



Effecten van bodemenergiesystemen op de grondwaterkwaliteit

Deze Deltafact behandelt de effecten van grootschalige toepassing van open- en gesloten bodemenergiesystemen op de grondwaterkwaliteit. De scope van deze Deltafact is beperkt tot bodemenergiesystemen met opslagtemperaturen boven de 25 °C. Voor meer informatie over zgn. Hoge Temperatuuropslag en effecten op grondwater wordt verwezen naar [Bloemendal et al \(2020\)](#) en <https://www.warmingup.info/thema/5/ondergrondse-warmteopslag>

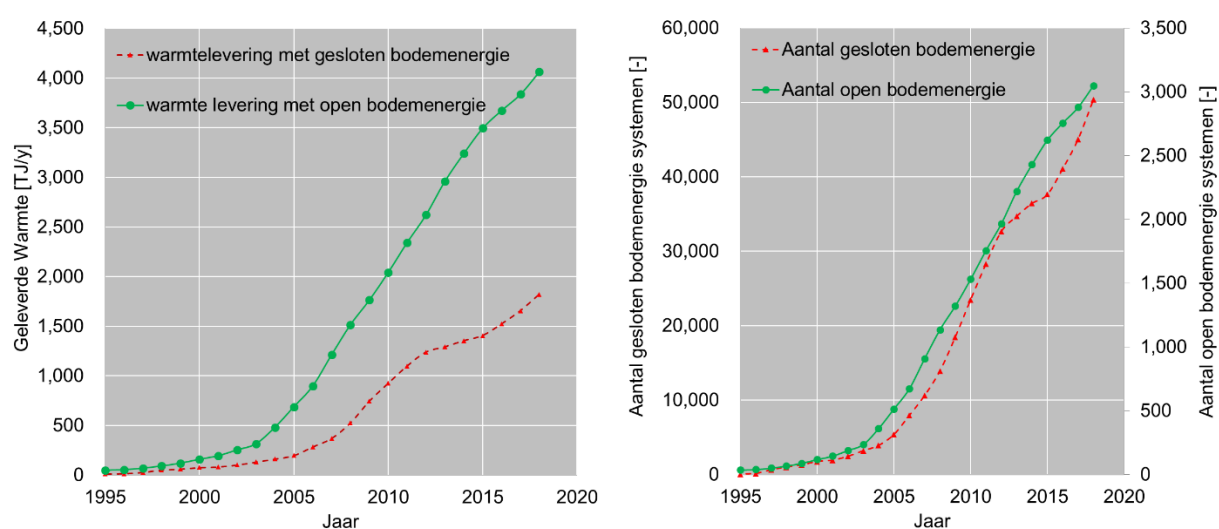
INHOUDSOPGAVE

1. INLEIDING
2. GERELATEERDE ONDERWERPEN EN DELTAFACTS
3. STRATEGIE
4. SCHEMATISCHE WEERGAVE
5. WERKING
6. KOSTEN EN BATEN
7. RANDVOORWAARDEN
8. GOVERNANCE
9. PRAKTIJKERVARING EN LOPENDE INITIATIEVEN
10. KENNISLEEMTES
11. BRONNEN & LINKS
12. COLOFON

1. INLEIDING

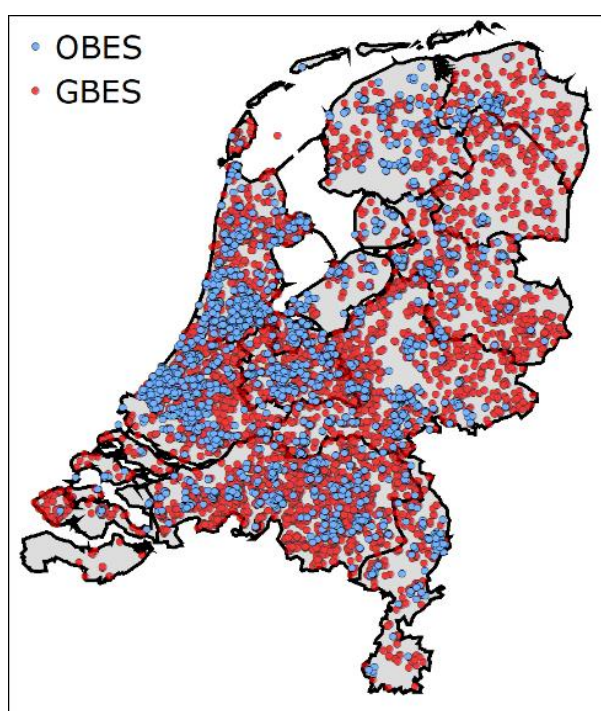
In de Nederlandse energietransitie speelt de ondergrond een belangrijke rol. Met name in de bebouwde omgeving zijn open en gesloten bodemenergiesystemen (OBES en GBES), warmteopslag en geothermie mogelijke oplossingen voor duurzame verwarming van huizen en gebouwen. Voor veel gebouwen is bodemenergie namelijk de enige en/of meest duurzame manier voor verwarming en koeling. Voor de energietransitie is het daarom van belang om grootschalige toepassing dan ook faciliteren om de ambities voor CO₂ reductie van het klimaatakkoord te halen.

Bodemenergiesystemen zijn sinds het begin van de 21^e eeuw grootschalig toegepast, resulterend in een geschatte hoeveelheid van zo'n 50.000 gesloten systemen en 3.000 open systemen in 2018 (Figuur 1, links), verspreid door heel het land (Figuur 2). Gezien de ambitieuze doelstellingen voor het verder verduurzamen van de gebouwde omgeving in het in 2019 afgesloten 2^e klimaatakkoord zal de toepassing van zowel open als gesloten bodemenergiesystemen naar verwachting verder doorgroeien. In 2050 heeft naar verwachting 10 tot 30% van de gebouwen in Nederland een bodemenergiesysteem ([Naber et al, 2016](#)).



Figuur 1 Links: Totaal geleverde warmte per jaar per type bodemenergiesysteem. Rechts: Ontwikkeling aantal geïnstalleerde warmtepompen. Bron: Vereniging Warmtepompen en CBS. <https://www.duurzaamverwarmd.nl/trendrapport/>. NB. Bij open bodemenergiesystemen zitten er vaak meerdere warmtepompen aan 1 systeem, uit het grondwater register weten we dat er circa 3000 open systemen zijn.

De ontwikkeling van open en gesloten bodemenergiesystemen legt een toenemend beslag op de beperkte ondergrondse ruimte en daarin reeds aanwezige functies. Zo wordt ongeveer 60 procent van het Nederlandse drinkwater geproduceerd uit grondwater. Ook in de toekomst zal de Nederlandse drinkwatervoorziening sterk afhankelijk blijven van grondwater, en wordt die afhankelijkheid mogelijk zelfs groter ([RIVM, 2015](#)). Momenteel concentreren bodemenergiesystemen zich vooral in de stedelijke omgeving. Grondwaterwinningen voor drinkwaterproductie bevinden zich vaak op de rand van steden of daarbuiten. Toch ligt een deel van de winningen ook in stedelijk gebied en waren in 2012 17 (zowel vergunde en onvergunde) open bodemenergiesystemen bekend die in een grondwaterbeschermingsgebied lagen. Nog eens 52 open systemen lagen op korte afstand (< 500 m) van een grondwaterbeschermingsgebied ([Bonte et al., 2013a](#)). Voor de gesloten bodemenergiesystemen is het onbekend hoeveel er in of nabij grondwaterbeschermingsgebieden liggen.



