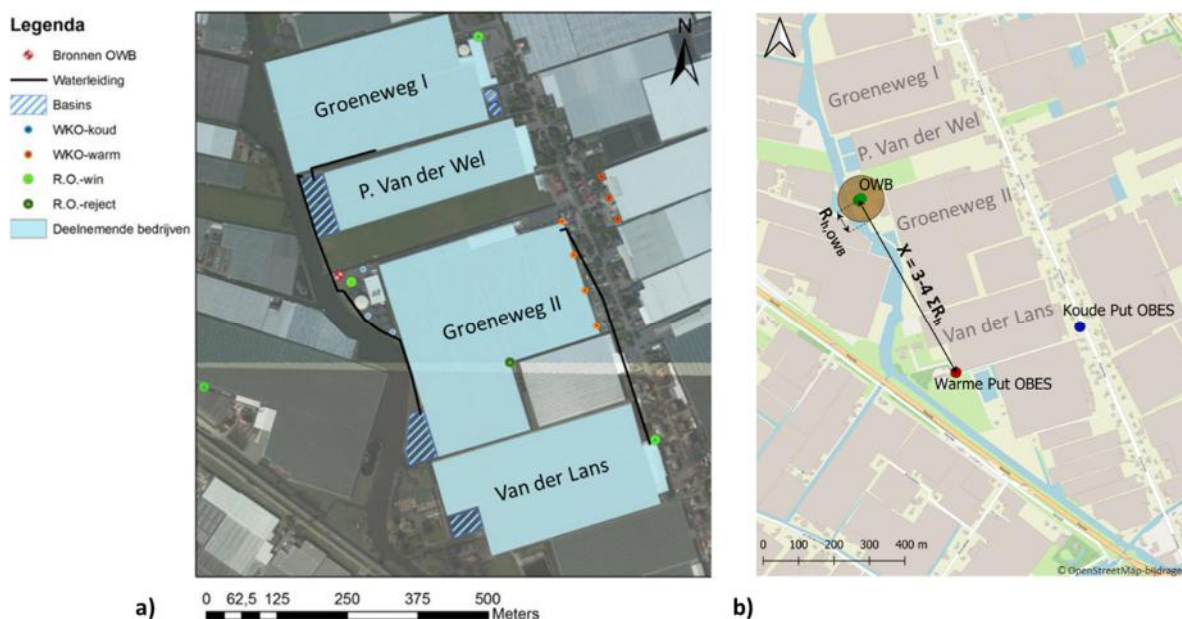
De casus in het Westland wordt uitgevoerd voor de locatie van een bestaand OWB-systeem aan de Groeneweg in 's Gravezande (Figuur 2-4). Hier wordt regenwater dat valt op vier kassencomplexen verzameld en geïnfiltreerd in een OWB-systeem. Voor de opzet van dit OWB-systeem is een uitgebreide studie uitgevoerd door Zuurbier & Paalman (2014). Later is er ter verbetering van de OWB ook nog een 'Freshkeeper' toegevoegd, waaruit brakwater werd gewonnen en omgezet naar gietwater (Figuur 2-5a). De reststroom (het brijn) hiervan wordt geïnfiltreerd in het tweede watervoerende pakket (Zuurbier et al., 2017).

Daarnaast is er ook nog een niet meer actief OBES-systeem aanwezig in het tweede watervoerende pakket (Figuur 2-5a). Dit systeem bestond uit vier doubletten met een totaal vergund verpompt volume van 1.200.000 m³/jaar. Zowel de brakwaterwinning als het OBES-systeem in het tweede watervoerende pakket worden verder niet meegenomen in deze studie.

De geohydrologische schematisatie wordt overgenomen uit eerdere studies en modelleringen die op deze locatie zijn gedaan door Zuurbier et al. (2017) en is samengevat in Tabel 2-4. In zowel de deklaag als de scheidende laag onder WVP1 zitten meer zandige lagen die ook zijn meegenomen in de modellering. Een meer precieze weergave van de geohydrologie is gegeven in Bijlage I. Omdat de geohydrologische schematisatie van de generieke simulaties deels gebaseerd is op de geohydrologie in het Westland, is de geohydrologische situatie van deze casestudy vergelijkbaar (Tabel 2-2). Het eerste watervoerende pakket op deze locatie is behoorlijk brak (3 – 4,8 g/l), daarom wordt het effect van dichtheidsstroming meegenomen in de simulaties.



Figuur 2-4: Locaties van de casestudy's in het Westland en Aalsmeer.



Figuur 2-5 a): Overzicht van de kassen, het OWB-systeem en de overige bronnen in het studiegebied voor case-study Aalsmeer (uit Paalman & Zuurbier, 2014). b): Locatie van de bronnen van de gemodelleerde OWB- en OBES-systemen en de afstandparameters die gebruikt zijn om het verpompte volume van de OBES-bronnen te berekenen.

Het op de locatie aanwezige OWB-systeem bestaat uit twee MPPW's, elk bestaande uit 3 filters, van -24 tot -27 m-mv, van -28 tot -31 m -mv en van -32 tot -37 m -mv. De twee MPPW's staan ongeveer 10 meter uit elkaar, waardoor het geïnfilterde zoete water in beide bronnen een gezamenlijke zoetwaterbel vormt.

Het OWB-systeem wordt op eenzelfde wijze gesimuleerd als in een eerdere studie van dit systeem van Zuurbier & Stuyfzand (2017). In de modelsimulaties wordt gebruik gemaakt van een totaal jaarlijks infiltratiedebiet van 60.000

m³/jaar, verdeelt over 120 dagen, gevolgd door een rustperiode van 30 dagen, een onttrekkingsperiode van (maximaal) 120 dagen en nog een rustperiode van (minimaal) 95 dagen. De injectieconcentratie is mg/l Cl (Zuurbier et al., 2017) en de afkapconcentratie is 50 mg/l Cl (Zuurbier & Stuyfzand, 2017).

Om de 2 MPPW's nauwkeurig te simuleren, wordt er gebruik gemaakt van een verticale resolutie van 1 meter binnen het model. Elk van de zes filters worden onafhankelijk gemodelleerd; na elke tijdstap wordt bepaald of de afkapconcentratie in een van de filters werd overschreden en wordt het betreffende filter stopgezet als dit het geval is. Tussen, en boven en onder, de filters in beide MPPW's worden ondoorlatende kleipropen toegevoegd die in de werkelijkheid ook gebruikt worden om stroming tussen de filters in het boorgat te voorkomen.

Bij de casestudy's wordt, in tegenstelling tot de generieke simulaties, zowel de koude als de warme bron van het OBES-systeem gesimuleerd. De locaties van beide bronnen zijn handmatig geselecteerd, aangezien er in de werkelijkheid geen OBES-systeem in WVP1 aanwezig is op deze locatie. Hierbij is er gezocht naar twee locaties binnen het terrein van de vier kassen met een maximale afstand naar de OWB-bronnen. Randvoorwaarden hierbij is dat de bronnen van het doublet onderling voldoende ver uit elkaar staan (minstens 3 R_h in elk scenario) en dat de boorlocatie praktisch haalbaar is (buiten en bereikbaar voor een boorwagen). Op basis van deze selectiecriteria worden de bronnen geplaatst op de locaties weergegeven in Figuur 2-5b.

Om de rekenregels voortkomend uit de generieke simulaties te testen wordt het verpompte debiet van de OBES-bronnen bepaald aan de hand van deze rekenregels. Uitgangspunt hierbij zijn de afstand tussen de OWB-bronnen en de meest nabije OBES-bron, in dit geval de warme bron (Figuur 2-5b), en de vooraf bekende hydraulische straal van het OWB-systeem op basis van het opslagvolume van 60.000 m³/jaar, gelijk aan 65 m volgend uit vergelijking (1). Hierbij wordt voor het berekenen van de hydraulische straal uitgegaan van de dikte van het watervoerende pakket van 15 meter (Tabel 2-4), aangezien de MPPW's de gehele diepte van het watervoerende pakket bestrijken.

Gegeven de straal van het OWB systeem ($R_{h,OWB}$) en de afstand tussen de OWB en de warme bron van het OBES (X), en uitgaande van een volkomen filter voor de OBES-bron, wordt het opslagvolume berekend door het omschrijven van vergelijkingen (1), (2) en (3):

$$V_{OBES} = \left(\frac{X}{a} - R_{h,OWB}\right)^2 * n\pi L \quad (7)$$

Op basis van de resultaten van de generieke simulaties onder brakke condities (Paragraaf 3.1) worden er twee scenario's voor deze case-study gedraaid, één met het berekende OBES-opslagvolume (V_{OBES}) voor $a = 3$ en één voor $a = 4$. Dit opslagvolume wordt toegepast op beide bronnen van het OBES. De doorgerekende scenario's zijn samengevat in Tabel 2-5. Hierbij wordt, om een gevoel te krijgen voor gangbare opslagvolumes voor OBES-systemen, ook de verhouding tussen V_{OBES} in beide scenario's en het vergunde opslagvolume van het voormalige OBES-systeem in het studiegebied weergegeven.

Tabel 2-4: Geohydrologische schematisatie van de casestudy in het Westland. Een meer gedetailleerde omschrijving van de verschillende modellagen is weergegeven in Bijlage I.

Laag	Top-Bot (m-mv)	K _h (m/d)	K _v (m/d)	n (-)	C ₀ (g/l)	T _a (°C)
Deklaag	0 – 5	0,2 – 1	1E-3 – 1	0,2 – 0,3	2,1 – 3,0	12
WVP1	22 – 37	35 – 100	35 – 100	0,3	3,0 – 4,8	12
Scheidende laag 1	37 – 48	5E-2 – 10	5E-3 – 10	0,2 – 0,3	3,3 – 6,0	12

Tabel 2-5: Belangrijkste variabelen voor de doorgekende scenario's voor de casestudy in het Westland.

a (= $X/\Sigma R_h$)	X (m)	$R_{h,OWB}$ (m)	$R_{h,OBES}$ (m)	V_{OBES} (m ³ /jaar)	Volume t.o.v. vergunde OBES (%)
3	560	65	122	209.300	35
4	560	65	75	79.500	13

2.4.2 Aalsmeer (Kudelstaart)

De casus onder zoete condities in de ondergrond wordt uitgevoerd aan de hand van een locatie in het glastuinbouwgebied rondom Aalsmeer. Uit de data die in de gebied beschikbaar is, blijkt dat de OWB-systemen in dit gebied over het algemeen een stuk kleiner zijn dan in het Westland (ca. 10.000 – 16.000 m³/jaar). Voor de casestudy wordt gekozen voor een kassencomplex nabij Kudelstaart, waar gebruik gemaakt wordt van een OWB-systeem in het eerste watervoerende pakket voor de gietwatervoorziening Figuur 2-6. Bij een nabijgelegen kassencomplex is een OBES-systeem aanwezig in een dieper watervoerend pakket (met een totaal vergund debiet van 1.485.000 m³/jaar), wat duidt op een vraag naar zowel warmte en koude als zoetwateropslag in dit gebied en de casus Aalsmeer dus een passende keuze maakt.

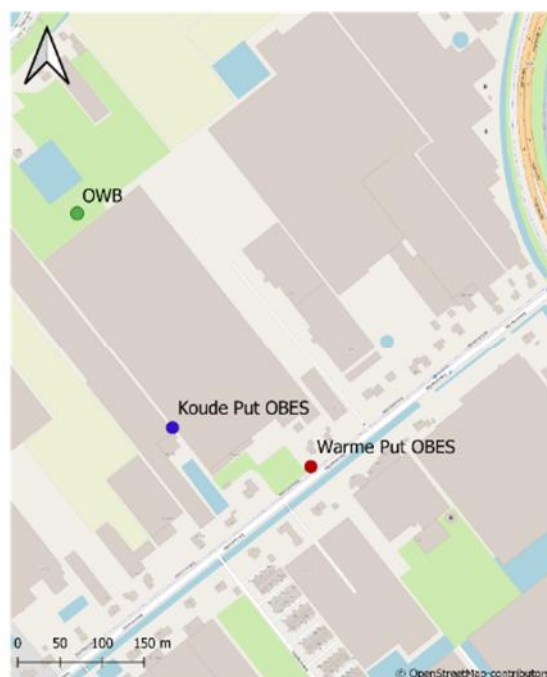
De geohydrologische schematisatie van dit gebied is gebaseerd op basis van REGIS II (Vernes & van Doorn, 2005) en wordt gegeven in Tabel 2-6. In vergelijking met het Westland en de generieke simulaties is het eerste watervoerende pakket een stuk dikker. Echter worden de OWB-systemen in dit gebied in de praktijk veelal alleen in de bovenste helft van het watervoerend pakket aangelegd. Daarom wordt de onderste scheidende laag uit het model weggelaten (met een no-flow boundary onderin het model). De natuurlijke chlorideconcentratie van het grondwater is gebaseerd op de grondwatermonsters beschikbaar in DINOLoket.

Voor het OWB-systeem wordt, op basis van de boorstaat van de betreffende bron, uitgegaan van één MPPW bestaande uit 4 bronnen (11 – 15 m -mv, 16 – 22 m -mv, 23 – 28 m -mv en 29 – 32 m -mv). Het jaarlijks opgeslagen volume bedraagt 16.000 m³. De chlorideconcentratie van het geïnfilterde water en de afkapconcentratie bedragen respectievelijk 5 mg/l en 20 mg/l.

De OBES-bronnen worden volgens eenzelfde procedure geplaatst als bij de casestudy in het Westland (Paragraaf 3.2.1). In dit geval ligt de koude bron echter dichterbij de OWB-bron dan de warme bron Figuur 2-6. In tegenstelling tot de OWB-bron, worden de OBES-bronnen wel over de gehele diepte van het watervoerende pakket geplaatst. De infiltratietemperatuur bij de koude bron is 7 °C, bij de warme bron 11 °C.

