A network diagram consisting of various sized light blue circles connected by thin white lines, set against a solid blue background. The circles vary in size and are scattered across the page, with some larger circles acting as hubs for smaller ones.

KWR 2026.040 | April 2026

Effecten van hogere temperatuur open bodemenergiesystemen op grondwaterkwaliteit

Huidige kennis, regelgevend kader en
handelingsperspectief

Kennis van Ecologie voor de Energietransitie
(KEEN) – Cluster Ondergrond

Colofon

Effecten hogere temperatuur open bodemenergiesystemen op grondwaterkwaliteit

Huidige kennis, regelgevend kader en handelingsperspectief

Kennis van Ecologie voor de Energietransitie (KEEN) – Cluster Ondergrond

KWR 2026.040 | April 2026

Opdrachtnummer

404661

Projectmanager

Martin van der Schans (KWR), Mariëlle Koenen (TNO)

Opdrachtgever

Ministerie van EZK

Auteurs

Gilian Schout (KWR), Mariëlle Koenen (TNO), Alwina Hoving (TNO), Stijn Beernink (KWR)

Kwaliteitsborgers

Niels Hartog (KWR), Jasper Griffioen (TNO)

Verzonden naar

Dit rapport is openbaar

Onderdeel 2.4 uit dit rapport is uitgevoerd als onderdeel van het project WarmingUP GOO. Dit is mede mogelijk gemaakt door subsidie van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) in het kader van de subsidieregeling Missiegedreven Onderzoek, Ontwikkeling en Innovatie (MOOI), bij RVO bekend onder projectnummer MOOI322012.

Keywords

Geohydrologie, bodemenergie, waterkwaliteit

Jaar van publicatie

2026

Meer informatie

Dr. Gilian Schout

T +31 30 6069598

E gilian.schout@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

KWR TNO

April 2026 ©

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.

KEEN

Het Ministerie van EZK heeft in 2025 opdracht gegeven om het onderzoeksprogramma Kennis van Ecologie voor Energietransitie (KEEN) te starten. Doel van het programma is te voorkomen dat de energietransitie leidt tot ongewenste ecologische gevolgen en tegelijkertijd te voorkomen dat de energietransitie vertraging ondervindt als gevolg van onzekerheid over de ecologische effecten van hernieuwbare energieopwekking.

De energietransitie zal een impact hebben op de kwaliteit en het leven in het water, op het land en in de bodem. Deltares, TNO, WUR en KWR onderzoeken de effecten van het opschalen van hernieuwbare energiebronnen zoals wind, zon, aquathermie en bodemenergie, om ervoor te zorgen dat onze overgang naar een duurzame toekomst zowel effectief als ecologisch verantwoord is. Er is nieuw onderzoek gestart binnen KEEN maar ook lopend onderzoek wordt gebruikt, gebundeld en aangevuld binnen KEEN. In dit rapport wordt het eerste seizoen van monitoring gepresenteerd, de wens is om een langjarige monitoringreeks te kunnen opbouwen. Het onderzoek is georganiseerd in drie clusters:

Cluster Land:

- Onderzoek naar de verdeling van bodemvocht onder zonnepanelen
- Onderzoek naar aanvaringsrisico's voor roofvogels bij het combineren van zon- en windenergie, met modellering van de luchtstromen.

Cluster Water:

- Onderzoek op één locatie naar de effecten van een aquathermie installatie op de ecologie. Er is gekeken naar de effecten van waterfiltering, koudelozing en stroming.
- Onderzoek naar de relatie tussen bedekking door zonnepanelen op water en de impact op primaire productie van biomassa.

Cluster Bodem:

- Onderzoek naar de temperatuureffecten van MTO- en HTO-systemen op de grondwaterkwaliteit.

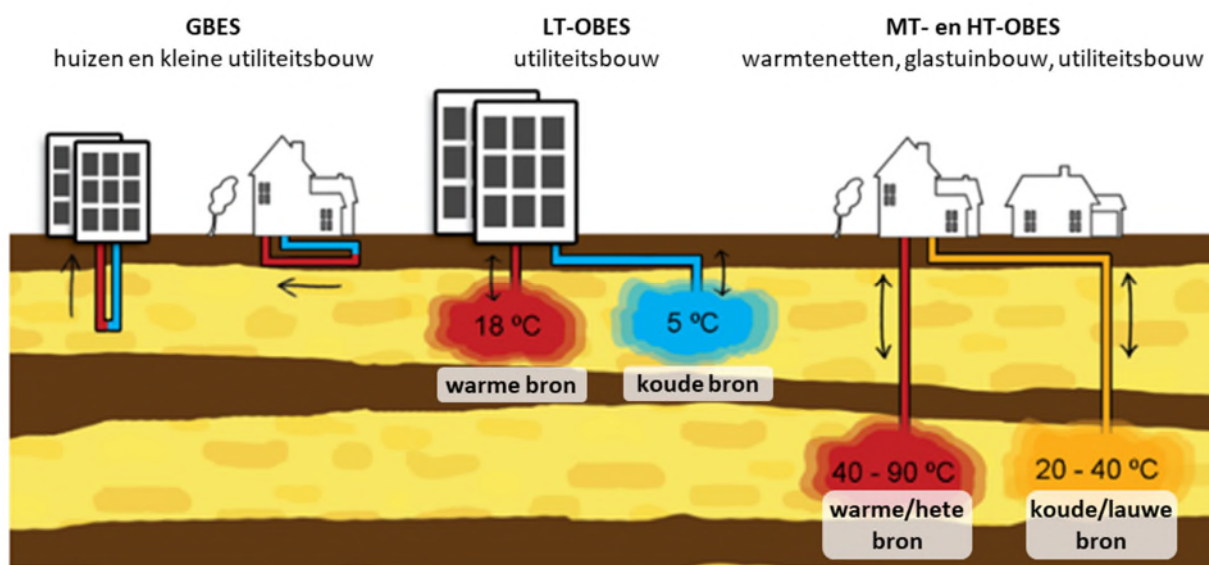
Inhoud

Colofon	1
Inhoud	3
1 Inleiding	4
1.1 Aanleiding	4
1.2 KEEN onderzoek: cluster Ondergrond	5
2 MT/HT-OBES effecten op grondwaterkwaliteit	6
2.1 Thermische effecten	6
2.2 Chemische effecten	8
2.3 Microbiologische effecten	10
2.4 Beïnvloeding op andere functies	12
3 Juridisch kader	15
3.1 Wettelijk kader open bodemenergiesystemen	15
3.2 Vergunningverlening OBES	15
3.3 Aanvullende vereisten bij hogere temperaturen	15
4 Handelingsperspectief: preventie, monitoring en mitigatie	17
4.1 Preventie	17
4.2 Monitoring	18
4.3 Mitigatie	19
5 Samenvatting en aanbevelingen	20
Referenties	22

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Grote delen van Nederland zijn geschikt voor toepassing van bodemenergie, en sinds het begin van de 21e eeuw wordt dit type systemen daarom grootschalig ingezet. Inmiddels gaat het om naar schatting meer dan 50.000 gesloten bodemenergiesystemen ('GBES', Figuur 1-1, links) en meer dan 3.000 lage-temperatuur open bodemenergiesystemen met opslagtemperaturen tot 25°C (LT-OBES of ook wel WKO, Figuur 1-1, midden) (Schout & Bloemendal, 2022). Deze ontwikkeling legt een toenemend beslag op de beperkte ondergrondse ruimte.



Figuur 1-1. Schematische weergave van gesloten bodemenergiesystemen (links), een regulier LT-OBES (WKO) systeem (midden) en een MT/HT-OBES systeem (rechts). Figuur aangepast uit Bloemendal (2018).

Voor bodemenergiesystemen geldt als uitgangspunt voor vergunningverlening dat de injectietemperatuur niet boven de 25°C uit mag komen en daarnaast dat een thermische balans aangehouden moet worden aangehouden: er wordt evenveel warmte als koude opgeslagen ten opzichte van de referentietemperatuur. De laatste jaren groeit de interesse in systemen met opslagtemperaturen boven de 25°C voor efficiëntere seizoensopslag van warmteoverschotten in de zomer. Daarbij kan onderscheid gemaakt worden tussen (1) LT-OBES waarbij piektemperaturen tot boven de 25°C worden toegestaan, maar de gemiddelde infiltratietemperatuur nog steeds beneden de 25°C is en (2) MT-OBES (25 – ~50°C) en HT-OBES (~50 – 100°C) waarbij de opslagtemperatuur structureel hoger is dan 25°C en het systeem bestaat uit hete en lauwe bronnen i.p.v. warme en koude bronnen, waardoor er ook geen sprake meer is van een energiebalans (Figuur 1-1, rechts).

Voordelen van MT- en HT-OBES zijn dat deze technieken grootschaligere seizoensopslag van warmte mogelijk maken (tot wel ~25 GWh opslag in het warme seizoen) en dat een warmtepomp overbodig kan zijn of efficiënter werkt in het koude seizoen. De grens van 50°C voor MT-OBES is geen harde technisch of juridisch bepaalde grens, maar volgt uit materiaalbeperkingen (zoals voor PVC) en de noodzaak om kalkneerslag te beheersen bij temperaturen vanaf 40–60°C. Bij MT- en HT-OBES is dus geen thermische balans mogelijk omdat zowel uit de hete als de lauwe bron warmte verloren naar de omgeving. In combinatie met de hogere opslagtemperatuur leidt dit tot een grotere thermische beïnvloeding van de ondergrond dan bij LT-OBES.

De mate van temperatuurverhoging rond de bronnen bepaalt mede de mogelijke impact op de chemie en microbiologie van het grondwater. Hoewel het juridische kader voor bodemenergie ook geldt voor systemen boven 25°C, vraagt vergunningverlening bij dit soort projecten daarom voornamelijk om een maatwerkafweging van de

temperatuur-gerelateerde effecten. Historisch en experimenteel onderzoek geeft inzicht in mogelijke effecten en risico's (zie voor een uitgebreid overzicht bijvoorbeeld Schout & Hartog, 2020), maar daadwerkelijke praktijkervaring is vooralsnog beperkt. In Nederland zijn er momenteel slechts enkele LT-OBES+ en MT-OBES operationeel en slechts 1 HT-OBES (Ennatuurlijk Middenmeer). De daadwerkelijke effecten van dit type systemen, zijn daarom, zeker ook voor de langere termijn, niet goed bekend. Het is voor een gegeven locatie, met haar specifieke geologische, chemische en microbiologische condities, dus nog niet mogelijk vooraf in te schatten wat de effecten zijn van hoge opslagtemperaturen op de grondwaterkwaliteit.