Figuur 2 Gemelde gesloten (GBES) en vergunde open (OBES) bodemenergiesystemen in Nederland. Bron: [Nationaal Georegister](#).

Uit verschillende onderzoeken blijkt dat individuele bodemenergiesystemen beperkte invloed op de grondwater kwaliteit hebben. Desondanks is het belangrijk om eventuele risico's voor de grondwaterkwaliteit in ogenschouw te houden. Dit is niet alleen relevant voor de drinkwaterwinning, maar ook voor andere functies van grondwater, zoals de habitatfunctie en ecologische processen, zoals natuurlijke afbraak, irrigatie en de "intrinsieke" waarde van grondwater.

In deze Deltafact worden de beschikbare kennis en de kennisleemtes over de effecten van zowel OBES als GBES op de grondwaterkwaliteit uiteengezet. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen effecten die optreden tijdens aanleg, tijdens bedrijf, en na het einde van de levensduur. Daarnaast worden beleid en regelgeving van

bodemenergiesystemen beschreven, en de voornaamste handelingsperspectieven waaraan gedacht kan worden voor de beheersing van negatieve effecten.

2. GERELATEERDE ONDERWERPEN EN DELTAFACTS

Trefwoorden: Waterkwaliteit, Grondwater, Energieopslag

Deze Deltafact is er één van een vijftal gemaakt in het Kennisimpuls-project Grondwater. De andere vier zijn:

- Deltafact 'Mogelijke lange-termijn effecten van grootschalige diepe en ultradiepe geothermie op grondwaterkwaliteit'
- Deltafact 'Mogelijke lange-termijn effecten van opkomende stoffen op grondwaterkwaliteit'
- Effecten van kunstmatige infiltratie van oppervlaktewater op de grondwaterkwaliteit
- Deltafact 'Vergrijzing van grondwater'

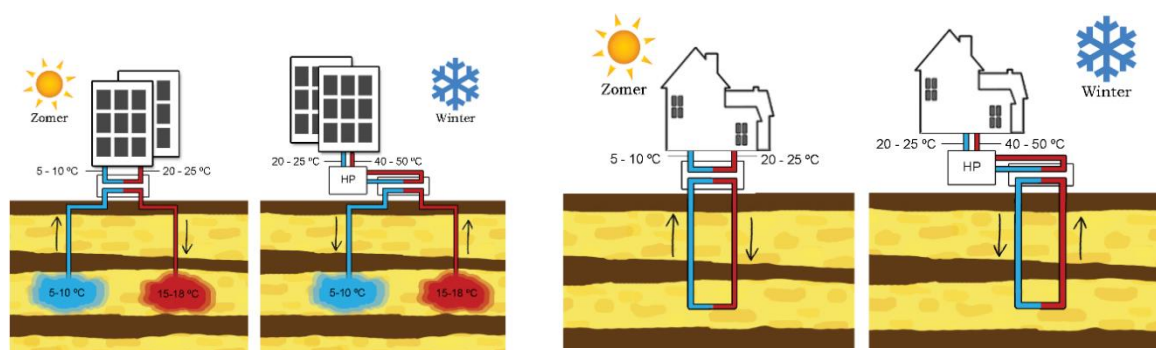
Overige gerelateerde Deltafacts:

- [Klimaatverandering en grondwaterbeheer stedelijk gebied,](#)
- [Ondergrondse waterberging,](#)
- [Ecologische effecten koudwaterlozingen,](#)
- [Deltascenario's en adaptief deltamanagement,](#)

3. STRATEGIE

Deze Deltafact heeft betrekking op grondwaterkwaliteit dus onder andere het realiseren van KRW-doelen: chemische doelen, biologie, monitoring. Daarnaast is er een relatie met de energietransitie en het het klimaatbeleid.

4. SCHEMATISCHE WEERGAVE



Figuur 3 Schematische weergave van een open (links) en gesloten bodemenergiesysteem (rechts) in de winter en zomer. Bron: [Bloemendal 2018](#)

5. WERKING

Bodemenergiesystemen worden toegepast bij allerlei typen gebouwen, waarbij de belangrijkste voorwaarde is dat ze goed geïsoleerd zijn, zodat ze met lage temperatuur (40-60°C) kunnen worden verwarmd. Bij een gesloten bodemenergiesysteem (GBES) wordt een circulatiemedium rondgepompt door een gesloten leidingsysteem dat in de bodem is geïnstalleerd, in de regel tot maximaal zo'n 200 m diepte (Figuur 3, rechts). Is het circulatiemedium kouder dan de omringende bodem dan neemt de vloeistof warmte op, is het medium warmer dan koelt deze juist in de bodem af. Op deze manier kan er in de winter warmte uit de bodem worden onttrokken en/of in de zomer koude. Het leidingstelsel wordt vaak verticaal in een boorgat aangebracht. Er bestaan echter ook horizontale toepassingen, die ondieper worden toegepast, of in constructieve elementen zoals heipalen of kademuren. Gesloten bodemenergiesystemen (Figuur 3, rechts) zijn geschikt voor verwarming en koeling van alle soorten gebouwen en kunnen vrijwel overal worden toegepast, omdat er geen eisen worden gesteld aan de ondergrond en technisch relatief eenvoudig functioneren. In Nederland worden ze vooral toegepast bij grondgebonden woningen en kleine gebouwen. In het buitenland worden ook grotere gesloten systemen toegepast, bijvoorbeeld omdat de geohydrologische situatie minder geschikt is voor open systemen. De energievraag van gesloten systemen is vaak voor verwarming, zodat er netto afkoeling optreedt rondom de bodemwarmtewisselaar.

Een open bodemenergiesysteem (OBES) maakt gebruik van grondwater om thermische energie (warmte of koude) van de ondergrond naar het gebouw te transporteren, en andersom (Figuur 3, links). De diepte van de bronnen varieert meestal tussen enkele tientallen meters tot maximaal circa 200 meter. In de winter

wordt warm grondwater omhoog gepompt uit de warme bron. De warmte wordt gebruikt om het gebouw te helpen verwarmen. Het afgekoelde grondwater wordt in een andere, koude bron weer terug in de bodem gepompt. In de zomer draait de stromingsrichting om: grondwater uit de koude bron wordt gebruikt om het gebouw te koelen, het warmt op en wordt gebruikt om de warme bron op te laden. Er is dus geen netto onttrekking van grondwater en tussen het grondwater en het gebouwsysteem is een warmtewisselaar geplaatst waarmee het grondwater- en gebouwcircuit zijn gescheiden. Open bodemenergiesystemen worden ingezet voor verwarming en koeling van grotere gebouwen, Figuur 3 links.