Tabel 2-6: Geohydrologische schematisatie van de casestudy in het kassengebied bij Aalsmeer.

Laag	Top-Bot (m-mv)	K_h (m/d)	K_v (m/d)	n (-)	C_0 (g/l)	T_a (°C)
Deklaag	0 – 10	1	0,01	0,3	0,125	11
WVP1	10 – 13	3,75	3,75	0,3	0,125	11
	13 – 28	37,5	37,5	0,3	0,125	11
	28 – 36	75	75	0,3	0,125	11
	36 – 52	7,5	7,5	0,3	0,125	11



Figuur 2-6: Overzicht van het gebied van de casestudy Aalsmeer en de putlocaties.

Het opslagvolume van de OBES-bronnen wordt ook hier bepaald aan de hand van vergelijking (7). Hierbij wordt de filterlengte (L) van OBES-systeem gelijk gesteld aan de dikte van het watervoerende pakket (Tabel 2-6), terwijl voor de filterlengte van het OWB-systeem 23 meter genomen werd, op basis van de lengte van het systeem in de boorbeschrijving inclusief kleipropen. Voor de casus Aalsmeer worden scenario's doorgerekend met OBES-volumes berekend op basis van waarden van a van 1,5, 2, 3 en 4. De verschillende scenario's zijn samengevat in Tabel 2-7. Daarnaast wordt het scenario met $a = 2$ nogmaals doorgerekend waarbij de warme en koude bron van locatie verwisseld zijn.

De opzet van de modelsimulatie is verder gelijk aan die van de casestudy in het Westland, behalve dat dichtheidsstroming door de kleine dichtheidsverschillen door de relatieve zoutgehalten in het grondwater niet meegenomen wordt in het model.

Tabel 2-7: Kerngetallen van de doorgerekende scenario's voor de casestudy in het Westland en relatieve hoeveelheden t.o.v. het vergunde debiet in de naastgelegen OBES in WVP2.

a (= $X/\Sigma R_h$)	X (m)	$R_{h,OWB}$ (m)	$R_{h,OBES}$ (m)	V_{OBES} (m ³ /jaar)	Volume t.o.v. vergunde OBES (%)
1,5	279	27	159	999.500	134
2	279	27	112	499.900	67
3	279	27	66	171.700	23
4	279	27	43	71.900	10

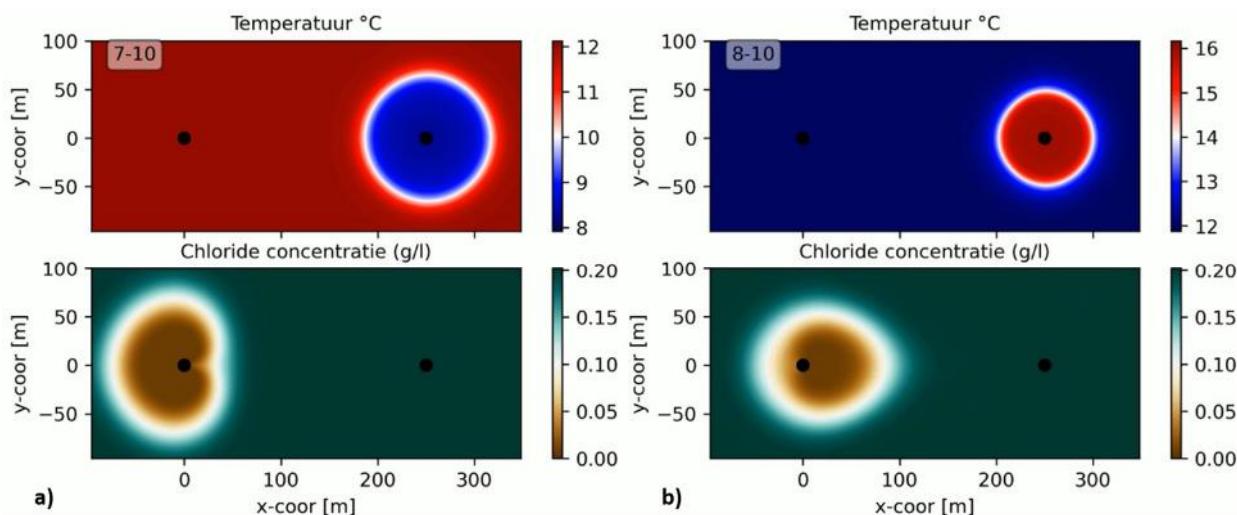
3 Resultaten

3.1 Generieke modellering

3.1.1 Interactie tussen OWB en OBES

In een homogeen pakket zonder sterke natuurlijk grondwaterstroming of beïnvloeding van andere systemen verspreidt het geïnfiltreerde water in een OWB zich horizontaal radiaal rondom de bron en wordt dit water bij onttrekking gelijkmatig weer terug naar de bron getrokken. De plaatsing van een OBES-bron in de nabijheid van de OWB-bron zorgt ervoor dat de stijghoogte rondom de OWB-bron beïnvloed wordt en de zoetwaterbel niet meer radiaal is maar vervormd wordt door de stroming die hierdoor veroorzaakt wordt (Figuur 3-1). De koude bron van een OBES is min of meer in fase met de OWB-bron (Figuur 2-3b), waardoor ze tegelijkertijd infiltreren en tegelijkertijd onttrekken. Dit zorgt ervoor dat de OBES-bron tijdens infiltratie de zoetwaterbel als het ware wegduwt van de OWB-bron (Figuur 3-1a). De warme bron van een OBES is over het algemeen juist in tegenfase van de OWB-bron, waardoor de zoetwaterbel tijdens infiltratie richting de warme OBES-bron wordt getrokken (Figuur 3-1b). In beide gevallen neemt door de grotere verplaatsing van de zoetwaterbel de dispersie toe. Door de hogere dispersie en het feit dat de opgeslagen zoete water zich niet in een perfecte cirkel rondom de bron bevindt, zal minder van het opgeslagen water teruggewonnen kunnen worden. Dit wordt echter deels gecompenseerd doordat de stroomrichting in OBES-bronnen omdraait, waardoor de zoete bel door de koude bron weer terug richting de OWB-bron wordt getrokken en door de warme bron weer terug wordt geduwd. De totale invloed zal dus minder zijn als dat er alleen sprake was geweest van onttrekking of infiltratie bij de OBES-bronnen.

Uit Figuur 3-1 blijkt dat de opgeslagen warme of koude bel minder van vorm verandert door de aanwezigheid van het OWB-systeem. Dit kan worden verklaard doordat het opgeslagen en onttrokken volume door het OWB-systeem kleiner is, waardoor het minder invloed heeft op de grondwaterstroming.



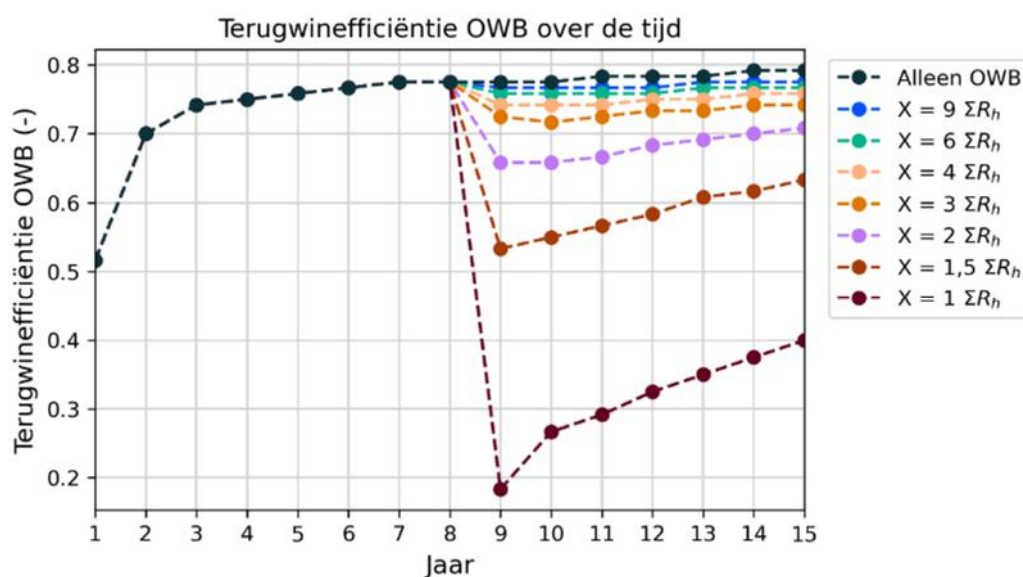
Figuur 3-1: Temperatuur en chloride concentratie in midden van WVP1 voor a): Basisscenario koud na 10 jaar en 7 maanden voor $X = 1,5 \Sigma R_n$, b): Basisscenario warm na 10 jaar en 8 maanden voor $X = 1,5 \Sigma R_n$. De specificaties van de verschillende scenario's zijn te vinden in Paragraaf 2.3.2.

3.1.2 Effect op terugwinefficiëntie OWB

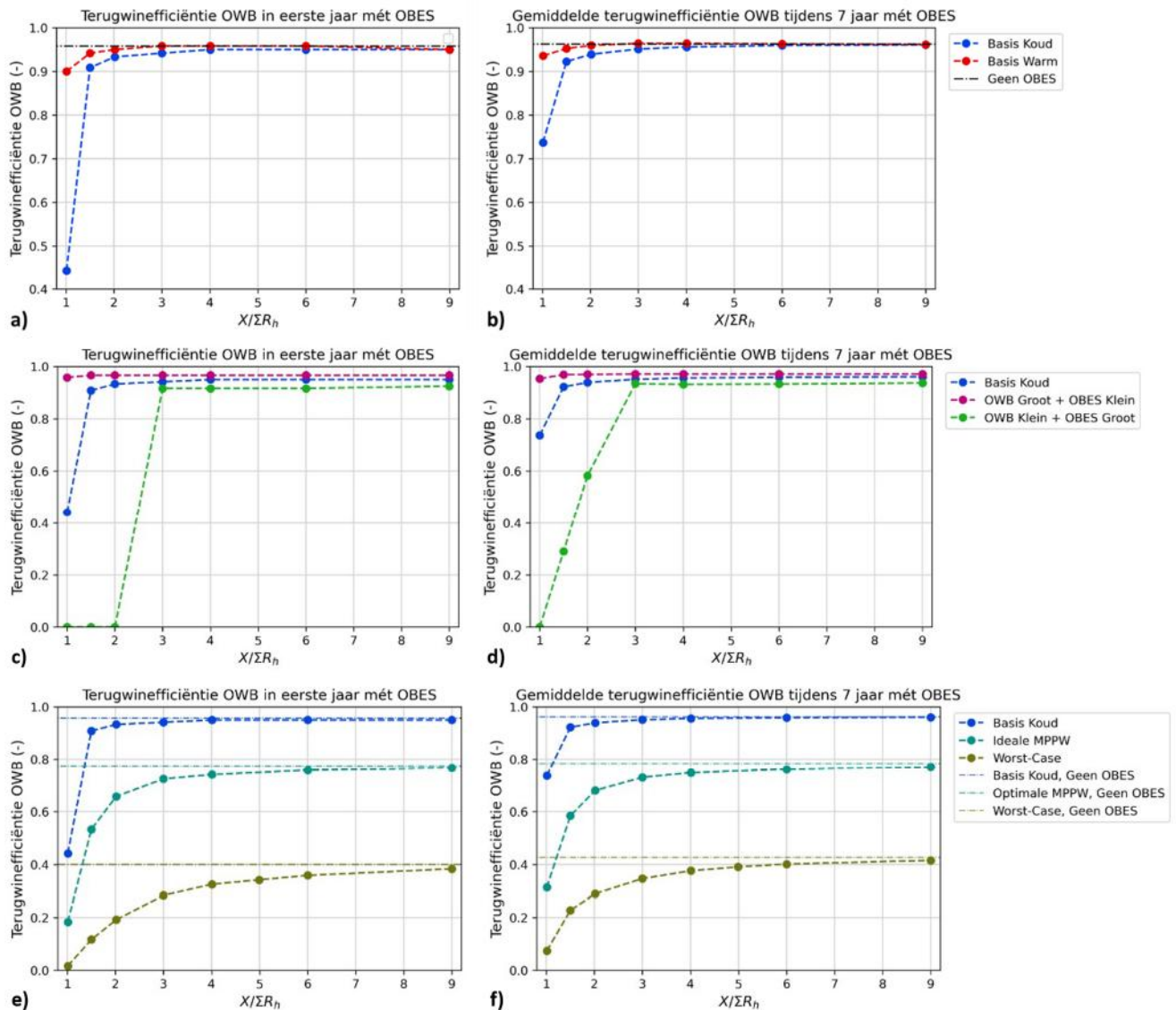
In Figuur 3-2 is de terugwinefficiëntie weergegeven voor de verschillende afstanden tussen de bronnen doorgerekend voor het scenario 'Ideale MPPW' (Tabel 2-3). In dit scenario is ΣR_h gelijk aan 167 meter. In Jaar 9 wordt hier de OBES-bron geactiveerd. In dat zelfde jaar neemt de terugwinefficiëntie van de OWB af voor alle doorgerekende afstanden tussen beide bronnen; een kleiner deel van het opgeslagen zoete water kan dus teruggewonnen worden. Dit effect is groter naarmate de bronnen dichter bij elkaar staan. Hoewel het terugwinefficiëntie in de daaropvolgende jaren weer toeneemt, blijft deze lager dan in het geval zonder aanwezige OBES-bron.