1.2 KEEN onderzoek: cluster Ondergrond

Om te voorkomen dat de verdere uitrol van hoge-temperatuur OBES-systemen leidt tot ongewenste effecten, maar ook om onnodige vertraging door onzekerheden te voorkomen, heeft het Ministerie van EZK opdracht gegeven deze kennislacune te verkleinen. Verbeterd inzicht in de effecten op chemie en microbiologie, welke nauw met elkaar samenhangen en gezamenlijk bepalend zijn voor waterkwaliteit, zal een scherper beeld geven van het maximaal toepassingspotentieel van deze technieken, en duidelijk maken hoe duurzame co-existentie met andere belangen in de ondergrond kan worden vormgegeven. Dit gebeurt binnen de cluster Ondergrond van het programma Kennis van Ecologie voor de Energietransitie (KEEN), waarin in bredere zin onderzocht wordt wat de ecologische effecten zijn van het opschalen van hernieuwbare energiebronnen zoals wind, zon, aquathermie en bodemenergie op basis van de een recent geformuleerde onderzoeksagenda (De Rijk & Dionisio Pires, 2023).

Dit rapport presenteert de resultaten van een bureaustudie waarin de beschikbare kennis gebundeld, gecondenseerd en toegankelijk gemaakt is. Hieraan zijn ook de laatste inzichten toegevoegd uit de aanvullende monitoring bij het HT-OBES systemen in Middenmeer (Hoving et al., 2026) en het LT-OBES systeem van Koppert Cress in het Westland, waar periodiek met temperaturen boven de 25°C is geïnfiltrerd (Schout et al., 2026). Het rapport is opgezet als een levend document dat in vervolgfases van het KEEN project zal worden geactualiseerd wanneer nieuwe kennis beschikbaar is. Er wordt aandacht besteed aan:

- effecten op grondwaterkwaliteit (hoofdstuk 2),
 - In sectie 2.4 is specifiek aandacht voor hoe deze effecten andere functies in de ondergrond kunnen beïnvloeden (zoals drinkwaterwinning, natuur, andere bodemenergiesystemen),
- het juridisch kader (hoofdstuk 3),
- het handelingsperspectief - preventie, monitoring en mitigatie van negatieve effecten (hoofdstuk 4),
- de belangrijkste resterende kennisvragen op dit gebied (hoofdstuk 5).

Buiten het KEEN project wordt deze kennisvraag ook opgepakt in een aantal andere lopende onderzoeken (met name [WarmingUP GOO](#), HTO-PEN, [TKI MTO voor de Glastuinbouw](#)), en worden er nieuwe projecten opgezet om de kennis verder uit te breiden. Het huidige document bundelt de inzichten uit deze projecten om een handzaam, helder en overkoepelend kennisdocument te bieden voor alle relevante stakeholders op het gebied van hogere temperatuur OBES. Specifiek het onderdeel 2.4 is een deliverable binnen het WarmingUP GOO-project en is tot stand gekomen met financiering vanuit dat project.

2 MT/HT-OBES effecten op grondwaterkwaliteit

MT- en HT-OBES systemen kunnen door middel van verschillende processen invloed hebben op de grondwatersamenstelling. De belangrijkste daarvan zijn geïllustreerd en toegelicht Box 1. Een deel van deze processen zijn niet specifiek voor hoge temperatuur systemen ($> 25^{\circ}\text{C}$) maar treden ook op bij reguliere LT-OBES systemen. Zo zijn er net als bij LT-OBES ook effecten door menging binnen het opslagpakket (nr. 4 in Box 1). Voor LT-OBES blijkt dit proces de primaire oorzaak van in de praktijk waargenomen effecten (Dinkla et al., 2012). Veelal betreft het menging als gevolg van een initieel verschil in waterkwaliteit met de diepte binnen het opslagpakket. Dergelijke menging zal leiden tot het afvlakken of opheffen van concentratiegradiënten en daarmee een uitmiddeling van de grondwatersamenstelling, bijvoorbeeld: initieel zoet ondiep grondwater wordt zouter en initieel zout dieper grondwater wordt zoeter.

Naast menging zijn er ook een aantal andere processen, niet gerelateerd aan de toegenomen temperaturen, die waterkwaliteitseffecten kunnen veroorzaken (samengevoegd onder nr. 5 in box 1). Zo kunnen er lekstromen optreden als gevolg van inadequaate afgedichte scheidende lagen, of directe lekkage vanuit de putverbuizing. Ook zijn er direct rond de put effecten die optreden in de aanlegfase door het gebruik van werkwater met toegevoegde additieven en een andere samenstelling dan dat van het aanwezige grondwater. Dit type effecten kan dus voorkomen bij alle type OBES. Hoewel er rekening mee gehouden moet worden in de ontwerp- en vergunningsfase, zijn ze niet wezenlijk anders dan bij LT-OBES. De focus in de hierop volgende hoofdstukken ligt bij de thermisch veroorzaakte effecten, ten gevolge van de hogere opslag temperatuur bij MT- en HT-OBES. Temperatuurveranderingen kunnen naast effecten op de grondwaterkwaliteit ook geomechanische effecten veroorzaken, zoals samenpersen/inklinken van het sediment (zetting). Dit type effecten viel buiten de scope van het KEEN onderzoek.

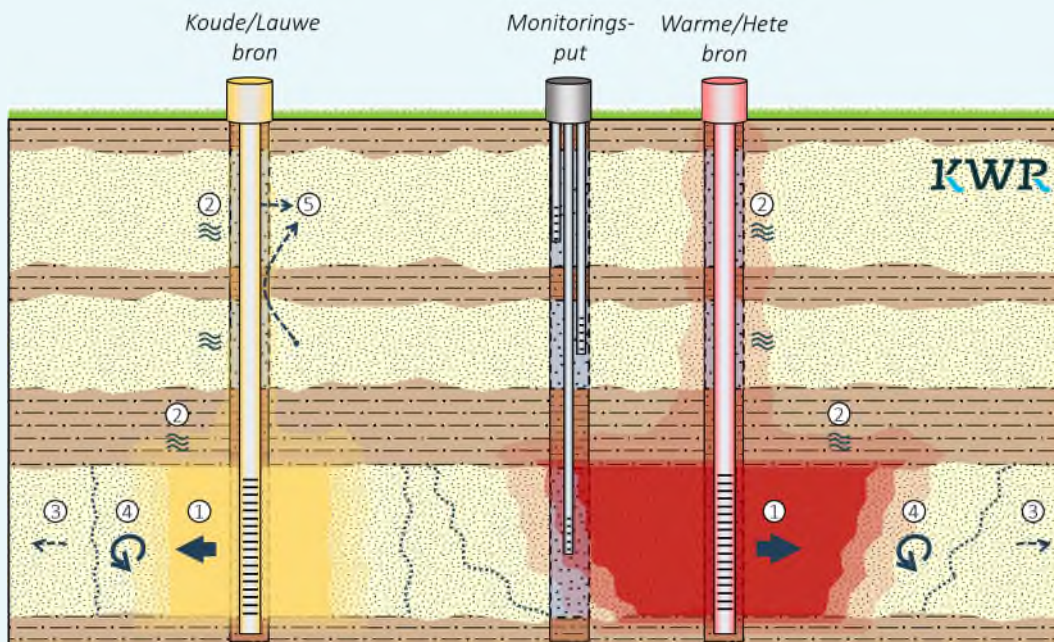
2.1 Thermische effecten

Thermische impact van MT/HT-OBES treedt in eerste instantie vooral op daar waar warm water door de bronnen wordt geïnfiltreerd in de opslaglaag en zich verspreidt. Waar en hoe de warmte zich verspreidt hangt af van het opslagvolume en van de geometrie en eigenschappen van de opslaglaag (Beernink et al., 2020). Dit volume wordt ook wel het thermische volume van de OBES genoemd. Binnen dit volume warmt de ondergrond het sterkst op, tot aan temperaturen gelijk aan de injectietemperatuur in de kern van het thermisch volume en naar buiten toe afnemende temperaturen door warmteverliezen van het geïnfiltreerde water naar het sediment, onder- en bovenliggende afsluitende lagen en menging met het verdreven grondwater. Een deel van de geïnfiltreerde warmte wordt door deze warmteverliezen niet teruggewonnen en verspreidt zich verder in de ondergrond.

Warmteverliezen en -transport treden op door voornamelijk twee processen:

1. **Conductie**, of warmtegeleiding, treedt op wanneer warmte zich verspreidt onder een temperatuurgradiënt. Dit proces kan worden beschreven met de wet van Fourier. De grootte van de warmteoverdracht door conductie neemt toe met een grotere temperatuurgradiënt ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$) en een hogere thermische geleidingscoëfficiënt ($\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$).
2. **Advectie** (stroming) is het transport van warmte doordat warm water met het grondwater mee stroomt. De stroming kan worden aangedreven door het pompregime van het systeem ('forced flow'), maar ook als gevolg van het dichtheidsverschil tussen het geïnjekteerde warme water en het omringende grondwater met een achtergrondtemperatuur ('free flow'). Wanneer het warme grondwater door het watervoerend pakket stroomt staat het een deel van de warmte af aan de korrelmatrix. Hierdoor gaat warmtetransport langzamer dan de stroming van het grondwater. Dit wordt ook wel thermische retardatie genoemd.

Box 1: Effecten van (midden en hoge temperatuur) OBES op grondwaterkwaliteit



Thermisch (geïnduceerde) effecten

1. Injectie van heet water

Daar waar het geïnjecteerde water (wat in feite in bij de andere bron onttrokken en opgewarmd grondwater is) warmer is dan de achtergrondtemperatuur leidt dat tot mogelijke effecten op de grondwaterkwaliteit door de interactie met de korrelmatrix. Door thermische retardatie (warmteoverdracht van het water aan de korrelmatrix) is deze zone kleiner dan de zone met water dat door het systeem verpompt wordt (aangegeven met de blauwe stippellijn). Door ondergrondse warmteverliezen neemt de omvang van de thermisch beïnvloedde zone met de jaren wel toe.

2. Warmteuitstraling vanuit opslaglaag en bronnen

Effecten veroorzaakt door opwarming als gevolg van warmtegeleiding vanuit het opslagpakket naar boven- en onderliggende lagen. Warmteuitstraling treedt ook op horizontaal vanuit de bronnen naar de bovenliggende doorboorde lagen. Dit laatste effect beperkt zich vermoedelijk tot enkele tientallen meters rond de bronnen en kan dus ook alleen dicht bij de bron gemonitord worden.

3. Stroomafwaartse verplaatsing

Door regionale grondwaterstroming kunnen zowel de thermische effecten als eventuele hierdoor veroorzaakte chemische en microbiologische effecten stroomafwaarts verplaatst worden. De mate waarin dit optreedt is voornamelijk niet goed onderzocht, mede doordat monitoring er vaak ook niet op gericht is om dit waar te kunnen nemen.

Algemene processen (treden ook op bij lage temperatuur OBES)

4. Menging van verschillende watertypen

Effecten als gevolg van menging van watertypen veroorzaakt door het rondpompen van grondwater. Bij de meeste onderzochte LT-OBES ('WKO') systemen bleek dit de oorzaak van waargenomen waterkwaliteitseffecten.