6. KOSTEN EN BATEN

Beide typen bodemenergiesystemen maken vaak gebruik van een warmtepomp (die meestal wordt aangedreven door stroom, maar soms ook door gas) om in de winter de relatief lage temperatuur vanuit de bodem naar het benodigde temperatuur niveau voor verwarming in de gebouwen te kunnen leveren. Het rendement van deze warmtepompen is daarom hoog. Een warmtepomp met een COP van 5 kan bijvoorbeeld met 1 kW elektrische energie en 4 kW thermische energie uit de bodem, 5 kW thermische energie leveren aan het gebouw (500% rendement). Samen met de elektriciteit voor het laden van koude is een besparing mogelijk van 40 tot 80 procent ten opzichte van het elektriciteitsverbruik van een koelmachine. Meer info: <https://bodemenergien.nl/bodemenergie/voordelen-van-bodemenergie/>

7. RISICO'S VOOR WATERKWALITEIT

Waterkwaliteitsrisico's bij aanleg

Effecten van gebruik boorspoeling en verontreinigd werkwater

In het algemeen geldt dat wordt getracht risico's bij het uitvoeren van boringen te voorkomen via de eerder genoemde wettelijke erkenningsregeling voor boorbedrijven BRL 2100 ([SIKB 2018](#)). Uit inspecties van de Inspectie Leefomgeving en Transport (ILT) blijkt dat in de eerste jaren na de invoering van de protocollen de installatie van systemen in de praktijk niet altijd volgens deze protocollen plaatsvindt ([IL&T 2018](#)).

Effecten van gebruik boorspoeling en verontreinigd werkwater

Één van de effecten die kan optreden in de aanlegfase is het vermorsen of lekken van boorspoeling en het gebruik van verontreinigd werkwater. Het lekken van

boorspoeling is in de praktijk echter geen noemenswaardig risico omdat als boorspoeling additief gebruikt wordt gemaakt van bentoniet, wat inert is, of biologisch goed afbreekbare polymeren (Ministerie van I&W 2018). Het gebruik van verontreinigd werkwater tijdens de boring kan ook verontreiniging veroorzaken van het grondwater. Het gebruik van oppervlakte water is om die reden dan ook niet toegestaan.

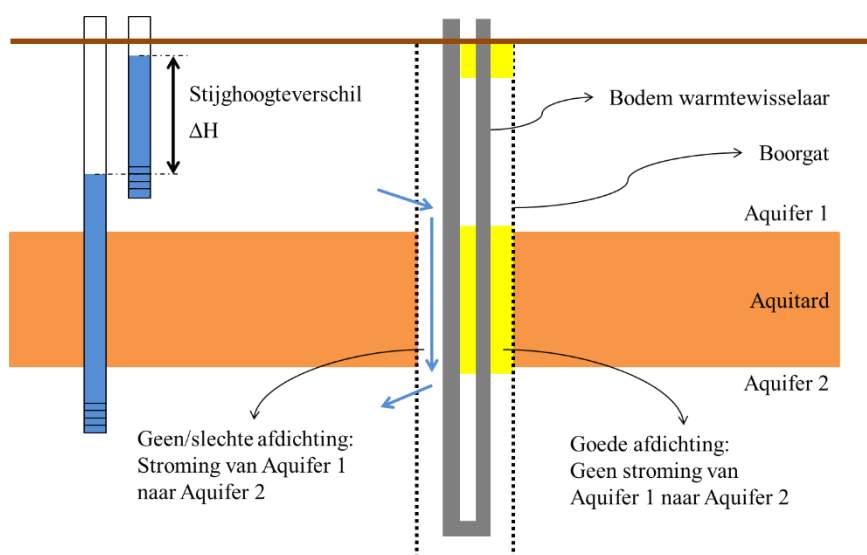
Risico van kortsluitstroming en verspreiding verontreinigingen door inadequate afdichting scheidende lagen

Wanneer een scheidende laag bij aanleg wordt doorboord en vervolgens onvolledig afgedicht, dan kan kortsluitstroming ontstaan door het drukverschil tussen het grondwater boven en onder de doorboorde scheidende laag (Figuur 4). Hierdoor kan menging optreden van verschillende watertypen; bijvoorbeeld menging van zoet en zout grondwater of het naar grotere diepte verplaatsen van grondwaterverontreinigingen.

Het risico op slecht aangevulde boorgaten is het hoogst bij gesloten bodemenergiesystemen, omdat daarvoor veelal gebruik gemaakt wordt van spoelboringen en het aantal boringen per eenheid warmte groot is. Bij een spoelboring is het (A) lastig om de bodemlagen die een scheidende werking hebben te identificeren, en (B) door de kleine diameter lastig om het boorgat ter hoogte van de scheidende lagen aan te vullen met afdichtend materiaal. Adequate afdichting in de omstorting van de lus is daardoor moeilijk te realiseren. Uit een themagerichte inspectie door de Inspectie Leefomgeving en Transport ([ILT, 2018](#)) is bovendien gebleken dat boorploegen de scheidende lagen niet altijd goed afdichten, en dat bij 11 van de 13 geïnspecteerde boorbedrijven het systeem niet volledig volgens de milieuregels werd aangelegd.

Als afdichtend materiaal werd in de periode tot 2014 veelal klei toegepast. Maar sinds de invoering van de BRL 11001 protocollen wint de toepassing van grout aan populariteit omdat klei lastig is aan te brengen in de kleine boorgaten. Er bestaat echter nog wel twijfel over de geschiktheid van grout als afdichtend materiaal. Veelal worden cement/bentoniet mengsels gebruikt die plastisch blijven. Als er grout met alleen cement wordt toegepast is er het risico op scheurvorming in het cement en risico op kortsluitstroming langs het uitgeharde cement. Voor OBES is dit risico veel lager, omdat hier over het algemeen gebruik wordt gemaakt van zuigboringen waarmee goede boorbeschrijving gemaakt kunnen worden. Ook is de ruimte tussen

de boorgatwand en de daarin geplaatste buis doorgaans groter bij OBES-boringen, waardoor het slecht doorlatende aanvulmateriaal beter kan worden aangebracht. Naast inadequate afdichting kan ook het instorten van een boorgat leiden tot kortsluitstroming wanneer de scheidende lagen na instorting niet meer kunnen worden hersteld.



Figuur 4 Schematische weergave van kortsluitstroming in een inadequaaf afdichtte boorgat, in dit geval een lus van een GBES.

Binnen het KWR onderzoek 'Effecten en risico's van gesloten bodemenergiesystemen' (KWR, 2013) is door middel van analytische en numerieke berekeningen in beeld gebracht wat de effecten van kortsluitstroming zijn. Voor enkele systemen is hierbij aangetoond dat

de lekkageflux bij inadequate afdichting verwaarloosbaar is. In een worst-case scenario waarbij uit is gegaan van een volledig met grind aangevulde bodemlus en een groot stijghoogteverschil van 4 m, wordt een fluxen berekend ($> 0.1 \text{ m}^3/\text{d}$). Dit is conform recente bevindingen in wetenschappelijk literatuur (Cassano et al., 2020). Onder Nederlandse omstandigheden met beperkte stijghoogte verschillen is de lekstroom beperkt. Echter, wanneer de protocollen niet worden nageleefd (door combinatie van slecht werken en geen/beperkt toezicht) kan cumulatie van slecht afgedichte boringen gezamenlijk wel weer voor een significante lekstroom zorgen.

