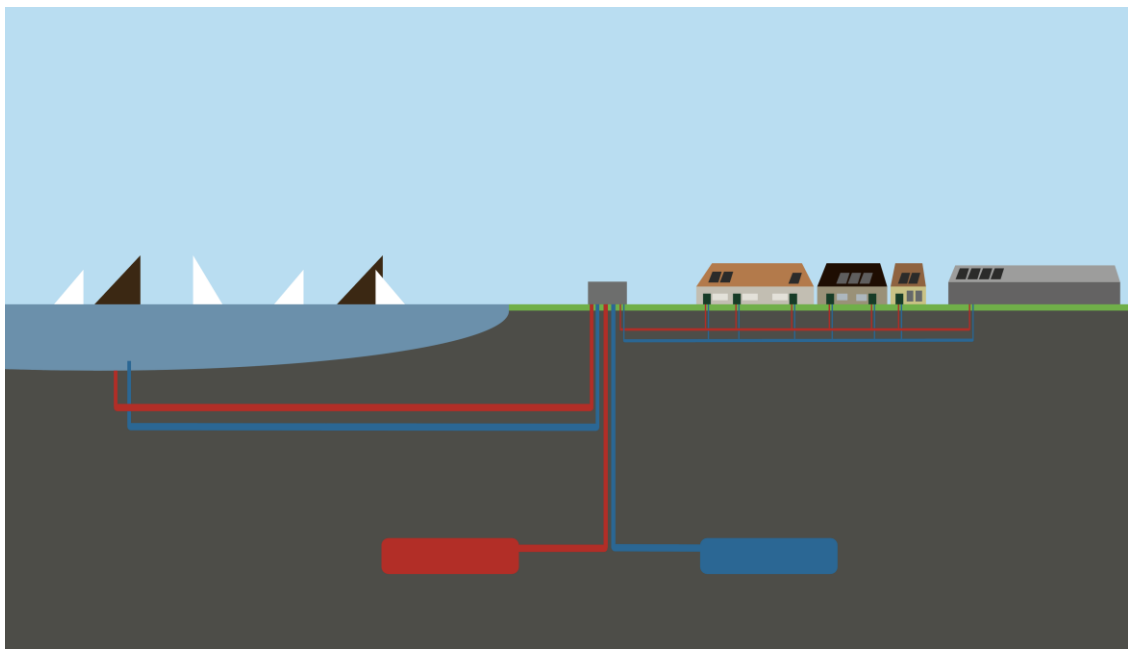


WARMINGUP

Innovatief Duurzaam Warmtecollectief



Bron: warmheeg.nl

Aan aquathermie gekoppelde bodemenergiesystemen;

Effecten op de ondergrond

3 mei 2021

Tussenrapportage na 1 jaar

Aan aquathermie gekoppelde bodemenergie-systemen;
Effecten op de ondergrond

Deltares

KWR



Rijkswaterstaat

Auteurs:

Martin Bloemendal & Alex Hockin (KWR)
Johan Valstar & Nanne Hoekstra(Deltares)
3 mei 2021

Kwaliteitsborger(s)

Ida de Groot-Wallast, Derk van Ree & Ronald Roosjen (Deltares), Jan Frank Mars (RWS)

Dit project is uitgevoerd als onderdeel van het Innovatieplan WarmingUP. Dit is mede mogelijk gemaakt door subsidie van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) in het kader van de subsidieregeling Meerjarige Missiegedreven Innovatie Programma's (MMIP), bij RVO bekend onder projectnummer TEUE819001.

WarmingUP geeft invulling aan MMIP-4 – Duurzame warmte en koude in gebouwde omgeving en levert daarmee een bijdrage aan Missie B – Een CO₂-vrije gebouwde omgeving in 2050.

[Projectnummer](#)

11205155-002

[Keywords](#)

Aquathermie, bodemenergie

[Jaar van publicatie](#)

2021

[Meer informatie](#)

Nanne Hoekstra

T 06 1088 5748

E nanne.hoekstra@deltares.nl

April 2021 ©

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veeleenvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevens bestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Samenvatting

Aquathermie kan warmte leveren voor woonwijken. Dat gebeurt echter vooral in de zomer, als woningen weinig verwarming nodig hebben. Daarom moeten seizoensopslag plaatsvinden. Dat lukt het best in de bodem. Daarvoor kan gebruik worden gemaakt van een bodemenergiesysteem. Dat kan tevens koude leveren. Omdat woningen meer warmte dan koude nodig hebben zou echter een conventioneel bodemenergiesysteem minder geschikt zijn. De beide bronnen van duurzame energie vormen daarom een uitstekende combinatie: enerzijds is opslag van warmte uit oppervlaktewater (of riool- en drinkwater) in de bodem nodig om het energie-aanbod in de tijd af te stemmen op de vraag, anderzijds kan aquathermie bijdragen aan de energetische balancerings van een bodemenergiesysteem.

Uit de uitgevoerde evaluatie van de mogelijke effecten op de bodem door het grootschalig inzetten van aquathermie, vanwege de noodzakelijke combinatie met bodemenergie, blijkt:

1. Ongewenste opwarming, met als potentieel gevolg wijziging van fysische, chemische en biologische bodemeigenschappen wordt voorkomen door de (huidige) regelgeving voor bodemenergiesystemen goed te hanteren. In dat kader is vooral de maximuminfiltratietemperatuur van belang.
2. Opwarming van de bodem door verschillen in energievraag en -aanbod, bij conventionele bodemenergiesystemen een reëel risico, kan juist door koppeling met aquathermie worden voorkomen.
3. Beïnvloeding van de grondwaterkwaliteit is beheersbaar en er zijn mogelijkheden voor een rendabele combinatie met maatregelen ten behoeve van een verbetering van de grondwaterkwaliteit. Dit wordt in 2021 verder uitgewerkt.

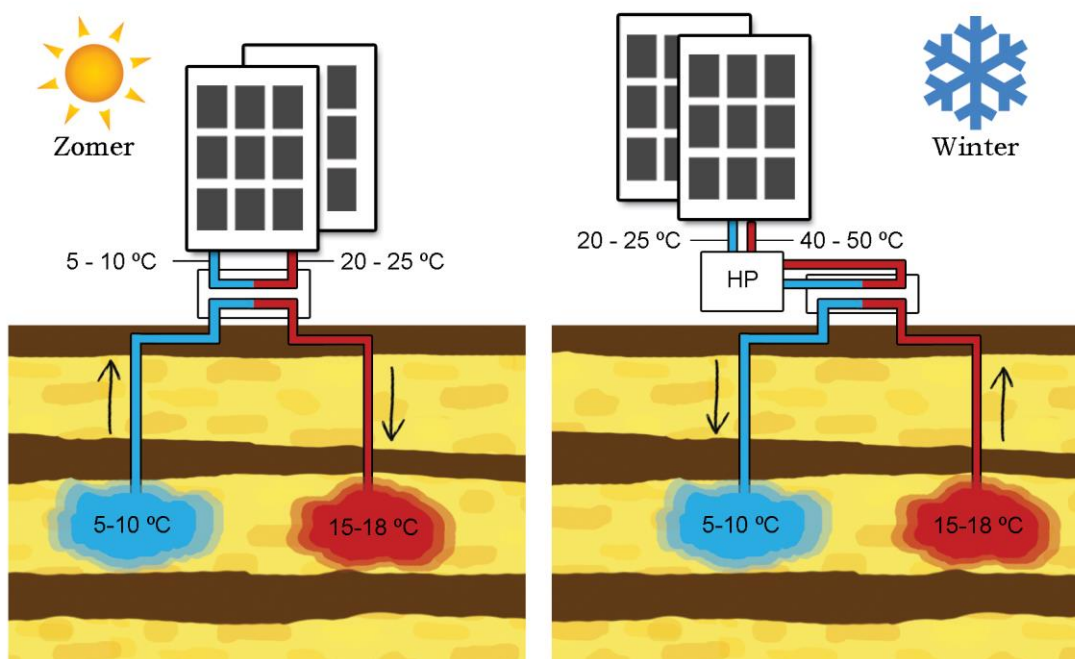
Inhoudsopgave

1	Introductie	5
2	OBES gekoppeld aan Aquathermie; een inleiding	8
2.1	Noodzaak OBES	8
2.3	Aquathermie als enige bron?	12
2.4	Benodigde orde grootte OBES	12
2.5	Ontwikkeling koude en warme bel en ontwerptimalisaties	13
2.6	Mogelijke effecten van OBES	14
2.7	Regels bodemenergie	15
3	Opslagtemperatuur	17
3.1	Inleiding	17
3.2	Totstandkoming 25°C grens	17
3.3	Beschouwde effecten bij temperatuur verandering tot 25°C	17
3.4	Maatwerk	18
2.5	Conclusies over opslagtemperatuur	19
4	Verschillen in energievraag en -aanbod	20
4.1	Inleiding	20
4.2	Periodieke verschillen	20
4.3	Structurele verschillen	22
4.4	Verlies van warmte- en koude door achtergrondstroming	24
4.5	Conclusies over variaties in energievraag- en aanbod	25
5	Effect van OBES op de verspreiding van verontreinigingen	26
5.1	Inleiding	26
5.2	Stedelijke verontreinigingen	26
5.3	OBES en grondwaterverontreiniging	27
5.4	Case Study's	33
5.5	Discussie en Conclusies effect van verspreiding	35
6	Samenvattende conclusies en aanbevelingen	37
	Referenties	38

1 Introductie

Project 3B van WarmingUP brengt de (mogelijke) effecten van de grootschalige toepassing van aquathermie (uit zowel oppervlakte-, afval- als drinkwater: TEO, TEA en TED) in beeld. In dit rapport is ingegaan op de effecten op de bodem, omdat grootschalige toepassing van aquathermie ook grootschalige (seizoens)opslag van thermische energie vraagt.

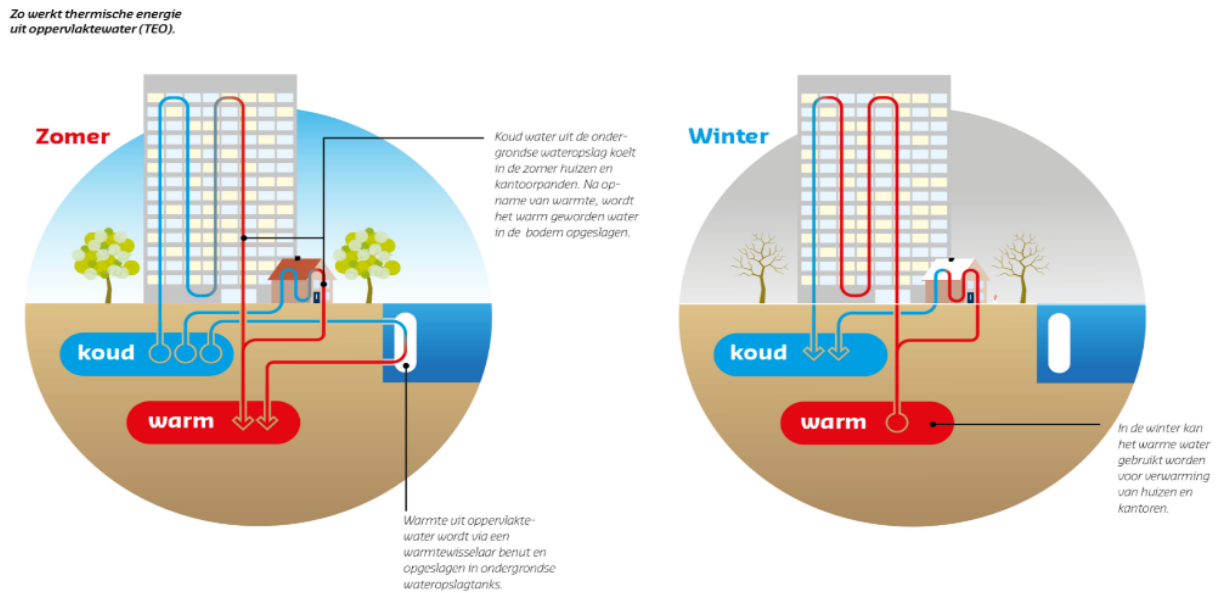
Met aquathermie kan zowel koude als warmte worden gewonnen uit het water. Voor Warming UP ligt de focus op grootschalige toepassing van warmtenetten om woonwijken van duurzame warmte te kunnen voorzien. Voor woonwijken is de warmtevraag aanzienlijk groter dan de koudevraag. De focus van dit onderzoek ligt dan ook op de effecten op de ondergrond van grootschalige winning van warmte uit het water. De temperatuur van het oppervlaktewater beweegt mee met de temperatuur van de buitenlucht. Vanuit ecologisch oogpunt kan met aquathermie het beste vooral bij hogere buitentemperaturen, in de zomer, warmte worden gewonnen die in de winter voor verwarming van woningen en gebouwen wordt gebruikt. Grootschalige toepassing van aquathermie vraagt dus om (grootschalige) seizoensopslag. Daarvoor is de bodem zeer geschikt. Met seizoensopslag in de bodem is al tientallen jaren ervaring opgedaan bij de toepassing van open bodemenergiesystemen: OBES (ook WKO genoemd: warmte- en koude-opslag), zie Figuur 1-1.



Figuur 1-1. Werkingsprincipe van open bodemenergie (Bloemendal & Hartog, 2018)

Hoe een OBES is gekoppeld aan aquathermie is schematisch weergegeven in Figuur 1-2, en nader toegelicht in Hoofdstuk 2. De grootschalige toepassing van aquathermie beïnvloedt door de koppeling met OBES ook de bodem en kan leiden tot effecten op de bodem. Negatieve effecten van OBES zouden daarmee ook een obstakel kunnen vormen voor de toepassing van aquathermie.

Positieve effecten kunnen een kans zijn voor deze toepassing. In het verleden zijn er al veel verschillende studies uitgevoerd naar de (negatieve) effecten van OBES. Een overzichtelijke samenvatting van alle risico's en effecten van OBES is weergegeven in de "Deltafact bodemenergie" (Schout en Bloemendal, 2021). Over het algemeen zijn de effecten van OBES bij vigerende regelgeving verwaarloosbaar klein, wat de wetgever heeft doen besluiten om in 2013 de regels voor OBES te stroomlijnen, uniformeren en versoepelen om de toepassing van de techniek te stimuleren (Schultz van Haegen, 2013).



Figuur 1-2 Principe van seizoensopslag van thermische energie uit oppervlaktewater in de bodem (Bodem nr. 3 juni 2019)

Ook voor het voor de hand liggende probleem van ongewenste opwarming van de bodem is adequate regelgeving ontwikkeld, maar omdat dit een belangrijk gepercipieerd risico is, wordt er in het kader van Warming Up wel expliciet aandacht besteed.

Voor de aan grootschalige aquathermie gekoppelde OBES is echter wel een risico relevant dat ook in de eerdere onderzoeken als belangrijk aandachtspunt is benoemd: de menging en verspreiding van grondwater van verschillende samenstellingen. OBES trekken water aan van rondom hun bronnen en van verschillende diepten. Als er verschil is in waterkwaliteit, wordt dat water in de bron vermengd en gelijktijdig op een andere plek in de aquifer weer geïnjecteerd. Als gevolg hiervan worden waterkwaliteitsverschillen verdund en verspreid. Bij grootschalige toepassing van OBES in stedelijk gebied waar vaak verontreinigingen in het grondwater aanwezig zijn, kan dat tot sterke verspreiding en verdunning van de verontreinigingen leiden. Daarnaast biedt dit echter de mogelijkheid om de verontreiniging gelijktijdig te saneren, als het water toch wordt opgepompt.

De bovengenoemde effecten en kansen zijn in dit rapport onderzocht. Na een beschrijving van het combinatiesysteem aquathermie & OBES in hoofdstuk 2 is in elk van de daaropvolgende hoofdstukken één van de bovengenoemde problemen toegelicht en zijn mogelijke oplossingen daarvoor besproken:

1. In verband met ongewenste opwarming van de bodem wordt in hoofdstuk 3 nog kort ingegaan op de opslagtemperatuur die (maximaal) toelaatbaar is. In hoofdstuk 4 wordt vervolgens uitgebreid de problematiek behandeld van het mogelijk ontbreken van evenwicht tussen koude- en warmtevraag.
2. In hoofdstuk 5 worden de processen beschreven en gekwantificeerd die zorgen voor de verspreiding en verdunning van verontreinigingen door OBES. En hoe er kan worden gestuurd op deze verspreiding en verdunning kan worden beheerst/bepikt, zodat andere grondwatergebruikers op enige afstand van de OBES geen nadelige effecten ondervinden van de toegenomen verspreiding/verdunning.

In het slothoofdstuk 6 worden op basis van de analyses in de voorgaande hoofdstukken samenvattende conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan voor seizoensopslag van uit (met name) oppervlaktewater geogste thermische energie in de bodem.