5. Effecten door kortsluitstroming, lekkage en werkwatergebruik

Kortsluitstroming langs inadequaat afgedichte kleilagen en lekkage vanuit de bronnen/peilbuizen (bijvoorbeeld van dieper (zouter) naar ondieper (zoeter) grondwater) kan een negatief effect hebben op de grondwaterkwaliteit. Initieel wordt de grondwaterkwaliteit langs de put ook beïnvloed door het gebruik van werkwater tijdens het boorproces (de 'boorspoeling').

Ontwikkeling van de thermische effecten

Doordat een deel van de warmte die ieder jaar wordt opgeslagen in het opslagpakket niet wordt teruggewonnen neemt het thermisch beïnvloede gebied ieder jaar in omvang toe. De jaarlijkse warmteverliezen zijn in relatieve zin het kleinst bij systemen met een hoog terugwinrendement (het deel van de opgeslagen warmte dat ieder jaar wordt teruggewonnen, zie Bloemendal & Hartog, 2018) welke dus een relatief beperktere thermische impact zullen hebben. Niet teruggewonnen warmte blijft achter in het opslagpakket en verspreidt zich vervolgens verticaal naar omliggende lagen en horizontaal binnen het opslagpakket. De achterblijvende warmte binnen het opslagpakket vormt een bufferschil waardoor de warmteverliezen met de tijd af zullen nemen en het opslagrendement de eerste jaren toeneemt. Zolang de bedrijfsvoering niet verandert zal het terugwinrendement van het systeem uiteindelijk stabiliseren. Hoe hoog het terugwinrendement uiteindelijk wordt is afhankelijk van locatie-specifieke eigenschappen van de ondergrond en de eigenschappen van het systeem. De studie van Beernink et al. (2024) laat zien dat de mogelijke warmteverliezen gemiddeld toenemen met hogere opslagtemperatuur, maar dat andere factoren als pakketeigenschappen en opslagvolume ook een sterke invloed hebben. Voor een brede range aan condities varieert het terugwinrendement bij 50°C opslagtemperatuur tussen de 55-85% in het 5^e jaar, terwijl dit bij een opslagtemperatuur van 90°C varieert tussen de 20-85%.

Waar in de grond achtergebleven warmte uiteindelijk naar toe gaat is afhankelijk van de opbouw van de ondergrond. Daarbij geldt dat de temperatuurverspreiding in watervoerende lagen kan optreden door grondwaterstroming en door opdrijving door dichtheidsverschillen, terwijl warmtetransport door scheidende lagen vrijwel uitsluitend verticaal zal plaatsvinden door conductie. Voor zes beoogde HT-OBES locaties en bijbehorende geohydrologische situaties die in het WINDOW project zijn doorgerekend, kwam de grootte van het gemodelleerde horizontale thermische invloedsgebied (25°C contour na 10 jaar) uit tussen de ~100 en ~275 m rond de warme bron (Beernink et al., 2020). Bij deze simulaties is geen rekening gehouden met verplaatsing van een deel van de warmte door natuurlijke grondwaterstroming (nr. 3 in Box 1), waardoor de mate van thermische beïnvloeding stroomafwaarts groter zal zijn en stroomopwaarts kleiner.

Warmteuitstraling vanuit de bronnen

Een relatief klein deel van de verpompte warmte gaat verloren vanuit de putcasing naar de ondergrond rondom de put (nr. 2 in Box 1), doordat vanuit de put conductie naar omringende lagen plaatsvindt. Uit een recent onderzoek bij een geothermieput in het Westland bleek dat er in 4 jaar een duidelijke opwarming van de ondiepe ondergrond rondom de put had plaatsgevonden, met temperaturen tot 34°C op 6 meter afstand en 30°C op 9 meter afstand, ofwel 20 tot 25°C hoger dan de natuurlijke situatie (de Vries & Hartog, 2024). Dit kwam deels ook door convectiecellen die in de zandige eenheden zijn ontstaan doordat het opgewarmde lichtere water rondom de put omhoog drijft, zoals ook al op basis van numerieke simulaties voorspeld was (Van Lopik et al., 2015). Ook uit onderzoek bij de hete bron van de HT-OBES in Middenmeer bleek al dat hier ook significante warmteverlies uit de put optrad (Oerlemans et al., 2022) en het nieuwe onderzoek bij Middenmeer lijkt te bevestigen dat dit ook hier leidt tot een convectiecel in de bovenliggende watervoerende laag (Hoving et al., 2026).

2.2 Chemische effecten

Een toename van de temperatuur van grondwater veroorzaakt verschuivingen in geochemische evenwichten, waaronder sorptie-evenwichten tussen grondwater en de vaste fase (het sediment waar het grondwater door stroomt) en de oplosbaarheid van mineralen daarin zoals CaCO₃ (kalk). Daarnaast zorgt het voor versnelling van kinetisch gecontroleerde reacties, zoals verwerings- of afbraakreacties. Sommige van deze processen worden gekatalyseerd door aanwezige micro-organismen, welke in hun activiteit en groei weer gevoelig zijn voor de temperatuursveranderingen. De hoeveelheid van een stof die vanuit het sediment (vaste fase) naar het grondwater gemobiliseerd kan worden wordt begrensd door de mate waarin deze stof zich van nature in het sediment bevindt (Schout & Hartog, 2021). De manier waarop de stof zich in het sediment bevindt bepaalt of deze zich ook daadwerkelijk naar het grondwater kan en zal mobiliseren. Andersom wordt de hoeveelheid van een stof die vastgelegd kan worden vanuit het grondwater bepaald door de concentratie van die stof. De uiteindelijke netto

impact op de grondwatersamenstelling wordt daarom bepaald door een complexe interactie tussen alle optredende biogeochemische processen.

De invloed van temperatuur op de grondwatersamenstelling blijkt dus zeer beperkt bij LT-OBES tot 25°C. De verwachting is echter dat een grotere temperatuurverandering tot grotere effecten zal leiden, waarbij de mate en richting (toe- of afname) afhangt van de parameter in kwestie en de betrokken biogeochemische processen. De belangrijkste processen waarvan in ieder geval op basis van experimenteel onderzoek bekend is dat ze beïnvloed worden door de grondwatertemperatuur zijn neerslag van carbonaatmineralen ("kalk") en silicaatverwerking (Griffioen & Appelo, 1993), mineralisatie van sedimentair organisch materiaal (Bonte, Röling, et al., 2013; Brons et al., 1991), versnelling van kinetisch gecontroleerde redoxreacties (waaronder het reducerend oplossen van ijzerhydroxiden, sulfaatreductie en methaanvorming), en de veranderde sorptie-affiniteit van het sediment (Bonte, Röling, et al., 2013; Jesušek et al., 2013), waardoor met name sporenelementen (zoals arseen) naar het grondwater gemobiliseerd kunnen worden (Bonte, van Breukelen, et al., 2013; Lüders et al., 2020). Op basis van dergelijk experimenteel onderzoek is de verwachting dat concentraties van silicium, ijzer, methaan, kalium en arseen in de loop van de tijd kunnen toenemen. De concentraties van andere parameters zoals sulfaat, calcium en sporenelementen als nikkel (tweewaardige sporenelementen die juist sterker adsorberen bij hogere temperaturen) zullen eerder afnemen.

Naast de waterkwaliteitsimpact van deze processen kan neerslag van kalk op termijn leiden tot verstopping van de technische installatie of het opslagpakket nabij de hete put. Dit fenomeen wordt in de literatuur aangeduid met "scaling" en waterbehandeling is mogelijk om dit te voorkomen. Bij het HT-OBES systeem in Middenmeer is gekozen voor een waterbehandeling met CO₂-dosering (Oerlemans et al., 2022), wat de zuurgraad van het water beïnvloed en de oplosbaarheid van kalk verhoogd. Dit kan echter neveneffecten veroorzaken op de grondwatersamenstelling, wat het vaststellen van de puur door de temperatuur veroorzaakte effecten compliceert.

Uit onderzoek komt verder naar voren dat met name de door desorptie gedreven mobilisatie van sporenelementen reversibel is bij temperatuurafname (Lüders et al., 2020; van Dooren et al., 2019). De mobilisatie van sporenelementen bij oplossings- en verweringsreacties zullen echter niet of veel minder reversibel zijn bij afname van de temperatuur. Het is daarom ook nog niet goed bekend in hoeverre deze effecten ook gevolg hebben op de grondwatersamenstelling buiten het direct thermisch beïnvloede gedeelte van een HT-OBES (nr. 3 in Box 1), en hoe lang de effecten stand zullen houden na het stopzetten van een systeem. Geochemische modelsimulaties wijzen er inderdaad op dat arseen waarschijnlijk vooral naar de rand van de hete bel zal worden getransporteerd, en daar weer grotendeels vastgelegd wordt (adsorbeert) (Bonte et al., 2014).

Waargenomen chemische effecten in de praktijk

Voor het beperkte aantal hogere temperatuur opslagsystemen (> 25°C) die inmiddels operationeel zijn én uitvoerig gemonitord zijn, blijkt vooralsnog dat de effecten door menging dominant zijn ten opzichte van effecten door de verhoogde temperatuur. Dit is bijvoorbeeld het geval bij de in KEEN verder onderzochte casus bij Koppert Cress, een LT-OBES waarbij incidenteel temperaturen boven de 25°C worden geïnfiltreerd (Bloemendal et al., 2020; Schout et al., 2026). Hierbij bleek dat, hoewel de mengeffecten rondom de bronnen vrijwel direct bij ingebruikname plaatsvinden, het bij monitoringsputten op grotere afstand van de bronnen veel langer kan duren voordat de uitmiddeling volledig heeft plaatsgevonden (>10 jaar). Dit kan het ingewikkeld maken om effecten die direct veroorzaakt worden door temperatuur te isoleren van effecten veroorzaakt door menging. Ook bij een 10 jaar gemonitord MT-OBES met een opslagtemperatuur van 45°C (Oerlemans & Drijver, 2021) bleken de tijdens de operationele fase gemeten effecten vooral veroorzaakt door het aantrekken van dieper, zouter grondwater, en dus niet door de hogere temperatuur ten opzichte van LT-OBES.

Daarnaast kunnen, naast menging, met name in de beginperiode na opstarten ook nog andere processen tot verandering van de grondwaterkwaliteit leiden. Bijvoorbeeld, bij het HT-OBES systeem in Middenmeer, waar op

grote schaal heet water van 80 tot 85°C uit meerdere geothermie systemen opgeslagen wordt, bleken de gemeten effecten binnen het opslagpakket, tijdens de eerste twee operationele jaren, grotendeels veroorzaakt door 1) het gebruik van zoet werkwater tijdens aanleg van de monitoringsput; 2) lekkage van zouter, methaan-rijk water uit een diepere laag langs de monitoringsput naar het opslagpakket (dit lek is gedetecteerd en verholpen vóór ingebruikname van het systeem) en 3) toestroming van minder zout water, ofwel vanuit een bovenliggende zoetere laag of door sterk laterale variatie in zoutgehalte (Schout et al., 2023). Kortom, eerst werd het water rondom de monitoringsput zoeter, dus de concentraties van vrijwel alle elementen ging sterk omlaag. Vervolgens vond er menging plaats met dieper, zouter grondwater met een andere grondwatersamenstelling. Het resulterende water is vervolgens heen en weer gepompt tijdens laden en ontladen, waardoor het geïnjecteerde water ging mengen met het omliggende 'natuurlijke' grondwater en er minder zout water werd aangetrokken.