Het effect van een dergelijke lekkageflux is uiteraard afhankelijk van het verschil in grondwaterkwaliteit tussen de verschillende watervoerende pakketten, en mede daardoor sterk locatie gebonden. In aanwezigheid van een grondwaterverontreiniging kan een kleine lekkage een grote hoeveelheid grondwater beïnvloeden, vooral als het een zaklaag als bron van grondwaterverontreiniging betreft.

Verontreiniging door het doorboren van verontreinigde grond

De protocollen van BRL 2100 verplichten Boorfirma's om bij het boren in bodem- en grondwaterverontreinigingen, extra voorzorgmaatregelen nemen om te voorkomen dat de verontreinigingen naar grotere diepte verspreiden.

Waterkwaliteitsrisico's bij exploitatie

Effect van temperatuur op de chemische samenstelling grondwater

Temperatuur heeft invloed op chemische evenwichten en de snelheid (kinetiek) van (bio)chemische processen in grondwater en kan daardoor het oplossen en neerslaan van mineralen, de binding van stoffen en de afbraak van stoffen versnellen of juist vertragen. Op basis van de theorie mag verwacht worden dat de door temperatuur veroorzaakte effecten tot de toegestane 25-30°C klein zullen zijn ([Hartog et al., 2013](#)). Dit gegeven blijkt ook uit praktijkstudies in zowel binnen- als buitenland (bijvoorbeeld [Sowers et al., 2006](#); [Bonte et al., 2011b](#); [Possemiers et al., 2014](#); [Garrido Schneider et al., 2016](#)).

In labexperimenten ([Bonte et al., 2013b](#)) en modelsimulaties ([Bonte et al., 2014](#)) was bij temperaturen boven de 25°C de mobilisatie van arseen aantoonbaar door versnelde reductie van ijzerhydroxiden ofwel verhoogde desorptie. Dit zou dan resulteren in hogere concentraties aan de rand van de warme bron. Ook kan bij hogere temperaturen de waterkwaliteit beïnvloed worden door het versneld mobiliseren van sedimentair organisch materiaal ([Brons et al., 1991](#)) en kan kalk neerslaan door verminderde oplosbaarheid ([Griffioen et al., 1993](#)). Bij toepassing van BES met hogere temperaturen zal hier dus rekening mee gehouden moeten worden.

In het kader van een mogelijk nieuw warmte opslagsysteem in Nieuwegein zijn door [KWR \(2019\)](#) labexperimenten uitgevoerd met sediment uit het voor opslag van thermische energie verkende watervoerend pakket. In het lab trad ook verhoogde mobilisatie van het van nature in de bodem aanwezige arseen op tot concentraties boven de norm van het Drinkwaterbesluit, maar werd tegelijkertijd geconstateerd dat deze mobilisatie reversibel was; de concentratie arseen nam weer af wanneer de temperatuur lager werd. Deze reversibiliteit bleek echter niet of slechts deels het

geval voor de van nature in lage concentraties voorkomende elementen wolfram (bij temperaturen vanaf 23 °C), cesium, lithium, molybdeen en rubidium (bij temperaturen vanaf 60 °C). Achtergrondconcentraties van verschillende typen elementen in de bodem zijn variabel, en over het algemeen zeer laag. Over hoe belangrijk deze effecten in de praktijk zijn voor de grondwaterkwaliteit, ruimtelijk en als functie van tijd, is nog weinig bekend.

Effect temperatuur op microbiologie

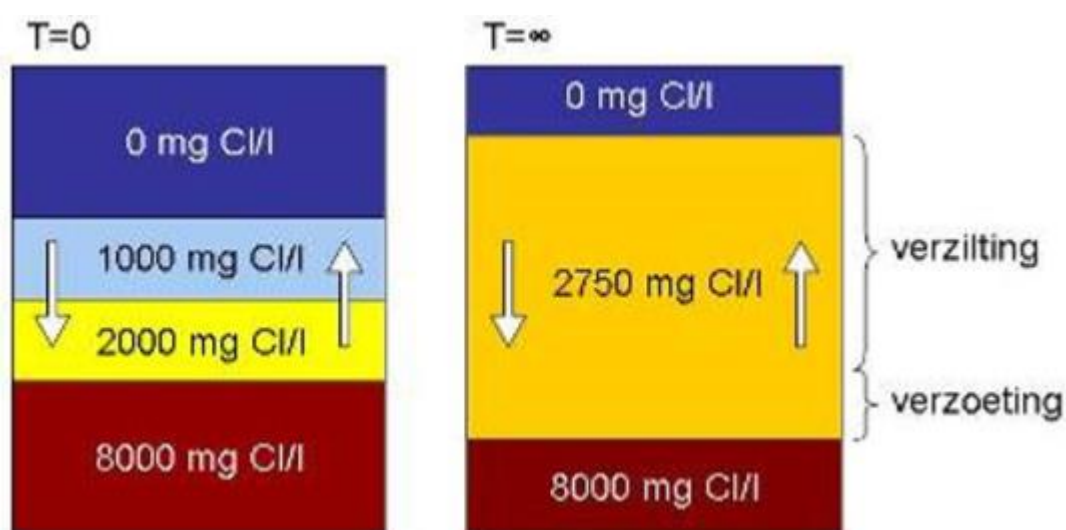
Ook de microbiologische samenstelling van grondwater kan beïnvloed worden door temperatuurveranderingen. In theorie kunnen hierdoor bepaalde processen niet meer op natuurlijke wijze verlopen, en ziekteverwekkers ontstaan ([RIVM, 2009](#)). Praktijkervaring leert dat dit effect tot 25-30°C beperkt blijft tot een mogelijke verandering in samenstelling en diversiteit van zowel bacteriën en microfauna (bijvoorbeeld [Sowers et al., 2006](#); [Brielman et al., 2009](#)). De hoeveelheden en activiteit waren onaangetast, en ook de uitgevoerde ecosysteemfuncties bleven bewaard. Bij een inventarisatie van een aantal Nederlandse OBES (tot 35°C) werd geen verschil in microbiologische samenstelling of kwantiteit gevonden ([Hartog et al., 2013](#)). Labexperimenten lieten wel weer zien dat ook een temperatuursverandering tot 25°C kan leiden tot een verschuiving in redoxcondities van ijzer-reducerend, naar sulfaat reducerend en vervolgens methanogene omstandigheden ([Bonte et al., 2013c](#)). Ook voor de impact op de microbiologie geldt dat bij hogere temperaturen de verwachte effecten groter zijn ([KWR, 2019](#)).

Vermenging grondwater door exploitatie open bodemenergiesystemen

De exploitatie van een OBES zorgt voor menging van verschillende watertypen. Het effect hiervan op de grondwaterkwaliteit is het hoogst in watervoerende lagen waar van nature een sterke gradiënt aanwezig is in bijvoorbeeld zoutgehalte, pH of redoxcondities (Figuur 5). Vermenging over deze gradiënt treedt op door de initiële menging bij het onttrekken en weer terugpompen van het grondwater, doordat het opgeslagen warme of koude water door natuurlijke grondwaterstroming afdrijft van de put, en doordat dispersie gedreven menging optreedt aan de rand van de ondergrondse opslagbel.