2 OBES gekoppeld aan Aquathermie; een inleiding

2.1 Noodzaak OBES

In principe kan bij aquathermie zowel koude als warmte worden gewonnen uit het water. Voor Warming UP ligt de focus op grootschalige toepassing van warmtenetten om woonwijken van duurzame warmte te kunnen voorzien. Voor woonwijken is de warmtevraag aanzienlijk groter dan de koudevraag. De focus van dit onderzoek ligt dan ook op de effecten van grootschalige winning van warmte uit het water. Vanuit ecologisch oogpunt wordt geadviseerd alleen warmte te winnen bij hogere (oppervlakte-) watertemperaturen. De temperatuur van het oppervlaktewater beweegt natuurlijk met de temperatuur van de buitenlucht mee. Daarom zal daaruit vooral bij hogere buitentemperaturen in de zomer warmte kunnen worden gewonnen die in de winter voor verwarming kan worden gebruikt. Grootschalige toepassing van aquathermie vraagt dus om (grootschalige) seizoensopslag. Daarvoor is de bodem zeer geschikt, het meest efficiënt is hiervoor gebruik te maken van een OBES.

Er wordt gekozen voor OBES en niet voor gesloten bodemenergiesystemen (GBES) omdat deze laatste meer geschikt zijn voor kleinschalige toepassingen. Voor het grootschalig toepassen van aquathermie zouden grote aantallen GBES nodig zijn, wat niet efficiënt is en daardoor onnodig duur zou worden en wat ook de bodem mogelijk te zeer zou aantasten; vanwege bijvoorbeeld het risico op perforaties van afsluitende lagen in de bodem door de grote aantallen boringen, lekkages van koelvloeistoffen en het inbrengen van kunststoffen in de ondergrond.

Overigens: In plaats van alle onttrokken warmte opslaan in de bodem kan ook een combinatie met direct gebruik van de thermische energie uit het oppervlaktewater – dus zonder opslag – gunstig zijn, omdat minder water richting OBES hoeft te worden verpompt. Dat kan op relatief koude dagen in de zomer, maar ook in de winter, omdat ook uit relatief koud oppervlaktewater nog energie kan worden gewonnen.

2.2 Ontwerputgangspunten OBES voor aquathermie

De werking van een "normale" OBES kan als volgt worden beschreven (zie figuur 1-1):

- Grond isoleert en de bodem werkt als een thermosfles. Het grondwater heeft van nature de jaargemiddelde temperatuur van de buitenlucht (ca 12 graden Celsius). Koeling of onttrekking van warmte aan gebouwen met koude uit grondwater in de zomer levert warmte die (via een warmtewisselaar) wordt opgeslagen in het grondwater van een watervoerende laag;
- De warmte in het opgewarmde grondwater (ca 18 graden Celsius) kan in de winter worden gebruikt voor verwarming van gebouwen. Het grondwater koelt af als het zijn warmte afgeeft tot ca 6 graden Celsius.
- De koude die daardoor in de winter vrijkomt, wordt apart opgeslagen en kan in de zomer weer effectief worden benut.

- Door af te koelen beneden de grondwatertemperatuur en op te warmen boven de grondwatertemperatuur ontstaan een koude en een warme bel in het grondwater, waardoor de effectiviteit van het systeem wordt verhoogd.

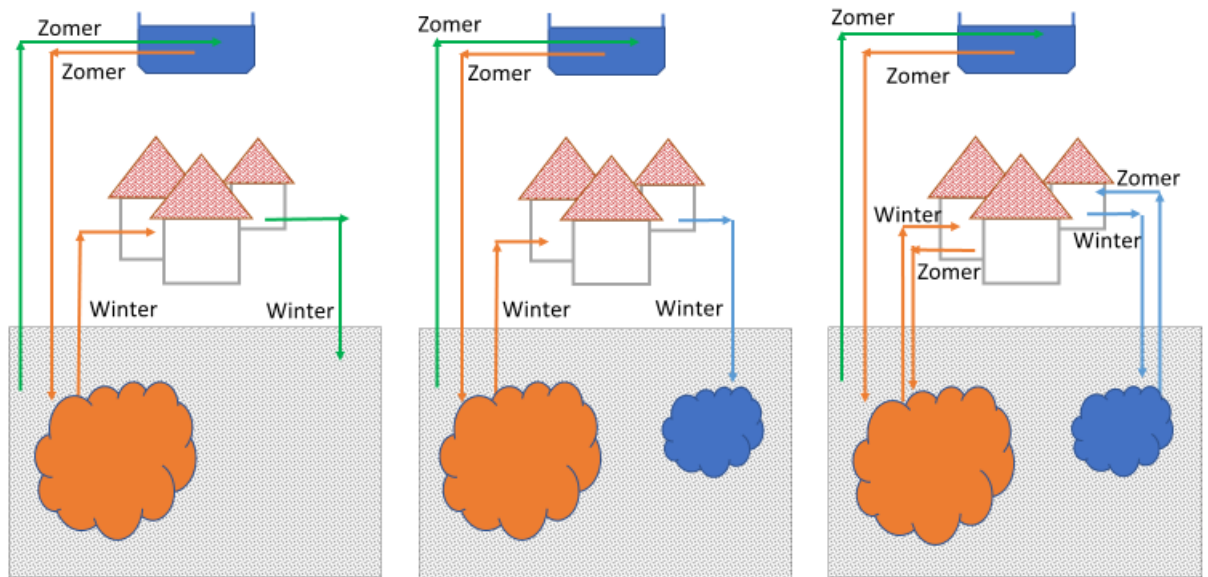
Dit principe met de koude en warme bel is energie-efficiënt omdat de totale warmte-opslagpotentie van de ondergrond wordt benut. Daarom is dit ontwerpprincipe ook het uitgangspunt voor de OBES bij aquathermie.

Overwegingen voor dit uitgangspunt

In principe zou voor aquathermie een vereenvoudigde OBES kunnen worden ingezet, waarbij alleen de warmte van het water gedurende het "winseizoen" in het grondwater wordt opgeslagen. Elke zomer kan het grondwater via zo'n systeem worden opgewarmd met warmte uit het oppervlaktewater die in de daaropvolgende winter wordt gebruikt. In de zomer wordt dan zoveel warmte opgeslagen als in de winter, naar verwachting, nodig is. Een deel van die warmte gaat echter verloren als gevolg van grondwaterstroming.

In die vereenvoudigde OBES wordt de warmte afgegeven aan het grondwater met achtergrondtemperatuur (12 graden Celsius). Zowel bij het opwarmen boven als het afkoelen tot de achtergrondtemperatuur wordt veel water verpompt door het beperkte toegestane temperatuurverschil (6 graden).

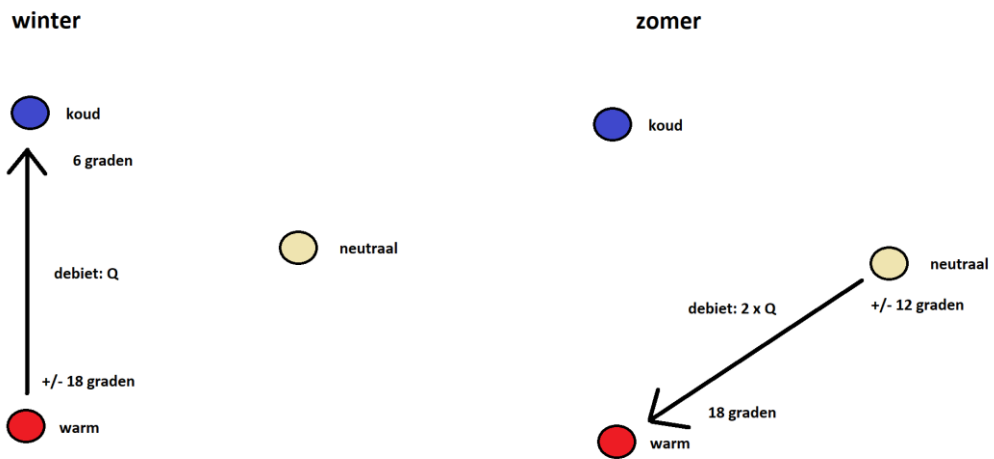
Verder afkoelen of opwarmen dan de achtergrondtemperatuur, zoals bij een conventionele OBES, kost minder water, minder energie en is dus rendabeler. Op die manier ontstaat alsnog een koude en warmtebron. Zo transformeert aquathermie met seizoensopslag logischerwijs altijd naar een OBES ; zie Figuur 2-1.



Figuur 2-1-1. Links: Grondwater met achtergrondtemperatuur (groene pijl) wordt in de zomer met oppervlaktewater opgewarmd (oranje pijl) en opgeslagen in de bodem (oranje bel). Deze warmte wordt in de winter gebruikt voor verwarming van woningen (oranje pijl), waarbij het grondwater wordt afgekoeld tot de achtergrondtemperatuur en weer wordt geïnfiltrerd in de bodem. Midden: Idem, maar omdat dit efficiënter is, wordt voor de verwarming van de woningen uit het opgepompte water meer warmte onttrokken (blauwe pijl), wat de temperatuur verlaagd, zodat bij terugvoer in de bodem een koude bel ontstaat (blauw). Rechts: Doordat koude in de bodem is opgeslagen, is het efficiënt die ook te gebruiken voor koeling in de zomer (blauwe pijl) en de warmte die daarbij ontstaat weer in de bodem op te slaan (oranje pijl). De warmte uit het oppervlaktewater is dan alleen nog nodig als aanvulling om aan de totale warmtevraag te voldoen, omdat woningen meer warmte vragen dan koude.

Mogelijke alternatieve variant OBES bij aquathermie

Doordat bij de toepassing van aquathermie bij woonwijken de koude grotendeels niet nuttig wordt gebruikt is er een alternatieve variant van OBES mogelijk. Hierbij wordt de koude grotendeels in de bodem achtergelaten. In plaats van afgekoeld grondwater uit de koude bel wordt grondwater met de (vrijwel) gemiddelde achtergrondtemperatuur onttrokken en opgewarmd met behulp van het oppervlaktewater. Dit grondwater wordt onttrokken uit een derde, neutrale bron, zie **Figuur 2-2** of bij een grootschalige systeem met veel doubletten uit één of enkele van de koudebronnen die zo min mogelijk (alleen bij een piekvraag van warmte als alle doubletten nodig zijn) met koude worden geladen.



Figuur 2-2 Configuratie van een alternatieve OBES met een extra neutrale bron

Bij het laden van warmte is er ook een keuze om:

1. Net zoveel warmte te laden als er in de winter wordt verbruikt, waarbij de warme belen groter worden omdat de begintemperatuur bij het laden de achtergrondtemperatuur is en niet de temperatuur van de koude bel. Een voordeel hierbij is dat de warme bel groter wordt en dat de retourtemperatuur aan het einde van de winter minder snel terugloopt hetgeen gunstig is voor de efficiëntie van de warmtepomp. Een nadeel is dat er in de zomer tijdens het laden meer water moet worden verpompt.
2. net zoveel warmte in de warme bel op te slaan als bij een 'normale OBES' waardoor er minder warmte aan het oppervlaktewater wordt onttrokken en er netto koude aan de bodem wordt toegevoegd. Dat laatste moet wel door bevoegd gezag worden toegestaan.

Het verschil in effecten op de bodem tussen de eerste optie met 1 doublet en een 'normale' OBES wordt in paragraaf 2.5 verder uitgewerkt.

Naast deze specifieke optimalisatiemogelijkheid voor de toepassing van aquathermie met OBES zijn er ongetwijfeld meer mogelijkheden voor optimalisatie, die ook bij een normale OBES kunnen worden toegepast. Deze worden hier verder buiten beschouwing gelaten.

Hogere temperatuur warme bel een kans?

In een warme bel kan meer warmte worden opgeslagen door de temperatuur in die bel te verhogen van de gebruikelijke circa 18 °C tot de toegestane grens van 25 °C. Daardoor hoeft de warmtepomp minder hard te werken, wat het energieverbruik vermindert. Hoe kleiner namelijk het temperatuurverschil tussen de warmtebron en het verwarmingssysteem, hoe lager in principe het energieverbruik van de warmtepomp, – afhankelijk van het type en met de kanttekening dat deze minder efficiënt wordt bij een lager debiet – en hoe hoger de prestatiecoëfficiënt (Coefficient Of Performance). Door de opgeslagen temperatuur dicht bij de benodigde temperatuur te brengen, wordt de OBES zelf ook energie-efficiënter, omdat water minder hoeft te worden verpompt. Daarbij is een juist ontwerp en beheer van de installatie van groot belang, want de extra energie moet zo compact mogelijk worden opgeslagen, resulterend in een zo hoog mogelijke temperatuur, niet in een groot volume. Althans, niet al te groot, want het gaat om het vinden van een optimum. Door het

gebruik moet de warmtepomp immers wel in staat blijven de temperatuur weer voldoende te verlagen voor de daaropvolgende koude-opslag bij de gewenste temperatuur.

2.3 Aquathermie als enige bron?

Aquathermie en OBES vormen een goede combinatie, omdat de eerste efficiënte opslag nodig heeft en de tweede evenwicht in koude- en warmtevraag. Aquathermie is een bron waarvan de capaciteit in de tijd flexibel is. Daardoor kan deze bron voor evenwicht zorgen in de OBES.

In de huidige praktijk zijn nog geen voorbeelden bekend van OBES die als enige externe bron aquathermie gebruiken. In de praktijk worden OBES tot nu toe gevoed door bijvoorbeeld (overschotten in) warmtenetten, zonnecollectoren en gekoelde zonnepanelen als opties om het systeem in balans te houden. Bestaande systemen zoeken zoveel mogelijk naar evenwicht in koude- en warmtevraag zodat externe bronnen voor balans in de OBES slechts beperkt noodzakelijk zijn.

En als een OBES voor warmtelevering aanwezig is, is het vervolgens efficiënt die ook voor koeling te gebruiken. Aquathermie is vooral effectief voor het herstellen van de structurele onbalans in de warmte- en koudevraag.

In theorie is het mogelijk een OBES zo in te richten dat de onttrokken warmte voor de verwarming van woningen volledig wordt gecompenseerd door de aquathermiebron.

2.4 Benodigde orde grootte OBES

WarmingUP richt zich op grootschalige toepassing van aquathermie. In deze studie worden daarin de mogelijke obstakels vanuit de bodem gezien geëvalueerd. Om gevoel te krijgen voor de orde grootte van de benodigde OBES-systemen worden hier enkele kentallen gegeven. Gedacht kan worden aan systemen voor bijvoorbeeld 300, 3.000 of 30.000 woningen. In Tabel 2-1 zijn daarvoor enkele kentallen opgenomen.

Tabel 2-1 Globale kentallen aquathermie + OBES

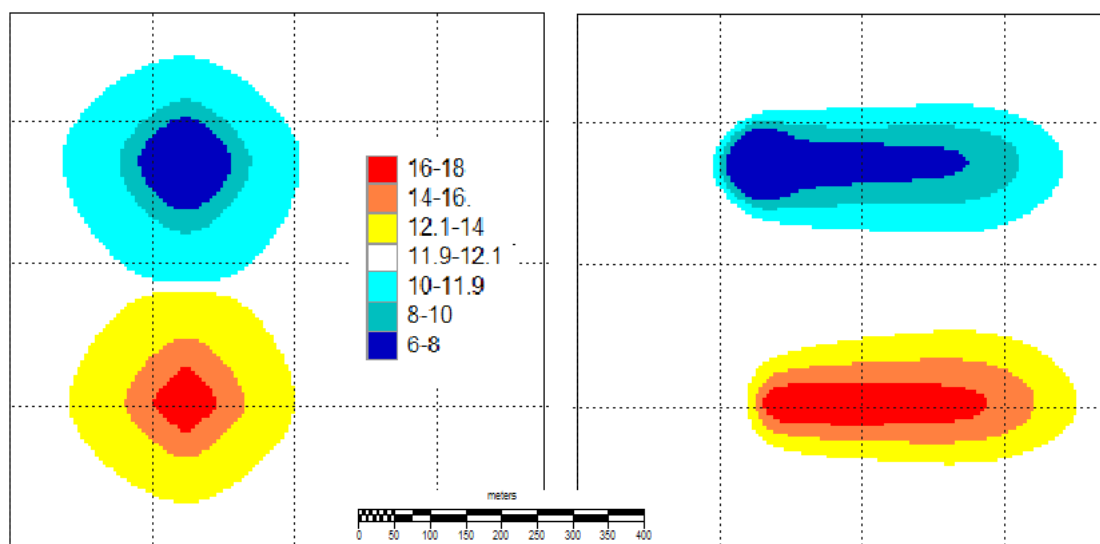
Aantal woningen	Representatief voor	Warmtevraag per jaar in TJ ¹⁾	Debiet in m ³ per seizoen ²⁾	Benodigde doubletten	Kosten aanleg miljoen€
300	Huizenblok / straat	9	225.000	1 à 2	0,2-0,4
1.000	Woonwijk	30	750.000	2 à 4	0,4-0,8
3.000	Woonwijk / dorp	90	2.250.000	6 à 12	1,2-2,4
30.000	Stad	900	22.500.000	140	28
60.000	Nijmegen	1.800	45.000.000	280	56

1) TJ = terajoule = 10¹² joule

2) OBES-debietten. De aquathermiedebieten zullen groter kunnen worden om het temperratuurverschil in het oppervlaktewater te beperken

2.5 Ontwikkeling koude en warme bel en ontwerpoptimalisaties

Hoe warme en koude bellen zich door het bedrijven van een OBES ontwikkelen hangt sterk af van de specifieke lokale omstandigheden. Daarnaast zijn vele ontwerpoptimalisaties mogelijk die de omvang en vorm van de bellen beïnvloeden. Figuur 2-2 geeft een algemeen beeld van de te verwachten ontwikkeling van de koude en warme bel.