Met name arseen, silica en methaan vertoonden schommelingen in concentratie, waarbij het verband met de temperatuur ook sterker aanwezig leek. Dit verband kon echter niet met zekerheid worden vastgesteld omdat naast menging ook de andere processen ten gevolge van de boring (bijv. de gebruikte boorspoeling) de resultaten vertroebelden. De gemeten veranderingen gerelateerd aan de temperatuurverhoging waren dus niet dominant (Schout et al., 2023). Bovendien bleven de veranderingen in concentratie van macrochemische parameters (bestanddelen die samen de chemische samenstelling van het grondwater domineren) beperkt tot grofweg $\pm 10\%$ t.o.v. de natuurlijke achtergrondsituatie. Het bedrijven van HT-OBES zelf had dus op de korte termijn een relatief kleine invloed op de macrochemische samenstelling van het grondwater. De monitoring-data van de twee opvolgende operationele jaren geeft in ieder geval indicaties dat de kalkchemie rondom de monitoringsput beïnvloed wordt door veranderingen in zowel de temperatuur, als de pH door toevoeging van CO₂. Verder zijn er tijdens het vierde operationele jaar nog aanwijzingen voor toestroming van zouter water (Eindrapportage TKI HTO-PEN, verwacht Q2 2026).

Ook in het dikke, relatief ondiepe zandpakket boven de afscheidende kleilaag van dit HT-OBES systeem zijn, als gevolg van opwarming rondom de hete en warme bronnen, veranderingen in grondwatersamenstelling grotendeels toe te schrijven aan menging van watertypen, hier als een gevolg van opdrijving (Hoving et al., 2026). Zowel chemische als temperatuur monitoring van het ondiepe zandpakket bij de hete en warme bron en de monitoringsput geven indicaties voor menging van diep, zeer zout water met ondiep, minder zout water. Dit lijkt met name het geval bij de hete bron maar in mindere mate ook bij de warme bron waar de retourtemperatuur met 30 tot 36°C ook ver boven de natuurlijke achtergrond temperatuur van $\sim 10^\circ\text{C}$ ligt. Ook een verlaging van de concentraties aan bicarbonaat, opgelost organisch materiaal en ijzer boven in dit dikke zandpakket lijken het gevolg van deze menging. Naast menging zijn er indicaties voor (minimale) chemische reacties ten gevolge van de opwarming. Een lichte verlaging van bicarbonaat, calcium en mangaan onderin bij de hete en warme bronnen kan duiden op kalkneerslag, een verhoging van de siliciumconcentratie op versnelling van silicaatverwerking, en lagere sulfaat-, ijzer- en arseenconcentraties op microbiële sulfaatreductie, gevolgd door neerslag van ijzersulfides (welke bekend staan om opname van arseen).

2.3 Microbiologische effecten

Grondwaterlagen bevatten allerlei verschillende micro-organismen. De waterhoudende zandlagen relevant voor MT- en HT-OBES toepassing zijn zuurstofloos en bevatten hoofdzakelijk bacteriën en archaea (Griebler & Lueders, 2009). Ze spelen een belangrijke rol bij allerlei processen in de ondergrond, zoals de afbraak van organisch materiaal, en dragen bij aan de nutriënten- en mineralenkringlopen. Microbiële activiteit kan zowel een positief als negatief effect hebben op de waterkwaliteit, bijvoorbeeld omdat ze verontreinigingen afbreken (positief), of ongewenste stoffen mobiliseren waardoor ze vrijkomen in het grondwater (negatief).

De in de ondergrond aanwezige micro-organismen kunnen worden gegroepeerd op basis van verschillende functies:

- Denitrificerende bacteriën; zetten nitraat om naar stikstofgas (N₂). Ze zijn actief tussen 2°C en 50°C maar het meest effectief tussen 25°C en 35°C (Katz, 2011).
- IJzerreducerende bacteriën; zetten slecht oplosbare Fe³⁺ uit sediment om naar oplosbare Fe²⁺.
- Sulfaat-reducerende bacteriën; reduceren met name sulfaat tot H₂S. Verschillende typen zijn actief onder verschillende temperatuur regimes, van 10°C tot 70°C
- Methanogene Archaea; produceren CH₄ uit H₂ plus CO₂ of uit acetaat. De hoogste activiteit vindt plaats tussen de 35-45°C maar er is ook een piek in activiteit tussen de 60-70°C (Katz, 2011).
- Dechlorerende bacteriën; zetten verontreinigingen gechloreerde koolwaterstoffen om tot minder schadelijke of onschadelijke verbindingen. Deze kunnen zowel onder zuurstofrijke als zuurstofloze condities actief zijn.

Een functionele groep kan een grote hoeveelheid verschillende bacteriesoorten omvatten. Er is een grote diversiteit aan micro-organismen in de ondergrond, maar velen ervan zijn inactief, afhankelijk van de beschikbare voedingsstoffen. Een verandering in lokale omstandigheden kan deze soorten reactiveren en resulteren in microbiële groei van de betreffende soorten die floreren onder die omstandigheden.

Het effect van temperatuurverandering op de microbiologie

Vanuit de theorie is te verwachten dat bij zowel zeer lage als hoge temperaturen de microbiële groei laag is en boven 70-80°C de microbiologische populatie zelfs grotendeels afsterft. In het tussenliggende temperatuurinterval is de groei theoretisch het grootst en kan een verschuiving in de *samenstelling* van micro-organismen optreden. Maximale groeisnelheden kunnen worden bereikt rond de optimale temperatuur van een bepaalde functionele groep, terwijl de snelheden snel afnemen bij hogere temperaturen en stoppen onder suboptimale omstandigheden (Huang et al., 2011; Mohr & Krawiec, 1980). De microbiologische samenstelling is naast de temperatuur afhankelijk van de initiële populatie micro-organismen en de aanwezigheid van voedingsstoffen. Het bepalen van de (initiële) actieve en inactieve populatie is complex. Bovendien is de verschuiving door temperatuurverandering locatie-specifiek en laat zich daardoor moeilijk voorspellen.

Een verhoogde temperatuur kan leiden tot een verhoogde mineralisatie van organische stof door microbiële activiteit (Riedel, 2019). Afhankelijk van de functionele groep welke actief wordt, de redox condities en de beschikbare voedingsstoffen kan dit leiden tot een toename van opgelost organisch koolstof, N₂, Fe²⁺, H₂S, en/of CH₄ in het grondwater (Bonte, Röling, et al., 2013; Drijver & van de Ridder, 2021; Ferris et al., 2021; Tzeneva et al., 2008; Zaan et al., 2010). Een temperatuurtoename kan bovendien zorgen voor versnelde afbraak van organische verontreinigingen (Lipczynska-Kochany, 2018; Ni et al., 2015). Alhoewel in experimenteel onderzoek de invloed op microbiologische verschuivingen veroorzaakt door hoge temperaturen niet reversibel is (van Dooren et al., 2019) zal de bacteriële populatie in de praktijk bij afkoeling op termijn reversibel zijn omdat het systeem open is voor herkolonisatie. Bij grondwaterstroming zouden de effecten door microbiële processen kunnen doorwerken naar zones waar de temperatuur niet is beïnvloed, en waar de bulk van de microbiële populatie geassocieerd met het sediment ongewijzigd zal zijn. Met metingen in de praktijk kan hier meer inzicht in verkregen worden.

Ziekteverwekkers

In dichtbevolkte gebieden kunnen van rioolwater afkomstige pathogenen (ziekteverwekkende micro-organismen) getransporteerd worden naar het grondwater (Rutsch et al., 2008). Ze zijn zeer goed aangepast aan warme temperaturen van ongeveer 37°C, maar zullen bij een hiteschok in warmtewisselaars grotendeels afsterven (García-Gil et al., 2018). Bovendien hebben ze zuurstof nodig. Zolang bij injectie en onttrekking van een MT- of HT-OBES de ondergrond zuurstofloos blijft zullen er geen ziekteverwekkers gaan groeien door de temperatuurtoename. Dit is in de praktijk dan ook niet waargenomen (Bloemendal et al., 2020; Drijver & Willemsen, 2004; Oerlemans & Drijver, 2021).

Waargenomen microbiologische effecten in de praktijk

Bij het NIOO MTO systeem (45°C) is na 10 jaar uitgebreide monitoring geen significante/duidelijke thermisch veroorzaakte invloed op de microbiologische kwaliteit waargenomen, en bleken de resultaten zeer gevoelig voor de toegepaste bemonsteringsmethode (Oerlemans & Drijver, 2021). Ook in de metingen bij het systeem van Koppert Cress was geen temperatuurgedreven effect zichtbaar. Bovendien bleef de microbiologische activiteit gedurende de hele meetreeks zeer laag (Schout et al., 2026).

Bij het HT-OBES in Middenmeer met een opslagtemperatuur van 80 tot 85°C in de hete bron en 30 tot 36 °C in de lauwe bron bleek de concentratie van opgelost organisch koolstof al vóór ingebruikname sterk toegenomen door de bij de boring gebruikte biologisch afbreekbare boorspoeling (Schout et al., 2023). Dit leidde tot een tijdelijke toename van de microbiële activiteit (ATP) en afname van de diversiteit. Na opstart van het systeem bleef de microbiologische activiteit gedurende vier operationele jaren bij de meeste metingen consistent laag, en leek deze juist te zijn afgenomen t.o.v. de natuurlijke situatie. Waarschijnlijk komt dit doordat de aanwezige bacteriën niet bestand zijn tegen de hoge temperatuur. Qua samenstelling vond er een verschuiving plaats door menging in de richting van de gemiddelde samenstelling van de opslaglaag. Daarbovenop leek er ook toename van thermofiele soorten plaats te vinden, wat een mogelijke verklaring is voor de licht toegenomen methaanconcentraties.

DNA analyse in het ondiepe zandpakket liet verder zien dat een verschuiving binnen de gehele populatie plaatsvindt (Hoving et al., 2026). De methanogene bacteriën verdwijnen bij de hete bron, hier is ook methaan niet meer meetbaar in het grondwater. Verder is een verschuiving te zien binnen de sulfaatreducerende microben; de ene soort sulfaatreducerende microbe verdwijnt vrijwel volledig rondom de hete en lauwe bron, en maakt plaats voor een thermofiele soort die beter gedijt onder de toegenomen temperatuur. De afname van met name sulfaat en arseen concentraties geven een indicatie van arseen-immobilisatie in ijzer sulfide en dus een efficiëntere sulfaatreductie van dit thermofiele type microbe, alhoewel de ATP-metingen laten zien dat de algehele microbiële activiteit niet is toegenomen.