In praktijkstudies is het effect van dergelijke menging als groter naar voren gekomen dan de door temperatuur veroorzaakte effecten. Een case-study in Nederland toont bijvoorbeeld aan dat hierdoor ondiep grondwater met hogere

concentraties aan chloride en sulfaat vermengd raakte met dieper grondwater, waardoor er op diepte een netto verhoging in concentraties werd waargenomen, gelijktijdig met een verlaging in het ondiepe gedeelte ([Bonte et al., 2011b](#)). De verhoging leidde hier echter niet tot waarden boven de drinkwaternorm. Ook in [Hartog et al. \(2013\)](#) wordt vermelding gemaakt van twee systemen waar verzilting is opgetreden als gevolg van menging. Voor een systeem in België zijn afwijkende pH-, ijzer-, en mangaanconcentraties toegeschreven aan menging veroorzaakt door een OBES ([Possemiers et al., 2014](#)). Menging van zuurstofhoudend en ijzerhoudend grondwater kan bij ondiepe OBES leiden tot problemen met putverstopping.



Figuur 5 Illustratie van mogelijke effect vermenging veroorzaakt door een OBES systeem in een watervoerend pakket met een niet lineaire chloride verdeling. Uit: Meer Met Bodemenergie (2012a).

Menging van verschillende grondwatertypen zou theoretisch gezien ook kunnen optreden als secundair effect van de toename van de grondwatertemperatuur, omdat bij een hogere temperatuur de viscositeit (ofwel stroperigheid) en de dichtheid van water afnemen, waardoor er dichtheid stroming ontstaat, die zorgt voor verticale verspreiding van in het grondwater opgeloste stoffen. Modelstudies hebben aangetoond dat het dichtheidsverschil met het koudere natuurlijke grondwater kan leiden tot opwaartse, convectie gedreven stroming van dieper gelegen zout grondwater. Hierdoor zou verzilting van ondiep grondwater kunnen optreden ([van Lopik et al., 2015](#)). Echter, op basis van zowel analytische berekeningen als veldstudies valt te constateren dat deze effecten niet noemenswaardig zullen optreden bij temperaturen onder de 30 °C ([MMB, 2012c](#)).

In stedelijk gebied waar veel open bodemenergiesystemen in elkaars hydrologische invloedssfeer staan, kan een eventuele bodemverontreiniging snel worden verspreid. Hoewel de verdunning die daarbij optreedt in de regel groot is, kan er ook versterkte oplossing uit zaklagen optreden. Daarnaast zou de natuurlijke afbraak van verontreinigingen in bepaalde omstandigheden ook gestimuleerd kunnen worden. Het effect van de toepassing van OBES in verontreinigd grondwater is dus sterk locatieafhankelijk ([Zuurbier et al., 2013](#)). In de praktijk zijn tot dusverre ook verschillende effecten geobserveerd: na 10 jaar toepassing van OBES in verontreinigd grondwater bij Utrecht Centraal zijn geen positieve effecten op de afbraak van de verontreiniging geobserveerd, bij een OBES in Eindhoven leek bij de eerste metingen na 1 jaar sprake te zijn van verbeterde omstandigheden voor afbraak ([Sommer, 2013](#)).

Lekkages uit installaties

Door een deel van de aanbieders van GBES wordt alleen water als circulatiemiddel gebruikt. Andere aanbieders voegen een antivriesmiddel toe om de thermische eigenschappen te verbeteren, viscositeitverbeteraars om pompenergie te verminderen en additieven om corrosie, biologische groei, slijtage en verstopping tot circa 30% te voorkomen ([MMB, 2012a](#)). Lekkage van circulatiemiddel kan daarom leiden tot grondwaterverontreiniging. De lekkagekans van een met de juiste materialen en methoden aangelegd gesloten bodemenergiesysteem wordt als laag ingeschat ([MMB, 2012a](#)). In het rapport van [KWR \(2013\)](#) is op basis van lekkansen van leidingwerk in de drinkwatervoorziening de lekkansen van een GBES ingeschat op één lekkage per jaar per 435 bodemlussen. Hierbij is de kans op lekkage in het horizontale deel (1:625) als groter ingeschat dan in het verticale deel (1:1.428). Over het algemeen neemt de kans op lekkage toe met de lengte van het leidingwerk en het aantal gebruikte koppelingen. Het lekvolume is afhankelijk van de grootte van het systeem, het type en de locatie van het lek, en de reactietijd van de beheerder van het systeem. Alleen al het verticale deel van een typisch GBES met een diepte van 80 m bevat bijvoorbeeld zo'n 85 liter vloeistof ([MMB, 2012a](#)). Lekkage door aangraving van een horizontaal leidingdeel zorgt voor een beperkte spill van circulatiemedium en wordt ook eerder opgemerkt omdat het systeem dan direct in storing gaat. Bij kleinere lekkage in bijvoorbeeld een koppeling, gaat het systeem na verloop van tijd ook in storing, door drukverlies.

Het effect op de grondwaterkwaliteit is vervolgens afhankelijk van zowel het gelekte volume als de samenstelling van het circulatiemiddel. Hierin mag volgens regelgeving monopropyleenglycol, ethyleenglycol, kaliumcarbonaat of water gebruikt worden ([SIKB 2014](#), protocol 11001). Deze stoffen zijn goed afbreekbaar, vooral onder aerobe omstandigheden maar ook onder anaerobe omstandigheden ([MMB, 2012a](#)). De samenstelling van het gebruikte antivries en de andere additieven is echter vaak niet bekend, omdat dit onder het bedrijfsgeheim van de fabrikanten van circulatiemiddelen valt. Andere additieven worden toegepast om corrosie te beperken of de viscositeit te bevorderen. Bekend is dat hier bijvoorbeeld ook benzotriazool in kan zitten, een slecht afbreekbaar middel dat op lange termijn schadelijk is voor in water levende organismen (persistent en toxisch). Dergelijke kleine toevoegingen kunnen daarom naar verwachting het grootste milieueffect hebben ([RIVM, 2013](#)). De wetgever stelt aan deze additieven echter geen eisen. In [KWR \(2013\)](#) wordt het risico van een lek met antivries en additieven dan ook als groot beschouwd, met een kleine kans maar een groot potentieel effect. De lekkans is niet groot, maar met de zeer grote aantallen die worden aangelegd is het aannemelijk dat er toch veel lekkage zullen optreden. Met een juist ontwerp van de warmtepomp en temperatuur trajecten en toegepaste materialen kunnen veel aanbieders echter alleen met water als circulatiemedium werken.