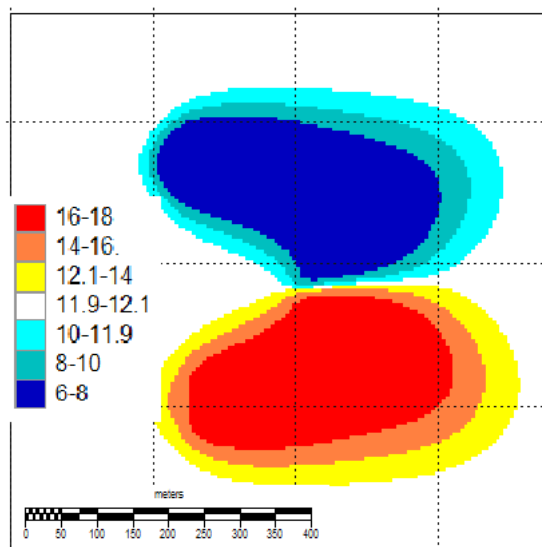
Figuur 2-3 Gemodelleerde warme en koude bellen zonder (links) en met (rechts) achtergrondstroming in het grondwater

De ontstane koude en warme bel horen bij een OBES ontworpen voor ca. 300 woningen met een totale warmtevraag van 9 TJ. Bijbehorend debiet per seizoen verpompt is 225.000 m³. Het linker plaatje illustreert de situatie zonder achtergrondstroming, het rechter plaatje is de situatie met een achtergrondstroming van 20 m/jaar. Ter indicatie, de diameter van de ontstane warme en koude

bellen is ca. 300 m in de figuur links en de uitgesmeerde bel in de figuur rechts is ca 200 bij 500 m als gevolg van de achtergrondstroming. Zie voor meer toelichting Bijlage A.

Ontwikkeling koude en warme bel bij alternatieve variant OBES bij aquathermie

De ontwikkeling van de koude en warme bel bij de alternatieve variant van OBES in paragraaf 2.2 bij de situatie met achtergrondstroming is ook gemodelleerd en wordt gevisualiseerd in Figuur 2-4.



Figuur 2-4 Gemodelleerde warme en koude bel met inzet neutrale bron

De achterliggende berekeningen en de voor- en nadelen van een dergelijke optimalisatie zijn verder beschreven in Bijlage A. De grootte van de resulterende bel is ca 300x500 meter en is dus groter dan bellen bij de 'normale' OBES. Een dergelijk systeem brengt wel een complex optimalisatievraagstuk met zich mee waarbij het gehele warmtenet, inclusief variatie in warmtevraag en -aanbod, prijs van elektriciteit op het moment dat het nodig is, de eisen voor de warmtebalans, etc. , moet worden beschouwd.

2.6 Mogelijke effecten van OBES

De met grootschalige toepassing van aquathermie gepaard gaande opschaling van OBES mag de functies die de bodem vervult niet beïnvloeden. Hiervoor is regelgeving van toepassing: zie ook § 2.5. De aandachtspunten die in het Innovatieplan zijn geïdentificeerd zijn:

1. Structurele opwarming van de ondergrond;
2. Beïnvloeding van de grondwaterkwaliteit;
3. Drukke in de ondergrond, conflicten met andere functies van de bodem.

Structurele opwarming van de bodem moet worden voorkomen. Hiervoor worden eisen gesteld aan de opslagtemperatuur waarop wordt ingegaan in hoofdstuk 3. Opwarming is, bij voldoen aan deze eis, nog steeds mogelijk indien energetisch evenwicht ontbreekt. Dit wordt in hoofdstuk 4 behandeld.

Voorts wordt (ondergrondse) infrastructuur aangelegd op andere locaties en dieptes (warmtenetten, putfilters, stijgbuizen e.d.) die voor wederzijdse thermische beïnvloeding kunnen zorgen. Belangrijk is de interactie tussen OBES en drinkwaterwinning. Ook is interactie tussen bijvoorbeeld warmtenetten en drinkwaterleidingen van belang met temperatuur-effecten op het ondiepe ecosysteem. Deze aspecten worden onderzocht in een flankerende studie van WarmingUP.

Grootschalige toepassing van OBES kan invloed hebben op de grondwatersamenstelling. Zowel verplaatsing van gebiedsvreemd water als verontreinigingen kunnen de situatie in de ondergrond veranderen. Hoofdstuk 5 gaat in op de problematiek van de waterkwaliteit, hoofdstuk 6 gaat in op de kansen die OBES bieden om verontreinigingen te saneren.

Grootschalige toepassing van aquathermie in combinatie met OBES is, zoals blijkt uit de kentallen in § 2.3, geen sinecure. Dit lijkt een enorme planmatige uitdaging. De vraag wordt hierom vaak gesteld of ordening van OBES-systemen, een ruimtelijk plan of ruimtelijk kaders voor de toekomst voor de ontwikkeling van de ondergrond een oplossing kan bieden. Dit aspect wordt in H7 onderzocht.

Veel OBES worden in de huidige situatie uitgelegd op een individueel gebouw. In die relatief eenvoudige situatie zijn al uiteenlopende belangen te onderscheiden tussen de gebouweigenaar, exploitant, gebruiker etc. ten aanzien het leveren van de dienst en de kosten-doorberekening. Hier zijn beleidsmatige en juridische aspecten van belang die invloed hebben op inrichting en beheer van het systeem. In de warmtewet stelt dat de overheid voorwaarden aan de partijen die in aanmerking kunnen komen voor de aanleg en het beheer van een warmtenet. De vraag is op welke andere prestatie-kenmerken een systeem kan worden beoordeeld zodanig dat geen sprake meer zal zijn van een energetische en/of technisch optimale toepassing maar van haalbare oplossingen. Denk bijvoorbeeld aan de keuze voor hoge-temperatuurnetten in plaats van lage-temperatuurnetten om problemen bij warmtelevering te voorkomen. Deze aspecten zijn onderwerp van onderzoek in thema 6 van WarmingUp.

2.7 Regels bodemenergie

Het Wijzigingsbesluit bodemenergiesystemen (Wbbe) regelt via de Wet milieubeheer, de WaterWet en de Wet Bodembescherming welke regels er voor bodemenergiesystemen gelden. Deze regels gaan beleidsneutraal over in de Omgevingswet, waarin het Besluit Activiteiten Leefomgeving (BAL). De belangrijkste regels staan hieronder, voor meer detail verwijzen we naar de webpagina's over de wetten, besluiten en regels, bijvoorbeeld <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stb-2013-112.html>.

- Open systemen zijn vergunningsplichtig, voor de meeste systemen geldt een verkorte effectenstudie en korte procedure. Als het een heel groot systeem is of er zijn veel andere systemen in de buurt is een lange procedure en uitgebreide effectenstudie nodig. De provincies zijn bevoegd gezag.
- Voor gebieden waar veel OBES en/of GBES komen kunnen gemeenten en/of provincie aparte of aanvullende regels opstellen, om optimaal gebruik van de ondergrond te waarborgen
- Bedrijven die bodemenergiesystemen ontwerpen, aanleggen en beheren moeten een erkenning hebben. Voor de ondergrondse systemen op grond van de BRL 11000 en 2100. Voor de bovengrondse systemen op grond van de BRL 6000-21. Via deze regels wordt de

werking van het systeem gewaarborgd en dat er bij de boring, installatie en verlaten van het systeem geen negatieve effecten plaatsvinden op de bodem.

3 Opslagtemperatuur

3.1 Inleiding

Ten behoeve van de effecten van OBES is reeds onderzoek gedaan naar de gewenste maximale opslagtemperatuur (Bonte, 2015, Koenders et al., 2012, KWR, 2019, Schout en Bloemendal, 2020). Op grond van dit onderzoek is de grens van 25°C als maximale infiltratie temperatuur in regelgeving vastgelegd (Schultz van Haegen, 2013). Het ligt voor de hand om bij de seizoensopslag van uit oppervlaktewater geogste thermische energie hierop aan te sluiten. Dat resulteert in een maximale infiltratietemperatuur van 25°C, die in dit hoofdstuk is onderbouwd.

3.2 Totstandkoming 25°C grens

De in Nederland geldende maximale infiltratietemperatuur voor standaard open bodemenergiesystemen (OBES) is 25°C. Omdat koelte door de klimaatopwarming een schaars goed is, geldt geen minimale infiltratietemperatuur voor OBES. Om bevroering in de verdamper van de installatie te voorkomen, zal die in de praktijk ook nooit lager kunnen liggen dan ca 5°C. Bij gesloten bodemenergiesystemen is de minimale temperatuur in de bodemlus -3°C.

Bij de eerste toepassingen van OBES eind jaren '80/begin jaren '90 is de 25°C-grens voor het eerst gehanteerd voor deze systemen. Dit was verankerd in het Grondwaterbesluit en is in 2012 beleidsneutraal overgenomen in het Waterbesluit (i.v.m. het opgaan van de Grondwaterwet in de Waterwet). De 25°C-grens was destijds ingegeven vanuit het Drinkwaterbesluit waarin is gesteld dat drinkwater aan de tap niet warmer mag zijn dan 25°C.

In 2013 zijn door het Wijzigingsbesluit bodemenergiesystemen (Wbbe) verschillende regels en voorschriften gewijzigd voor bodemenergiesystemen (Schultz van Haegen, 2013). Bij de totstandkoming van het Wbbe is geëvalueerd of de grens voor de maximale infiltratietemperatuur moest worden aangepast. In de periode 2008-2012 is door de bodemenergiebranche en drinkwatersector wetenschappelijk praktijkgericht onderzoek uitgevoerd naar de effecten van OBES op de grondwaterkwaliteit. Hierbij is ook het effect van de temperatuurverandering beschouwd. Op basis van de uitkomsten van deze onderzoeken is vastgesteld dat bij verandering van de grondwatertemperatuur tot 25 à 30°C geen (noemenswaardige) nadelige water kwaliteitseffecten optreden (Bonte, 2013; Bonte et al., 2013; Koenders, 2012).

3.3 Beschouwde effecten bij temperatuur verandering tot 25°C

De aspecten die zijn beschouwd bij het onderzoek naar de effecten van temperatuurverandering tot 25°C zijn:

- Mobilisatie van zware metalen/sporen elementen
- Microbiologie
- Mineraalevenwichten

- Redoxcondities
- Reactiesnelheden

Bij geen van bovengenoemde aspecten zijn als gevolg van temperatuurveranderingen tot 25°C noemenswaardige veranderingen vastgesteld (Bonte, 2013; Koenders, 2012).

3.4 Maatwerk

Vanwege de rol die de ondergrond speelt en kan spelen in de energietransitie hebben bevoegde gezagen de vrijheid om ook hogere infiltratietemperaturen toe te staan. Dit kan alleen “indien het belang van de bescherming van de bodem zich daartegen niet verzet” (artikel 6.11b – lid 2, Waterbesluit en artikel 3.16j - lid2, Activiteitenbesluit Milieubeheer). Dit gebeurt doorgaans binnen pilots die met aanvullende voorschriften worden vergund (zie kader). Thema 5 van WarmingUP (WINDOW) richt zich specifiek op OBES met hogere opslagtemperaturen. In dat thema wordt ook gekeken naar de effecten van hogere opslagtemperaturen. Daarom wordt hier in dit rapport verder niet op ingegaan.

Kader: Uit de Nota van toelichting van het Wbbe (Schultz van Haegen, 2013)

§ 7.2 De temperatuur van het water

In open bodemenergiesystemen is de temperatuur van het retourwater naar de koudebron in de praktijk minimaal 6°C. De temperatuur van het retourwater naar de warmtebron is doorgaans maximaal 25°C. Het retourwater mengt zich met het aanwezige grondwater. De gemiddelde temperatuur van het grondwater zal daarom in de koudebron hoger zijn dan 6°C en in de warmtebron lager dan 25°C. Bij het ontwerp van een bodemenergiesysteem wordt uitgegaan van een temperatuur van het grondwater in de koudebron van 8°C tot 10°C en in de warmtebron van 16°C tot 18°C. Ten opzichte van de in Nederland heersende bodemtemperatuur van 10°C tot 12°C is deze temperatuursverandering niet zodanig dat de Technische Commissie Bodem (TCB) veranderingen verwacht in de andere functies die de bodem voor mens, plant en dier vervult. Daarom ziet de TCB geen problemen voor de bodem bij de huidige temperatuurgrenzen van het retourwater.

Bij temperaturen hoger dan 25°C versnelt de microbiële afbraak van organisch bodemmateriaal (mineralisatie). De chemische oxidatie versnelt eveneens, mogelijk zelfs meer dan de microbiële afbraak. Bij temperaturen boven de 45°C is de mobilisatie van organisch koolstof groot, waardoor onder meer het opgelost organisch koolstof en het gebruik van chemisch zuurstof in het grondwater toenemen. Het bufferend vermogen van organisch bodemmateriaal voor verontreinigende stoffen, organische microverontreinigingen en sporenelement neemt hierdoor af. Wanneer de maximale retourtemperatuur van het in de bodem teruggebrachte water op 25°C wordt gesteld, verwacht de TCB in de praktijk geen negatieve invloed op de bufferende werking. Er treedt dan geen nadelige invloed op het bodemleven op en chemische evenwichten in de bodem worden niet verstoord.

In het Wijzigingsbesluit bodemenergiesystemen is het advies van de TCB gevolgd. Voor open bodemenergiesystemen is een maximale retourtemperatuur van het geïnjecteerde water op 25°C gesteld. Voor gesloten bodemenergiesystemen kan van een iets hogere temperatuur worden

uitgegaan. De retourvloeistof komt daarbij niet in direct contact met de bodem. Het thermische invloedsgebied is bovendien bij gesloten systemen veel kleiner dan bij open systemen. Daarom is de temperatuur van de circulatievloeistof op ten hoogste 30°C vastgesteld.

In uitzonderingsgevallen kan het bevoegd gezag bij maatwerkvoorschrift een hogere temperatuur toestaan. Voor Hoge Temperatuur Opslag kan een hogere temperatuur worden toegestaan in de watervergunning. Bij een hogere temperatuur is vaak een hoger energierendement haalbaar. Er moeten dan zo nodig voorschriften worden gesteld ter bescherming van de bodem en het grondwater tegen de gevolgen van opwarming door het aanleggen van een warmtebron.

In 2012 is de eerste fase van het onderzoeksprogramma Meer Met Bodemenergie afgerond. Uit het temperatuuronderzoek blijkt dat in het traject van 25°C tot 30°C geen significante veranderingen in de chemische en biologische kwaliteit van het grondwater optreden maar dat er wel dichtheidsstromingen kunnen plaatsvinden. Bovendien leverde ander onderzoek van de drinkwatersector op dat er binnen dit temperatuurtraject mogelijk wel effecten kunnen optreden bij arseen en sulfaat. Daarom is afgezien van een verhoging van de maximale retourtemperatuur, zoals bepleit tijdens de inspraak op het ontwerpbesluit. Voor gesloten bodemenergiesystemen geldt naast de hoogste temperatuur ook een laagste temperatuur van de circulatievloeistof in de retourbuis. De laagste temperatuur is -3°C waarmee wordt voorkomen dat de bodem bevriest en de goede werking van het bodemenergiesysteem zelf wordt geschaad.

2.5 Conclusies over opslagtemperatuur

Voor bodemenergiesystemen is een maximale infiltratietemperatuur van 25°C bepaald, die door middel van onderzoek is onderbouwd en in Nederland wettelijk bekrachtigd. De bij het oogsten van thermische energie uit oppervlaktewater benodigde seizoensopslag in de bodem komt overeen met wat in conventionele bodemenergiesystemen gebeurt. Het is daarom logisch dezelfde maximumtemperatuur te hanteren. Het is ook praktisch om goed bij de vergunningsprocedures voor toepassing bodemenergiesystemen aan te sluiten. Deze maximumtemperatuur brengt nauwelijks beperkingen met zich mee omdat oppervlaktewater doorgaans niet tot boven 25°C opwarmt.

4 Verschillen in energievraag en -aanbod

4.1 Inleiding

Een potentiële barrière voor OBES, die vaak aan WarmingUP is voorgelegd, is het ontbreken van evenwicht in de seizoensopslag van warmte en koude door verschillen en variaties in energievraag- en aanbod, waardoor structurele opwarming of afkoeling mogelijk is. In dit hoofdstuk wordt dit probleem geëvalueerd en wordt bekeken hoe zich dat verhoudt met aquathermie. Daarbij wordt uitgegaan van een combinatie van aquathermie en OBES.