2.4 Beïnvloeding op andere functies

Hoe de hierboven beschreven effecten op een bepaalde locatie doorwerken op specifieke functies in de ondergrond, moet in het vergunningstraject via een effectenstudie worden onderzocht (zie Hoofdstuk 3). Hieronder volgt een beknopt overzicht van belangen in de ondergrond die door toepassing van MT- of HT-OBES kunnen worden beïnvloed. Daarbij is ook aandacht voor functies in brakke of zoute aquifers, omdat MT- en HT-OBES naar verwachting met name in dit type watervoerende pakketten zal worden toegepast.

Drinkwaterproductie uit zoet grondwater

Voor de productie van drinkwater uit grondwater betreft de primaire zorg de veranderingen in de chemische en microbiologische waterkwaliteit. Bij MT- en HT-OBES systemen kunnen deze ontstaan door menging (niet uniek voor verhoogde temperaturen, en ook relevant bij conventionele LT-OBES), maar ook door de temperatuurverhoging bij deze systemen zelf. Een bekend voorbeeld is de in eerdere experimentele studies waargenomen stijging van arseenconcentraties bij hogere grondwatertemperaturen. Of en in hoeverre effecten op de grondwaterkwaliteit door MT- en HT-OBES systemen door werken op de kwaliteit van grondwater dat onttrokken wordt voor drinkwaterproductie hangt er ten eerste van af of die effecten zich binnen het intrekgebied van zo'n grondwaterwinning voordoen. Als dat zo is dan zal de mate waarin deze effect hebben op de onttrokken grondwaterkwaliteit onder meer afhangen van de grondwaterreisafstand tot de winning en de relatieve grootte van het effect ten opzichte van de achtergrondwaarden voor het onttrokken grondwater. Zo liet recentelijk onderzoek naar de impact van geothermische brijn lekkage op grondwaterwinningen zien dat voor reistijden groter dan 25 jaar de thermische impact op het onttrokken grondwater al snel verwaarloosbaar was, maar dat de impact van zout aanzienlijk was (Brox en Hartog, 2025). Ook speelt de mate van retardatie een rol wanneer effecten zich in de grondwaterwinning voordoen: warmte verspreidt zich over het algemeen trager dan bijvoorbeeld chloride. Hoewel de mogelijke effecten van MT- en HT-OBES systemen nog niet op een dergelijke manier

onderzocht zijn draagt de ruimtelijke scheiding door het niet toestaan van OBES in grondwaterbeschermingsgebieden (veelal 25 jaar reistijd vanaf maaiveld) rondom bestaande drinkwaterwinningen bij aan het beperken van eventuele effecten MT- en HT-OBES op bestaande winningen. Daarnaast kunnen MT- en HT-OBES een inperking vormen voor het zoekgebied van nieuwe winningen of toekomstige uitbreidingen van bestaande winningen.

Kwelafhankelijke natuur

Kwelafhankelijke natuur kan beïnvloed worden door effecten van MT- en HT-OBES op de grondwaterkwaliteit, bijvoorbeeld door het optreden van menging en hogere temperaturen, als deze effecten zich in het intrekgebied van die kwelstroom voordoen. Hoewel er geen eerder onderzoek naar de effecten van MT- en HT-OBES op kwelafhankelijke natuur bekend is, zal de mate waarin deze effecten doorwerken onder meer afhangen van de aard en mate van de waterkwaliteitsverandering (bv. kalkrijkheid) en de grondwaterreisafstand. Ook als HT- en MT-OBES systemen relatief diep zijn geplaatst ten opzichte van het maaiveld waar de kwelafhankelijke natuur zich bevindt, kunnen kwelstromen ook van grotere diepte komen en kunnen daarnaast ook bij diepe systemen ondiepe effecten optreden vanwege de warmteverliezen vanuit de putten.

WKO (conventionele LT-OBES)

Wat betreft de effecten van MT- en HT-OBES op andere open bodemenergiesystemen is thermische interferentie het belangrijkste aandachtspunt. Over de effecten van interferentie tussen LT-OBES is al redelijk wat onderzoek uitgevoerd (bv. Beernink et al, 2022) en ten dele is dat ook relevant voor MT- en HT-OBES. Wanneer een koude bron opwarmt, vermindert het koelrendement. Een warmere warme bron kan juist gunstig zijn, tenzij hierdoor de energetische balans moeilijker te handhaven is. Goede ondergrondse ordening is daarom essentieel. Wanneer een MT- of HT-OBES een veel groter opslagvolume heeft dan een nabijgelegen conventioneel OBES of andersom, kan verplaatsing van warme of koude bellen optreden. Deze afdrijving kan het opslagrendement aanzienlijk beïnvloeden. Daarnaast kunnen grondwaterkwaliteitsveranderingen het operationeel functioneren van OBES systemen beïnvloeden.

GBES / bodemwarmtewisselaars

Opwarming van de bodem rond bodemwarmtewisselaars door MT- of HT-OBES maakt het voor gesloten bodemenergiesystemen (GBES) makkelijker om in de winter aan de warmtevraag te voldoen, maar kan koeling in de zomer bemoeilijken. Een toename van de grondwaterstroming door een nabijgelegen MT-OBES kan voor GBES juist gunstig zijn, omdat warmte- of koudeoverschotten sneller worden afgevoerd. Ook hier speelt ruimtelijke ordening dus een belangrijke rol. Grondwaterkwaliteitseffecten door MT- en HT-OBES zijn voor GBES niet relevant omdat de grondwaterkwaliteit het functioneren van GBES niet beïnvloedt.

Ondergrondse waterberging (OWB)

Eerder onderzoek heeft al aangetoond dat hydraulische interferentie kan optreden wanneer OWB-systemen te dicht bij LT-OBES-systemen liggen (Brokx et al., 2022). Omdat OWB-systemen doorgaans een kleiner opslagvolume hebben, kan afdrijving een relatief grote invloed hebben op het opslagrendement (de fractie van het geïnfiltreerde zoete water dat kan worden teruggewonnen). Nog onbekend is hoe, vanwege de warmteonbalans bij MT- en HT-OBES, opwarming over de lange termijn tot opwarming van OWB-systemen kan leiden. Bij significante opwarming van het opgeslagen water kan ook extra opdrijving ontstaan wat het rendement nog verder verlaagd. Daarnaast kan die opwarming tot waterkwaliteitsveranderingen leiden die ongewenst zijn afhankelijk van het beoogde gebruik van het met OWB opgeslagen water.

Zoetwaterproductie uit brak grondwater (RO)

RO-systemen functioneren het best bij een stabiele waterkwaliteit en temperatuur. Verzilting kan de recovery beïnvloeden, maar de risico's voor de chemische of microbiologische kwaliteit van het gezuiverde water zijn beperkt.

Onttrekkingen voor landbouw of industrie

Landbouwonttrekkingen vinden meestal plaats uit ondiep grondwater en zullen daardoor weinig in directe interactie staan met MT- of HT-OBES, al kan de ondiepe invloed van warmteverliezen uit de putten altijd een rol spelen. Het belangrijkste verschil tussen grondwaterwinningen voor industrie en voor drinkwaterproductie is de omvang (of veelal de afwezigheid) van beschermingszones. Hierdoor kunnen OBES-systemen dicht bij industriële onttrekkingen worden gerealiseerd, met een groter potentieel risico op beïnvloeding van de onttrokken grondwatersamenstelling. Ook hier blijft ruimtelijke ordening een belangrijke factor.

3 Juridisch kader

3.1 Wettelijk kader open bodemenergiesystemen

Het wettelijke kader voor Open Bodemenergiesystemen (OBES) ligt in de Omgevingswet. Daarin zijn OBES gedefinieerd als installaties die gebruik maken van de bodem voor levering van warmte of koude voor verwarming of koeling van gebouwen, waarbij grondwater wordt onttrokken en weer in de bodem wordt teruggebracht. Systemen dieper dan 500 meter vallen onder de Mijnbouwwet.

In de Omgevingswet is OBES aangewezen als milieubelastende activiteit in het Besluit activiteiten leefomgeving ('Bal', paragraaf 3.2.6). Dit betekent dat voor aanleg en gebruik van OBES een Omgevingsvergunning van de provincie verplicht is. Het doel van deze vergunning is om doelmatige benutting van de bodem te borgen, en de omgeving te beschermen (Artikel 2.2), waaronder voor OBES vooral relevant:

- de chemische en ecologische kwaliteit van het grondwater;
- doelmatig gebruik van energie;
- het voorkomen van wateroverlast of -schaarste.

3.2 Vergunningverlening OBES

Waar moet een vergunningsaanvraag aan voldoen?

Een initiatiefnemer die een OBES wil aanleggen en gebruiken, heeft daarvoor een Omgevingsvergunning nodig. De vergunningsaanvraag wordt via het Omgevingsloket ingediend en komt terecht bij het bevoegd gezag (Provincie) ter beoordeling. Een initiatiefnemer zal onderstaande informatie moeten aanleveren bij een vergunningsaanvraag.

In de Omgevingsregeling, die een nadere uitwerking geeft van de Omgevingswet, staat in artikel 7.35 dat een vergunningsaanvraag voor een OBES (Open Bodemenergiesysteem) onder andere moet bevatten:

- een beschrijving van het ontwerp van het systeem;
- het verwachte energierendement;
- de hydrologische en thermische effecten.

Bij het aanleggen en gebruiken van een OBES komt grondwater vrij. Als dat geloosd wordt op het riool of in de bodem, is dat juridisch gezien onderdeel van de OBES activiteit en dan dient de aanvraag ook informatie over de lozing te bevatten. Bij lozing van het grondwater op oppervlaktewater wordt dit gezien als aparte activiteit en daarvoor dient een andere vergunning te worden aangevraagd.

Hoe wordt de vergunningsaanvraag beoordeeld?

De vergunningsaanvraag wordt beoordeeld door de vergunningverleners van de Provincie (bevoegd gezag), of een omgevingsdienst die het mandaat van de provincie heeft gekregen om vergunningen te beoordelen.

Bij de praktische uitvoering van de vergunningverlening wordt gebruik gemaakt van de BUM Bodemenergie (Besluitvormings Uitvoerings Methode). Het doel van de BUM is om de beoordeling van vergunningsaanvragen te stroomlijnen en consequenter te maken tussen de provincies. Deze methode vertaalt de wettelijke eisen naar duidelijke toetsingscriteria en bevat standaardvoorschriften die in de vergunning kunnen worden opgenomen. De BUM beschrijft ook waar de effectenstudie aan moet voldoen, waarin via (model)berekeningen de verwachte hydrologische, thermische en grondmechanische effecten inzichtelijk worden gemaakt.