Waterkwaliteitsrisico's na beëindiging van het gebruik

De risico's die kunnen optreden na beëindiging van het gebruik van bodemenergiesystemen worden via het Wijzigingsbesluit bodemenergiesystemen beheerst door de volgende maatregelen: (1) de beëindiging van het gebruik van het systeem moet worden gemeld, (2) bodemlussen en bronnen mogen niet worden verwijderd, (3) circulatievloeistof moet uit de bodemlussen worden verwijderd, en (4) de bodemlus of bron moet worden afgevuld met een waterondoorlatend materiaal conform protocol 2101 mechanisch boren. Het voor de bodemlussen gebruikte PE blijft dus achter in de boorgaten. Onder de van nature in de ondergrond voorkomende omstandigheden is dit echter stabiel en daardoor niet schadelijk. Alleen in aanwezigheid van een sterke oxidator (bijvoorbeeld chloorbleekloog) is het afbreekbaar ([KWR, 2013](#)) Het is zeer onwaarschijnlijk dat dergelijke omstandigheden in de ondergrond voorkomen. Indien de circulatievloeistof conform protocol verwijderd wordt, zit het resterende risico van een verlaten bodemenergiesysteem dus in de mogelijk kortsluitstroming en verspreiding van verontreinigingen door inadequaaf afgedichte scheidende lagen. Dit risico is reeds beschreven bij de risico's veroorzaakt door de aanleg van BES systemen.

8. GOVERNANCE

Beleid en regelgeving

Wettelijke eisen voor bodemenergiesystemen zijn opgenomen in de Waterwet, de Wet milieubeheer en Wet bodembescherming. In 2022 komen deze wetten (beleidsneutraal) samen in de Omgevingswet. Het toezicht op en regie over de systemen is afhankelijk van zowel het type systeem als de grootte van het systeem. Open systemen vallen onder het bevoegd gezag van de provincies. Voor open systemen is in de meeste gevallen een watervergunning nodig voor de onttrekking. Alleen bij systemen met een debiet kleiner dan 10 m³/u (de meeste open systeem hebben een vergund debiet tussen 50 en 100 m³/u; Bloemendal, 2018) kan hier een vrijstelling voor gelden op basis van een provinciale verordening. In dat geval is er nog wel een meldingsplicht op basis van de Waterwet. In het Wijzigingsbesluit bodemenergiesystemen ([Staatsblad, 2013](#)) is verder geregeld dat voor OBES de maximaal toelaatbare retourtemperatuur 25°C is , tenzij hier met een maatwerkvoorschrift van afgeweken wordt.. Ook moet over meerdere jaren gezien de energiebalans in de bodem zo gereguleerd worden dat er geen warmte-overschot in de bodem ontstaat (een koude-overschot mag wel). Dit is een van de redenen dat er in Nederland enkel op pilotschaal en via vergunning met een maatwerkvoorschrift ervaring is opgedaan met het uitsluitend opslaan van warmte (ook vaak Hoge Temperatuuropslag (HTO) genoemd). HTO is een vorm van OBES waarbij water met een temperatuur > 25°C wordt opgeslagen en daardoor ook de energiebalans niet gewaarborgd kan worden (TNO 2015, [Bloemendal et al 2020](#)).

Gesloten systemen vallen onder de verantwoordelijkheid van de gemeenten. Er geldt hierbij een meldingsplicht in het kader van het Activiteitenbesluit of Besluit lozen buiten inrichtingen. Voor systemen met een vermogen > 70 kW is een 'omgevingsvergunning beperkte milieutoets' nodig. Een dergelijke vergunning is ook nodig voor een klein systeem als dat binnen een 'interferentiegebied' ligt; een zone die door gemeentes aangewezen kan worden om aan te sturen op een zo optimaal mogelijk gebruik van de ondergrond voor bodemenergie. In het Wijzigingsbesluit bodemenergiesystemen is bepaald dat de temperatuur van het circulatiemiddel bij GBES minimaal -3°C en maximaal 30°C mag zijn.

Er zijn verschillende typen beschermingszones waarbinnen op basis van provinciale verordeningen extra regels gelden voor drinkwaterbescherming, en bodemenergiesystemen niet of alleen onder voorwaarden zijn toegestaan:

grondwaterbeschermingsgebieden inclusief waterwingebied (veelal 25- en 100-jaarzones), boringsvrije zones en aanvullende strategische voorraden. In waterwingebieden zijn alleen activiteiten voor drinkwaterwinning toegestaan. In de omringende beschermingsgebieden gelden meestal ook zeer beperkende voorwaarden. In de boringsvrije zones en de aanvullende strategische voorraden kunnen de regels soepeler zijn. Welke activiteiten in de verschillende zones onder voorwaarden worden toegestaan verschilt per provincie.

De beheersing van risico's die kunnen optreden als gevolg van het inrichten en opereren van een bodemenergiesysteem is geregeld via private kwaliteitsborging. De richtlijnen BRL 2100 en SIKB protocol 2101 'Mechanisch Boren' ([SIKB, 2018](#)), BRL 11000 en SIKB protocol 11001 'Ondergronds deel installaties bodemenergie' ([SIKB 2014](#)) richt zich op de milieuhygiënische kwaliteit van de bodemenergiesystemen, om negatieve effecten te voorkomen. De BRL 6000-21/00 'Ontwerpen, installeren en beheren van energiecentrales van bodemenergiesystemen' richt zich op de energiecentrale om te waarborgen dat de systemen in de praktijk ook de benodigde besparing halen. Alle ontwerpers, boorbedrijven en installateurs moeten aan deze richtlijnen voldoen. Certificerende instellingen (CI) voorzien deze bedrijven van een certificaat dat ze toegang geeft tot de bodemenergiemarkt. De CI's spelen daarmee een belangrijke rol in de kwaliteitsborging van de deze type systemen. De wetgever heeft via deze constructie voorzien in een kwaliteitssysteem dat ervoor moet zorgen dat eventuele negatieve effecten worden voorkomen en positieve effecten worden gewaarborgd.

Handelingsperspectief gesloten bodemenergiesystemen

Voor gesloten systemen vormen kortsluitstroming door slecht afgedichte scheidende lagen en lekkage van het circulatiemiddel de belangrijkste risico's. De beheersing van deze risico's zou als volgt versterkt kunnen worden:

- Het vergroten van de (perceptie van) de pakkans bij overtredingen, vooral tijdens het aanvullen van boorgaten, door strenger toezicht door ILT en omgevingsdiensten op de naleving van reeds geldende protocollen. In ([Graaf et al., 2021](#)) staan een aantal concrete aanbevelingen hoe het kwaliteitssysteem te verbeteren.
- het verbeteren van de informatievoorziening: Door beter toezicht en administratie van systemen en milieu incidenten kan ook beter inzicht verkregen worden in de faalkansen en daaraan verbonden risico's (zie kennisleemten). Gedacht kan worden aan een systeem waarin niet alleen de locatie van systemen, maar ook,

de samenstelling van het circulatiemedium, en eventuele incidenten worden bijgehouden.

- Het aanpassen van de voorschriften voor aanvullen van boorgaten in de BRL 2,100/11,000. Op basis van lopend onderzoek lijkt het volledig aanvullen van de boorgaten met een ondoorlatend materiaal te leiden tot lagere risico's op kortsluitstroming in vergelijking met het laagsgewijs aanvullen met grind of zand bij zandlagen en klei bij scheidende lagen.
- De mogelijke effecten door lekkages van bodemlussen op de grondwaterkwaliteit kunnen nog verder verkleind worden door het gebruik van milieuvriendelijke circulatievloeistoffen. Bijvoorbeeld door toepassing van water zonder additieven te stimuleren of door een verdere beperking van de toegestane additieven in de BRL 11,000.
- Het instellen van een dieptebeperking voor het boren, zodat scheidende lagen boven kwetsbare watervoerende pakketten intact blijven. Wel dient per locatie een afweging te worden gemaakt tussen de bescherming van dieper grondwater versus de negatieve effecten van een geringere einddiepte op de toepassingspotentie en prestaties (thermisch rendement) van GBES.