In Figuur 3-3 is het effect van de onderlinge afstand tussen beide bronnen op de terugwinefficiëntie van het OWB-systeem voor alle scenario's weergegeven. Uit de simulaties blijkt dat de terugwinefficiëntie in elk gesimuleerd scenario negatief wordt beïnvloed door de aanwezigheid van een OBES systeem in de buurt. In het eerste jaar dat de OBES-bron actief is, is dit effect over het algemeen het grootst. Dit effect lijkt sterker veroorzaakt te worden door de koude bron dan door de warme bron van het OBES-systeem (Figuur 3-3a, b). Ook blijken de volumes van beide systemen een significant effect te hebben op de terugwinefficiëntie van de OWB, waarbij kleinere OWB-systemen nabij grotere OBES-systemen sterker beïnvloedt worden (Figuur 3-3c, d). In het geval dat het natuurlijke grondwater relatief zoet is (Figuur 3-3a - d), is de maximale afname van de efficiëntie van de OWB door de aanwezigheid van de OBES-bron kleiner dan 1,7% als de bronnen $3 \Sigma R_h$ uit elkaar staan. Dit is bij een bronafstand van ca. 500-750 meter. Uitgezonderd het 'OWB Klein + OBES Groot' scenario, is de afname kleiner dan 2,5% bij een afstand van $2 \Sigma R_h$ onder zoete condities.

Onder brakke condities is het OWB-systeem kwetsbaarder (Figuur 3-3e, f). Ten eerste is de terugwinefficiëntie hier sowieso al aanzienlijk lager. Ten tweede is er meer afstand tussen beide systemen nodig om de negatieve effecten op de opslagefficiëntie van het OWB-systeem te minimaliseren. In het 'Ideale MPPW' scenario neemt de terugwinefficiëntie af met ca. 5% af op een afstand van $3 \Sigma R_h$ en ca. 3,3% bij $4 \Sigma R_h$. Deze afname blijft ongeveer constant over de tijd, zoals ook te zien is in Figuur 3-2. In het 'worst-case' scenario is de afname van de efficiëntie 11,7% en 8,1% in respectievelijk het eerste jaar met OBES en het langjarige gemiddelde bij een onderlinge afstand van $3 \Sigma R_h$ en 7,5% en 5% in het bij een onderlinge afstand van $4 \Sigma R_h$. Over het algemeen geldt dus dat minder presterende OWB-systemen ook gevoeliger zijn voor de nabije aanwezigheid van een OBES-systeem.



Figuur 3-2: Terugwinefficiënties van het OWB-systeem over de tijd voor het scenario 'Ideale MPPW'.

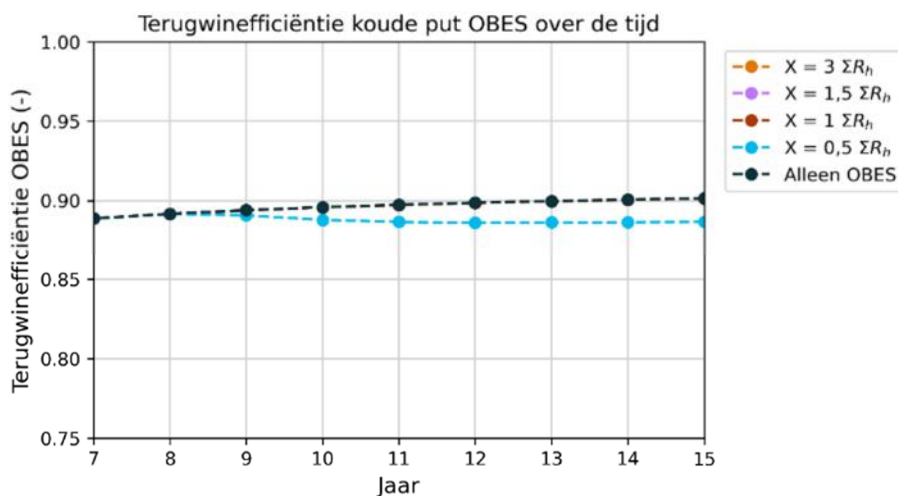


Figuur 3-3: Terugwinefficiëntie van het OWB systeem in het eerste jaar dat de OBES-put actief is (linker kolom, a-c-e) of gemiddeld over de eerste 7 jaar waarin de OBES-put actief is (rechter kolom, b-d-f) over de afstand tussen de bronnen uitgedrukt in $a = X/\Sigma R_h$. In de rijen zijn achtereenvolgend de scenario's die variëren in het type OBES-put (boven, a-b), de opslagvolumes van de systemen (midden, c-d) en het zoutgehalte van de ondergrond (onder, e-f) weergegeven.

Uit de resultaten van de generieke simulaties blijkt dat onder zoete condities een afstand tussen OBES- en OWB-bron van $2 \Sigma R_h$ in de meeste gevallen een verwaarloosbare (<2.5%) afname van de opslagefficiëntie oplevert en dat dit in elk scenario geldt bij een afstand van $3 \Sigma R_h$. Onder brakke condities is meer ruimte nodig tussen beide systemen. Een minimale afstand van $4 \Sigma R_h$ is in brakke omstandigheden nodig om de effect van de OBES op het OWB-systeem te beperken.

3.1.3 Invloed OWB op efficiëntie van OBES

De focus van dit onderzoek ligt op het onderzoeken van de effecten van een OBES op de opslagefficiëntie van een nabijgelegen OWB. Om het verwachte kleinere effect (Paragraaf 2.3.1) van een OWB op de terugwinefficiëntie van een OBES te controleren, is de terugwinefficiëntie van het OBES berekend in het 'Basis Koud' scenario (Tabel 2-3). Bij deze simulaties is het OBES-systeem al aanwezig en werd het OWB-systeem in het 10^{de} jaar geactiveerd. De resultaten van deze simulaties is weergegeven in Figuur 3-4. Hieruit blijkt dat het OWB-systeem alleen op een onderlinge afstand van $X = 0,5 \Sigma R_h$ een kleine negatieve invloed heeft op de terugwinefficiëntie van het OBES. Op de andere simulaties, met grotere onderlinge afstand, is geen effect van de plaatsing van het OWB-systeem



Figuur 3-4: Terugwinefficiëntie van de koude put van een OBES voor het scenario ‘Basis Koud’ voor verschillende relatieve afstanden naar een in jaar 9 geplaatst OWB-systeem.

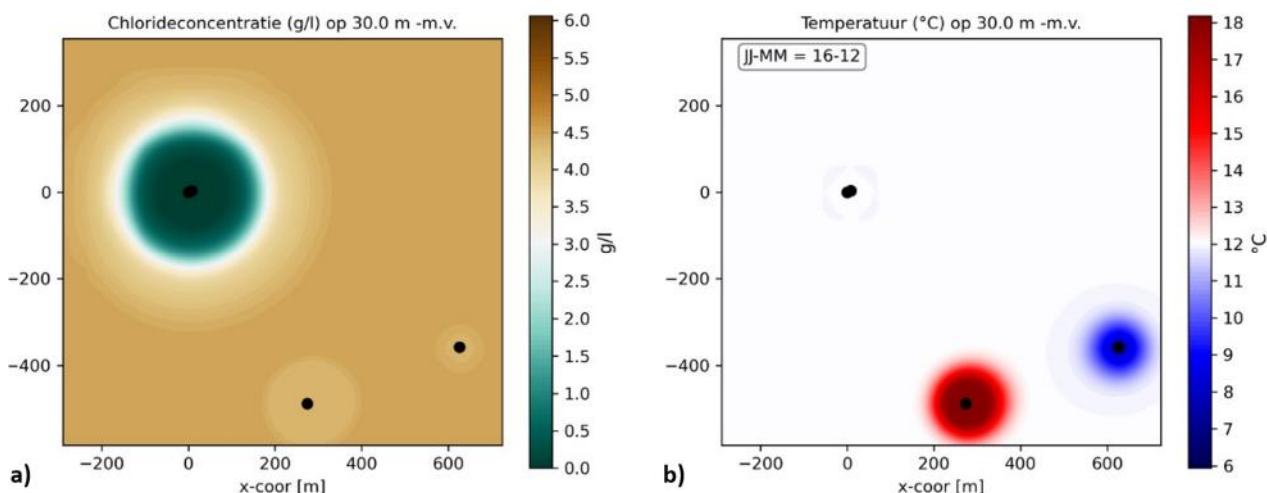
waarneembaar. Andersom was er al een klein negatief effect van de OBES op de terugwinefficiëntie van het OWB-systeem op een onderlinge afstand van 3-4 ΣR_h (Figuur 3-3a-b). Dit resultaat bevestigt dus de aanname dat het effect van OBES op de terugwinefficiëntie van een OWB significant groter is dan andersom.

3.2 Casestudy’s

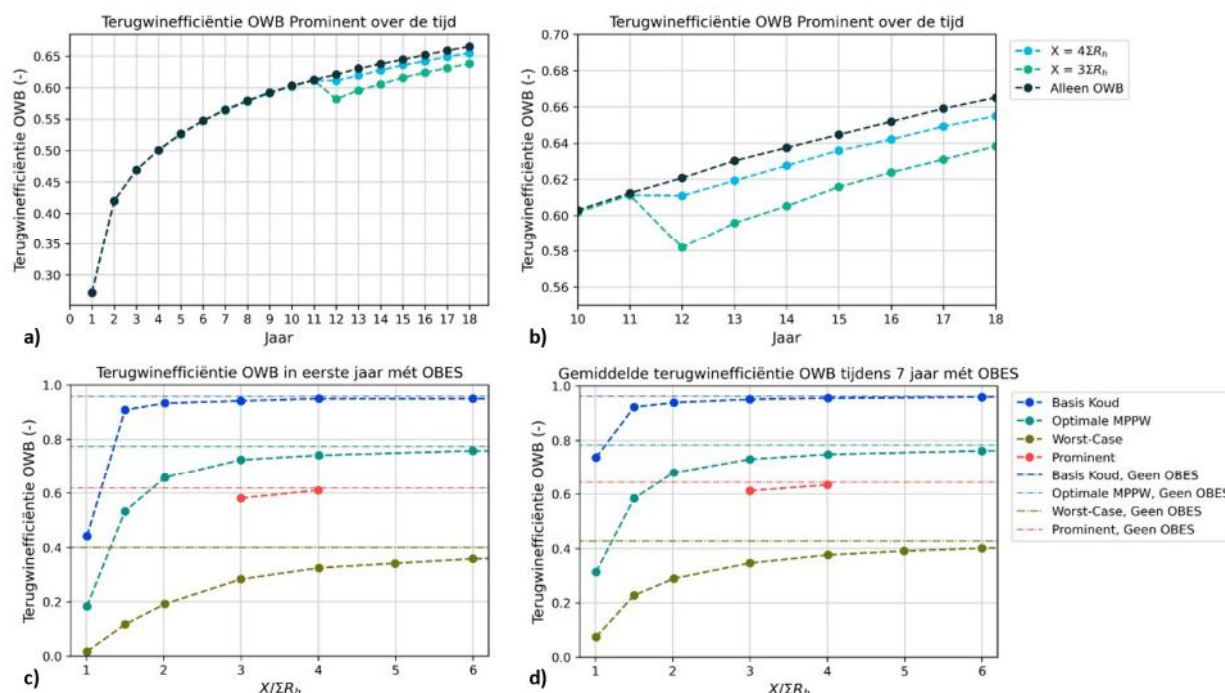
Het doel van de twee casestudy’s is om te testen of de afstandsregels, zoals deze zijn afgeleid uit de generieke simulaties in Paragraaf 3.1, vergelijkbare resultaten geven als in de generieke simulaties.

3.2.1 Westland (Prominent)

De casus in het Westland bij het kassencomplex Prominent dient om de afstandsregels condities met brak/zout grondwater te testen, waarbij dichtheidsstroming een belangrijke rol speelt. Uit de generieke simulaties blijkt immers dat een afstand van minstens 4 ΣR_h nodig is om de negatieve impact van het OBES op de OWB te beperken. Om deze noodzaak te testen in een casestudy gebaseerd op een werkelijk OBES-systeem, zijn de scenario’s doorgerekend waarbij het volume van de OBES zo gekozen werd dat de afstand tussen de warme bron en het OWB-systeem gelijk



Figuur 3-5 a): Chlorideconcentratie en b): temperatuur aan het einde van jaar 16 op een diepte van 30 m -m.v. voor het scenario waarbij de warme put van het OBES en het OWB-systeem $X = 3 \Sigma R_h$ uit elkaar staan voor de casestudy in het Westland.



Figuur 3-6 a): Terugwinefficiëntie van het gesimuleerde OWB-systeem over de tijd voor de 3 doorgerekende scenario's. Een ingezoomd beeld vanaf jaar 10 is weergegeven in b). c): Terugwinefficiëntie in het eerste jaar mét OBES van de casestudy in het Westland in vergelijking de generieke simulaties zoals gedefinieerd in Tabel 2.3 en d): Gemiddelde terugwinefficiëntie gemiddeld over de eerste 7 jaar mét OBES voor de casestudy in het Westland in vergelijking met de generieke simulaties zoals gedefinieerd in Tabel 2.3.

