



# Mogelijke lange-termijn effecten van grootschalige geothermie op grondwaterkwaliteit

Versie: 25 april 2022

Onder redactie van: Gijsbert Cirkel (KWR), Joris Dijkstra, Mariëlle van Vliet (TNO),  
Stefan Jansen (Deltares)

## Inhoud

1. INLEIDING.....	1
2. GERELATEERDE ONDERWERPEN EN DELTAFACTS.....	4
3. SCHEMATISCHE WEERGAVE.....	5
4. TECHNISCHE KENMERKEN .....	6
Beschrijving van het thema geothermie .....	6
Terminologie.....	8
5. GOVERNANCE .....	10
6. MOGELIJKE RISICO'S VAN GEOTHERMIESYSTEMEN VOOR DE GRONDWATERKWALITEIT.....	14
De Aanlegfase.....	14
De Productiefase.....	22
Abandonnering .....	26
7. KENNISLEEMTES.....	27
8. HANDELINGSPERSPECTIEF .....	29
9. PRAKTIJKERVARING EN LOPEND ONDERZOEK.....	31
10. REFERENTIES .....	35

## 1. INLEIDING

Scope: Mogelijke lange-termijn risico's van grootschalige geothermie op  
grondwaterkwaliteit.

Door een toename van antropogene activiteiten aan maaiveld en in de ondergrond  
raakt grondwater tot steeds grotere diepten verontreinigd met een breed spectrum  
aan stoffen. Ook wanneer stofconcentraties beneden de geldende

grondwaterkwaliteitscriteria blijven, kunnen gebruiksfuncties worden aangetast. Deze 'vergrijzing' is volgens de Adviescommissie Water (2017) een urgent probleem, vooral met het oog op de drinkwatervoorziening.

Om de opwarming van de aarde te beperken tot ruim onder 2 graden Celsius, hebben de EU-lidstaten, waaronder ook Nederland, in het VN-Klimaatakkoord van Parijs (COP21) afgesproken dat de EU in 2030 de CO<sub>2</sub> uitstoot met minimaal 40% moet hebben teruggebracht ten opzichte van 1990. De samenleving moet hiervoor versneld overschakelen naar fossielvrije, duurzame energiebronnen. Geothermie wordt door de Rijksoverheid erkend als belangrijke duurzame warmtebron voor de toekomst ([Beleidsbrief Geothermie, 2018](#); [Klimaatplan 2021-2030](#)). Daarom ondersteunt de Rijksoverheid de komende jaren de veilige en verantwoorde ontwikkeling van geothermie via een samenhangend pakket aan versterkings- en versnellingsmaatregelen, zoals onder andere aanvullende technische eisen, het vergroten van kennis van de ondergrond, en innovatie ([Beleidsbrief Geothermie, 2018](#); [Klimaatplan 2021-2030](#), [Innovatieagenda aardwarmte, 2021](#)). Geothermie, zoals gedefinieerd in de Mijnbouwwet, is vooralsnog zeer beperkt qua omvang (ca 28 systemen), maar is één van de ondergrondse activiteiten die naar verwachting de komende jaren een sterke groei zal doormaken om bij te dragen aan de gewenste energietransitie. Projecties gaan uit van een groei van 3 PetaJoule in 2018, via 50 PJ in 2030 naar 200 PJ in 2050 wat overeenkomt met ca. 700 dubletten ([Masterplan Aardwarmte, 2018](#)). Deze voorziene sterke groei kan vragen oproepen over de mogelijke effecten van geothermie op de vergrijzing van grondwater. Hoewel de feitelijke risico's beperkt blijken te zijn (zie onder), kunnen bij onzorgvuldige aanleg en beheer geothermieactiviteiten in potentie tot aantasting van de bodem – en grondwaterkwaliteit leiden. Hierbij valt te denken aan: vermorsingen en lekkages van mijnbouwhulpstoffen en andere stoffen aan maaiveld, lekkage van formatiewater uit opslagbassins aan maaiveld, waterkwaliteitsverandering door temperatuuruitstraling, kortsluitstroming van vloeistoffen en gassen als gevolg van het doorboren en onvoldoende afdichten van scheidende lagen en lekkage vanuit onvoldoende integere injecterende putten. Het risico voor de grondwaterkwaliteit is hierbij gedefinieerd als het product van de kans op voorkomen en het effect hiervan op de grondwaterkwaliteit. Hoewel het huidige risico mede gezien het gering aantal huidige systemen voor het Nederlandse grondwatersysteem beperkt is, leidt de voorziene groei naar enkele honderden systemen mogelijk tot een toename van het risico.