Omdat koelte door het veranderend klimaat een schaars goed wordt en enigermate tegenwicht biedt aan het opwarmen van de steden (het stedelijke warmte-eilandeffect) is afkoeling van de bodem minder erg, en wordt daarom tegenwoordig vaak in zekere mate toegestaan. Echter, het structureel opwarmen of afkoelen van de bodem is vanuit het perspectief van duurzaam bodembeheer ongewenst. Daarbij kunnen uitdijende thermische zones een negatief effect hebben op de werking van naburige OBES.

Om structureel opwarmen of afkoelen van de bodem te voorkomen wordt in Nederland bij de vergunningverlening door provincies (in dezen het bevoegde gezag) geëist dat de koelte- en warmte-onttrekking in evenwicht is over een periode van vijf jaar¹.

Er zijn verschillende oorzaken dat dit evenwicht in onttrekking van warmte en koude onder druk kan komen te staan:

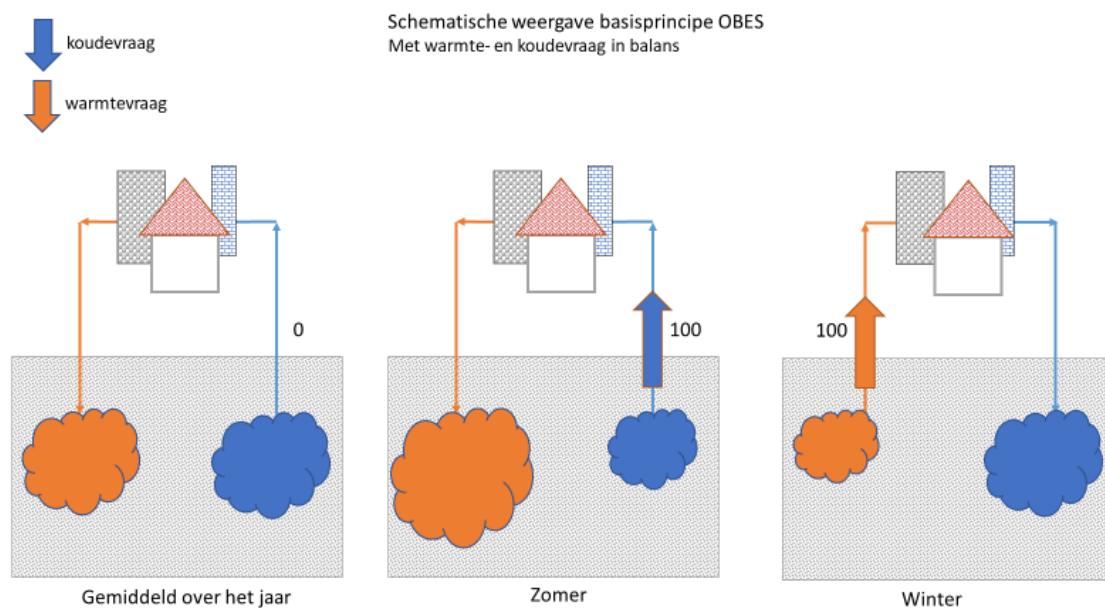
1. Periodieke verschillen als gevolg van seizoensvariaties; waardoor tijdelijk minder of meer wordt onttrokken dan opgeslagen
2. Structurele verschillen: Als warmte- en koudevraag niet in evenwicht zijn, waardoor structureel meer warmte of koude wordt onttrokken dan opgeslagen;

In de volgende paragrafen worden de periodieke en structurele verschillen in vraag en aanbod van warmte en koude geëvalueerd. In de daaropvolgende paragraaf wordt ingegaan op het versturende effect van de achtergrondstroming die de verschillen kan vergroten. In de voorlaatste paragraaf worden illustratieve berekeningen gepresenteerd. Tot slot worden integrale conclusies getrokken over de effecten op de bodem van energetische disbalansen.

4.2 Periodieke verschillen

Idealiter zal door een OBES elke winter alle in de zomer opgeslagen warmte en elke zomer de volledige in de winter geproduceerde koude precies worden gebruikt, zie Figuur 4-1.

¹ Voor een disbalans in uit oppervlaktewater onttrokken thermische energie en de ecologische effecten van resulterende temperatuurverhogingen of -verlagingen in sloten, vijvers, kanalen en meren wordt verwezen naar een (eveneens binnen 3B) uitgevoerde studie, waarvan de resultaten zijn weergegeven in het 'Monitoringsplan Ecologische Effecten Thermische Energie Oppervlaktewater'.



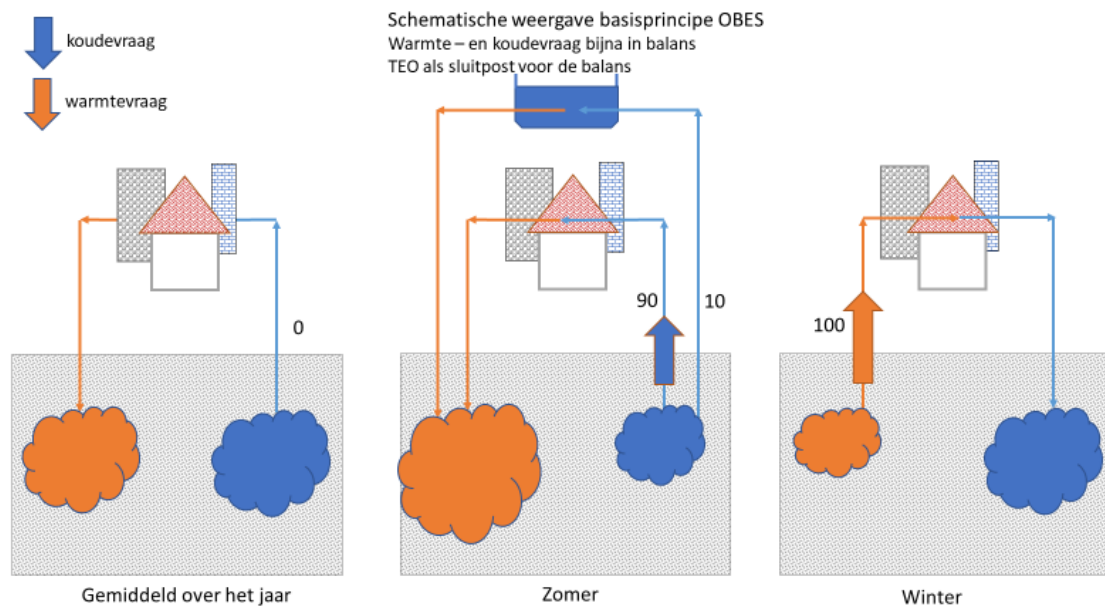
Figuur 4-1. Schematische weergave OBES

Indien het jaar na een hete zomer de wintermaanden relatief warm zijn, zal een deel van de opgeslagen warmte dat seizoen niet worden gebruikt. Hetzelfde geldt voor opgeslagen kou, als een strenge winter wordt gevolgd door een koude zomer. Frisse zomerseizoenen en zachte winterperioden kunnen juist leiden tot te weinig opgeslagen warmte en kou. Hierdoor is er tijdelijk geen evenwicht in vraag en aanbod. Omdat geen jaar hetzelfde is, wordt bij de vergunningverlening uitgegaan van perioden van 5 jaar waarbinnen thermisch evenwicht, dus een balans tussen warmte en koude, moet worden gerealiseerd.

Om periodiek in balans te zijn, is het voor OBES van belang dat deze regeneratievoorzieningen hebben om, al naargelang de vraag, extra warmte of koude te kunnen invangen.

(Bijschakeling van) Aquathermie biedt mogelijkheden om bij te sturen. Een tekort aan warmte of koude kan met behulp van thermische energie uit het oppervlaktewater worden gecompenseerd. Dit kan door achteraf die thermische energie op te slaan waarvan een tekort ontstaat maar ook door te anticiperen op de verwachte hoeveelheden warmte of koude die in de bodem over het seizoen zullen worden opgeslagen.

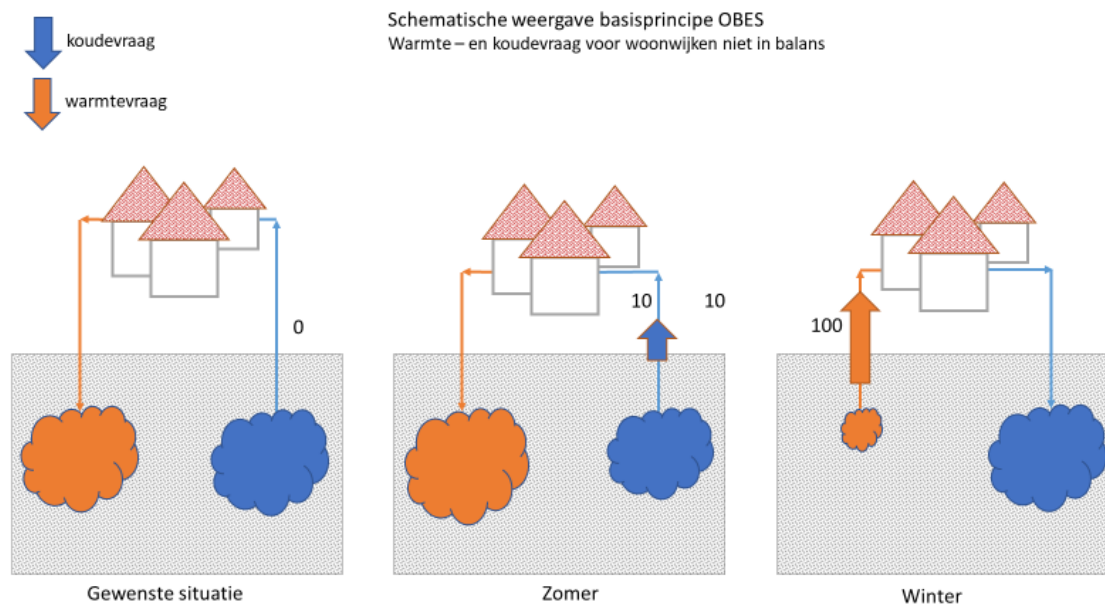
De potentiële barrière voor OBES die ontstaat door de verschillen in energievraag en -aanbod over de seizoenen wordt dus juist weggenomen door de combinatie met TEO, zie Figuur 4-2. Zie hiervoor verder tevens § 4.3.



Figuur 4-2 Bijsturen met TEO om energetisch beter te balanceren

4.3 Structurele verschillen

Een OBES wordt normaal gesproken zo ingericht dat warmte en koudevraag met elkaar in evenwicht zijn. Op die manier wordt voorkomen dat koude- of warmte-onttrekking overheerst, waardoor het gevraagde evenwicht niet in gevaar komt. Dat is niet altijd eenvoudig te realiseren. Bij kantoorgebouwen is veelal meer koude nodig dan warmte, waardoor een steeds grotere warme grondwaterbel ontstaat, terwijl de koude bel voor het eind van de zomer verdwijnt. Bij woonwijken overstijgt juist de warmtevraag de koudevraag, met als gevolg het opraken van het opgewarmde grondwater voordat de winter voorbij is. Dat is in Figuur 4-3 geïllustreerd.



Figuur 4-3. Onbalans bij toepassing OBES in woonwijken

Indien we ons richten op de energievoorziening voor woonwijken (= focus van WarmingUp) dan kan een onbalans worden verwacht. De warmtevraag zal (zeker voor de oudere woningen) de koudevraag overstijgen. Als de vraag naar verwarming en koeling bij OBES niet in evenwicht zijn, moeten creatieve oplossingen worden gevonden. Dat kan enerzijds door meerdere typen gebruikers aan elkaar te koppelen, anderzijds door andere bronnen van warmte/koude op de OBES aan te sluiten.

Bijschakelen van energiebronnen

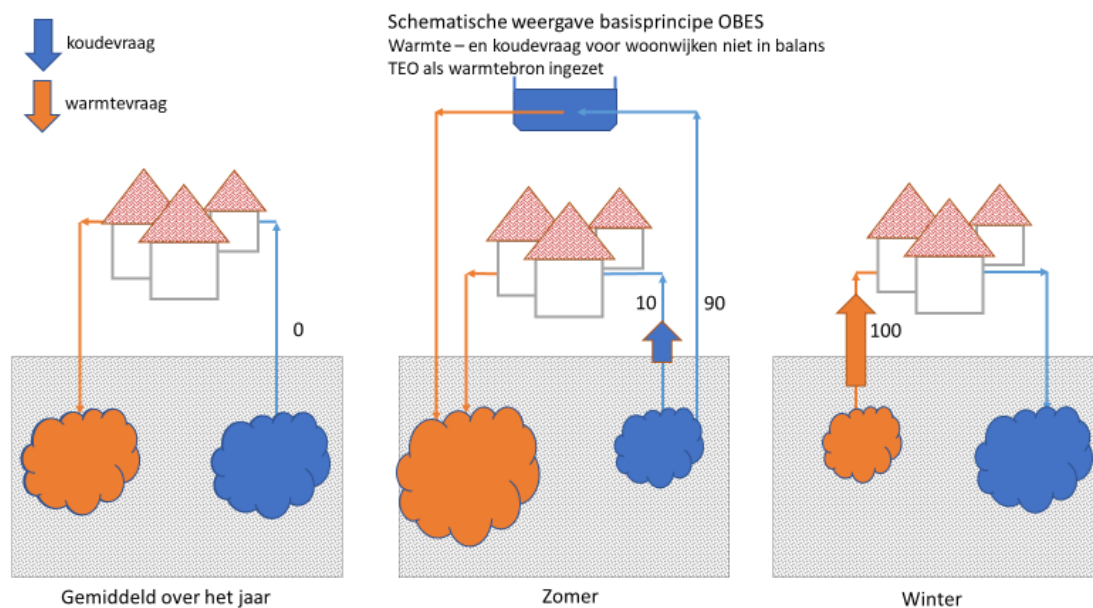
Een alternatieve oplossing voor het gebrek aan evenwicht in de energievraag bij OBES is het bijschakelen van andere energiebronnen. Zo kan bijvoorbeeld extra warmte worden gegenereerd met zonnecollectoren. Maar ook oppervlaktewateren fungeren als collector van zonne-energie. Beide vangen vooral in de zomer veel warmte, die voor gebruik in de winter kan worden opgeslagen in de bodem. Daarnaast worden fotovoltaïsche cellen – die bijvoorbeeld de energie van de pompen kunnen leveren – steeds vaker gekoeld, omdat bij opwarming het rendement terugloopt. Ook de warmte uit dit koelwater kan worden benut voor warmte-opslag in de bodem.

Gebruikers koppelen

Door verschillende typen gebruikers te koppelen kan bijvoorbeeld teveel vraag naar koeling van kantoorgebouwen gecompenseerd worden met de overheersende vraag naar verwarming van woningen. Die moeten dan echter wel in dezelfde omgeving zijn gelegen en dat is vaak niet het geval; in ieder geval is dat in woonwijken problematisch. Op bedrijventerreinen, waar allerlei gebouwen uiteenlopende klimaateisen hebben, zijn vaak wel maatoplossingen te realiseren. Toch vormt ook daar de ruimtelijke verdeling van gebruikers dikwijls een knelpunt omdat de kosten van een thermisch netwerk evenredig met de te overbruggen afstand oplopen.

Het koppelen van energiegebruikers en -bronnen zal alleen al, omdat dit gepaard gaat met grotere OBES met diverse koude en warme bellen ondergronds, eerder tot energetisch evenwicht leiden. Het combineren van diverse energiegebruikers en/of -bronnen geeft bovendien extra flexibiliteit ten opzichte van de gebruikelijke compensatiemechanismen (zie § 4.2) om de energiebehoeftes die afwijken van de voorspelling en variëren over de tijd op te vangen, evenals eventuele fouten in het ontwerp en andere onvoorziene zaken. Daaronder valt de hoeveelheid weglekkende warmte en koude als gevolg van achtergrondstroming van het grondwater (die ook weer in de tijd kan variëren door bijvoorbeeld onttrekkingen in de omgeving); zie § 4.4.

Koppeling met aquathermie is één van de mogelijkheden om daarvoor te compenseren. In verband met de kosten van het benodigde leidingwerk moet oppervlaktewater zich wel in de nabijheid van de gebruikers bevinden of daar worden gecreëerd en dienen WKO-putten strategisch te worden geplaatst. In ieder geval biedt aquathermie eveneens een kans voor het wegnemen van de potentiële barrière voor de toepassing van OBES van structurele verschillen in warmte- en koudevraag, zie Figuur 4-4.