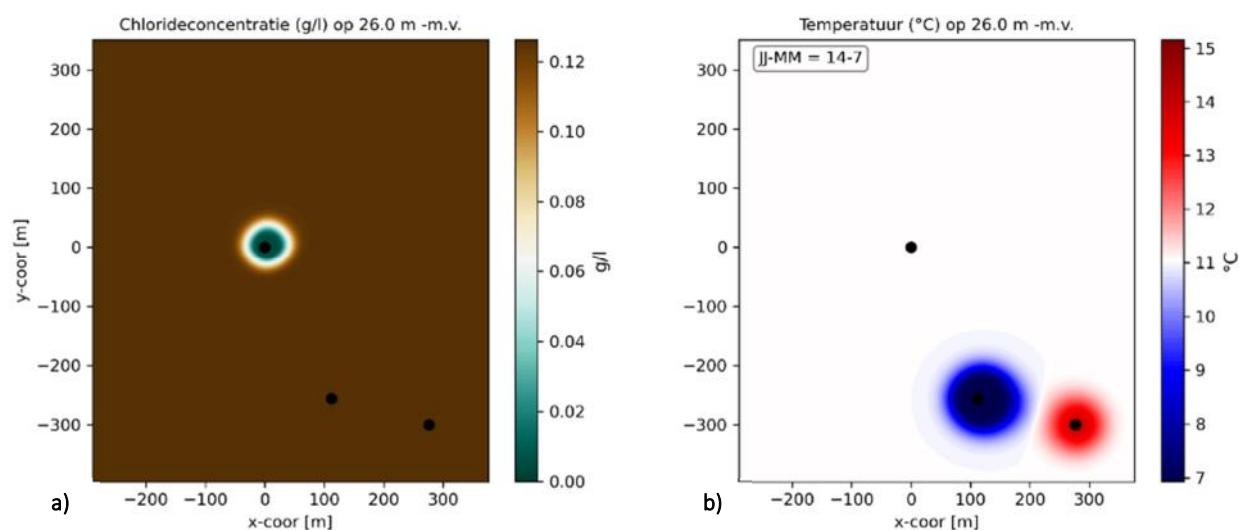
is aan $X = 3 \Sigma R_h$ en $X = 4 \Sigma R_h$. Ter vergelijking: het vergunde volume van het voormalige OBES-systeem aanwezig in het tweede watervoerende pakket zou leiden tot een relatieve afstand van $X = 2,1 \Sigma R_h$.

In de casestudy Westland staat de warme bron van het OBES het dichtstbij het OWB-systeem (Figuur 3-5), waardoor deze leidend is voor het bepalen van de verpompte volumes door de OBES-bronnen. De koude bron ligt in dit scenario ten opzichte van het OWB-systeem niet achter maar naast de warme bron, in tegenstelling tot in de generieke simulaties. In deze situatie is er sprake van gedeeltelijke uitdemping van de stijghoogteverschillen die ontstaat door de tegengestelde pomprichting van beide OBES-bronnen.

In Figuur 3-6a & b is de berekende terugwinefficiëntie van het OWB-systeem weergegeven voor de twee doorgerekende scenario's en het scenario zonder dat er een OBES in het eerste watervoerende pakket wordt geplaatst. Voor beide doorgerekende scenario's zorgt de activatie van het OBES voor een afname van de terugwinefficiëntie. Voor het scenario $X = 3 \Sigma R_h$ is de afname in het eerste jaar mét OBES ca. 4% en loopt dit terug naar 2,7% in jaar 18. Voor het scenario $X = 4 \Sigma R_h$ is dit ca. 1% gedurende de gehele 7 jaar waarin er mét OBES gesimuleerd is. De afname komt dus goed overeen met de generieke simulaties onder brakke condities (Figuur 3-6c & d). De absolute waarde van de terugwinefficiëntie ligt volgens verwachting in alle drie de simulaties tussen de waarden van de generieke simulaties met een ideale MPPW ('best-case') en zonder MPPW ('worst-case') in.

3.2.2 Aalsmeer

De casus Aalsmeer dient als voorbeeld voor condities met zoet grondwater. Belangrijkste verschillen ten opzichte van de generieke simulaties in deze casus zijn het dikkere eerste watervoerende pakket en het feit dat de OWB-bron niet over de gehele lengte van dit watervoerende pakket is geplaatst, wat wel het geval is voor de OBES-bronnen. In tegenstelling tot de casestudy in het Westland (Prominent), staat in dit geval de koude bron het dichtst bij het OWB-systeem (Figuur 3-7). In de verschillende scenario's is het verpompte volume van de OBES-bronnen zo gekozen dat de afstand tussen de koude bron en het OWB-systeem respectievelijk gelijk is aan $X = \Sigma R_h$, $X = 1,5 \Sigma R_h$, $X = 2 \Sigma R_h$, $X =$



Figuur 3-7: Chlorideconcentratie en b): Temperatuur halverwege jaar 14 op een diepte van 26 m -m.v. voor het scenario waarbij de koude put van het OBES en het OWB-systeem $X = 3 \Sigma R_h$ uit elkaar staan voor de casestudy in Aalsmeer.

$3 \Sigma R_h$ en $X = 4 \Sigma R_h$. Ter vergelijking: het vergunde debiet van de nabijgelegen OBES in Kudelstaart zou volgens de hier gebruikte configuratie leiden tot een afstand tot de OWB-bron van $X = 1,7 \Sigma R_h$.

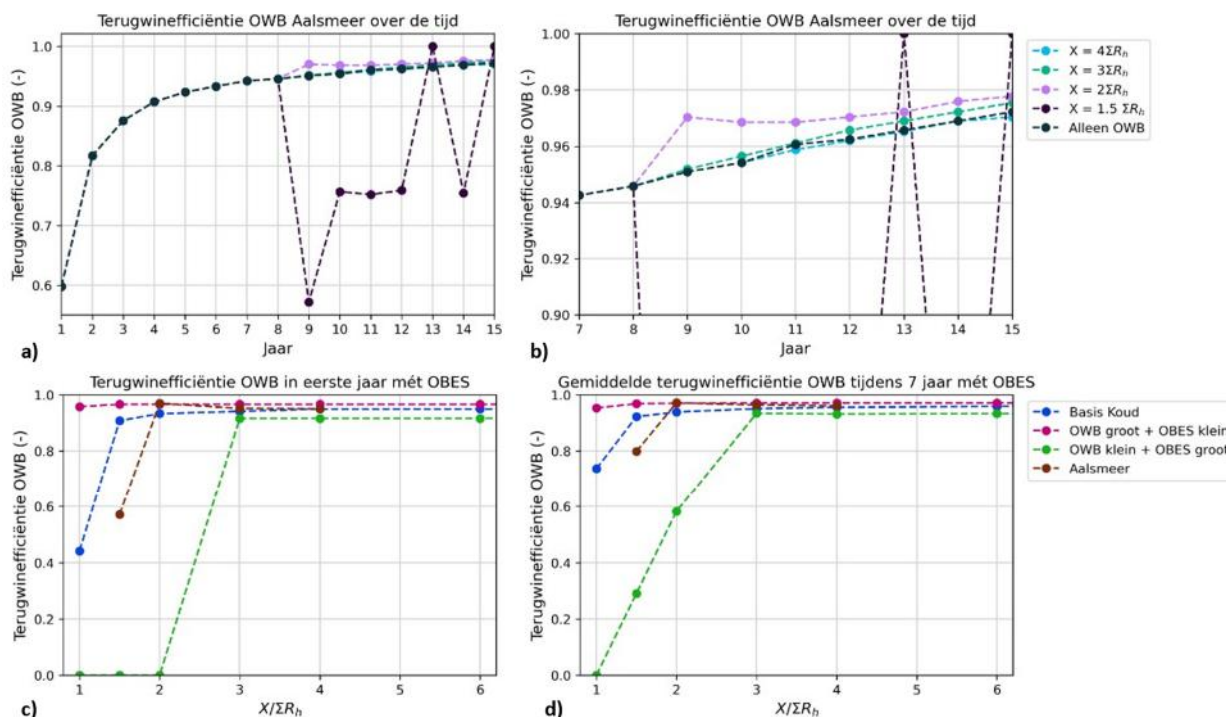
In Figuur 3-8a & b is de terugwinefficiëntie van de OWB over de tijd weergegeven voor de verschillende doorgerekende scenario's voor de casestudy Aalsmeer. De terugwinefficiëntie voor het scenario waar de bronnen $X = 1,5 \Sigma R_h$ uit elkaar staan neemt duidelijk af in de eerste jaren nadat het OBES actief is. De terugwinefficiëntie vervolgens in jaar 13 neemt sterk toe, waarna deze in jaar 14 weer sterk afneemt. Dit patroon is ook waarneembaar in enkele van de generieke simulaties waarin de OWB-bron en de OBES-bron zeer dicht bij elkaar stonden. Een mogelijke verklaring voor dit patroon is dat in de jaren ervoor, waar de terugwinefficiëntie zeer laag is, er een groot volume zoet water nabij de put beschikbaar blijft, en dit vervolgens door de OBES weer richting de put wordt bewogen tijdens de rustperiode van de OWB, waarna dit volume het jaar daarop, samen met de dat jaar geïnfiltreerde hoeveelheid, grotendeels kan worden teruggewonnen.

Voor de overige scenario's is het effect van de aanwezigheid van het OBES-systeem op de OWB-bron kleiner. In het geval van het scenario $X = 2 \Sigma R_h$ is zelfs een kleine toename van de terugwinefficiëntie te zien ten opzichte van het scenario zonder OBES. Deze toename wordt verklaart door het feit dat de geohydrologische omstandigheden en de locatie van de OBES bronnen er hier voor zorgen dat de stroming rondom de onvolkomen OWB-bronnen geremd wordt, waardoor er minder menging is tussen het grondwater en het opgeslagen hemelwater door dispersie. Bij een onderlinge afstanden van $X = 3 \Sigma R_h$ of meer is er een verwaarloosbaar effect van de OBES op de terugwinefficiëntie van de OWB.

Ondanks de verschillende geohydrologische setting en systeemeigenschappen van de OWB, is de berekende terugwinefficiëntie voor de verschillende de casestudy bij Aalsmeer in overeenstemming met de terugwinefficiënties die zijn berekend in de generieke simulaties onder zoete condities (Figuur 3-8c & d). Het opslagvolume van het OWB-systeem van $16.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ is tussen het opslagvolume van het scenario 'OWB klein + OBES groot' ($10.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$) en het scenario 'Basis koud' (OWB $50.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$) in. Dit is terug te zien in de kwetsbaarheid van het systeem voor de aanwezigheid van een OBES-systeem bij de simulaties op kortere afstanden (Figuur 3-8).

De resultaten van de casestudy's komen overeen met de afstandsregels die zijn opgesteld aan de hand van de generieke simulaties (Paragraaf 3.1). In de casestudy Aalsmeer zijn er geen negatieve effecten van het OBES op de terugwinefficiëntie van de OWB vanaf $3 \Sigma R_h$ en verwaarloosbare (positieve of negatieve) effecten vanaf $2 \Sigma R_h$. Deze relatieve afstanden zijn in dezelfde range als minimaal benodigde afstanden die voortkomen uit de generieke

simulaties in een zoete ondergrond. Voor de casestudy in het Westland is het effect van het OBES op de OWB verwaarloosbaar vanaf $4 \Sigma R_h$, gelijk aan de minimaal benodigde relatieve afstand in een brakke ondergrond uit de generieke simulaties.



Figuur 3-8 a): Terugwinefficiëntie van het gesimuleerde OWB-systeem over de tijd voor de 5 doorgerekende scenario's. Een ingezoomd beeld vanaf jaar 7 is weergegeven in b). c): Terugwinefficiëntie in het eerste jaar mét OBES van de casestudy in de regio Aalsmeer in vergelijking de generieke simulaties onder zoete condities zoals gedefinieerd in Tabel 2.3 en d): Gemiddelde terugwinefficiëntie gemiddeld over de eerste 7 jaar mét OBES voor de casestudy in de regio Aalsmeer in vergelijking met de generieke simulaties onder zoete condities zoals gedefinieerd in Tabel 2-3.

4 Co-Existentie van OWB en OBES

4.1 Analytische exercitie voor meerdere naast elkaar gelegen kassen

Om de inpasbaarheid van OWB en OBES in hetzelfde watervoerende pakket te testen, is voor het kassencomplex van de casestudy Aalsmeer en twee naastgelegen kassencomplexen (Figuur 4-1a) gekeken wat de minimaal benodigde afstand tussen de verschillende systemen is, gegeven het feit dat alle drie de kassencomplexen zowel een gietwatervraag hebben waarvoor ze een OWB-systeem willen gebruiken als een warmte en koude vraag waarvoor ze OBES willen inzetten. Deze exercitie dient als vingeroefening om een beeld te krijgen hoe de afstandsregels zoals opgesteld in het voorgaande hoofdstuk in de praktijk toepasbaar zijn.

4.1.1 Aanpak

De benodigde groottes van de OWB en OBES worden geschaald naar het dakoppervlak van de betreffende kassen. Voor de OWB wordt het systeem uit de casestudy bij Aalsmeer (Paragraaf 2.4.2) gebruikt als basis voor het bepalen voor het geschaalde infiltratievolume ($3.400 \text{ m}^3/\text{jaar/ha}$). De bodemenergiesystemen wordt geschaald naar het vergunde volume ($300.000 \text{ m}^3/\text{seizoen}$) van een OBES bij een kassencomplex Rijssenhout ca. 4 km van de hier gebruikte locatie, gelijk aan een geschaald opslagvolume van ca. $76.500 \text{ m}^3/\text{ha/seizoen}$. De opslagvolumes en bijbehorende hydraulische stralen van beide systemen zijn weergegeven voor de 3 kassencomplexen in Tabel 4-1. Hierbij wordt er, hetzelfde als bij de casestudy Aalsmeer, uitgegaan van een filterlengte van 23 meter voor de OWB-systemen en 42 meter voor de open bodemenergiesystemen.

Net als in beide casestudy's, is voor allebei de systeemtypen gezocht naar een locatie op het terrein van het betreffende kassencomplex op een locatie die potentieel bereikbaar is met een boorwagen, en de afstand tussen warme en koude bronnen minimaal $3 R_{th}$ (ca. $2 R_{th,OBES}$) is. Binnen deze plaatsingsregels is gezocht naar de locaties waar de minimale afstand tussen OWB en OBES zo groot mogelijk is. Aan de hand van de hydraulische stralen in Tabel 4-1 is vervolgens de relatieve onderlinge afstand $a = X/\Sigma R_h$. Dit is gedaan voor de volgende vijf scenario's:

- Sc1: Bij ieder kassencomplex wordt een eigen OWB en OBES aangelegd.
- Sc2: Bij ieder kassencomplex wordt een eigen OBES aangelegd. Er wordt gezamenlijk één OWB aangelegd.
- Sc3: Bij ieder kassencomplex wordt een eigen OWB aangelegd. Er wordt gezamenlijk één OBES aangelegd.
- Sc4: Er wordt gezamenlijk één OBES aangelegd en de huidige OWB bij de middelste kas wordt uitgebreid om aan de gietwaterbehoefte van de drie kassen te voldoen.
- Sc5: Er wordt gezamenlijk één OBES aangelegd én één OWB op een nieuwe locatie.