3.3 Aanvullende vereisten bij hogere temperaturen

Het Bal bevat verschillende standaardregels voor OBES. MT- en HT-OBES wijken af van twee van deze regels:

- de maximale infiltratietemperatuur is begrensd op 25°C (Artikel 4.1152).

- er moet ten minste eens in de 5 jaar sprake zijn van een energiebalans (Artikel 4.1154), wat betekent dat de hoeveelheid opgeslagen warmte gelijk moet zijn aan de hoeveelheid opgeslagen koude.

Een belangrijke gedachte achter het invoeren van de Omgevingswet, is om het voor het bevoegd gezag makkelijker te maken om maatwerk te leveren. Het Bal biedt het bevoegd gezag dan ook de ruimte om af te wijken van standaardregels. Dat kan op twee manieren:

- **maatwerkregels** (algemene regels in een omgevingsverordening of -plan);
- **maatwerkvoorschriften** (projectspecifieke voorschriften in de vergunning).

In de praktijk betekent dit dat een bevoegd gezag MT- en HT-OBES kan toestaan via twee extra maatwerkvoorschriften: één die de maximale temperatuur beschrijft (bijvoorbeeld 50 °C i.p.v. 25 °C), en één voorschrift dat beschrijft welke mate van warmteoverschot maximaal mag worden toegepast. Naast deze twee voorschriften kan een bevoegd gezag ook andere maatwerkvoorschriften toevoegen aan de vergunning, bijvoorbeeld om monitoring voor het systeem voor te schrijven.

Voorlopig afwegingskader vergunningverlening

Omdat er nog maar weinig MT- en HT-OBES zijn vergund, is er nog geen eenduidig beleid voor deze maatwerkvoorschriften. Om te zorgen dat vergunningen voor MT- en HT-OBES op een meer consequente manier worden aangevraagd, beoordeeld en vergund is een Voorlopig Afwegingskader Vergunningverlening opgesteld, in samenwerking met onderzoeksinstituten, de markt, en het bevoegd gezag, tijdens het WarmingUP project (Bloemendal et al., 2021). Dit kader kan gezien worden als een (voorlopig) handboek, waarin voor initiatiefnemers is beschreven welke informatie moet worden aangeleverd bij de vergunningaanvraag, en waarin voor vergunningverleners beoordelingscriteria zijn opgesteld.

Het afwegingskader bevat een set maatwerkvoorschriften die in de vergunning kunnen worden opgenomen als aanvulling op de standaard voorschriften uit de BUM. Als voorbeeld staat in deze handreiking dat opwarming boven 25°C is toegestaan, mits wordt aangetoond dat andere grondwatergebruikers niet negatief worden beïnvloed en de temperatuurstijging bij beschermingsgebieden en strategische voorraden voor drinkwater beperkt blijft tot maximaal 3°C. Het kader is inmiddels beproefd bij verschillende MT- en HT-OBES aanvragen. In 2026 wordt het afwegingskader aangescherpt op basis van deze recente ervaringen en het gewijzigde wettelijke kader (Omgevingswet i.p.v. Waterwet).

Specifiek provinciaal beleid

Zuid-Holland heeft relatief veel ervaring met het vergunnen van OBES-systemen met hogere opslagtemperaturen. Afwijkend van de standaardregels zijn hier sowieso al pieken tot 30°C toegestaan, zolang de gemiddelde temperatuur van het retourwater tijdens koeling niet boven 25°C komt. Bij recent verleende vergunning geldt aanvullend dat in de eerste vijf jaar maximaal drie keer zoveel warmte mag worden opgeslagen als teruggewonnen (warmteoverschot 300%), en daarna maximaal twee keer zoveel (200%). Dit moet doelmatig energiegebruik en beperkte thermische impact waarborgen.

In andere provincies, zoals bijvoorbeeld Drenthe en Utrecht, zijn specifieke watervoerende lagen aangewezen waar MT- en HT-OBES wel of niet worden toegestaan, wat resulteert in meer of minder restrictief beleid. Een uitgebreid overzicht van specifiek provinciaal beleid wordt gegeven in het Juridisch Achtergronddocument HTO (Oerlemans & Bakema, 2020).

4 Handelingsperspectief: preventie, monitoring en mitigatie

4.1 Preventie

De huidige kennisbasis toont aan dat de invloed van hoge temperatuur bodemenergiesystemen op de grondwaterkwaliteit afhankelijk is van de lokale ondergrondcondities in combinatie met de inpassing van het bodemenergiesysteem daarin. Preventie van ongewenste effecten is deels mogelijk door de keuze voor locatie en opslagpakket, en het ontwerp en beheer van het systeem hierop aan te passen. De te verwachten effecten dienen bij vergunningverlening in kaart te worden gebracht door middel van een effectenstudie op basis waarvan preventieve opties overwogen kunnen worden (zie Hoofdstuk 3). Hier een korte opsomming van mogelijke preventieve maatregelen:

Locatiekeuze en ontwerp

- Locatiekeuze
Door het uitvoeren van hydrothermische simulaties als onderdeel van een effectenstudie kunnen de verwachte 3D thermische verspreiding en mengeffecten in zowel de verticaal als horizontale richting worden ingeschat. Op basis hiervan moet beschouwd worden of deze effecten acceptabel zijn bij andere nabijgelegen belangen in de ondergrond (bijv. bodemenergiesystemen, industriële onttrekkingen, beschermingsgebieden). Zo niet dan kan bijvoorbeeld gekozen worden voor een grotere afstand of diepere of ondiepere opslaglaag.
- Keuze opslaglaag
Op basis van de huidige kennis is het nog niet goed mogelijk om de effecten van verhoogde temperatuur op mobilisatie van stoffen vanuit het sediment a-priori te voorspellen. Dit is namelijk niet alleen afhankelijk van de mate waarin deze voorkomen, maar ook op welke manier: als sporenelement in bepaalde mineralen of geadsorbeerd aan bijvoorbeeld klei of organisch materiaal. In theorie kan selectie van een geschikte opslaglaag deze temperatuurgerelateerde effecten beperken, maar in de praktijk ontbreekt momenteel voldoende kennis om dit vooraf gericht en betrouwbaar toe te passen.
- Filterstelling bronnen
Ook binnen een watervoerende laag kunnen sterke verschillen in waterkwaliteit voorkomen. Een zorgvuldige keuze van de dieptes van de bronfilters is daarom een belangrijke ontwerpkeuze waarmee ongewenste effecten van menging van verschillende watertypen deels kan worden voorkomen. Dit dient ook een operationeel belang omdat menging van verschillende watertype binnen het bronbereik (bijvoorbeeld sulfaat en methaanhoudend water) op termijn tot putverstopping kan leiden.
- Isolatie bronnen
Zoals geobserveerd bij de HT-OBES in Middenmeer kunnen bij aanwezigheid van dikke watervoerende lagen boven de opslaglaag door warmteverliezen uit de bronnen convectiecellen ontstaan waardoor het ondiepe grondwater mengt met dieper (bijvoorbeeld zouter) grondwater. Wanneer uit de effectenstudie blijkt dat dit ongewenste menging van water veroorzaakt kan gekeken worden naar extra thermische isolatie van de bronnen.

Operationeel beheer

- Begrenzing van verpompte volumes en vermogens
Door volumestromen en vermogens te begrenzen, kunnen mengingseffecten en thermische impact worden beperkt. Of en in hoeverre dit nodig is dient te worden bepaald op basis van de effectenstudie.
- Minimaal terugwinrendement (maximale warmteverliezen)
Het hanteren van een ondergrens voor het terugwinrendement voorkomt dat structureel te veel warmte in de ondergrond achterblijft. Hierdoor blijft de thermisch beïnvloede zone beperkt in de tijd. Dit draagt bij aan zowel doelmatig energiegebruik als bescherming van de omgeving. Bij recent verleende vergunning in

de Provincie Zuid-Holland wordt dit reeds toegepast en wordt bijvoorbeeld een minimaal systeemrendement van 50% na 10 jaar vereist.

- Begrenzing temperaturen

Een maximaal toelaatbare injectietemperatuur kan gedefinieerd worden om thermische beïnvloeding te beperken (warmteverliezen zijn doorgaans groter bij hoge temperaturen) en om convectiecellen in bovenliggende lagen te voorkomen. Op basis van de huidige kennis kunnen nog geen specifieke temperatuur niveaus gesteld worden voor MT- en HT-OBES waarbij de effecten naar verwachting significant minder zijn.

4.2 Monitoring

Hoewel door preventieve maatregelen veel ongewenste effecten kunnen worden beperkt, kunnen ze nooit volledig worden uitgesloten. In combinatie met de nog aanwezige kennislacunes rond MT- en HT-OBES maakt dit dat naast preventie ook goede monitoring noodzakelijk is. Monitoring is niet alleen nodig om effecten bij individuele systemen betrouwbaar te kunnen beoordelen, maar draagt in bredere zin ook bij aan het vergroten van de algemene kennisbasis over temperatuur-gerelateerde processen in de ondergrond. In verschillende eerdere documenten is al beschreven welke monitoringsopzetten passend zijn voor MT- en HT-OBES (Bloemendal et al., 2021; Fennis et al., 2026; Schout et al., 2023). Hieronder wordt hier een beknopte samenvatting hiervan gegeven. Uiteindelijk doel is om steeds scherper een voor zowel MT- als HT-OBES passend monitoringskader te kunnen stellen, dat pragmatisch en kosten-efficiënt is voor initiatiefnemers maar ook recht doet aan de mogelijke risico's.

Algemene uitgangspunten

Ten eerste wordt er vooralsnog geen onderscheid gemaakt tussen de benodigde monitoringsinspanning bij MT- of HT-OBES. Op basis van de huidige kennis is er namelijk geen onderbouwde reden om voor een gegeven bereik aan temperaturen boven de 25°C meer of minder monitoring voor te schrijven. Wel wordt onderscheid gemaakt tussen een zwaardere 'onderzoeksmonitoring' en een afgeslankte, generieke variant voor situaties waar verdere kennisontwikkeling geen primair doel is en de effecten vooraf al goed genoeg ingeschat kunnen worden. De aanleg van een monitoringsput nabij de hete bronnen heeft in beide gevallen sterke voorkeur maar zeker bij de 'onderzoeksmonitoring', omdat deze essentieel is om temperatuurverspreiding en veranderingen in chemische en microbiologische grondwaterkwaliteit gedetailleerd te kunnen volgen. Hoewel met de aanleg van een monitoringsput aanzienlijke meerkosten gemoeid kunnen zijn, kan deze ook worden gebruikt als proefboring, wat zeer waardevolle informatie biedt voor ontwerp optimalisatie.