Figuur 4-4. Bijsturen met TEO voor energetisch balanceren bij toepassing OBES in woonwijken

4.4 Verlies van warmte- en koude door achtergrondstroming

Natuurlijke achtergrondstroming zorgt voor het weglekken van warmte en koude uit een OBES. Afhankelijk van de stroomsnelheid van het grondwater en het volume van het opgeslagen warm en koude water zal een deel van dat water zich na een jaar niet meer in het intrekgebied van de bron bevinden. Uit een evaluatie in 2018 van een deel van de Nederlandse energiesystemen (Bloemendal 2018) blijkt dat op deze wijze significante verliezen kunnen optreden. Dat heeft twee gevolgen: (1) het grondwater stroomafwaarts van de warmte- / koudebron warmt ongewenst op of koelt onbedoeld af en (2) niet alle in de zomer opgeslagen warmte is beschikbaar voor de opvolgende winter. Voor dit laatste aspect zijn 2 mogelijke oplossingen: (a) voor het laden van nieuw warm water voor de volgende winter moet een extra hoeveelheid warmte worden opgeslagen en vanwege de balanseis zal dan ook extra koude aan de bodem moeten worden toegevoegd of (b) bij het ontwerp wordt rekening gehouden dat de retourtemperatuur van warm water voor het einde van de winter al oploopt waardoor er in de warmtepomp minder thermische energie per volume water kan worden gehaald.

Het weglekken van thermische energie in de bodem kan overigens worden beperkt door de filterlengte te optimaliseren (zie bovengenoemd proefschrift) en verder worden ondervangen door het slim plaatsen van de putten zodat die uiteindelijk het “ontsnapte” verwarmde of afgekoelde grondwater invangen.

Verlies van thermische energie zal altijd plaatsvinden, maar indien koude- en warmtevraag in evenwicht zijn, dan is het verlies van warmte en koude vergelijkbaar en is er geen invloed op het evenwicht.

4.5 Conclusies over variaties in energievraag- en aanbod

Omdat met aquathermie warmte in de zomer wordt geoogst en koude in de winter nodig is, vraagt aquathermie seizoensopslag van warmte in de bodem. Daarom kan aquathermie niet zonder OBES. Barrières voor OBES zouden daarmee ook een obstakel kunnen vormen voor de toepassing van aquathermie. Maar voor een belangrijke barrière bij de toepassing van OBES, verschillen en variatie in warmte- en koude vraag en -aanbod, kan aquathermie juist bijdragen aan een oplossing omdat tekorten van thermische energie kunnen worden gecompenseerd met warmte of koude uit oppervlaktewater. Daarenboven zal het de energie-efficiëntie van OBES kunnen verhogen. Dit betekent niet alleen dat aquathermie en OBES goed samengaan maar ook dat gebruik van thermische energie uit oppervlaktewater zonder seizoensopslag lastig is. Aquathermie wordt vooral ingezet voor het herstellen van de structurele onbalans in de warmte- en koudevraag.

Door weersvariaties in de seizoenen treden er altijd tijdelijke onbalanssituaties op. Vandaar dat de provincie stelt dat eens per 5 jaar een OBES energetisch in balans moet zijn. Om over zo'n periode in balans te kunnen zijn, is het voor OBES van belang dat deze regeneratieve voorzieningen hebben om, al naargelang de vraag, extra warmte of koude te kunnen invangen. Een TEO-systeem kan als flexibele regeneratievoorziening dienen en OBES helpen om de energiebalans te handhaven.

Uit dit hoofdstuk blijkt dat koppeling van aquathermie aan OBES kan bijdragen aan het verevenen van een disbalans en het verhogen van de energie-efficiëntie. Met een doordacht ontwerp en een juiste inregeling kan het potentiële probleem van zowel een periodieke als een structurele disbalans in warmte- en koudevraag bij OBES worden omgebogen naar het voordeel van een veel robuuster en efficiënter duurzaam energiesysteem door het combineren van energiegebruikers en -bronnen, waaronder aquathermie.

5 Effect van OBES op de verspreiding van verontreinigingen

5.1 Inleiding

Binnen de Nederlandse energietransitie speelt de bodem een belangrijke en steeds grotere multifunctionele rol (DeltaFacts, 2020; Henssen et al., 2012). Daarbij moet worden gedacht aan grondwater voor gebruik van drinkwater, energieopslag, zoetwateropslag, waterzuivering, gebruik voor de bouw etc. De toename van de vraag naar duurzame energie betekent dat het aantal bodemenergiesystemen toeneemt, meestal in grotere steden en de bebouwde gebieden. Verstedelijking en industrialisatie heeft geleid tot een groot aantal verontreinigde locaties binnen stedelijke gebieden. Het gevolg is dat bodemenergiesystemen steeds meer worden geïnstalleerd binnen of dichtbij verontreinigd grondwater (Dinkla, Lieten, Hartog, et al., 2012; Verburg et al., 2010). Bovendien is de vraag naar ondergrondse ruimte voor de opslag van thermische energie in stedelijke gebieden vaak ook groter dan het aanbod, daarom worden bodemenergiebronnen vaak dichtbij elkaar aangelegd (Bloemendal et al., 2014). Een zorg is welke effecten deze systemen, en de interactie van deze systemen, zouden kunnen hebben op de verspreiding of de verdunning van verontreiniging en welke factoren de risico's bepalen voor omliggende gebieden. Dit is met name het geval bij de toepassing van open bodemenergiesystemen (OBES, Figuur 1-1) omdat bij deze systemen grondwater wordt onttrokken en simultaan wordt geïnfiltrerd, wat menging, verdunning en verspreiding van verontreinigingen tot gevolg heeft.

In dit hoofdstuk geven we een overzicht van processen die de verspreiding en verdunning van verontreinigingen veroorzaken als gevolg van de interactie van verontreinigd grondwater met OBES.

5.2 Stedelijke verontreinigingen

Veel voorkomende verontreinigingen in steden zijn onder andere koolwaterstoffen (b.v. benzeen, toluen, ethylbenzeen en xyleen, gezamenlijk bekend als BTEX) en gechloreerde koolwaterstoffen (VOC's) (Ni et al., 2016; W. Sommer et al., 2013). VOC's zijn ontvettings- en reinigingsmiddelen die veel gebruikt worden in de stomerij en de industrie (Bradley, 2000). Veel voorkomende bronnen van (historische) koolwaterstofverontreiniging zijn lekkende ondergrondse opslagtanks, pijpleidingen, afvalputten, evenals onopzettelijke vermorsingen tijdens verwerking en/of transport (Alvarez et al., 2006). Zowel VOC's als koolwaterstoffen zijn een bron van zorg vanwege het risico voor de volksgezondheid en de persistentie in het milieu. De verspreidingsmechanismen voor verontreinigingen zullen voor de verontreinigingen in de aquifer zelf dezelfde zijn als voor bijvoorbeeld additieven in het OBES-systeem, en worden daarom niet afzonderlijk beschouwd.

VOC's en in het bijzonder tetrachlooretheen (PER), trichlooretheen (TRI), dichlooretheen (CIS) en vinylchloride (VC), worden vaak aangetroffen op de operationele diepte van OBES, 10 tot 250 meter onder de grondwaterstand (Zuurbier et al., 2013). VOC-pluimen ontwikkelen zich meestal door de langdurige oplossing uit een zaklaag (ook wel bekend als DNAPL, dense non-aqueous phase liquid) (Pankow et al., 1996). De aanwezigheid of afwezigheid van een DNAPL is een factor die bijdraagt aan de vraag of een vervuilende pluim wordt verspreid of verdund in de aanwezigheid van een OBES.

Wanneer een verontreiniging in de opgeloste fase aanwezig is, kan het mengen van verontreinigd grondwater met schoon grondwater de concentratie van de verontreiniging over een groter gebied verdunnen. In de aanwezigheid van een DNAPL kan het mengen een verbeterde oplossing van de DNAPL veroorzaken, wat leidt tot een verhoging van pluimvolume en -massa (Zuurbier et al., 2013). Verschillende processen dragen bij aan de verspreiding van de verontreiniging in de aanwezigheid van een OBES.

5.3 OBES en grondwaterverontreiniging

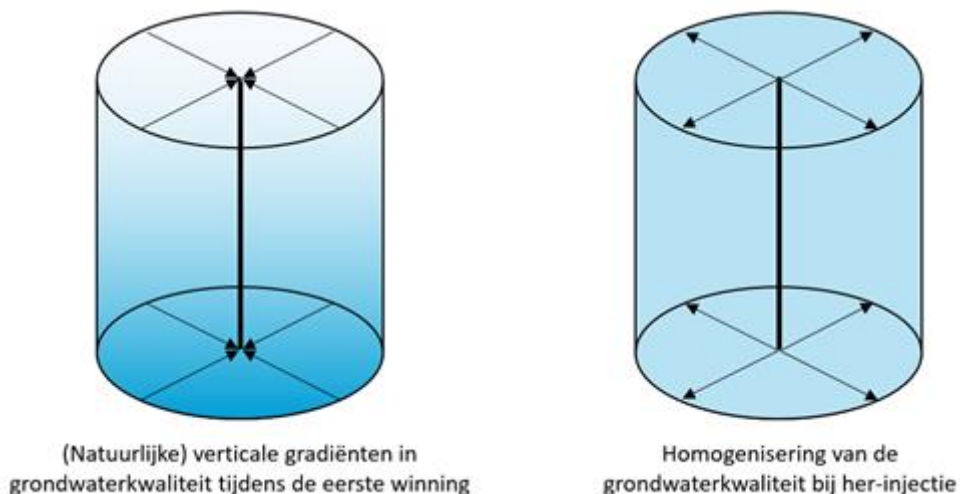
5.3.1 Effecten van afzonderlijke OBES

Door het onttrekken en weer infiltreren door OBES wordt het grondwater gemengd, neemt de dispersie² toe en verandert lokaal de grondwaterstroming richting en/of grootte. Versterkte grondwaterstroming kan leiden tot de verspreiding van verontreiniging buiten het oorspronkelijk gebied.

Wanneer een OBES in een verontreinigd gebied aanwezig is, kan het de verontreiniging via verschillende processen verspreiden en verdunnen:

Mengen van verticale watersamenstellingsgradiënten

Door het onttrekken van grondwater over de hele filterlengte van een OBES-bron worden variaties in watersamenstelling over de dikte van de aquifer gemengd en gehomogeniseerd (Figuur 5-1; Dinkla, Lieten, Hartog, et al., 2012; Bloemendal, M. and T. Olsthoorn, 2018). Verontreinigd grondwater kan zich tijdens de onttrekking mengen met schoon grondwater en zich in verticale richting verspreiden. Hoe groter het onttrokken en geïnjecteerde volume, hoe groter dit effect (Phernambucq, 2015).

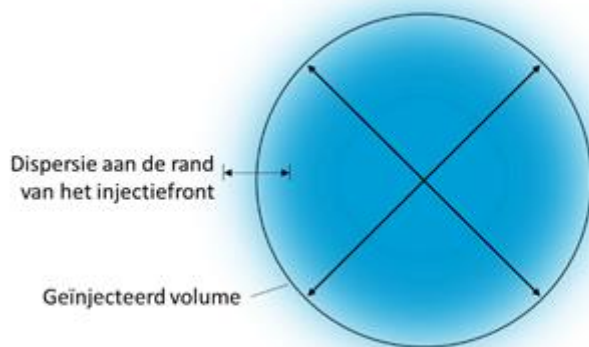


Figuur 5-1 Tijdens de onttrekking wordt grondwater met een natuurlijke verticale gradiënt in kwaliteit gemengd en tijdens de her-injectie wordt de grondwaterkwaliteit gehomogeniseerd. Dit kan leiden tot vermenging en verdunning van de in de watervoerende laag aanwezige verontreiniging

² Dispersie is menging van grondwater en vervlakking van concentratiegradiënten door diffusie en verschillen in stroomsnelheid in het watervoerend pakket. Dit proces wordt bepaald door de van plaats tot plaats in grootte en richting variërende snelheid van de waterdeeltjes in de poriën (mechanische dispersie) en door moleculaire diffusie.

Dispersie aan de randen van een geïnjecteerd volume

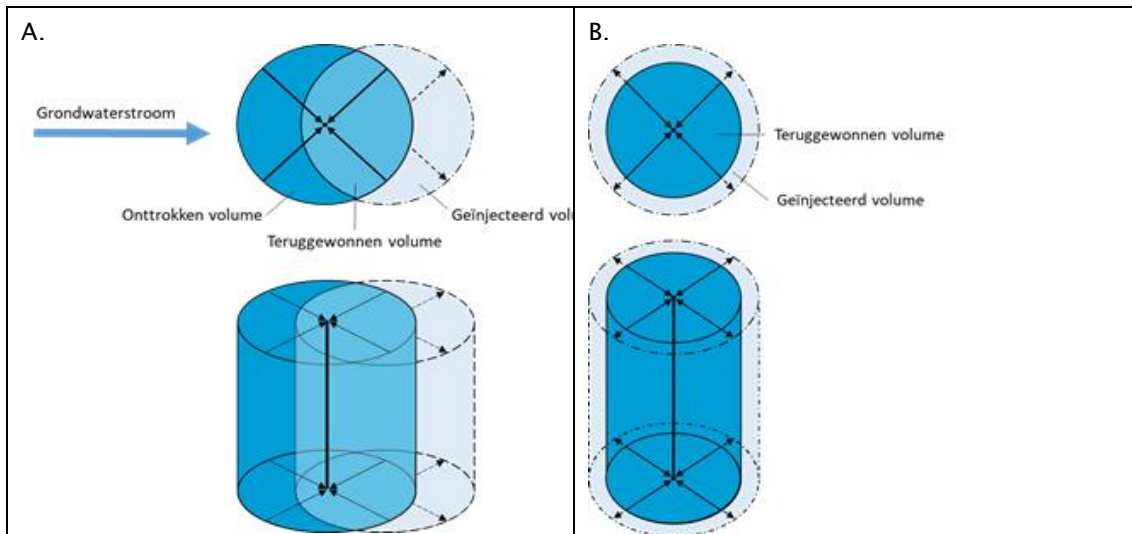
Dispersie mengt het geïnjecteerde grondwatervolume met het omgevingsgrondwater op de (hydraulische) grens van het geïnjecteerde volume (Figuur 5-2). Geïnjecteerd verontreinigd grondwater mengt zich zo met schoon omgevingsgrondwater en andersom, resulterend in grotere verontreinigde volumes. Hoe hoger de pompsnelheid en het watervolume, hoe hoger de mengeffecten van de dispersie op de verspreiding van de verontreiniging (Henssen et al., 2012). Als OBES systemen met volumebalans draaien, zorgt dispersie er voor dat de verontreinigingen zich verspreiden buiten de hydraulische invloedssfeer van het OBES.



Figuur 5-2 Dispersie aan de rand van het injectiefront kan leiden tot een verhoogde verspreiding van de verontreiniging, door het mengen van verontreinigd grondwater in het geïnjecteerde volume met het schone omgevingswater, of andersom.