Tabel 4-1: Gehanteerde volumes en daaruit volgende hydraulische stralen in het geval van een eigen OBES en eigen OWB per kassencomplex, gebruikt voor de analytische exercitie.

Relatieve ligging	Dakoppervlak (ha)	V_{OWB} (m^3/jaar)	$R_{h,OWB}$ (m)	V_{OBES} (m^3/jaar)	$R_{h,OBES}$ (m)	$R_{th,OBES}$ (m)
Zuidwest	3,7	12580	24	283050	85	57
Midden	4,8	16000	27	367200	96	65
Noordoost	6,5	22100	32	497250	112	75

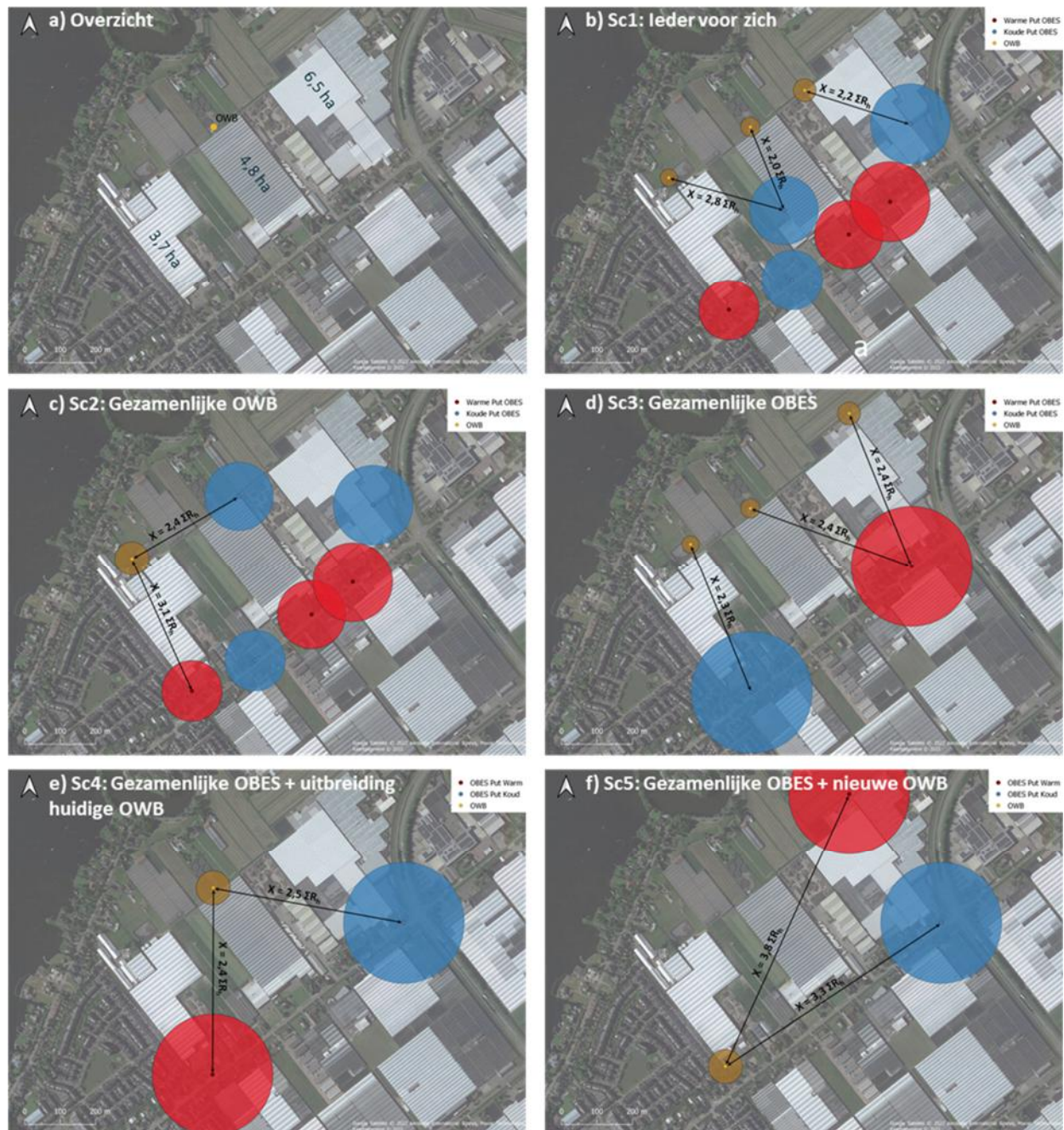
4.1.2 Resultaten

In Figuur 4-1b-f wordt het resultaat van deze inpassingsoefening voor de verschillende scenario's weergegeven, met per scenario de twee of drie kleinste relatieve onderlinge afstanden tussen OWB en OBES. Uit het figuur blijkt dat de minimale relatieve onderlinge afstand gelijk is aan $X = 2 \Sigma R_h$ in het geval dat er bij ieder kassencomplex zowel een OBES als een OWB wordt aangelegd (Sc1, Figuur 4-1b). Uit de resultaten van de casestudy Aalsmeer (Paragraaf 3.2.2) blijkt dat deze onderlinge afstand geen negatieve impact op de terugwinefficiëntie van het OWB-systeem heeft. Omdat de terugwinefficiëntie de OWB bij een wat kleinere relatieve onderlinge afstand van $1,5 \Sigma R_h$ echter zeer sterk afneemt, zou een iets grotere relatieve afstand tussen OWB en OBES in dit geval aan te raden zijn.

In het geval dat er óf een gezamenlijk OWB-systeem (Sc2, Figuur 4-1c) óf een gezamenlijke bodemenergiesysteem (Sc3, Figuur 4-1d) wordt aangelegd, neemt de relatieve minimale onderlinge afstand toe tot respectievelijk $2,4 \Sigma R_h$ en $2,3 \Sigma R_h$. Een vergelijkbare minimale onderlinge afstand van $2,4 \Sigma R_h$ is het geval als er een gezamenlijke OBES wordt aangelegd en het bestaande OWB-systeem wordt uitgebreid om te voldoen voor alle drie de kassen (Sc3, Figuur 4-1e). In het geval dat ook voor het OWB-systeem een nieuwe locatie wordt gezocht (Sc4, Figuur 4-1f), is er wel een significante toename van de minimale onderlinge afstand tot $3,3 \Sigma R_h$. Dit scenario voldoet dus aan de minimale afstand die nodig is onder zoete condities zoals die volgde uit de generieke simulaties van $3,0 \Sigma R_h$ (Paragraaf 3.1.2).

De resultaten van deze inpassingsoefening laten zien dat het gezamenlijk inpassen en aanleggen van systemen leidt tot meer beschikbare ruimte in de ondergrond. Dit is het geval bij de inpassing van zowel OBES als OWB voor deze drie kassencomplexen, maar zeker als dit nog grootschaliger plaatsvindt. Bij de inpassingsoefening zoals deze hier gedaan is, is namelijk geen rekening gehouden de mogelijkheid dat omliggende kassencomplexen OWB dan wel OBES willen toepassen in het betreffende watervoerende pakket, of dat er een OBES-systeem wordt geplaatst t.b.v. de warmte en koude voorziening van de woningen ten zuidwesten van de kassen complexen. Dit terwijl de cirkels van de hydraulische stralen in Figuur 4-1 in elk scenario in elk scenario het terrein van een ander mogelijke gebruiker doorsnijdt. Ruimtelijke ordening is dus vereist om OWB en OBES op grote schaal naast elkaar in hetzelfde watervoerende pakket te kunnen laten bestaan.

Door de relatief grote afstand die nodig is tussen beide type systemen t.o.v. bijvoorbeeld bodemenergiesystemen onderling, wordt bij co-existentie een relatief groot deel van de ondergrond onbenut gelaten. Indien het mogelijk is, is het dus in gebieden met een intensief gebruik van de ondergrond raadzaam om functies te verdelen over meerdere watervoerende pakketten. Waar dit niet mogelijk is, zijn de hier ontwikkelde regels van belang voor het ruimtelijk ordenen van de verschillende systemen. Hier wordt in het volgende hoofdstuk verder op ingegaan.



Figuur 4-1 a): Overzicht van de kassencomplexen gebruikt voor de analytische exercitie, inclusief hun dakoppervlak, en de locatie van het bestaande OWB-systeem gebruikt in de casestudy Aalsmeer. b-f): Resultaat van de analytische exercitie met de 2 of 3 kleinste relatieve afstanden tussen OWB en OBES, met de hydraulische stralen van de OWB-systemen (bruin), en koude (blauw) en warme (rood) bronnen van bodemenergiesystemen ingetekend.

4.2 Reflectie op afstandsregels en toepasbaarheid bij vergunningverlening

Op vrijdag 25 maart 2022 zijn de in dit rapport opgenomen resultaten als input gebruik in een workshop met de klankbordgroep van dit onderzoek. De klankbordgroep bestaat uit experts van verschillende gemeenten, waterschappen, omgevingsdiensten, provincies, de glastuinbouwbranche en KWR. Tijdens de workshop is er gereflecteerd op de praktische toepasbaarheid van de afstandsregels en hoe deze passen en verankerd kunnen worden in de vergunningverlening. De belangrijkste overwegingen en conclusies zijn in deze paragraaf besproken.

4.2.1 Ruimtelijke ordening en beleid

Noodzaak voor ruimtelijke ordening in de ondergrond

Op dit moment is er voornamelijk concrete vraag naar de mogelijkheden voor co-existentie tussen OWB en OBES bij ondernemers in het Westland. Ruimtelijke ordening is noodzakelijk om deze functies bij elkaar in hetzelfde watervoerende pakket te accommoderen. Dit onderzoek laat zien dat dat kan, maar dat de praktische inpassing aandacht vergt en in sommige gevallen lastig te realiseren is. De casestudy in Aalsmeer heeft laten zien dat toepassing van OBES én OWB in het eerste watervoerende pakket leidt tot beperkingen voor de toepassing van OWB en/of OBES voor naburige kassen/tuinders.

Ruimtelijke ordening t.b.v. de co-existentie van OBES en OWB in een watervoerend pakket is met name noodzakelijk in gebieden waar andere watervoerende pakketten niet beschikbaar, of minder optimaal, voor opslag zijn, zoals bijvoorbeeld in het Westland, waar het tweede watervoerende pakket veel dieper en minder goed doorlatend is dan het eerste watervoerende pakket, of in Noord-Brabant waar de diepere watervoerende pakketten volledig gereserveerd zijn voor drinkwaterwinning

Hemelwaterberging zou in de toekomst in stedelijke gebieden ook een grotere rol gaan spelen. Dus ook in stedelijke gebieden kan de vraag naar gezamenlijke toepassing van OWB en OBES toenemen. Voor de plaatsing van bodemenergiesystemen hebben gemeenten op sommige locaties interferentiegebieden aangewezen, waarbinnen alle open en gesloten bodemenergiesystemen vergunningplichtig zijn. Vaak wordt voor zulke gebieden ook een bodemenergie masterplan opgesteld, waarbij de gemeente actief de ordening van de ondergrond in handen neemt. Met de invoering van de Omgevingswet komt het instrument interferentiegebieden te vervallen. In plaats daarvan valt de ordening van de ondergrond dan onder het Omgevingsplan. In deze Omgevingsplannen kan het ruimtegebruik in de ondergrond worden geregeld. De afstandsregels voor co-existentie van OBES en OWB kunnen hiertoe worden gebruikt.

Regie bij ruimtelijk ordening van de ondergrond

Omdat het bevoegd gezag verschilt per activiteit in relatie tot bodemenergie en zoetwateropslag, is het niet vanzelfsprekend wie de regie zou moeten voeren voor de ruimtelijke ordening van de ondergrond. De consensus binnen de deelnemers van de workshop is dat de regierol in eerste instantie bij de Provincies en Gemeenten ligt, die de Omgevingswet en de daarbinnen vallende Omgevingsplannen moeten opstellen. De Waterschappen moeten hier echter wel ook bij aangehaakt/betrokken worden, aangezien zij verantwoordelijk zijn voor hemelwaterberging.

Er gaan daarmee drie overheidslagen over de ruimtelijke ordening van de ondergrond bij de toepassing van OBES en OWB. Ruimtelijke ordening van de ondergrond dient zowel de belangen van de publieke als de private sector. Voor marktpartijen biedt een duidelijke ruimtelijke ordening namelijk een speelveld waarbinnen zij kunnen ondernemen. Omdat marktpartijen vaak inzicht hebben in de toekomstige behoeften van zowel bodemenergie als zoet water, is het niet ongewoon dat het initiatief voor het opzetten van ruimtelijk ordening in een bepaald gebied vanuit deze partijen komt. Voor de overheden dient ruimtelijke ordening van de ondergrond als instrument om vergunningverlening te vereenvoudigen en als middel om overzicht te houden op het ondergrondse ruimtegebruik en de koppeling met het bovengrondse.

De rol van afstandsregels bij ruimtelijke ordening

Uit de discussie tijdens de workshop blijkt dat er consensus is over dat de afstandsregels uit deze studie één van de handvatten kunnen worden om de ruimtelijke ordening van OBES en OWB te bewerkstelligen.