Informatiebehoefte

Doel van monitoring is om zowel de thermische, chemische en microbiologische effecten effectief te kunnen beoordelen en daarmee te voorzien in de volgende informatiebehoefte:

1. Waterverplaatsing en energiehuishouding. Bepaald moet kunnen worden hoe groot de warme bel is rond de bronnen en wat het (cumulatieve) warmteoverschot en opslagrendement is (de keerzijde van het warmteoverschot).
2. Temperatuurverdeling in de ondergrond. Om langetermijneffecten goed te kunnen schatten is het belangrijk is vast te stellen of de daadwerkelijke temperatuurverspreiding overeenkomt met verwachtingen, of er in de opslaglaag preferente stromingsrichtingen zijn door achtergrondstroming, opdriving of heterogeniteit en in welke mate er opwarming van bovenliggende lagen plaatsvindt.
3. Ontwikkeling chemische samenstelling grondwater. Hiervoor moeten periodieke watermonsters worden geanalyseerd op een vaste set macro- en microchemische parameters, zowel bij de bronnen als liefst ook een monitoringsput op afstand van de bronnen.
4. Ontwikkeling microbiologie grondwater. Dit omvat metingen van microbiële activiteit en samenstelling (bijv. ATP en DNA-gebaseerde analyses) op meerdere dieptes, op basis van representatieve

grondwatermonsters uit zowel bronnen als monitoringsput.

Voorgesteld monitoringsprogramma

In Fennis et al. (2026, Bijlage E) wordt een uitgebreide monitoringsopzet beschreven die kan worden uitgevoerd om te voorzien in de bovenstaande informatiebehoefte, waarin dus onderscheid gemaakt tussen een zwaardere ‘onderzoeksmonitoring’ en een afgeslankte variant. Er is daarin aandacht voor het type metingen dat dient uit te worden gevoerd, maar daarnaast ook een voorstel gedaan voor hoe de putten en meetinstrumenten hiervoor kunnen worden gerealiseerd, en aandachtspunten voor goede bemonstering. Deze monitoringsopzet omvat analyselijsten voor chemische parameters en microbiologische parameters met de meetfrequentie en geschikte momenten voor monsternamen. Met name voor microbiologische parameters gelden daarbij aanvullende eisen aan de monsternametechniek om tot betrouwbare analyses te komen. Een essentieel onderdeel van het monitoringsprogramma is verder een goede nulmeting, waarin de watersamenstelling wordt bepaald in de bronnen én in de monitoringsput, zowel boven in als onder in de opslaglaag en in de eerste watervoerende laag boven de opslaglaag. Tijdens de operationele fase worden jaarlijks twee bemonsteringsrondes uitgevoerd—één in de laadperiode en één in de ontladperiode—waarbij monsters worden genomen in zowel de monitoringsput als bij een representatieve hete bron. Deze monitoringsopzet wordt momenteel beproefd in een TKI-project met vier glastuinbouwbedrijven die de komende jaren een MT-OBES gaan realiseren. Bij toekomstige implementatie zijn in aanvulling hierop twee aandachtspunten: (1) voer metingen op hetzelfde moment uit in de cyclus en (2) overweeg om gedurende een cyclus frequenter (vier keer per jaar in plaats van twee keer) te meten om inzicht te krijgen in de reversibiliteit van waterkwaliteitseffecten.

4.3 Mitigatie

Wanneer uit monitoring blijkt dat er toch ongewenste effecten optreden, bij het systeem zelf dan wel op afstand van het systeem (bij andere belangen), dan zijn er verschillende mitigerende opties mogelijk.

- **Aanpassen van de bedrijfsvoering.** Bijvoorbeeld door het temperatuurniveau, de verpompte volumes of de energiebalans te wijzigen, zodat de mate van beïnvloeding van de ondergrond wordt verminderd.
- **Het systeem (tijdelijk) stilleggen.** De thermische effecten zullen dan op termijn afnemen. De grondwatersamenstelling zal nooit volledig terugkeren naar zijn oorspronkelijk staat, ook omdat mengeffecten onomkeerbaar zijn. De door temperatuur veroorzaakte chemische effecten zijn echter wel deels reversibel.
- **Het ongewenste effect tegen gaan daar waar het optreedt**
Afhankelijk van het type effect en onder welke omstandigheden die optreedt kan het ook mogelijk zijn om het ongewenste effect tegen te gaan, bijvoorbeeld door het realiseren van een GBES in een bovenliggende laag met een netto warmtevraag (waardoor de grondwatertemperatuur afneemt).

5 Samenvatting en aanbevelingen

Dit rapport geeft een overzicht van de huidige stand van kennis over de thermische, chemische en microbiologische effecten van MT- en HT-OBES, het relevante juridische kader en de handvatten voor preventie, monitoring en mitigatie. De inzichten zijn gebaseerd op gepubliceerde studies en aangevuld met de meest recente resultaten uit het KEEN-onderzoek bij twee locaties waar verhoogde opslagtemperaturen in de praktijk worden toegepast. Deze geactualiseerde en geïntegreerde kennisbasis bepaalt de huidige stand van inzicht en helpt nadere kennisvragen te identificeren.

1) Bepaling van temperatuureffecten op grondwaterkwaliteit bij OBES

Op basis van de huidige inzichten zijn er bij het (zeer beperkte) aantal gemonitorde MT- en HT-OBES meerdere factoren die de bepaling van directe temperatuureffecten op de grondwaterkwaliteit bemoeilijken. Hierdoor is het lastig vast te stellen in hoeverre MT- en HT-OBES een groter effect hebben dan conventionele OBES (<25 °C). Allereerst heeft het boren en ontwikkelen van de putten effect op de chemische samenstelling en de microbiële populatie rondom de putten, maar deze effecten verdwijnen relatief snel wanneer het systeem in gebruik genomen wordt (voorbeeld: Middenmeer). Ten tweede kan lekkage langs de put tussen verschillende watervoerende pakketten de waterkwaliteit beïnvloeden. Zelfs wanneer dit soort lekkage snel is verholpen, blijven de effecten langdurig meetbaar (voorbeeld: Middenmeer). Ten derde zijn er veranderingen die optreden door de menging van grondwater met initieel verschillende kwaliteit, als gevolg door de verpompings met een OBES, of door opwarming en opdrijving in bovenliggende zandlagen rondom de hete/lauwe bronnen. Afhankelijk van waar er gemonitord wordt binnen het systeem kan het een aantal jaar duren voordat de effecten van menging van initiële verschillen stabiel worden (voorbeeld: Koppert Cress). Zelfs op de lange termijn kan menging voor verschuiving blijven zorgen, zoals door het steeds meer aantrekken van dieper, zouter grondwater van onderaf (voorbeeld: NIOO).

Het meest geschikt voor het eenduidig bepalen van de effecten van hogere temperatuur op de grondwaterkwaliteit bij MT- en HT-OBES zijn dus systemen met relatief hoge infiltratietemperaturen waarvan de initiële veranderingen door menging gestabiliseerd zijn. De monitoring bij een OBES waarvan de initiële mengeffecten al gestabiliseerd zijn en vervolgens de infiltratietemperatuur relatief sterk verhoogd wordt, zou zeer geschikt zijn om de effecten van die temperatuurverhoging te bepalen. Daarnaast is de langjarige monitoring bij HT-OBES daarvoor geschikt.

2) Grondwaterkwaliteitseffecten bij MT- en HT-OBES

Op basis van theoretische studies, lab experimenten en ervaring bij geothermie is bekend dat hoge temperaturen verstopping van de put kan optreden door kalkneerslag. Verder komt uit dergelijk onderzoek de verwachting dat concentraties van silicium, ijzer, methaan, kalium en arseen in de loop van de tijd kunnen toenemen. Andere parameters zoals sulfaat, calcium en sporenelementen als nikkel (tweewaardige sporenelementen die juist sterker adsorberen bij hogere temperaturen) zullen eerder afnemen.

Hoewel bij het HT-OBES in Middenmeer enkele van deze effecten in beperkte mate worden waargenomen, blijkt ook hier en bij de andere bemeaten MT- en HT-OBES locaties met opslagtemperaturen boven 25 °C dat menging voornamelijk dominant is. De effecten door menging overheersen daarmee de directe temperatuureffecten, zoals ook bekend is voor conventionele LT-OBES (<25 °C; Dinkla et al., 2012). Hoewel er in de conventionele LT-OBES praktijk aandacht is voor het voorkomen van menging van grondwater over redox en zoet-zout overgangen (protocol SIKB BRL 11001), leidt ook de menging van grondwater met verschillen in andere parameters binnen een OBES tot veranderingen in

grondwaterkwaliteit. Ook dient te worden benadrukt dat de waargenomen effecten mogelijk sterk locatieafhankelijk zijn, door verschillen in de chemische samenstelling van de ondergrond. Nader onderzoek onder uiteenlopende bodem- en grondwatercondities is daarom nodig om vast te stellen in hoeverre deze conclusie ook van toepassing is op andere locaties.

Bij het systeem in Middenmeer is menging, als gevolg van opdrijving door opwarming rondom de hete en mogelijk ook de lauwe bron, ook waargenomen in het dikke, bovenliggende zandpakket. Dergelijke effecten zijn sterker bij hogere brontemperaturen. Naast mengeffecten zijn er ook indicaties voor temperatuur-gedreven, (deels microbiële) geochemische reacties. De gemeten grondwaterkwaliteit laat in geen enkel geval hoge concentraties aan schadelijke elementen of ongewenste microben zien. Wel dient voor toekomstige systemen rekening te worden gehouden met potentiële verzilting van zoetwater als gevolg van menging, zowel binnen het opslagpakket als in bovenliggende zandlagen.

3) Ruimte voor verdere ontwikkeling van MT- en HT-OBES

Op basis van dit onderzoek geven de verkregen inzichten geen aanleiding voor belemmering of restricties voor het toestaan van MT- en HT-OBES pilots wat betreft het optreden van temperatuurseffecten. Aanvullend rekening houdend met mengeffecten, geldt dit te meer in gebieden waar het eventuele optreden van ongewenste beïnvloeding van andere functies verwaarloosbaar is, bijvoorbeeld door voldoende afstand te houden tot andere functies, te kiezen voor brakke of zoute grondwaterlagen en de casing te isoleren.

4) Belang van voortgezette monitoring en kennisontwikkeling

Op basis van de tot nu toe verkregen inzichten is het van belang om langjarige monitoring bij relatief hoge temperaturen te realiseren. Dit is nodig om de kennisbasis over met name de locatieafhankelijkheid, cumulatieve langetermijneffecten en de reversibiliteit van hogere infiltratietemperaturen bij MT- en HT-OBES op de grondwaterkwaliteit te verbeteren. In dit onderzoek is beschreven dat dit een uitgebreidere monitoring vergt dan standaard wordt toegepast bij LT-OBES. Om de invloed van mengeffecten in de interpretatie beter mee te kunnen nemen, kan het aanvullend hierop overwogen worden om frequenter te meten (bijv. 4x/jaar) zodat er op elke locatie metingen zijn aan het begin van het laad/ontlaadt seizoen met hogere temperaturen en aan het einde met lagere temperaturen. Daarnaast dient het aantal meetlocaties te worden uitgebreid naar nieuwe systemen (mits de verwachting is dat daar minder mengeffecten zullen optreden vanwege geologische setting) of systemen die al langdurig in bedrijf zijn (en de menging is gestabiliseerd).