Handelingsperspectief open bodemenergiesystemen

Voor open systemen zijn menging van verschillende grondwatertypen en de verspreiding van bestaande verontreinigingen de belangrijkste risico's. Gedegen vooronderzoek blijft essentieel om risico hierop in beeld te brengen. Vanwege de vergunningsplicht is er al goed zicht op activiteiten, zowel vooraf als ook tijdens het gebruik, en hebben de provincies mogelijkheden om waar nodig aanvullende preventie- of monitoringsvoorschriften op te nemen. Op deze manier kan OBES toch worden toegepast en ongewenste verspreiding/menging van watertypen worden beheerst.

9. PRAKTIJKERVARING EN LOPENDE INITIATIEVEN

Voor een actueel overzicht, neem contact op met:

<https://www.kennisplatformbodemenergie.nl/>

10. KENNISLEEMTES

De belangrijkste kennisleemte bij gesloten bodemenergiesystemen is gebrek aan kwantitatief inzicht in de fouten bij aanleg en faalkansen van individuele systemen om milieurisico's bij grootschalige toepassing van gesloten bodemenergiesystemen te beoordelen.

- Dit gebrek aan inzicht komt hoofdzakelijk doordat niet bekend is hoe frequent er in de praktijk kortsluitstroming optreedt tussen watervoerende pakketten als gevolg van het niet goed afdichten van scheidende lagen bij de aanleg, voor verschillende aanvulmethoden.
- Daarnaast is onbekend hoe groot de kans is dat de afdichtende werking van cementgebaseerd groutmengsel gedurende de gebruiksfase verslechterd. Er kunnen krimp scheuren vormen, gestimuleerd door temperatuurfluctuaties. En wellicht kan, bodemmateriaal deformeren of uitspoelen op het grensvlak met het uitgeharde grout; analoog aan piping, maar met dien verstande dat de hoeveelheid materiaal dat verplaatst beperkt is door het volume holle ruimtes rond het boorgat en er sprake moet zijn van een stijghoogteverschil. Voor de cement/bentoniet mengsels is onduidelijk of de mengverhoudingen in de praktijk wel goed worden gevolgd en wat de implicaties zijn van afwijking voor de doorlatendheid en plasticiteit van het afdichtmateriaal.
- Het ontbreekt aan technieken om de afdichtende werking na aanleg eenvoudig en objectief te controleren (meten) vanwege de kleine diameter van de leidingen en de kleine lekstroom. Een dergelijke techniek zou ook nuttig kunnen zijn bij inspectie en toezicht. Zolang niet bekend is of en waar kortsluitstromingen optreden kan ook niet gemeten worden wat de effecten zijn van lekkages op de waterkwaliteit.
- Daarnaast zijn er twijfels over de nauwkeurigheid van de inschatting van faalkansen door lekkages van het circulatiemedium. De vigerende inschatting is namelijk gebaseerd op storingsdata uit de drinkwatersector en het is de vraag hoe representatief die is voor gesloten bodemenergiesystemen aangezien in bodemlussen veel minder koppelstukken worden gebruikt dan in drinkwaterleidingen en omdat bij GBES de leidingen vooral verticaal zijn georiënteerd.
- Tot slot is weinig bekend over hoeveel er in de praktijk gebruik wordt gemaakt van potentieel schadelijke en persistente additieven zoals bijvoorbeeld benzotriazool. De vraag is bovendien in welke gevallen het haalbaar is om dergelijke additieven te verbieden en welke invloed dat heeft dat de prestatie van het GBES.

Voor OBES geldt dat een nadere uitwerking van de risico's van verspreiding van verontreinigingen door clusters van OBES noodzakelijk is, en hoe daar mee om te

gaan. Model- en praktijkstudies lijken er op te wijzen dat de effecten zowel positief als negatief kunnen zijn en dat er mogelijkheden liggen om de grondwaterkwaliteit verder te verbeteren door een slimme inrichting van het grondwatersysteem. Nader onderzoek is nog nodig naar de verspreidingsmechanismen, beheerbaarheid en monitoring.

Ook de veilige inpassing van OBES en GBES nabij of in co-existentie met andere grondwatergebruikers dient verder onderzocht te worden. Hierbij moet niet alleen gedacht worden aan de benodigde onderlinge afstanden tot bijvoorbeeld grondwaterbeschermingszones, maar bijvoorbeeld ook andere functies zoals systemen voor zoetwateropslag en hemelwaterinfiltratie

11. BRONNEN & LINKS

Bloemendal, M., & Mathijssen, H. (2013). Bodemenergie warm aanbevolen. SIKB cahier. <https://www.kennisplatformbodemenergie.nl/kennisportal/algemeen-skb-cahier-2013-bodemenergie-warm-aanbevolen/>

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. (2018). The Hidden side of cities. PhD Dissertation. TU Delft <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A0c6bcdac-6bf7-46c3-a4d3-53119c1a8606>

Bloemendal, M., Beernink, S., Bel, N. van, Hockin, A., Schout, G., (2020). Transitie open bodemenergiesysteem Koppert-Cress naar verhoogde opslagtemperatuur, Evaluatie van energiebesparingen en grondwatereffecten. KWR, Nieuwegein. <https://www.kwrwater.nl/projecten/transitie-wko-naar-hto-energie-en-milieubeheerstrategieen/>

Bonte, M., Stuyfzand, P. J., Hulsmann, A., & van Beelen, P. (2011a). Underground thermal energy storage: Environmental risks and policy developments in the Netherlands and European Union. *Ecology and Society*, 16(1). <https://doi.org/10.5751/ES-03762-160122>

Bonte, M., Stuyfzand, P. J., Van Den Berg, G. A., & Hijnen, W. A. M. (2011b). Effects of aquifer thermal energy storage on groundwater quality and the consequences for drinking water production: A case study from the Netherlands. *Water Science and Technology*, 63(9), 1922–1931. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.189>

Bonte, M., Van Breukelen, B. M., & Stuyfzand, P. J. (2013a). Environmental impacts of aquifer thermal energy storage investigated by field and laboratory experiments. *Journal of Water and Climate Change*, 4(2), 77–89.

<https://doi.org/10.2166/wcc.2013.061>

Bonte, M., van Breukelen, B. M., & Stuyfzand, P. J. (2013b). 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>

Bonte, M., Roling, W. F. M., Zaura, E., van der Wielen, P. W. W. ., Stuyfzand, P. J., van Breukelen, B. M., & Stuijzand, P. J. (2013c). Impacts of shallow geothermal energy production on redox processes and the microbial communities. *Environmental Science and 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>

Brielmann, H., Griebler, C., Schmidt, S. I., Michel, R., & Lueders, T. (2009). Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. *FEMS Microbial Ecology*, 68, 273–286. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2009.00674.x>

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)

Casasso, A., Ferrantello, N., Pescarmona, S., Bianco, C., & Sethi, R. (2020). Can Borehole Heat Exchangers Trigger Cross-Contamination between Aquifers? *Water*, 12(4), 1174. <https://doi.org/10.3390/w12041174>

Deltares, RIVM (2018). Factsheet Warmte Koude Opslag.