4.2.2 Vergunningverlening

De rol van afstandsregels bij ruimtelijke ordening

Uit de discussie tijdens de workshop blijkt dat er consensus is over dat de afstandsregels goed zouden kunnen worden toegepast als eerste check om de haalbaarheid van gezamenlijke toepassing van OBES en OWB te verkennen in een bepaalde casus. Deze check zou in principe uitgevoerd moeten worden door de initiatiefnemer van het betreffende systeem. Hiervoor is het belangrijk dat de afstandsregels makkelijk toepasbaar zijn. Voor definitieve haalbaarheid en detail ontwerp is wel altijd een locatie specifieke studie nodig.

Flexibiliteit in vergunningen

Omdat vraag en aanbod van warmte, koude en zoet water voor of van bepaalde systemen variabel en veranderlijk is over de jaren, benutten vergunninghouders maar een deel van hun vergunningsruimte, of is die juist te klein. Om de gereserveerde ruimte in de ondergrond passend te houden voor verschillende systemen, zou het flexibel kunnen aanpassen van de vergunningscapaciteit bijdragen aan een verbeterde ruimtelijke ordening van de ondergrond.

Op dit moment gebruiken veel OBES systemen slechts een klein deel van het vergunde opslagvolume, doordat de vergunningen vaak te ruim worden aangevraagd. Hierdoor eisen ze een buitenproportioneel groot deel van de ondergrond op, wat mogelijke toepassing van andere OBES en/of OWB onterecht belemmert. Het aanpassen of gedeeltelijk intrekken van beperkt benutte vergunningsruimte, draagt bij aan het accommoderen van zoveel mogelijk functies in de ondergrond. Dit biedt ook ruimte voor het uitbreiden van vergunningen van gebruikers die te weinig vergunningsruimte hebben. Het aanpassen van vergunningen is onder bepaalde voorwaarden mogelijk binnen de Waterwet. Er moet wel rekening mee gehouden worden dat het aanpassen van de vergunningen niet ten kosten gaat van de gebruiker zelf, bijvoorbeeld in jaren met extreme weersomstandigheden.

4.2.3 Belangrijkste conclusies en openstaande vragen

Met betrekking tot de toepasbaarheid van de afstandsregels zijn tijdens de workshop de volgende twee conclusies getrokken:

- De afstandsregels kunnen door de initiatiefnemers van OWB en OBES gebruikt worden als belangrijke eerste controle om te kijken of co-existentie haalbaar is in de ondergrondse bezetting in een gebied. Indien dit het geval is, is casusspecifiek detail ontwerp nog wel vereist.
- De afstandsregels zijn een bruikbaar instrument binnen de ruimtelijke planvorming en het aanwijzen van gebieden voor verschillende bodemfuncties.

De belangrijkste openstaande vragen wat betreft de toepassing van ruimtelijke ordening van de ondergrond is welke instantie hier de regie over voert, en waarin afstandsregels zoals de hier voorgestelde in verankerd moeten worden. Dit zou in een vervoltraject verder uitgediept moeten worden.

Op technisch gebied rest de vraag hoe de afstandsregels doorwerken op de beschikbare ruimte voor verschillende type systemen en de mate waarmee de functie van de verschillende systemen vervuld kan worden in een bepaald gebied. Mogelijk zou er daarvoor in een vervolgonderzoek gekeken moeten worden naar wat de afstandsregels betekenen voor de inpassing van bodemenergie en zoetwateropslag in een groter gebied, zoals het gehele Westland.

Kader: Quotes uit de workshop

Glastuinbouwsector: *“De vraag voor de mogelijkheden voor OWB en OBES samen in het eerste watervoerende pakket leeft bij ondernemers binnen het Westland. Dit onderzoek laat zien dat er mogelijkheden zijn, maar ook dat hier coördinatie voor nodig is.*

Omgevingsdienst: *“In Noord-Brabant begint de vraag voor ruimtelijke ordening van de ondergrond ook steeds meer te spelen, doordat alles onder het eerste watervoerende pakket gereserveerd gaat worden voor drinkwater. Hierbij merken we juist dat de markt het initiatief neemt voor deze ordening, en dat de gemeente het vervolgens verder oppakt.”*

Gemeente: *“Voor ordeningsregels zijn criteria zoals deze afstandsregels nodig. Voor het opstellen van deze ordeningsregels moeten afspraken gemaakt worden die leiden tot protocollen om dit soort vraagstukken aan te vliegen.”*

5 Discussie

5.1 Beschouwing mogelijke andere invloeden op OBES-OWB interactie

Hoewel de belangrijkste aspecten die een rol spelen bij de interactie van OBES en OWB in deze studie zijn beschouwd (zoals opslagvolume, putafstanden, en infiltratie- en onttrekkingsvariatie), zijn er in de praktijk tal van andere factoren die weliswaar niet direct, maar mogelijk indirect nog van invloed kunnen zijn op de interactie. Daarom wordt in deze paragraaf voor een aantal van de belangrijkste niet beschouwde aspecten verkend of gekwantificeerd wat hun effect is op de interactie tussen OBES en OWB. Deze aspecten zijn los van elkaar beschouwd, maar kunnen in de praktijk tegelijkertijd optreden.

5.1.1 Achtergrondstroming

Bekend is dat natuurlijk grondwaterstroming zowel de terugwinefficiëntie van OWB als van OBES systemen negatief kan beïnvloeden (Bloemendal & Hartog, 2018; Bloemendal & Olsthoorn, 2018; Rambags et al., 2013; van Ginkel et al., 2014), doordat een deel van het opgeslagen zoete water of warmte/koude tijdens de ondergrondse opslag buiten bereik van de bron stroomt en laagwaardiger water zich juist richting de bron verplaatst. Hoewel de invloed van achtergrondstroming op de interactie tussen OBES en OWB systemen in deze studie niet beschouwd is, is het de verwachting dat als de beïnvloeding sterker wordt wanneer de OWB en OBES meer in de lijn van de stromingsrichting ten opzichte van elkaar geplaatst. Indien, bijvoorbeeld, het OBES stroomafwaarts van de OWB geplaatst wordt, zal een deel van het opgeslagen zoetwatervolume van de OWB richting OBES stromen. Dichter bij het OBES is de hydraulische invloed van het OBES groter, dus zijn in dat geval de verwachte effecten op het opslagvolume van de OWB groter. Aan de andere kant zou het effect van de OWB op het OBES dan juist kleiner worden, omdat een groter deel van de opgeslagen warmte/koude zich verder van de OWB bevindt.

Daarnaast is gebleken dat kwetsbaardere systemen (zoet-in-brak, klein opslagvolume) gevoeliger zijn voor externe invloeden en daarmee ook mogelijk gevoeliger zijn voor achtergrondstroming. Systemen onder invloed van een sterke achtergrondstroming zijn ook kwetsbaarder, waardoor de effect van onderlinge interactie tussen de systemen mogelijk ook nog een grotere rol gaan spelen op de terugwinefficiëntie van beide systemen en met name OWB.

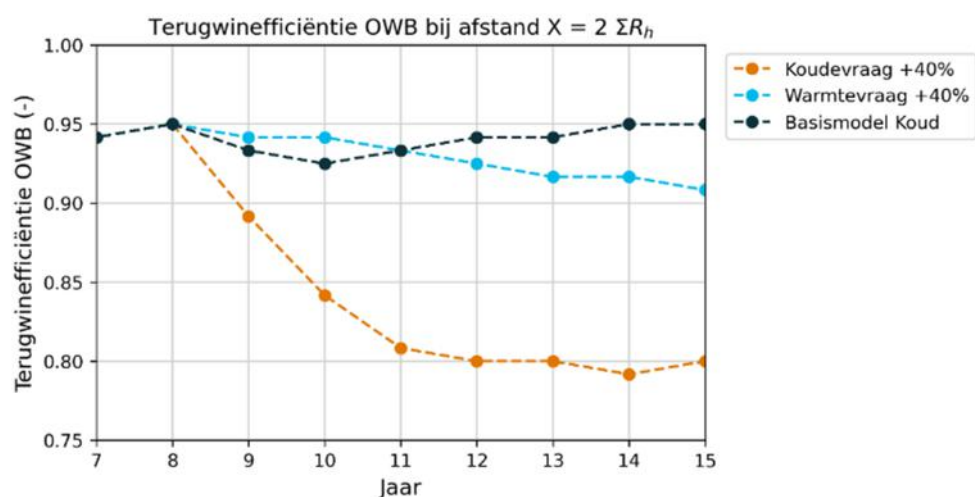
5.1.2 Onbalans

In het geval dat een OBES in balans is, zal elke OBES-bron gedurende het jaar net zoveel onttrekken als infiltreren, waardoor deze elk jaar net zoveel aan het zoetwatervolume van een nabijgelegen OWB trekt als dat deze dit volume wegduwt. Hierdoor worden de negatieve effecten van een OBES op een nabijgelegen OWB deels gecompenseerd.

In de praktijk is de warmte- en koudevraag van een OBES echter nooit helemaal in balans, maar is er meer koude dan warmte of meer warmte dan koude nodig. In dat geval is er sprake van een thermische onbalans, waarbij het in de zomer verpompte volume niet gelijk is aan het in winter verpompte volume. Over het algemeen wordt deze langjarige onbalans grotendeels opgevangen met een regeneratiesysteem, een kunstmatige toevoer van warmte/koude waarmee de energiebalans in de bodem wordt hersteld (SIKB, 2014). Indien er sprake is van een thermische onbalans, zal één van de bellen gestaag groeien over de tijd, terwijl de andere bel juist ieder jaar meer dan volledig leeg wordt getrokken. Er is dan ook sprake van een hydraulische onbalans binnen een bron, aangezien de onttrokken hoeveelheid anders is dan de geïnfiltrerde hoeveelheid. Bij een onbalans zijn de totale aantrekkende en wegduwende werking van een OBES-put op het zoetwatervolume van een OWB gedurende het jaar niet gelijk aan elkaar. Hierdoor is het totale effect van een OBES in onbalans op de terugwinefficiëntie van de OWB naar verwachting groter.

Om een eerste inzicht van de effecten van een onbalans te krijgen zijn er scenario's met een relatief grote onbalans van respectievelijk 40% meer koudevraag dan warmtevraag en 40% meer warmtevraag dan koudevraag gesimuleerd. Dit is gedaan voor het 'Basis Koud' scenario (Tabel 2-3) voor een relatieve onderlinge afstand van $2 \Sigma R_h$. Omdat het opslagvolume leidend is voor het bepalen van de hydraulische straal (Paragraaf 2.2.1), is het opslagvolume van de koude bron constant gehouden. Dit betekent dat in het geval van een grotere koudevraag het onttrokken debiet van de koude bron 40% hoger is en bij een grotere warmtevraag 28% lager ($100 - 100/140$).

In Figuur 5-1 is de terugwinefficiëntie van de OWB voor deze simulaties weergegeven. Hieruit blijkt dat zowel een onbalans richting de warmtevraag als een onbalans richting de koudevraag op middellange termijn het negatieve effect van de OBES op het OWB-systeem vergroten ten opzichte van een OBES dat in balans is. Het effect van een grotere koudevraag is in dit scenario een stuk groter dan van een grotere warmtevraag, er is in feite een netto onttrekking in de koude bron en die zorgt dus dat een deel van het zoete water naar die onttrekking wordt aangetrokken.



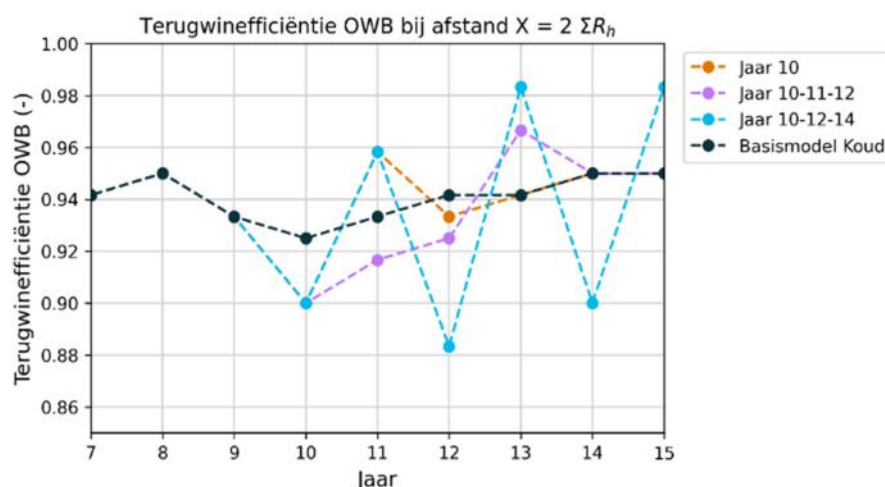
Figuur 5-1: Terugwinefficiëntie van het OWB-systeem voor het scenario 'Basis Koud' voor een afstand van $2 \Sigma R_h$ voor een systeem in balans, een systeem met 40% meer warmtevraag dan koudevraag en een systeem met 40% meer koudevraag dan warmtevraag.

5.1.3 Jaarfluctuaties Vraag

In deze studie wordt ervan uitgegaan dat de water- en warmte/koudebehoefte ieder jaar hetzelfde is. In de praktijk hoeft dit echter niet zo te zijn. In natte jaren zal er meer zoet water opgeslagen kunnen worden, terwijl in droge jaren de vraag juist groter is. In warme jaren zal er extra vraag naar koude zijn, in koude jaren juist naar warmte. Al deze fluctuaties hebben een effect op de daadwerkelijk hydraulische straal van de systemen en dus op de onderlinge beïnvloeding. Daarnaast kunnen deze fluctuaties ook samen voorkomen: droge zomers gaan vaak samen met lange periodes van hitte, waardoor in een dergelijk jaar zowel de watervraag als de koudevraag toe zullen nemen.