Onvolledige terugwinning van het geïnjecteerde volume

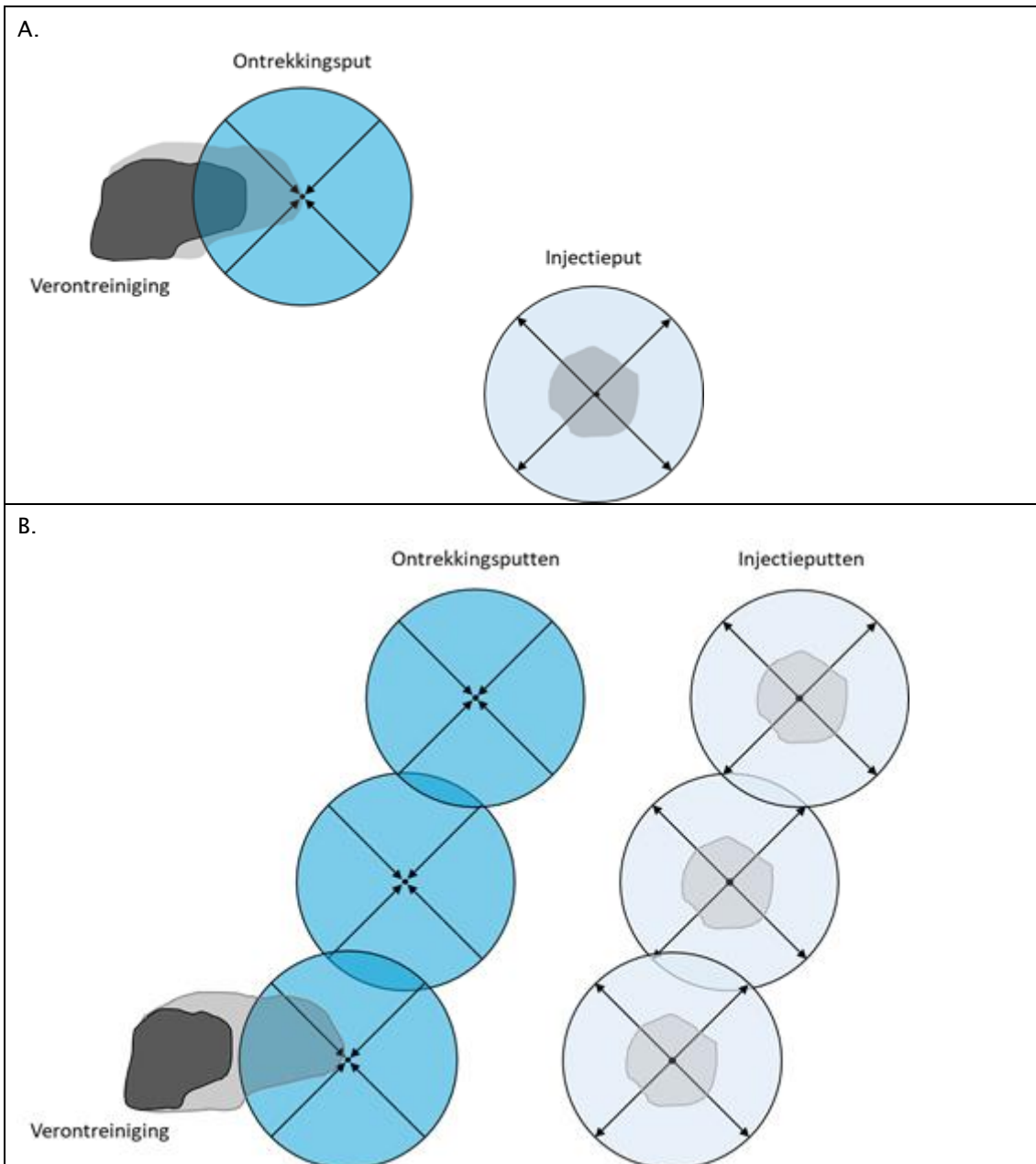
Als gevolg van de achtergrondstroming van het grondwater wordt het geïnjecteerde volume water in een OBES verplaatst in de tijd tussen de pompcycli (Figuur 5-3A; Bonte, 2013). Deze verplaatsing houdt in dat voor elke pompcyclus een deel van het geïnjecteerde volume niet volledig wordt teruggewonnen, maar wordt vervangen door grondwater van bovenstrooms, dat vervolgens tijdens de onttrekking wordt vermengd met het oorspronkelijke geïnjecteerde volume. Het niet-teruggewonnen deel blijft in de aquifer en stroomt verder stroomafwaarts. Deze vermenging van inkomend grondwater in de onttrekkingsfase verspreidt de verontreiniging tussen de injectie- en de onttrekkingsputten en de vermenging van het niet-teruggewonnen deel met het omgevingsgrondwater verspreidt de verontreiniging buiten het toestroomgebied van het systeem. De mate van verspreiding is afhankelijk van de natuurlijke grondwaterstroming ten opzichte van het opslagvolume (Phernambucq, 2015). Een onvolledige onttrekking van het geïnjecteerde volume kan ook het gevolg zijn van een structurele energieonbalans in de warme en koude vraag van het OBES. Als bijvoorbeeld de warmtevraag groter is dan de koudevraag, zal er meer koud water in de aquifer worden geïnjecteerd dan dat er wordt onttrokken (Figuur 5-3B). Op lange termijn kan dit resulteren in een steeds grotere koude zone die de verontreiniging verspreidt (Bloemendal et al. 2020). Het omgekeerde zal natuurlijk het geval zijn wanneer de koudevraag groter is dan de warmtevraag met hetzelfde resultaat.



Figuur 5-3 Onvolledige terugwinning van het geïnjecteerd volume: A. Als gevolg van de achtergrond grondwaterstroming, B. Als gevolg van onbalans aan evenwicht in de warme en koude vraag van het OBES-systeem.

Transport van het OBES

In OBES wordt grondwater gerecirculeerd door middel van onttrekking op de ene locatie en simultaan her-injectie van grondwater op een andere locatie. Wanneer de verontreiniging aanwezig is, leidt dit tot de verspreiding van de verontreiniging van de extractie- en injectieplaatsen van één OBES (Figuur 5-4A) en tussen meerdere bronnen van dezelfde OBES (Figuur 5-4B). Het ontwerp van het OBES is van invloed op de mate van verspreiding; hoe meer injectie- en onttrekkingsputten in het systeem, hoe groter de verdunning, en hoe groter de afstand tussen de putten, hoe groter het mogelijke verspreidingsgebied. In het geval van het aantal putten zal de verspreiding van de verontreiniging afhangen van het feit of de beïnvloedingsgebieden van de putten elkaar binnen hetzelfde systeem overlappen. De koppeling van de putten heeft ook invloed op de verspreiding van verontreinigingen. Phernambucq (2015) liet zien hoe de verontreiniging die in 1 put wordt aangetrokken, sterk verdund in alle putten van het andere type wordt geïnfiltreerd.



Figuur 5-4 Verontreiniging kan worden verspreid door A. het overspringen tussen bronnen van hetzelfde OBES en B. het overspringen tussen meerdere bronnen van hetzelfde OBES.

Veranderingen in de grondwaterstroming

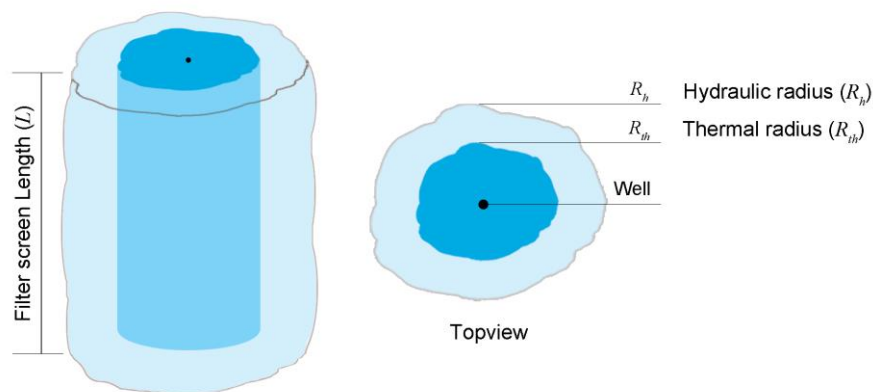
Door onttrekken en infiltreren in OBES-bronnen verandert de stijghoogte van het grondwater rondom de bronnen en daarmee de hydraulische gradiënt. kan ervoor zorgen dat de verontreiniging zich in de directe nabijheid van de OBES zich in andere richtingen verspreidt dan de heersende achtergrondstroming (Spoor, 2015).

In het geval van een opgeloste verontreiniging neemt het volume van de verontreinigde pluim toe als gevolg van deze processen, hoewel de concentratie in de pluim wordt verdund. Echter, in het geval dat DNAPL aanwezig is, kunnen deze processen het oplossen daarvan stimuleren, waardoor

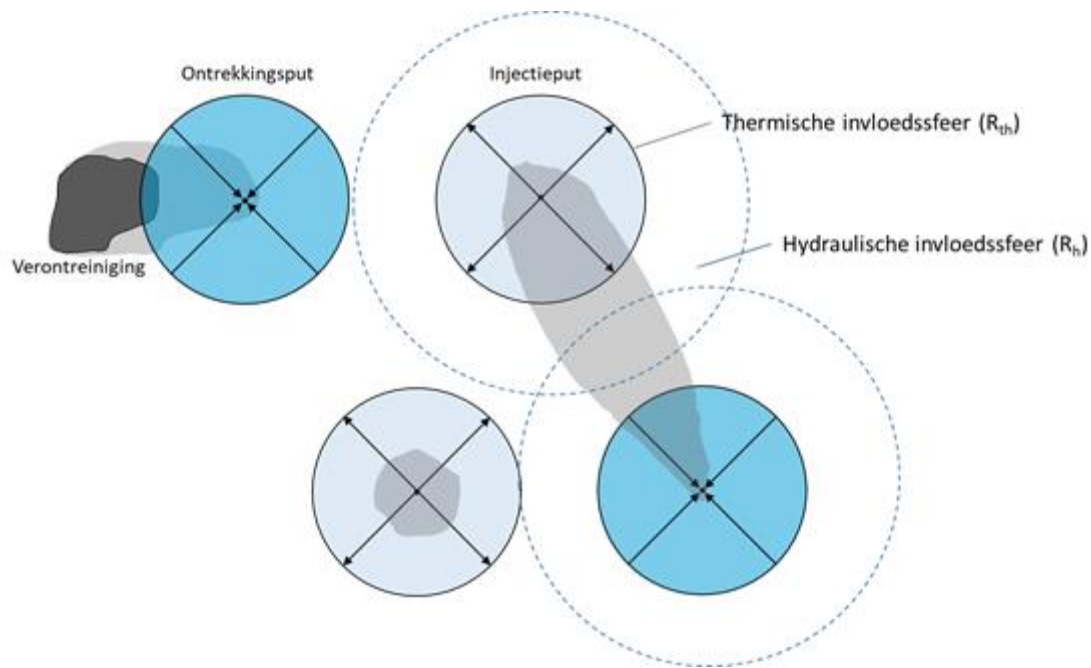
naast het pluimvolume ook de contaminantenmassa toeneemt (Henssen et al., 2012; Zuurbier et al., 2013).

5.3.2 Interactie van meerdere OBES

Wanneer meerdere OBES in een gebied aanwezig zijn, kan er overlapping zijn tussen de thermische en hydraulische invloedssfeer van de systemen (Dinkla, Lieten, Hartog, et al., 2012). Deze overlapping kan ervoor zorgen dat verontreinigingen van het ene OBES naar het andere springen (Figuren 5-5 en 5-6). Gewoonlijk worden OBES-bronnen zo geïnstalleerd dat elk systeem buiten de thermische invloedssfeer van een ander systeem wordt geplaatst. De hydraulische invloedssfeer is echter 1,5 keer groter dan de thermische invloedssfeer (Phernambucq, 2015), en verontreinigingen verplaatsen zich juist binnen de hydraulische invloedssfeer. Als systemen te dicht bij elkaar worden geplaatst kunnen verontreinigingen van het ene systeem naar het andere worden verspreid, terwijl er geen nadelige gevolgen zijn voor de thermische efficiëntie van het systeem. Hierdoor wordt een groot gebied zeer snel bestreken (Phernambucq, 2015). Bovendien zijn in gebieden met OBES-bronnen in elkaars nabijheid de hydraulische en thermische stralen niet perfect cirkelvormig en versterken de hydraulische interacties tussen de systemen de effecten van overlappende zones.



Figuur 5-5. Verschil tussen thermische en hydraulische invloedssfeer (Bloemendal & Hartog, 2018)



Figuur 5-6 Aangezien de thermische straal (R_{th}) kleiner is dan de hydraulische straal (R_h), kunnen OBES-filters plaatsen dicht bij elkaar staan zonder negatieve gevolgen voor de thermische efficiëntie van het systeem, maar kunnen ze leiden tot het springen van de verontreiniging van de ene OBES naar de andere

5.3.3 Andere factoren

De ontwikkeling van de pluimmassa en -omvang is ook afhankelijk van de vraag of de afbraaksnelheid in het sediment wordt beïnvloed door de menging. Mengen veroorzaakt over het algemeen een homogenisering van het grondwater (Dinkla, Lieten, Vries, et al., 2012).

Zuurbier et al. (2013) hebben met modellering aangetoond door welke factoren de totale afbraaksnelheid van de verontreiniging wordt beperkt, en of het OBES de afbraak door middel van mengprocessen al dan niet kan versterken. Onder omstandigheden waarin de afbraaksnelheid van de verontreiniging wordt beperkt door de langzame afgifte van elektronendonoren uit het sediment (bijvoorbeeld door afbraak van sedimentair organisch materiaal), kan het OBES de afbraak verbeteren door een betere verspreiding van de verontreiniging in de watervoerende laag, waardoor de verontreiniging wordt blootgesteld aan een groter deel van de afbraakcapaciteit die in het sediment aanwezig is. Dit op voorwaarde dat de redoxcondities niet verslechteren als gevolg van het OBES-systeem. Onder omstandigheden waarin al voldoende elektronendonoren beschikbaar zijn, leidt de aanwezigheid van OBES tot een grotere verspreiding van de verontreiniging, met als gevolg een groter pluimvolume, maar geen verbeterde afbraak (Zuurbier et al., 2013).

Menging kan ook resulteren in het verlies van specifieke redox niches, wat een negatief effect kan hebben op de afbraak van de verontreiniging. Dit kan echter ook leiden tot vermenging van koolstofbronnen, elektronenacceptoren en/of bacteriën, wat een (positief) effect kan hebben op de snelheid van de afbraak van de verontreiniging grondwater (Dinkla, Lieten, Vries, et al., 2012).

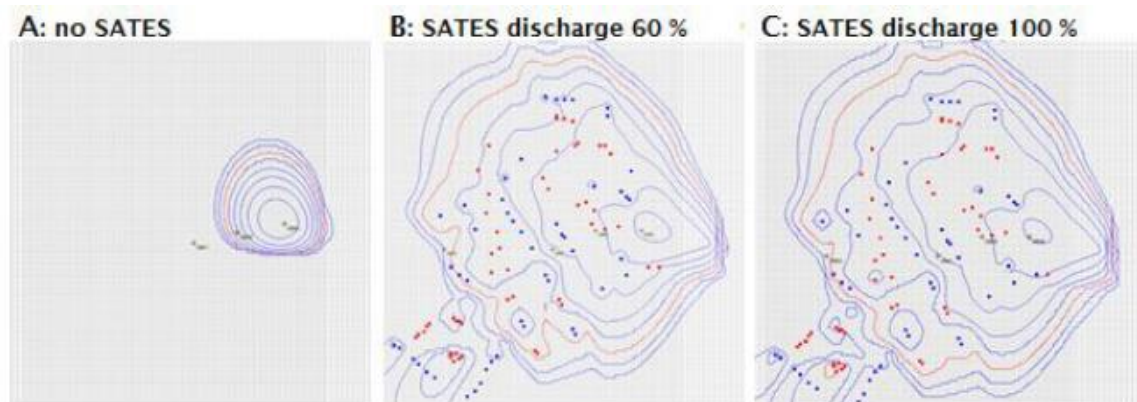
5.4 Case Study's

5.4.1 Utrecht Centrum

In de Utrechtse binnenstad is er een hoge dichtheid van OBES in een gebied met een straal van ongeveer 600 m en een aquifer van 20 m dikte (Bloemendal et al., 2014). Op basis van de vergunde capaciteit van alle OBES gebruiken die circa 20 miljoen m³ van de beschikbare 23 miljoen m³ in de aquifer onder het betreffende gebied (Bloemendal et al., 2014). Sommige systemen zijn al enkele decennia in gebruik, maar er komen ook nog nieuwe systemen bij waardoor de vraag verder toeneemt. De betreffende aquifer is vervuild met VOCL's, met name VC en in sommige gebieden CIS. De concentraties van VC zijn in sommige gevallen tot 100x de interventiewaarde van 5 µg/L, en reiken tot meer dan 70 m diepte. In de aquifer heersen vooral sulfaatreducerende condities. Lage concentraties van verontreinigingen zijn gemeten in de OBES-bronnen evenals verhoogde concentraties van VC en CIS (Dinkla et al., 2012b).

Een onderzoek van het Meer Met Bodemenergie (MMB) project in 2012 wees uit dat vermenging als gevolg van de OBES weinig effect had op de verspreiding van de vervuiling in de binnenstad en er was geen duidelijke indicatie dat de systemen hadden bijgedragen aan biologische afbraak van verontreiniging (Dinkla et al., 2012b). Echter, de omstandigheden ter plaatse voorafgaand aan de installatie van de systemen zijn onbekend, daarom is het niet mogelijk om te zeggen of de eerste mengeffecten significant waren.

Phernambucq (2015) heeft de verspreiding van 1 verontreinigingspluim in Utrecht gemodelleerd met behulp van een grondwatermodel met daarin 15 OBES uit het centrum van de stad en vergeleken met de verspreiding van 1 verontreinigingspluim zonder de OBES. De resultaten van de simulaties toonden aan dat OBES de omvang van de verontreinigingspluim met een factor 10 vergrootten en het verticale transport met een factor 50. De verspreiding bleek zo groot dat binnen enkele decennia het hele systeem vervuild raakt (Figuur 5-7). bij toepassing van een DNAPL als verontreiniging in de simulaties, was de relatieve verspreiding van de verontreinigingspluim groter dan de relatieve verdunning, wat aantoont hoe OBES bijdragen aan de verbeterde oplossing en ontbinding van DNAPL.



Figuur 5-7. De verspreiding van de hypothetische pluim na 50 jaar, voor een situatie zonder SATES (A) en met SATES met afvoer op 60 % van het maximum (B) en op 100 % van het maximum (C). De concentratiecontouren zijn logaritmischeschaald in stappen van een factor 10; de rode lijn komt overeen met 1E-06, (Phernambucq, 2015)

Phernambucq (2015) vond ook dat de toestroomgebieden werden getransformeerd en vergroot als gevolg van grote veranderingen in de grondwaterstand en -stroming, waardoor de

grondwaterstroming buiten de hydraulische straal van de OBES veranderde. Hierdoor kon de verontreiniging van het ene systeem naar het andere worden overgedragen, ook al overlappen de thermische of de hydraulische stralen elkaar niet. Ondanks de snelle verspreiding binnen de stad bleven de reistijden van de verontreinigingen naar de drinkwateronttrekkingslocaties buiten de stad Utrecht vrijwel onveranderd. Dit was te wijten aan een bufferzone rond het stadscentrum, waar OBES afwezig zijn, wat zorgt voor lange reistijden (~600 jaar) voor verontreinigingen om de winningslocaties te bereiken en een positieve invloed heeft op de waterkwaliteit.