De uitkomsten van dergelijk vervolgonderzoek worden, indien mogelijk, gebruikt om het huidige kennisdocument te updaten. Deze kennisbasis kan als input dienen voor een mogelijk toekomstig regelgevend kader, bij voorkeur gestandaardiseerd voor alle provincies in Nederland.

Referenties

Beernink, S., Bloemendal, M., & Hartog, N. (2020). Prestaties en thermische effecten van ondergrondse warmteopslagsystemen. WINDOW fase 1 (C2). <https://www.warmingup.info/documenten/window-fase-1---c2---prestaties-en-thermische-effecten.pdf>

Beernink, S., Bloemendal, M., Kleinlugtenbelt, R., & Hartog, N. (2022). Maximizing the use of aquifer thermal energy storage systems in urban areas: effects on individual system primary energy use and overall GHG emissions. *Applied Energy*, 2022

Beernink, S., Hartog, N., Vardon, P. J., & Bloemendal, M. (2024). Heat losses in ATEs systems : The impact of processes , storage geometry and temperature. *Geothermics*, 117(December 2023), 102889. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102889>

Bloemendal, M. (2018). The hidden side of cities: Methods for governance, planning and design for optimal use of subsurface space with ATEs [PhD Thesis]. Technische Universiteit Delft.

Bloemendal, M., Beernink, S., van Bel, N., Hockin, A., & Schout, G. (2020). KWR 2020.156. Transitie open bodemenergiesysteem Koppert-Cress naar verhoogde opslagtemperatuur Evaluatie van energiebesparingen en grondwatereffecten. <https://library.kwrwater.nl/publication/61755396/transitie-open-bodemenergiesysteem-koppertcress-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., Oerlemans, P., & Schout, G. (2021). Voorlopig afwegingskader voor vergunningverlening HTO. Juridisch afwegingskader ondergrondse warmteopslag. <https://library.kwrwater.nl/publication/67211202/warmingup-voorlopig-afwegingskader-voor-vergunningverlening-hto-juridisch-afwegingskader-ondergrondse-warmteopslag/>

Bonte, M., Röling, W. F. M., Zaura, E., van der Wielen, P. W. J. J., Stuyfzand, P. J., & van Breukelen, B. M. (2013). Impacts of Shallow Geothermal Energy Production on Redox Processes and Microbial Communities. *Environmental Science & Technology*, 47(24), 14476–14484. <https://doi.org/10.1021/es4030244>

Bonte, M., Stuyfzand, P. J., & Breukelen, B. M. V. (2014). Reactive transport modeling of thermal column experiments to investigate the impacts of aquifer thermal energy storage on groundwater quality. *Environmental Science and Technology*, 48(20), 12099–12107. <https://doi.org/10.1021/es502477m>

Bonte, M., van Breukelen, B. M., & Stuyfzand, P. J. (2013). Temperature-induced impacts on groundwater quality and arsenic mobility in anoxic aquifer sediments used for both drinking water and shallow geothermal energy production. *Water Research*, 47(14), 5088–5100. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.05.049>

Brons, H. J., Griffioen, J., Appelo, C. A. J., & Zehnder, A. J. B. (1991). (Bio)geochemical reactions in aquifer material from a thermal energy storage site. *Water Research*, 25(6), 729–736. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(91\)90048-U](https://doi.org/10.1016/0043-1354(91)90048-U)

Brokx, L. P., Bloemendal, M. P., & Hartog, N. (2022). *Handvatten voor duurzame co-existentie van ondergrondse waterberging en open bodemenergie*. https://www.kasalsenergiebron.nl/content/research/2022_KWR_Handvatten_voor_duurzame_co-existentie_van_ondergrondse_waterberging_en_open_bodemenergie-min.pdf

de Vries, E., & Hartog, N. (2024). KWR 2024.008 | Opwarming grondwater door warmteuitstraling vanuit geothermieput bij Trias-Westland. <https://www.ebn.nl/wp-content/uploads/2024/02/KWR-Eindrapport-EBN-Opwarming-Ondergrond-TriasWestland.pdf>

Dinkla, I., Lieten, S., Hartog, N., & Drijver. (2012). *Meer met bodemenergie: Rapport 3 & 4 - Effecten op de ondergrond*. [https://soilpedia.nl/Bikiwiki_documenten/Meer met Bodemenergie/](https://soilpedia.nl/Bikiwiki_documenten/Meer_met_Bodemenergie/)

Drijver, B., & van de Ridder, Y. (2021). Putverstopping door sulfaatreductie. <https://bodemenergie.nl/wp-content/uploads/2022/03/Putverstopping-door-sulfaatreductie.pdf>

Drijver, B., & Willemsen, A. (2004). Temperatuureffecten op grondwater kwaliteit.

Fennis, B., Verster, D., Beernink, S., Schout, G., & van Meurs, B. (2026). Potentie en inpassing MTO in de glastuinbouwsector: Een handboek. www.glastuinbouwnederland.nl

Ferris, F. G., Szponar, N., & Edwards, B. (2021). Groundwater Microbiology. In *Groundwater Microbiology*. <https://doi.org/10.21083/978-1-77470-005-1>

García-Gil, A., Gasco-Cavero, S., Garrido, E., Mejías, M., Epting, J., Navarro-Elipe, M., Alejandre, C., & Sevilla-Alcaine, E. (2018). Decreased waterborne pathogenic bacteria in an urban aquifer related to intense shallow geothermal exploitation. *Science of the Total Environment*, 633, 765–775. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.245>

Griebler, C., & Lueders, T. (2009). Microbial biodiversity in groundwater ecosystems. *Freshwater Biology*, 54(4), 649–677. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2008.02013.x>

Griffioen, J., & Appelo, C. A. J. (1993). Nature and extent of carbonate precipitation during aquifer thermal energy storage. *Applied Geochemistry*, 8(2), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(93\)90032-C](https://doi.org/10.1016/0883-2927(93)90032-C)

Hoving, A., Koenen, M., & Griffioen, J. (2026). TNO 2026 R10848 | Evaluatie van effecten HTO Middenmeer op grondwaterkwaliteit.

Huang, L., Hwang, A., & Phillips, J. (2011). Effect of Temperature on Microbial Growth Rate—Mathematical Analysis: The Arrhenius and Eyring–Polanyi Connections. *Journal of Food Science*, 76(8). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02377.x>

Jesušek, A., Grandel, S., & Dahmke, A. (2013). Impacts of subsurface heat storage on aquifer hydrogeochemistry. *Environmental Earth Sciences*, 69(6), 1999–2012. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2037-9>

Lipczynska-Kochany, E. (2018). Effect of climate change on humic substances and associated impacts on the quality of surface water and groundwater: A review. *Science of the Total Environment*, 640–641, 1548–1565. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.376>

Lüders, K., Dahmke, A., Fiedler, M., & Köber, R. (2020). Temperature influence on mobilisation and (re)fixation of trace elements and heavy metals in column tests with aquifer sediments from 10 to 70 °C. *Water Research*, 169, 115266. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115266>

Mohr, P. W., & Krawiec, S. (1980). Temperature Characteristics and Arrhenius Plots for Nominal. *Journal of General Microbiology*, 121, 311–317.

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>

Oerlemans, P., & Bakema, G. (2020). Wet- en regelgeving voor de toepassing van Hoge Temperatuur Opslag (HTO): Juridisch Achtergronddocument. <https://www.warmingup.info/documenten/window-fase-1---d1---juridisch-achtergronddocument.pdf>

Oerlemans, P., & Drijver, B. (2021). Effects of HT-ATES on the subsurface-the NIOO case study An evaluation of the effects of a HT-ATES system (45 oC) on the subsurface. In Heatstore: D5.2. www.heatstore.eu

Oerlemans, P., Drijver, B., Koenen, M., Koornneef, J., Dinkelman, D., & Godschalk, B. (2022). First field results on the technical risks and effectiveness of mitigation measures for the full scale HT-ATES demonstration project in Middenmeer First field results on the technical risks and effectiveness of mitigation measures for the full scale HT-AT.

Riedel, T. (2019). Temperature-associated changes in groundwater quality. *Journal of Hydrology*, 572(February), 206–212. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.059>

Rutsch, M., Rieckermann, J., Cullmann, J., Ellis, J. B., Vollertsen, J., & Krebs, P. (2008). Towards a better understanding of sewer exfiltration. *Water Research*, 42(10–11), 2385–2394. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.01.019>

Schout, G., Besteman, M., & Beernink, S. (2026). KWR 2026.031 | Evaluatie effecten op grondwatersamenstelling bodemenergiesysteem Koppert Cress. Update na nieuwe meetronde in 2025.

Schout, G., & Bloemendal, M. (2022). Deltafact Effecten van bodemenergiesystemen op de grondwaterkwaliteit.

Schout, G., & Hartog, N. (2020). Effecten van hoge temperatuur warmteopslag op grondwaterkwaliteit. WINDOW fase 1 (C3b). <https://www.warmingup.info/documenten/window-fase-1---c3---effecten-van-hoge-temperatuur-warmteopslag-op-grondwaterkwaliteit.pdf>

Schout, G., Hartog, N., & Timmers, P. (2023). KWR 2023.120 | Waterkwaliteitseffecten bij en monitoring van HTO systemen: Synthese en update op basis van de monitoring bij HTO Middenmeer. <https://library.kwrwater.nl/publication/71265759/waterkwaliteitseffecten-bij-en-monitoring-van-hto-systemen-synthese-en-update-op-basis-van-de-monitoring-bij-hto-middenmeer/>

Tzeneva, V. A., Hannes, F., Griffioen, J., & Gerritse, J. (2008). TNO Rapport 2008-U-R1285/A | Microbiële diversiteit in de geotop op zes boorlocaties in Zuid-Nederland.

van Dooren, T., Beernink, S., Timmers, P., & Bloemendal, M. (2019). Prestaties en effecten van ondergrondse warmteopslag - Een verkenning voor het P2X project. <https://library.kwrwater.nl/publication/60827901/>

Van Lopik, J. H., Hartog, N., Zaadnoordijk, W. J., Cirkel, D. G., & Raoof, A. (2015). Salinization in a stratified aquifer induced by heat transfer from well casings. *Advances in Water Resources*, 86, 32–45. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.09.025>

Zaan, B. Van Der, Hannes, F., Griffioen, J., & Gerritse, J. (2010). Microbiële diversiteit in de geotop van boorlocaties in Zuid-Nederland en correlatie met de lokale geochemie Inhoudsopgave.