Om een beeld te geven van de effecten van jaarfluctuaties op de terugwinefficiëntie van het OWB-systeem, zijn er drie simulaties gedaan met een aantal extreem koude jaren, waarin de warmtevraag 50% hoger is dan in een gemiddeld jaar. Om deze reden is er in de winter 50% meer geïnfilterd in de koude bron, en om energiebalans te bewaren 50% meer onttrokken in de zomer. In deze jaren neemt de relatieve onderlinge afstand af van $2 \Sigma R_h$ naar $1,7 \Sigma R_h$. Dit heeft dan ook een negatief effect op de terugwinefficiëntie van de OWB in deze betreffende jaren, zoals te zien is in Figuur 5-2. Opvallend is dat in een normaal jaar volgend op een extreem koud jaar de terugwinefficiëntie juist hoger is. Dit wordt veroorzaakt doordat er in jaren waar er minder zoet water wordt teruggewonnen, er meer zoet water achterblijft in de ondergrond, wat in het daaropvolgende jaar wel kan worden teruggewonnen. Daarnaast is de terugwinefficiëntie in de 'Jaar 10' en 'Jaar 10-11-12' naar verloop van tijd weer gelijk aan de terugwinefficiëntie

in de simulatie zonder extreem koude jaren. De effecten van jaarfluctuaties in het OBES op de terugwinefficiëntie van de OWB lijken bij deze simulaties dus tijdelijk.

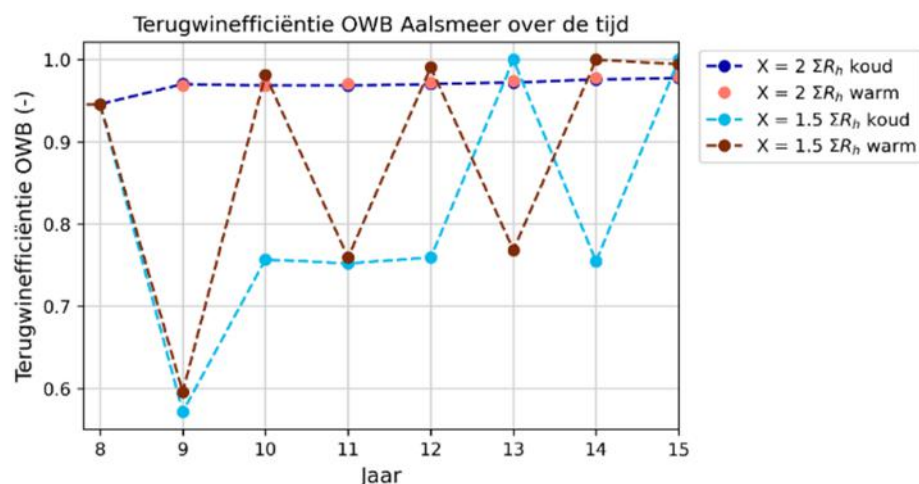


Figuur 5-2: Terugwinefficiëntie van het OWB-systeem voor het scenario 'Basismodel Koud' voor een relatieve afstand van $2 \Sigma R_h$ en een aantal extreem koude jaren waarin er 50% meer wordt geïnfilteerd en onttrokken bij de OBES-put. In de legenda staan de betreffende jaren voor de drie simulaties weergegeven.

5.1.4 Effect van meest nabijgelegen OBES-bron

Uit de generieke simulaties blijkt dat het effect op de terugwinefficiëntie van een OWB-systeem enigszins verschilt voor de koude en de warme OBES-bron (Figuur 3-3a-b). Omdat de exacte onderlinge interactie tussen de OWB en de koude of warme OBES-bel afhangt van de specifieke pompschema's van beide systemen, zijn de twee scenario's die hier vergeleken kunnen worden niet voldoende om uitspraken te doen over de daadwerkelijke verschillen in de praktijk.

Om toch een eerste beeld te krijgen van de verschillen in de praktijk, is voor de casestudy Aalsmeer (Paragraaf 2.4.2) gekeken wat het effect is als de locaties van de koude en warme bron van locatie verwisseld worden. Dit is gedaan voor de scenario's waarbij de OWB en meest nabijgelegen OBES-bron $1,5 \Sigma R_h$ en $2 \Sigma R_h$ uit elkaar liggen.



Figuur 5-3: Terugwinefficiëntie van het OWB-systeem in de casestudy Aalsmeer voor een relatieve onderlinge afstand van $2 \Sigma R_h$ in het geval dat de koude put van de OBES het dichtst bij de OWB ligt ($X = 2 \Sigma R_h$ koud) en in het geval dat het de warme put is ($X = 2 \Sigma R_h$ warm)

Het resultaat van deze simulaties is weergegeven in (Figuur 5-3). Hieruit blijkt dat er zeer grote verschillen zijn tussen het scenario waar de koude bron het dichtstbij ligt en het geval dat dit de warme bron is in het geval dat de OWB sterk beïnvloed wordt door het OBES-systeem, wat het geval is bij een afstand van $X = 1,5 \Sigma R_h$. De gemiddelde terugwinefficiëntie echter wel sterk af op deze relatieve afstand ongeacht welke OBES-bron het dichtst bij staat, terwijl bij een relatieve afstand van $2 \Sigma R_h$ er geen significante verschillen waarneembaar zijn als gevolg van het omwisselen van de koude en warme bron. Dit duidt erop dat het voor de minimaal benodigde afstand tussen OWB en OBES niet uitmaakt welke bron van het OBES het dichtst bij de OWB staat, maar dat de impact van het OBES op de OWB wel van belang is indien de systemen minder dan deze afstand van elkaar afstaan.

5.1.5 Overige complicerende praktijkcondities

Naast de in deze paragraaf besproken variabelen, zijn er nog een aantal andere aspecten waar binnen dit onderzoek niet nader op is ingegaan:

- De huidige afstandsregels gaan uit van een radiaal opslagvolume per OWB-systeem en voor de warme en koude zijde van een OBES. Dit is representatief voor systemen met 1 bron per type of voor systemen waar meerdere bronnen van het zelfde type (OWB, warm/koud) zijn geclusterd. Echter bestaan er ook OWB- en OBES-systemen waarbij de bronnen van het systeem niet zijn geclusterd, maar bijvoorbeeld op een rij geplaatst zijn, waardoor de vorm van het opslagvolume niet langer radiaal is. Het is aannemelijk dat de invloed van een ander systeem op een systeem waarvan het opslagvolume anders is dan voor een systeem waarvan de bronnen geclusterd zijn. De mate van invloed zal te maken hebben met de oriëntatie van de bronnen van dat systeem ten opzichte van het systeem waardoor het beïnvloed wordt.
- In dit onderzoek is uitgegaan van één OWB en één OBES-bron of -systeem. Indien er sprake is van meerdere OBES-systemen nabij een OWB, zal de totale invloed op de terugwinefficiëntie van de OWB veranderen. Zo is het aannemelijk dat de invloed op de terugwinefficiëntie versterkt wordt indien meerdere OBES-systemen in dezelfde richting t.o.v. van de OWB liggen, door de superpositie van de hydraulische invloed van beide systemen, en kan de invloed juist worden beperkt indien OBES-systemen aan weerszijden van de OWB liggen, doordat de hydraulische invloed van de systemen dan (deels) wordt uitgemiddeld.
- Andere grondwatergebruikers dan OWB en OBES kunnen ook van invloed zijn op de werking van beide type systemen en de daarmee de onderlinge interactie tussen OWB en OBES. Grondwateronttrekkingen zijn hiervan een belangrijk voorbeeld en komen regelmatig voor nabij glastuinbouwgebieden. Deze grondwateronttrekkingen kunnen lokaal de grondwaterstroming beïnvloeden, wat weer effect heeft op de verspreiding van de opgeslagen warmte/koude door een OBES of opgeslagen zoet water door een OWB.
- In deze studie is uitgegaan van watervoerende pakketten met homogene condities in de glastuinbouwgebieden van Westland en Aalsmeer. Op andere plekken kan de dikte van het watervoerende pakket beschikbaar voor OBES en OWB variëren, waarbij een dikker watervoerend pakket inpassing makkelijker maakt, mits de volledige dikte ook wordt gebruikt. Verder zijn in de praktijk de eigenschappen van watervoerende pakketten in meer of mindere mate heterogeen wat tot andere verspreiding en interactie kan leiden. Vooral de aanwezigheid van grind- of schelplagen kan ervoor zorgen dat de onderlinge interactie tussen OWB en OBES anders is dan beschreven in deze studie.

5.2 Invloed opslagtemperatuur op ruimtebeslag OBES

Het watervolume dat door een OBES geïnfiltreerd en onttrokken wordt is evenredig met de hoeveelheid energie die opgeslagen wordt en omgekeerd evenredig met het temperatuurverschil tussen de warme en koude bron/bronnen volgens Vergelijking (5) in Paragraaf 2.2.1. Dit betekent dat het opslag- en onttrekkingsvolume dus kleiner wordt voor een bepaalde hoeveelheid warmte/koude wanneer het temperatuurverschil groter wordt. In dat geval neemt dus ook de hydraulische invloed op een nabijgelegen OWB-systeem af.

Wanneer ruimte in de ondergrond schaars is, zoals in de casus besproken in Paragraaf 4.1, zou groter temperatuurverschil tussen de warme en koude bron van een OBES bij kunnen dragen aan de co-existentie van OBES en OWB. Indien in deze casus het temperatuurverschil zou verdubbelen, bijvoorbeeld van 8 °C naar 16 °C, zou het benodigde opslagvolume voor dezelfde hoeveelheid energie dus halveren, en de som van de stralen van de OWB en OBES (ΣR_h) dus afnemen. In Tabel 5-1 is de kleinste onderlinge relatieve afstand weergegeven voor de scenario's uit Figuur 4-1 met het originele temperatuurverschil van 8 °C en wanneer het temperatuurverschil 16 °C zou zijn. Hieruit blijkt dat de relatieve onderlinge afstand, afhankelijk van de relatieve opslagvolume van de OWB t.o.v. het OBES, met 24% tot 33% toeneemt. Dit betekent ook dat de OWB en OBES bij een ΔT van 16 °C 19% tot 25% dichter bij elkaar kunnen voor dezelfde relatieve afstand a als bij een ΔT van 8 °C, waardoor er minder ondergrondse ruimte in beslag genomen hoeft te worden voor de co-existentie van OBES en OWB in hetzelfde watervoerende pakket.

Daarbovenop kunnen de koude en warme bronnen van de OBES ook dichter bij elkaar geplaatst worden bij een kleiner opslagvolume, waardoor het minimaal benodigde ruimtebeslag nog verder afneemt.

Tabel 5-1: Kleinste onderlinge relatieve afstand volgend uit de inpassingsoefening uit Paragraaf 4.1 per scenario bij het originele temperatuurverschil van 8 °C en bij een verdubbeling van het temperatuurverschil tot 16 °C voor de 5 scenario's uit de inpassingsoefening.

Scenario	Kleinste relatieve onderlinge afstand (a) bij $\Delta T = 8 \text{ }^\circ\text{C}$	Kleinste relatieve onderlinge afstand (a) bij $\Delta T = 16 \text{ }^\circ\text{C}$	Toename a door verdubbeling temperatuurverschil
Sc1.	2,0 ΣR_h	2,6 ΣR_h	29%
Sc2.	2,4 ΣR_h	3,0 ΣR_h	24%
Sc3.	2,3 ΣR_h	3,1 ΣR_h	33%
Sc4.	2,4 ΣR_h	3,1 ΣR_h	30%
Sc5.	3,3 ΣR_h	4,3 ΣR_h	30%

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Het doel van dit onderzoek was om op zoek te gaan naar de mogelijkheden voor co-existentie van open bodemenergiesystemen (OBES) en ondergrondse waterberging (OWB) in hetzelfde watervoerend pakket. Hiervoor zijn generieke afstandsregels die eenvoudig toepasbaar zijn in de praktijk toepasbaar afgeleid. De minimale afstand benodigd tussen beide systemen is gebaseerd op de som van hydraulische stralen ΣR_h van het opslagvolume van de OWB en de warme of koude bron van het OBES. Op basis van dit onderzoek zijn de volgende conclusies getrokken:

- Uit de generieke simulaties blijkt dat de minimale afstand tussen een OBES en een OWB in een watervoerend pakket met zoet grondwater minimaal $3 \Sigma R_h$ moet zijn om de effecten van het OBES op de terugwinefficiëntie van het OWB-systeem te beperken. In de meeste gevallen, behalve bij een grote OBES en een kleine OWB, is een minimale afstand van $2 \Sigma R_h$ ook voldoende.
- Uit de generieke simulaties blijkt ook dat de minimale afstand tussen OBES en OWB in een watervoerend pakket met brak/zout grondwater minimaal $4 \Sigma R_h$ moet zijn om de effecten van het OBES op de terugwinefficiëntie van de OWB te beperken.
- De geldigheid van de bovenstaande afstandsregels zijn getest en in overeenstemming bevonden met de resultaten van de uitgevoerde casestudy's in het Westland en de regio Aalsmeer.
- Ruimtelijke ordening is noodzakelijk om op basis van deze afstandsregels voldoende ruimte te hebben voor zowel OWB als OBES in gebieden waar veel vraag is naar zowel zoet water als bodemenergie, zoals kassengebieden. Ook blijkt de ruimtelijk meerwaarde van collectieve systemen uit een inpassingsoefening in een kassengebied nabij Aalsmeer.
- De hier opgestelde afstandsregels kunnen een rol spelen bij de ruimtelijke ordening van de ondergrond door bevoegd gezag, zowel in tuinbouwgebieden als andere gebieden waar beide systemen een rol kunnen spelen, zoals stedelijk gebied.
- De afstandsregels kunnen door initiatiefnemers van open bodemenergie- en ondergrondse waterbergingssystemen gebruikt worden als eerste controle of het betreffende systeem past binnen de huidige bezetting van de ondergrond in dat gebied.