<https://www.bodemambities.nl/themas/warmte-koudeopslag>

Garrido Schneider, E. A., García-Gil, A., Vázquez-Suñè, E., & Sánchez-Navarro, J. (2016). Geochemical impacts of groundwater heat pump systems in an urban alluvial aquifer with evaporitic bedrock. *Science of the Total Environment*, 544, 354–368.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.096>

Graaf, A.d., Bloemendal, M., Schans, M.v.d., (2021) Aanvullen van boorgaten voor gesloten bodemenergiesystemen: Verkenning van en voorstellen tot verbetering van de kwaliteitsborging, KWR 2021.###, KWR, Nieuwegein.

<https://www.kwrwater.nl/projecten/betrouwbaar-en-betalbaar-aanvullen-boorgaten-voor-gesloten-bodemenergiesystemen/>

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)

Hartog, N., Drijver, B., Dinkla, I., & Bonte, M. (2013). Field assessment of the impacts of Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) systems on chemical and microbial groundwater composition. *European Geothermal Congress 2013*, 8.

https://www.researchgate.net/profile/Niels_Hartog/publication/265601612_Field_assessment_of_the_impacts_of_Aquifer_Thermal_Energy_Storage_ATESsystems_on_chemical_and_microbial_groundwater_composition/links/541bd9320cf2218008c4c441.pdf

Inspectie Leefomgeving en Transport (2018). Bedrijven nemen onaanvaardbare risico's bij aanleg gesloten bodemenergiesystemen. *Nieuwsbericht*, 30-05-2018

<https://www.ilent.nl/actueel/nieuws/2018/05/30/index>

KvINL (2014). BRL 6000-21. <https://www.kiwa.com/nl/nl/service/brl-6000-21-certificering-bodemgebonden-energiesystemen/>.

KWR, IF Technology (2013). Effecten en risico's van gesloten bodemenergiesystemen. <https://edepot.wur.nl/396258>

KWR (2019). Prestaties en effecten van ondergrondse warmteopslag. Een verkenning voor het P2X project. <https://library.kwrwater.nl/publication/60827901/>

Ministerie Infrastructuur en Waterstaat (2013). Lozingen bij aanleg en onderhoud van bodemenergiesystemen. Beleidsondersteunend document.

https://www.sikb.nl/doc/Bodemenergie/Lozingen%20handreiking_eindconcept_2013_doc_1.pdf

Ministerie Infrastructuur en Waterstaat (2018). Kamerbrief over effecten van handhaving ILT bij bodemenergiesystemen. ILT-2019/3440.

MMB (2012a). Meer met bodemenergie: Rapport 2 – Literatuuronderzoek. Bioclear, Deltares, IF Technology & Wageningen Universiteit.

<https://soilpedia.nl/Bikiviki%20documenten/Meer%20met%20Bodemenergie/>

MMB (2012b). Meer met bodemenergie: Rapport 3/4 – Effecten op de ondergrond. Bioclear, Deltares, IF Technology & Wageningen Universiteit.

<https://soilpedia.nl/Bikiviki%20documenten/Meer%20met%20Bodemenergie/>

MMB (2012c). Meer met bodemenergie: Rapport 6 – Hogetemperatuuropslag. Bioclear, Deltares, IF Technology & Wageningen Universiteit.

<https://soilpedia.nl/Bikiviki%20documenten/Meer%20met%20Bodemenergie/>

- Naber, N., et al. (2016). Een klimaatneutrale warmtevoorziening voor de gebouwde omgeving – update 2016. Delft, CE-Delft. 16.3I28.68.
<https://www.ce.nl/publicaties/download/2166>
- Possemiers, M., Huysmans, M., & Batelaan, O. (2014). Influence of Aquifer Thermal Energy Storage on groundwater quality: A review illustrated by seven case studies from Belgium. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2, 20–34.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2014.08.001>
- RIVM (2009). Warmte Koude Opslag en duurzaam gebruik van de ondergrond.
<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/607050007.pdf>
- RIVM (2011). De mogelijke risico's van warmte-en koudeopslag voor de grondwaterkwaliteit. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/607050009.pdf>
- RIVM (2013). A method to rank the relative environmental hazard of coolants leaking directly into groundwater. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/607050014.pdf>
- RIVM (2015). Scenario's drinkwatervraag 2015-2040 en beschikbaarheid bronnen. Verkenning grondwatervoorraden voor drinkwater.
<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2015-0068.pdf>
- SIKB (2014). BRL 11000 en protocol 11001 (Ondergronds deel installaties bodemenergie). <https://www.sikb.nl/bodembeheer/richtlijnen/brl-11000>.
- SIKB (2018). BRL 2100 en protocol 2101 (Mechanisch Boren).
<https://www.sikb.nl/richtlijnen/brl-2100>.
- Sommer, W., Drijver, B., Verburg, R., & Slenders, H. (2013). Combining shallow geothermal energy and groundwater remediation. *European Geothermal Congress 2013*, June, 3–7.
http://www.researchgate.net/publication/254864457_Combining_shallow_geothermal_energy_and_groundwater_remediation/file/3deec51ff824b965fb.pdf
- Sowers, L., York, K. P., & Stiles, L. (2006). Impact of thermal buildup on groundwater chemistry and aquifer microbes. *10th International Conference on Thermal Storage-Ecostock 2006: Thermal Energy Storage Here and Now*. Stockton, USA., 1–7.
<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.572.673&rep=rep1&type=pdf>
- Staatsblad, 2014. Wijzigingsbesluit bodemenergie.
<https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stb-2013-112.html>.
- TNO (2015). Technische en Juridische belemmeringen Hoge Temperatuuropslag (HTO).

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>

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>

12. COLOFON

Deze Deltafact is geschreven in het kader van het project Grondwater van de Kennisimpuls Waterkwaliteit. In de Kennisimpuls werken Rijk, provincies, waterschappen, drinkwaterbedrijven en kennisinstututen aan meer inzicht in de kwaliteit van het grond- en oppervlaktewater en de factoren die deze kwaliteit beïnvloeden. Daarmee kunnen waterbeheerders en andere partijen de juiste maatregelen nemen om de waterkwaliteit te verbeteren en de biodiversiteit te vergroten.

In het programma brengen partijen bestaande en nieuwe kennis bijeen, en maken ze deze kennis (beter) toepasbaar voor de praktijk. Hiermee verstevigen ze de basis onder het waterkwaliteitsbeleid. Het programma is gestart in 2018 en duurt vier jaar. Het wordt gefinancierd door het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, STOWA, waterschappen, provincies en drinkwaterbedrijven.

Versie: 4 januari 2020

Onder redactie van: Gilian Schout (KWR) Martin Bloemendal (KWR)

In samenwerking met Deltares en TNO