5.4.2 Striip-S, Eindhoven (Sanergy)

In 2011 is een OBES geïnstalleerd op Striip-S, een voormalig industrieterrein van Philips in Eindhoven. Deze locatie was de eerste waar het is geprobeerd om sanering en energiewinning (Sanergy) te combineren in één systeem (Slenders et al., 2010). Het grondwater wordt in één richting rondgepompt door een reeks van injectieputten die omgeven zijn door onttrekkingsputten, waardoor de stroming verontreinigd grondwater wordt beheerst. Het terrein is verontreinigd met VOC's in de eerste aquifer (30-60 m-mv) en benzeen in de freatische aquifer (Dinkla, Lieten, Vries, et al., 2012).

Het systeem werd onderzocht als onderdeel van het MMB-project (Dinkla, Lieten, Vries, et al., 2012). Het mengen als gevolg van het OBES heeft geleid tot een toename van organisch materiaal en waterstof, en op sommige locaties tot een toename van de concentratie van *Dehalococcoides*-bacteriën en genetisch materiaal dat verantwoordelijk is voor reductieve dechlorinatie. Echter, ondanks de gunstigere omstandigheden voor afbraak, bevestigden de resultaten van stabiele isotopenanalyses niet dat er een significante afbraak van CIS of VC plaats heeft gevonden op de locatie.

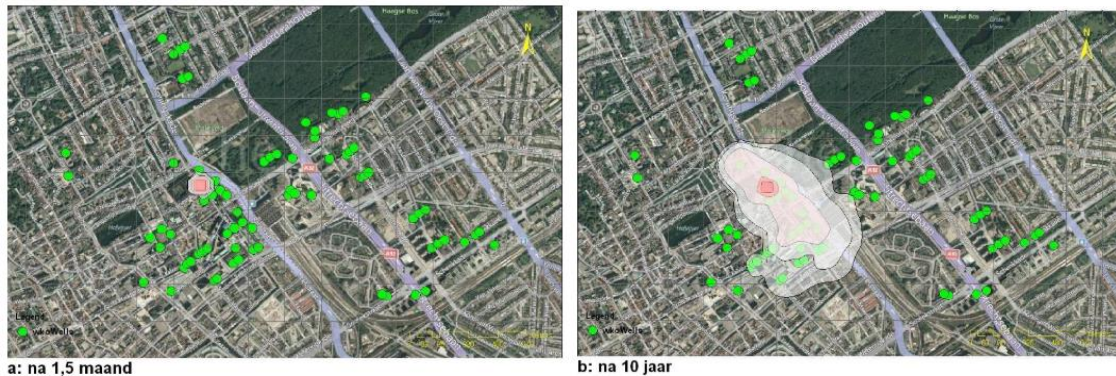
5.4.3 High-Tech Campus, Eindhoven

Een OBES op de Phillips High Tech Campus (HTC) in Eindhoven is in 2004 geïnstalleerd (Spoor, 2015). Het systeem is geïnstalleerd in een grondwaterbeschermingsgebied, waar grondwater wordt onttrokken voor drinkwater in de buurt van de Aalsterweg. Ten tijde van de installatie was niet bekend dat de HTC verontreinigd was met VOC's van het Phillips Natuurkundig Laboratorium (NatLab), gelegen ten noorden van de HTC. De verontreiniging is 2 jaar na de installatie van het OBES ontdekt. Op basis van de heersende grondwaterstroomrichting werd verwacht dat de verontreiniging door de rivier de Dommel naar het noorden zou worden beheerst. Uit de monitoring bleek echter dat de verontreiniging zuidelijker en oostelijker stroomde dan verwacht. Een studie van het gebied vond een kleine netto hydraulische gradiënt naar het oosten, veroorzaakt door het seizoensgebonden pompen van het OBES, en een oostelijke hydraulische gradiënt als gevolg van de onttrekkingsputten aan de Aalsterweg (Spoor, 2015), wat een deel van de oostelijke stroming van de verontreiniging zou kunnen verklaren.

5.4.4 Den Haag

In de stad Den Haag zijn 19 OBESen geïnstalleerd in een gebied van 3,8 km² met in totaal 76 putten (Bakr et al., 2013; W. T. Sommer, 2015). Het OBES-bestand in Den Haag is organisch gegroeid. Zodoende zijn nieuwe systemen geïnstalleerd tussen oude , met het principe dat de systemen op een afstand van 1,5 maal de thermische straal worden geïnstalleerd (Oorstrom et al., 2012). Binnen het MMB-project is een theoretische DNAPL-verontreiniging gemodelleerd om de mogelijke verspreiding van de verontreiniging in het centrum van Den Haag te illustreren. Figuur 5-8 toont de verspreiding van de theoretische besmetting na 10 jaar.

Het model toonde aan dat de 'OBES de verspreiding en verdunning van de verontreiniging binnen en buiten het gebied van de afzonderlijke systemen vergrootte. De effecten van de OBES op de verspreiding van de verontreiniging bleken echter relatief beperkt ten opzichte van de regionale grondwaterstroom, met de grootste in lage grondwaterstroomregimes. Ten slotte bleek de verspreiding van de verontreiniging gerelateerd aan de oriëntatie van de OBES op elkaar en de regionale grondwaterstromingsrichting, zodat gebiedsgerichte benaderingen hiermee rekening kunnen houden bij de planning van systeemindelingen om de verspreiding van de verontreiniging in drukke stadscentra mogelijk te beheersen (Henssen et al., 2012).



Figuur 5-8. Verspreiding van verontreinigingen vanuit een hypothetische constante verontreinigingsbron (willekeurig gekozen locatie) onder invloed van OBES in de ondergrond van Den Haag. Figuur 4.2a laat de initiële situatie zien, 1,5 maand na introductie van de verontreinigingsbron Figuur 4.2b laat de verspreiding situatie zien na 10 jaar. De contourlijnen laten de volgende fracties (C/Co) van de verontreinigingsconcentratie bij de bron zien: 0.001, 0.01, 0.1, 0.5 en 0.9 (Henssen et al., 2012)

5.5 Discussie en Conclusies effect van verspreiding

Het lokaliseren van OBES in verontreinigde gebieden biedt zowel kansen als risico's. Als de installatie van een OBES in verontreinigde gebieden op verantwoorde wijze wordt beheerd door het gebruik van gebiedsgericht beheer kan de ontwikkeling van ontwikkel locaties doorgaan. Dit is een kans om duurzame energiesystemen te installeren die voldoen aan de behoeften van groeiende stadscentra, waar vaak vervuiling wordt aangetroffen. OBES kan, onder bepaalde omstandigheden, de kwaliteit van het grondwater verbeteren door de natuurlijke attenuatie en degradatie van de verontreiniging te verbeteren, door middel van grootschalige mengprocessen.

De effectieve implementatie van OBES in verontreinigde gebieden vereist echter een grondige karakterisering van de locatie, met inbegrip van biologische afbraakprocessen, ruimtelijke verdeling van de verontreiniging, de aanwezigheid en verdeling van zaklagen, redoxcondities en de toegestane verspreiding en verdunning binnen het beheersgebied (Henssen et al., 2012). Daarnaast is ook de opstelling van OBES van belang, waaronder de onderlinge afstand van putten en de omvang van het systeem in relatie tot bijvoorbeeld de achtergrondgrondwaterstroming.

5.5.1 Samenvatting van risicofactoren en kansen

Risicofactoren voor de ongewenste verspreiding van de besmetting in gebieden met OBES zijn onder andere;

- Slechte ondergrondkarakterisering: gebrek aan kennis over de locatie en de verspreiding van de verontreiniging, de geochemie van de locatie, de redoxcondities en de natuurlijke afbraakprocessen.
- Installatie van systemen in gebieden zonder natuurlijke afbraak en/of met zaklagen: Van OBES-systemen is niet aangetoond dat ze inherent degradatie in gang zetten en bij aanwezigheid van zaklagen de nalevering daaruit kunnen doen toenemen.
- Systeemontwerp: ongebalanceerde systemen, de pompsnelheid ten opzichte van het achtergrondwaterdebiet en het pompvolume zijn allemaal van invloed op de mate van dispersie en terugwinning van het systeem. Een verhoogde dispersie of een onvolledige terugwinning kan de verontreiniging ongewenst verspreiden. Ongebalanceerde systemen kunnen echter ook worden gebruikt om de verspreiding van verontreinigingen te beperken.
- Plaatsing van OBES in de nabijheid van gebieden die van belang zijn voor de bescherming van de grondwaterkwaliteit (bijv. voor drinkwaterwinning, grondwaterreserves, enz.) . OBES kunnen fungeren als een kanaal om verontreiniging buiten het verontreinigde gebied te brengen en er is aangetoond dat een bufferzone rond een verontreinigd gebied belangrijk is om lange reistijden naar een kwetsbaar gebied te handhaven, zie paragraaf 5.4.1
- Nabijheid van de afzonderlijke OBES'en ten opzichte van elkaar: Als systemen te dicht bij elkaar worden geplaatst, terwijl er geen nadelige gevolgen zijn voor de thermische efficiëntie van het systeem, kunnen verontreinigingen echter wel van het ene systeem naar het andere worden verspreid, waardoor een groot gebied zeer snel wordt bestreken zie paragraaf 5.3.2

6 Samenvattende conclusies en aanbevelingen

Uit deze studie naar de mogelijke effecten van grootschalige toepassing van aquathermie op de bodem blijkt dat bij aquathermie altijd (seizoens)opslag van warmte nodig is, de bodem daar het meest geschikt voor is, en dus ook een bodemenergiesysteem vereist wordt. Daarbij moet worden bedacht dat het OBES zelf vervolgens het meest efficiënt energie zal produceren door gebruik te maken van een warme en koude bel. Het aantrekkelijke van OBES is immers dat juist door warmte te gebruiken, koude wordt geproduceerd en omgekeerd. Het zal daardoor altijd economisch het meest aantrekkelijk zijn deze intrinsieke energieproductie van OBES zo veel mogelijk te benutten en alleen de verschillen in benodigde warmte of koude met aquathermie te compenseren.

De in Nederland wettelijk vereiste maximumtemperatuur voor opslag van warmte in de bodem van 25°C brengt nauwelijks beperkingen met zich mee omdat oppervlaktewater doorgaans niet tot boven dat niveau opwarmt.

Een belangrijk obstakel voor OBES, variaties in en verschillen tussen aanbod van en vraag naar koeling en verwarming kan met aquathermie worden weggenomen. Energetische disbalansen kunnen voor de toepassing van OBES problematisch zijn, maar aquathermie draagt niet bij aan dat probleem en juist wel aan de oplossing. Aquathermie kan door de combinatie met OBES voorzien in de warmtetekorten die zich bij grootschalige toepassing voor woonwijken zullen voordoen.

Voor partijen die OBES overwegen, is het daarom de moeite waard, naast andere duurzame opties als zonnecollectoren, gekoelde fotovoltaïsche cellen en koppeling van gebouwen met uiteenlopende warmte- en koudegebruik via een warmtenet – en de minder duurzame opties van bijstoken met gas en het gebruik van grijze stroom voor airconditioning waarvoor thans nog vaak uit gemak wordt gekozen – tevens te kijken naar de mogelijkheden van een combinatie met aquathermie.

De effecten van OBES op de grondwaterkwaliteit worden in verschillende studies beschouwd. Het verdient aanbeveling op de hoogte te blijven van de resultaten van deze onderzoeken. In dit rapport is een niet – eerder onderzocht aspect beschouwd, namelijk de invloed van het verpompen van het water op de verspreiding van bestaande verontreinigingen. Hieruit blijkt dat OBES de verspreiding kan versnellen, maar dat dit voorspelbaar is en daarmee beheersbaar lijkt. In 2021 zal worden gezocht naar ontwerpregels voor de verplaatsing van verontreinigingen en zal worden ingegaan op de mogelijkheden om met OBES de grondwaterkwaliteit juist te verbeteren.

Daarnaast wordt geadviseerd te onderzoeken hoe ordening van bodemenergiesystemen, bij grootschalige toepassing van aquathermie kan worden geoptimaliseerd middels bijvoorbeeld integraal beheer van de ondergrond.

Referenties

- Alvarez, P. J. J., & Illman, W. A. (Walter A. (2006). *Bioremediation and natural attenuation : process fundamentals and mathematical models*. Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience. John Wiley & Sons, Inc. Publication.
- Bakr, M., Oostrom, N. Van, & Sommer, W. (2013). Efficiency of and interference among multiple Aquifer Thermal Energy Storage systems ; A Dutch case study. *Renewable Energy*, 60, 53–62.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.04.004>
- Bloemendal, M., Olsthoorn, T., & Boons, F. (2014). How to achieve optimal and sustainable use of the subsurface for Aquifer Thermal Energy Storage. *Energy Policy*, 66, 104–114.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.034>
- Bloemendal, J.M., 2018. The hidden side of cities; Technische Universiteit Delft.
- 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. and T. Olsthoorn (2018). "The effect of a density gradient in groundwater on ATES system efficiency and subsurface space use." *Advances in Geosciences* 45: 85-103.
- Bonte, M. (2013). *Impacts of shallow geothermal energy on groundwater quality*; Vrije Universiteit Amsterdam.
- Bonte, M., Mesman, G., Kools, S., Meerkerk, M., Schriks, M., 2013. *Effecten en risico's van gesloten bodemenergiesystemen*. KWR Watercycle research institute, Nieuwegein.
- Bradley, P. M. (2000). Microbial degradation of chloroethenes in groundwater systems. *Hydrogeology Journal*, 8(1), 104–111. <https://doi.org/10.1007/s100400050011>
- Carnot, S., 1978. *Réflexions sur la puissance motrice du feu*.
- DeltaFacts. (2020). *Effects of open and closed soil energy systems on groundwater quality* (pp. 1–19). pp. 1–19.
- Dinkla, I., Lieten, S., Hartog, N., & Drijver, B. (2012). *Meer met Bodemenergie -Rapport 3/4. Effecten op de ondergrond. Effecten van bodemenergiesystemen op de geochemie en biologie in praktijk. Resultaat metingen op pilotlocaties en labtesten*.
- Dinkla, I., Lieten, S., Vries, E. de, Hartog, N., & Hoekstra, N. (2012). *Meer met Bodemenergie (MMB) – Rapport 9 Effect op Saneering. Effecten van bodemenergiesystemen bij inzet bodemsanering resultaat metingen op pilotlocaties en in labtesten*. Retrieved from www.meermetbodemenergie.nl
- Hartog, N. (2011). Anticipated temperature effects on biogeochemical reaction rates in seasonal Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) systems: an evaluation using the Arrhenius equation. *1e Nationaal Congres Bodemenergie - Utrecht, Nederland, 13 - 14 Oktober 2011*, 5.
- Henssen, M., & Hartog, N. (2012). *Meer met Bodemenergie (MMB) – Rapport 11 - Gebiedsgericht Grondwaterbeheer. Inpassing van bodemenergie in gebiedsgrondwaterbeheer – kansen en*

aandachtspunten.