Dit onderzoek draagt bij aan de breder kunnen toepassen van bodemenergiesystemen bij kassengebieden en draagt daarmee bij aan de energiedoelstellingen van de Kas als energiebron. Verder draagt het onderzoek bij aan het optimaal en duurzaam gebruik van de ondergrond voor OWB en OBES op ander locaties, zoals bijvoorbeeld de stedelijke omgeving. De ontwikkelde handvatten zijn bruikbaar als hulpmiddel in de ruimtelijke ordening van de ondergrond en ondersteunend de vergunningverlening voor systemen voor ondergrondse opslag van warmte en water.

6.2 Aanbevelingen

De resultaten van dit onderzoek geven technische handvatten bij het gezamenlijk toepassen van OBES en OWB. Tijdens de workshop bleek er consensus over dat de afstandsregels ook één van de handvatten kunnen worden om de ruimtelijke ordening van OBES en OWB te bewerkstelligen. Hoe nu verder in de praktijk?

- De afstandsregels kunnen door de initiatiefnemers van OWB en OBES nu reeds gebruikt worden als belangrijke eerste controle om te kijken of co-existentie in individuele gevallen haalbaar is in de ondergrondse bezetting in

een gebied. Het is hiervoor belangrijk om de inzichten uit deze studie breder bekend te maken bij provincies, die deze systemen vergunnen, in de advieswereld en binnen de glastuinbouwsector, zodat in individuele gevallen hierop kan worden teruggevallen, voor een eerste verkenning van de haalbaarheid.

- De afstandsregels zijn een potentieel bruikbaar instrument binnen de ruimtelijke planvorming en het aanwijzen van gebieden voor verschillende bodemfuncties. Wij raden aan dit verder te onderzoeken, bijvoorbeeld door voor een concreet gebied een breed opgezette ruimtelijke inpassingsoefening (zie ook Hoofdstuk 4.1) uit te voeren. Naast inzichten voor de specifieke gebieden, maakt zo'n studie vooral ook inzichtelijk hoe de afstandsregels praktisch kunnen worden ingezet, als voorbeeld of inspiratie voor (glastuinbouw)gebieden elders in Nederland. Door voor grote glastuinbouwgebieden specifiek in beeld te brengen wat de mogelijkheden zijn, wordt duidelijkheid gecreëerd t.a.v. de ontwikkelmogelijkheden.
- Tenslotte, daar waar duurzame co-existentie tussen OWB en OBES haalbaar blijkt, zou in overleg met het bevoegde gezag verkend kunnen worden of de generieke afstandsregels kunnen worden gebruikt voor het maken en beoordelen van bodemenergieplannen en eventueel opname van een planningsinstrument hiervoor in beleidsregels voor bodemgebruik.

Referenties

- Bloemendal, M., Beernink, S., van Bel, N., Hockin, A., & Schout, G. (2020). *Transitie open bodemenergiesysteem Koppert-Cress naar verhoogde opslagtemperatuur: Evaluatie van energiebesparingen en grondwatereffecten*.
- Bloemendal, M., & Hartog, N. (2018). Analysis of the impact of storage conditions on the thermal recovery efficiency of low-temperature ATEs systems. *Geothermics*, 71, 306–319. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.10.009>
- Bloemendal, M., & Olsthoorn, T. (2018). ATEs systems in aquifers with high ambient groundwater flow velocity. *Geothermics*, 75, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.04.005>
- Côté, J., & Konrad, J. M. (2005). Thermal conductivity of base-course materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(1), 61–78. <https://doi.org/10.1139/t04-081>
- Gelhar, L. W., & Collins, M. A. (1971). General Analysis of Longitudinal Dispersion in Nonuniform Flow. *Water Resources Research*, 7(6), 1511–1521. <https://doi.org/10.36074/2617-7064.09.006>
- Harbaugh, A. W. (2005). MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process. *U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3133/tm6A16>
- Hassanzadeh, S. M. (2017). *Summary Lecture Notes - Hydrogeological Transport Phenomena*. Utrecht University.
- Hecht-Méndez, J., Molina-Giraldo, N., Blum, P., & Bayer, P. (2010). Evaluating MT3DMS for heat transport simulation of closed geothermal systems. *Ground Water*, 48(5), 741–756. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2010.00678.x>
- Langevin, C. D., Dausman, A. M., & Sukop, M. C. (2010). Solute and heat transport model of the Henry and Hilleke laboratory experiment. *Ground Water*, 48(5), 757–770. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00596.x>
- Langevin, C. D., Shoemaker, W. B., & Guo, W. (2003). *MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-Documentation of the SEAWAT-2000 version with the Variable-Density Flow Process (VDF) and the Integrated MT3DMS Transport Process (IMT)*. <http://water.usgs.gov/ogw/seawat/>
- Ma, R., & Zheng, C. (2010). Effects of Density and Viscosity in Modeling Heat as a Groundwater Tracer. *Ground Water*, 48(3), 380–389. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00660.x>
- Midttømme, K., Roaldset, E., & Aagaard, P. (1998). Thermal conductivity of selected claystones and mudstones from England. *Clay Minerals*, 33, 131–145. <https://doi.org/10.1180/000985598545327>
- Rambags, F., Raat, K. J., Zuurbier, K. G., van den Berg, G. A., & Hartog, N. (2013). *Aquifer Storage and Recovery (ASR). Design and operational experiences for water storage*.
- Ros, S. E. M., & Zuurbier, K. G. (2017). The impact of integrated aquifer storage and recovery and brackish water reverse osmosis (ASRRO) on a coastal groundwater system. *Water*, 9(273). <https://doi.org/10.3390/w9040273>
- SIKB. (2014). Protocol: Ontwerp, realisatie en beheer van het ondergrondse deel van bodemenergiesystemen. *Protocol 11001*.
- Stafleu, J., Maljers, D., Busschers, F. S., Gunnink, J. L., Schokker, J., Dambrink, R. M., Hummelman, H. J., & Schijf, M. L. (2013). *GeoTop modellering*.
- Stofberg, S. F., & Zuurbier, K. G. (2018). *COASTAR. Verkenning waterbank Westland*. <https://www.coastar.nl/wp-content/uploads/COASTAR.-Verkenning-Waterbank-Westland-definitief.pdf>
- van Doorn, A., Zuurbier, K. G., & Paalman, M. A. A. (2013). *Potentie van ondergrondse waterberging voor (glas)tuinbouw in Zuid-Holland*.
- van Ginkel, M., Olsthoorn, T. N., & Bakker, M. (2014). A New Operational Paradigm for Small-Scale ASR in Saline Aquifers. *Groundwater*, 52(5), 685–693.
- van Lopik, J. H., Hartog, N., & Zaadnoordijk, W. J. (2016). The use of salinity contrast for density difference compensation to improve the thermal recovery efficiency in high-temperature aquifer thermal energy storage systems. *Hydrogeology Journal*, 24, 1255–1271. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1366-2>
- Vernes, R. W., & van Doorn, T. H. M. (2005). Van Gidslaag naar Hydrogeologische Eenheid – Toelichting op de totstandkoming van de dataset REGIS II. *TNO Report, Netherlands Inst. of Applied Geoscience TNO, Utrecht, the Netherlands*.
- Ward, J. D., Simmons, C. T., & Dillon, P. J. (2007). A theoretical analysis of mixed convection in aquifer storage and recovery: How important are density effects? *Journal of Hydrology*, 343, 169–186. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.06.011>

- Zheng, C., & Wang, P. P. (1999). MT3DMS: A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems: Documentation and User's Guide. In *A modular three-dimensional multi-species ...* [http://www.geo.tu-freiberg.de/hydro/vorl_portal/gw-modellierung/MT3DMS Ref Manual.pdf](http://www.geo.tu-freiberg.de/hydro/vorl_portal/gw-modellierung/MT3DMS%20Ref%20Manual.pdf)
- Zurbier, K. G., Bakker, M., Zaadnoordijk, W. J., & Stuyfzand, P. J. (2013). Identification of potential sites for aquifer storage and recovery (ASR) in coastal areas using ASR performance estimation methods. *Hydrogeology Journal*, 21(6), 1373–1383. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1003-2>
- Zurbier, K. G., Kooiman, J. W., Groen, M. M. A., Maas, B., & Stuyfzand, P. J. (2015). Enabling Successful Aquifer Storage and Recovery of Freshwater Using Horizontal Directional Drilled Wells in Coastal Aquifers. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(3), 1–7. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000990](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000990)
- Zurbier, K. G., & Paalman, M. (2014). *Veldproef ondergrondse zoetwaterberging in zout grondwater (Pilot ASR Prominent)*.
- Zurbier, K. G., & Stuyfzand, P. J. (2017). Consequences and mitigation of saltwater intrusion induced by short-circuiting during aquifer storage and recovery in a coastal subsurface. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(2), 1173–1188. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1173-2017>
- Zurbier, K. G., & Van Dooren, T. C. G. W. (2019). *Urban Waterbuffer Spangen: Resultaten* (Issue December). <http://api.kwrwater.nl/uploads/2020/01/KWR-2019.111-Urban-Waterbuffer-Spangen-Resultaten.-Deelrapport-TKI-project-Urban-Waterbuffer.pdf>
- Zurbier, K. G., Van Dooren, T. C. G. W., & Ros, S. E. M. (2017). *Improved ASR-Coastal Reference site*.
- Zurbier, K. G., Zaadnoordijk, W. J., & Stuyfzand, P. J. (2014). How multiple partially penetrating wells improve the freshwater recovery of coastal aquifer storage and recovery (ASR) systems: A field and modeling study. *Journal of Hydrology*, 509, 430–441. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.057>

Bijlagen

I Geohydrologische opbouw casus Westland

Geohydrologische laag	Top (m mv)	Bot (m mv)	K_h (m/d)	K_v (m/d)	n (-)	T_a (°C)	S_0 (g/l)
Deklaag	0	-5	1	0,01	0,2	12	2,1
Deklaag	-5	-10	0,2	0,002	0,2	12	2,1
Deklaag	-10	-15	1	0,01	0,2	12	2,1
Deklaag	-15	-20	0,1	0,001	0,2	12	3
Deklaag	-20	-21	1	1	0,3	12	3
Deklaag	-21	-22	0,2	0,02	0,2	12	3
WVP1	-22	-23	35	35	0,3	12	3
WVP1	-23	-24	35	35	0,3	12	4
WVP1	-24	-27	35	35	0,3	12	4
WVP1	-27	-28	35	35	0,3	12	4,5
WVP1	-28	-31	35	35	0,3	12	4,5
WVP1	-31	-32	35	35	0,3	12	4,5
WVP1	-32	-33	35	35	0,3	12	4,8
WVP1	-33	-37	100	100	0,3	12	4,8
Scheidende Laag 1	-37	-39	0,1	0,01	0,2	12	3,3
Scheidende Laag 1	-39	-40	0,1	0,1	0,2	12	3,3
Scheidende Laag 1	-40	-44	10	10	0,3	12	3,3
Scheidende Laag 1	-44	-46	0,05	0,005	0,2	12	3,3
Scheidende Laag 1	-46	-48	0,05	0,005	0,2	12	6

II Onderbouwing locaties casestudy's

De eerste selectie bestond uit de volgende tuinbouwgebieden:

- Aalsmeer
- Bommelerwaard
- Luttelgeest
- Next Garden
- West-Brabant (Nieuw Prinsenland)
- Oostland
- Omgeving van Venlo
- Noord-Holland Noord (Agriport)
- Westland

Om een zo goed mogelijke vertaalslag te kunnen maken naar de opslagsituatie voor OWB-systemen in heel Nederland en daarnaast ook een relevante casus te beschouwen, zijn de volgende selectiecriteria gebruikt op volgorde van prioriteit:

- 1 Eén casus is in een gebied waarbij WVP1 zoet is, de andere waar WVP1 brak is;
- 2 De geohydrologische eigenschappen verschillen tussen de casussen;
- 3 Er zijn zowel OBES als OWB/grondwateronttrekkingen in het gebied als indicatie voor de vraag naar bodemenergie/zoet grondwater;
- 4 Er is data beschikbaar om een inschatting te maken van de opslagvolumes van zowel OWB als OBES.

De keuze voor het Westland als eerste casestudy lag voor de hand: hier wordt het eerste watervoerende pakket gebruikt voor de opslag van gietwater en de noodzaak hiervan zal in de toekomst alleen maar groter worden (zie: Stofberg & Zuurbier, 2018). Mede hierom geldt een verbod voor de plaatsing van bodemenergiesystemen in het eerste watervoerende pakket. Door de grote interesse in bodemenergie in dit gebied leeft juist hier daarom de vraag of OWB en OBES samen in één watervoerend pakket ingepast kunnen worden.

Door de keuze van de casus Westland viel een aantal van de hierboven genoemde locaties af op basis van de selectiecriteria. West-Brabant en Oostland hebben een vergelijkbare ondergrond met het Westland en in Noord-Holland Noord en Luttelgeest is het eerste watervoerende pakket (over het algemeen) brak.

In de glastuinbouwgebieden rondom Venlo en in de Bommelerwaard zijn geen bodemenergiesystemen en slechts een beperkt aantal onttrekkingen aanwezig. Daarom vallen deze twee gebieden af op basis van het derde selectie criterium.

Van de overgebleven twee tuinbouwgebieden (Aalsmeer en Next Garden), is de keuze voor de locatie voor de tweede casestudy op Aalsmeer gevallen op basis van het vierde selectie criterium. Van deze locatie was namelijk bekend dat de glastuinbouw hier gebruikt maakt van zowel opslag van gietwater als bodemenergie. Dit was niet het geval voor Next Garden.