- Hofman-Caris, C. H. M., Harmsen, D. J. H., Hartog, N., Nicolaes, T., Janssen, L. J. J. M., Winters-Breur, E., & Keijzer, T. J. S. (2017). The potential of using UV photolysis in an aquifer thermal energy storage system to remediate groundwater contaminated with chloro ethenes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(3), 2921–2929. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.05.035>
- Koenders, M., 2012. Meer met Bodemenergie research program. Soilpedia.nl - Bibliotheek - Meer met Bodemenergie
- Lenselink, G., Van Schaik, M., Rob Heijer, R., Hartog, N., Roosjen, R., Hoekstra, N. De bodem als thermosfles. *Bodem nr. 3*, juni 2019.
- Ni, Z., van Gaans, P., Smit, M., Rijnaarts, H., & Grotenhuis, T. (2016). Combination of aquifer thermal energy storage and enhanced bioremediation: resilience of reductive dechlorination to redox changes. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(8), 3767–3780. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-7241-6>
- Ni, Z., Van Gaans, P., Smit, M., Rijnaarts, H., & Grotenhuis, T. (2015). Biodegradation of cis-1,2-Dichloroethene in Simulated Underground Thermal Energy Storage Systems. *Environmental Science and Technology*, 49(22), 13519–13527. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03068>
- Oorstrom, N. van, & Bakr, M. (2012). *Meer met Bodemenergie - Rapport 7 Interferentie. Effecten van bodemenergiesystemen op hun omgeving - modellering grootschalige inpassing in stedelijke gebieden.*
- Pankow, J. F., & Cherry, J. A. (1996). *Dense Chlorinated Solvents and other DNAPLs in Groundwater: History, Behavior, and Remediation.* Portland, Oregon: Waterloo Press.
- Pellegrini, M., Bloemendal, M., Hoekstra, N., Spaak, G., Andreu Gallego, A., Rodriguez Comins, J., ... Steeman, H. J. (2019). Low carbon heating and cooling by combining various technologies with Aquifer Thermal Energy Storage. *Science of the Total Environment*, 665, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.135>
- Phernambucq, I. H. (2015). *Contaminant spreading in areas with a high density of Seasonal Aquifer Thermal Energy Storage (SATES) systems. MSc Thesis.* Utrecht: Utrecht University.
- Schultz van Haegen, M.H., 2013. Wijzigingsbesluit bodemenergiesystemen, in: Environment, M.o.l.a. (Ed.). *Staatscourant 23617*, Den Haag.
- Slenders, H. L. A., Dols, P., Verburg, R., & Vries, A. J. de. (2010). Sustainable Remediation Panel : Sustainable Synergies for the Subsurface : Combining Groundwater Energy With Remediation. *Remediation Journal*, 20(2), 143–153. <https://doi.org/10.1002/rem.20246>
- Sommer, W., Drijver, B., Verburg, R., & Slenders, H. (2013). Combining shallow geothermal energy and groundwater remediation. *Researchgate.Net*, (June), 3–7. Retrieved from http://www.researchgate.net/publication/254864457_Combining_shallow_geothermal_energy_and_groundwater_remediation/file/3deec51ff824b965fb.pdf
- Sommer, W. T. (2015). Modelling and monitoring of Aquifer Thermal Energy Storage. In *Wageningen University*.
- Spoor, A. (2015). *Analysis of groundwater flow dynamics in a contaminated area and the influences of the ATES system of the High Tech Campus - MSc Thesis.*

Zuurbier, K. G., Hartog, N., Valstar, J., Post, V. E. A., & Van Breukelen, B. M. (2013). The impact of low-temperature seasonal aquifer thermal energy storage (SATES) systems on chlorinated solvent contaminated groundwater: Modeling of spreading and degradation. *Journal of Contaminant Hydrology*, 147, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2013.01.002>

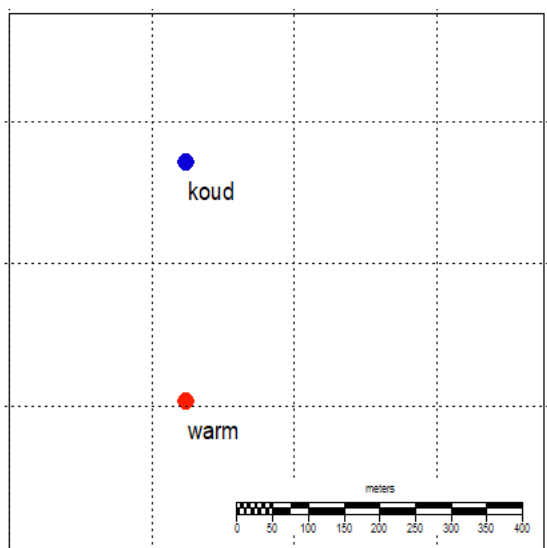
Bijlage 1

Deze bijlage beschrijft de ontwikkeling van koude en warme bellen voor een OBES-systeem, gekoppeld aan aquathermie met een illustratief rekenvoorbeeld. De 1^e paragraaf beschrijft de gangbare OBES-situatie, de 2^e paragraaf gaat in op een alternatieve variant.

1.1 Ontwikkeling koude- en warme bel in gangbare OBES

Bij het gebruik van aquathermie in combinatie met OBES zal de thermische energie uit oppervlaktewater worden ingezet om de onbalans in de OBES als gevolg van de overheersende warmtevraag te compenseren. In deze illustratieve berekening wordt het effect van een OBES voor een woonblok van 300 huizen doorgerekend. De warmtevraag is 9 TJ. Het debiet dat per seizoen verpompt wordt is 225.000 m³, zie tabel 2.1.

Een eenvoudig 2D model van een watervoerend pakket met één warme en één koudebron is weergegeven in Figuur B1.



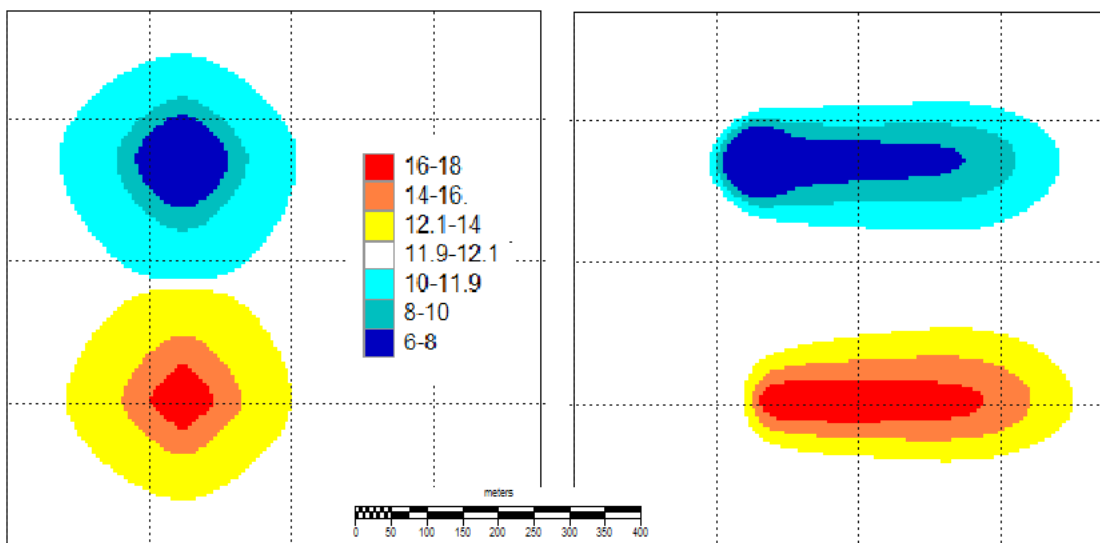
Figuur B1 Modeldomein met locatie van de bronnen

De modelranden aan de linker- en rechterzijde hebben een constante stijghoogte. Bij de modelrand aan de onder- en bovenkant geldt een no-flow-randvoorwaarde. De bronnen hebben een jaarlijkse cyclus met periode van productie van 122 dagen afgewisseld met 60 of 61 dagen rust. De parameters die in het model zijn gebruikt worden weergegeven in Tabel B1.

Tabel B1 Modelparameters

Parameter	
Modellengte x-richting	750 m
Modellengte y-richting	750 m
Modelresolutie	5 m
Dikte watervoerend pakket	40 m
Doorlatendheid	20 m/dag
Porositeit	0.3
debiet bij productie	1844 m ³ /dag
achtergrondstroming (Darcy)	0 of 20 m/jaar
Injectietemperatuur	koud 6 °C; warm 18 °C
Achtergrondtemperatuur	12 °C
longitudinale dispersiviteit	0.1 m
transversale dispersiviteit	0.01 m
thermische diffusiecoëfficiënt	0.126 m ² /dag

Bij deze berekening is een scenario zonder en met achtergrondstroming uitgewerkt. De temperatuurverdeling in de ondergrond voor de 2 modelscenario's weergegeven in Figuur B2.

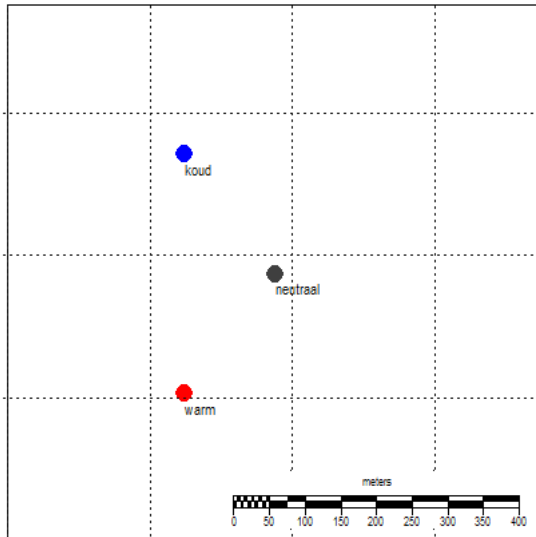


Figuur B2 Temperatuurverdeling in de ondergrond aan het eind van de periode van 10 jaar na einde koude periode zonder (links) en met (rechts) achtergrondstroming

Bij de resultaten is duidelijk te zien dat er meer warmte en koude in de bodem blijft bij het scenario met de achtergrondstroming. Ter indicatie, de diameter van de ontstane warme en koude bellen is ca. 300 m in de figuur links en de uitgesmeerde bel in de figuur rechts is ca 200 bij 500 m als gevolg van de achtergrondstroming. De effecten op de ondergrond zijn logischerwijs hetzelfde als voor een OBES die in balans is en geen gebruik maakt van aquathermie.

1.2 Alternatieve variant voor OBES met aquathermie

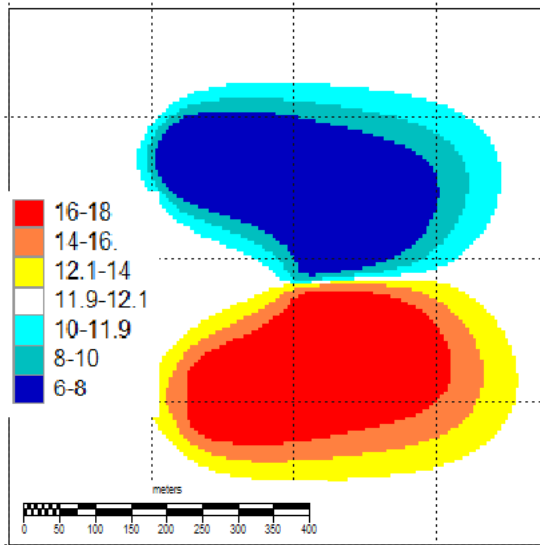
De alternatieve variant met een extra neutrale bron zoals beschreven in paragraaf 2.2 is ook doorgerekend voor de situatie met achtergrondstroming. De locatie van de bronnen wordt weergegeven in Figuur B3.



Figuur B3 Configuratie van OBES met een extra neutrale bron

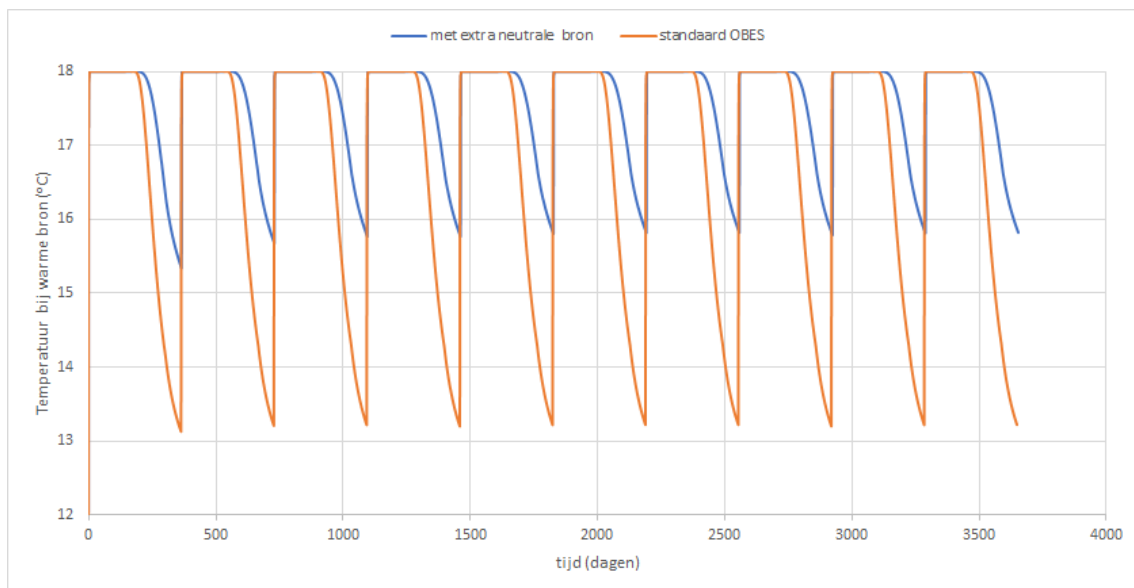
Tijdens de winterperiode is de werking van het systeem gelijk aan het systeem met de gangbare OBES en wordt water uit de warme bron opgepompt en na benutting van de warmte weer geïnjecteerd in de koude bron. In de zomerperiode wordt echter water uit de neutrale bron onttrokken, opgewarmd met behulp van het oppervlaktewater, en geïnjecteerd in de warme bron. Om evenveel warmte te laden wordt het debiet verdubbeld omdat het water vanuit de neutrale bron gemiddeld ongeveer de achtergrondtemperatuur heeft. Hierdoor zullen er een grote warme bel en koude bel ontstaan. Immers uit de koude bel wordt geen water onttrokken en bij de warme bel is het injectiedebiet 2 keer zo groot als het onttrekkingsdebiet.

Bij het herstellen van de onbalans kan er zo meer warm water en daarmee ook meer warmte, in de warme bron worden geladen. Tijdens de benutting van de warmte zal de retourtemperatuur minder snel dalen. De temperatuurverdeling in de ondergrond voor deze berekening wordt weergegeven in Figuur B4. Hieruit blijkt dat er veel grotere pluimen van warm en koud water ontstaan dan in de rechterfiguur van Figuur B2.



Figuur B4 Temperatuurverdeling in de ondergrond aan het eind van de periode van 10 jaar na einde koude periode met achtergrondstroming waarbij een extra bron wordt gebruikt voor het laden van warmte met behulp van aquathermie.

De temperatuur bij de warmtebron voor dit scenario en het scenario voor de standaard OBES wordt weergegeven in Figuur 4-8. Hieruit blijkt dat de retourtemperatuur van de warmtebron minder snel terugloopt in het scenario met de extra neutrale bron.



Figuur B5 Temperatuur bij de warme bron voor de scenario's met achtergrondstroming met een extra neutrale bron en een standaard OBES

1.3 Vergelijking rendement

Bij de standaard situatie dat er geen 3^{de} bron wordt toegepast is de gemiddelde onttrekkingstemperatuur van de warme bron 16,2 °C, bij toepassing met de 3^{de} neutrale bron 17,6 °C. Op basis van het Carnot rendement ($T_{cond}/(T_{cond}-T_{verd})$) kan de verbetering van de

warmtepomp COP worden bepaald (Carnot, 1978). Afhankelijk van de exacte temperaturen die de condensor van de warmtepomp maakt (benodigde leveringstemperatuur aan gebouwen) en basis COP van de warmtepomp, is in tabel 3.2 inzichtelijk gemaakt hoe groot de besparing in elektriciteitsgebruik is door de warmtepomp.

Tabel 3.2 Warmtepomp COP en energiegebruik bij WK bron en WKN bron

COP_Basis	4	5	6	-
E gebruik W-K	2,41	1,93	1,61	TJ
condensor 40C				
COP verbeterd	4,8	5,8	6,8	-
Delta Egebruik W-K-N	-0,41	-0,27	-0,19	TJ
condensor 50C				
COP verbeterd	4,4	5,4	6,4	-
Delta Egebruik W-K-N	-0,23	-0,15	-0,10	TJ
condensor 60C				
COP verbeterd	4,3	5,3	6,3	-
Delta Egebruik W-K-N	-0,14	-0,09	-0,06	TJ

Er moet echter ook extra grondwater worden verpompt doordat er 2x meer water nodig is voor het laden van de bron. Het verpompen van grondwater voor ontladen neemt daarentegen iets af doordat de energie-inhoud van het onttrokken water in de winter groter is; dat is ook meegenomen (totaal extra verpompen = 271.000m³/ jaar). Bij het laden van de warme bron is de dT tussen achtergrond en de warme bron slechts 6C, dus wordt gerekend met een COP van de bron van 15. Wat resulteert in een extra energiegebruik van 0,33 TJ.

Bij lage condensortemperatuur en basis COP's van de warmtepomp wegen de energiebesparingen enigszins op tegen de extra pompkosten. Bij hogere basis COP's en condensortemperaturen is dat echter niet het geval.

Opgemerkt kan nog wel worden dat het elektriciteitsverbruik bij de gangbare OBES hoger is bij warmtelevering in de winterperiode en bij het alternatieve systeem hoger is bij het laden van warmte in de zomer. Bij variatie van de elektriciteitsprijs ontstaat een complex optimalisatieprobleem waarbij ook nog meerdere aspecten van de OBES en aquathermie, die hier niet zijn beschouwd, moeten worden meegenomen.

Adres

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht

Postadres

Postbus 80015
3508 TA Utrecht

Telefoon

088 866 42 56

E-mail

contact@warmingup.info

Website

www.warmingup.info