De Nederlandse geothermiesector is jong en sterk in ontwikkeling. In 2017 heeft Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) met de [Staat van de Sector Geothermie](#) de aandacht gevestigd op risico's van geothermie (2017), die niet alleen betrekking hebben op grondwater, maar ook op andersoortige risico's (aardbevingen, arbeidsveiligheid). Sinds het uitkomen van deze SodM rapportage heeft de geothermiesector echter een snelle ontwikkeling doorgemaakt. Elk project stelt bijvoorbeeld tegenwoordig een winningsplan op. Hierin worden mogelijke risico's geïnventariseerd. Als deze risico's een bepaald niveau overstijgen, worden er mitigerende maatregelen voorgesteld en geïmplementeerd. Bij het nemen van deze instemmingsbesluiten wordt het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) geadviseerd door een aantal adviseurs en instanties met specialistische kennis op het gebied van deze mogelijke risico's. SodM heeft in september 2021 een [Evaluatie Aanbevelingen Staat van de Sector Geothermie](#) gepubliceerd, waarin ze concludeert dat over het algemeen de professionalisering van de sector in gang is gezet en dat het naleefgedrag en veiligheid zijn verbeterd, maar dat die nog niet op het gewenste niveau is (SodM, 2021). Verder is begin 2021 de 'Industriestandaard voor duurzaam putontwerp' in werking getreden waarin de sector invulling geeft aan maatregelen om onder meer milieurisico's te verkleinen.

Momenteel vindt aanpassing van de wet- en regelgeving voor geothermie plaats. De huidige mijnbouwwet- en regelgeving richt zich op de praktijk van de gas- en oliewinning en sluit daarmee minder goed aan op de praktijk van geothermie ([Kamerbrief, 28 mei 2020](#)). De Tweede Kamer heeft reeds ingestemd met de aangepaste Mijnbouwwet, maar de aanpassing van het Mijnbouwbesluit en Mijnbouwregeling zijn op het moment van de laatste redactionele aanpassing van de deltafact (april 2022) nog gaande. Recent is een onderzoek door de Algemene Rekenkamer afgerond waarin specifiek is gekeken of de overheid, gegeven de inzet op sterke groei van ondergrondse energievoorziening, voldoende doeltreffend is in het beschermen van drinkwatervoorraden ([Algemene Rekenkamer, 2021](#)). Zij bevelen de ministers van EZK en IenW aan om de regie te versterken bij de inrichting en het beheer van de ondergrond en ze vinden het belangrijk dat er meer samenhang komt in wet- en regelgeving voor de ondergrond (zie 'Governance').

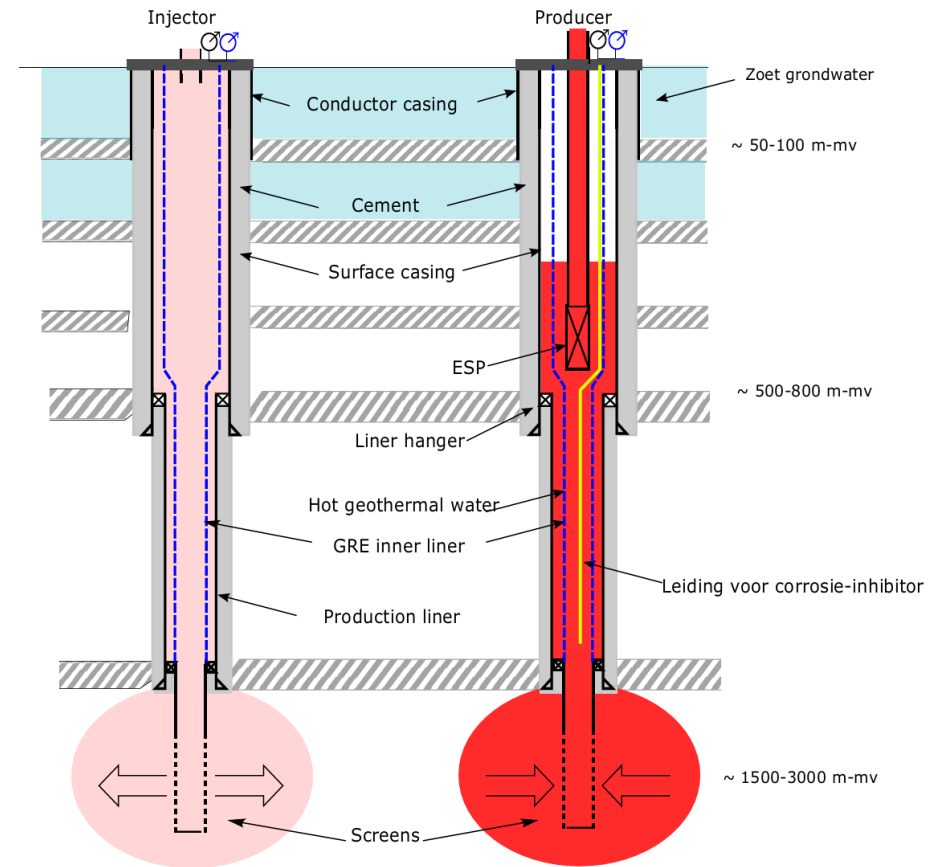
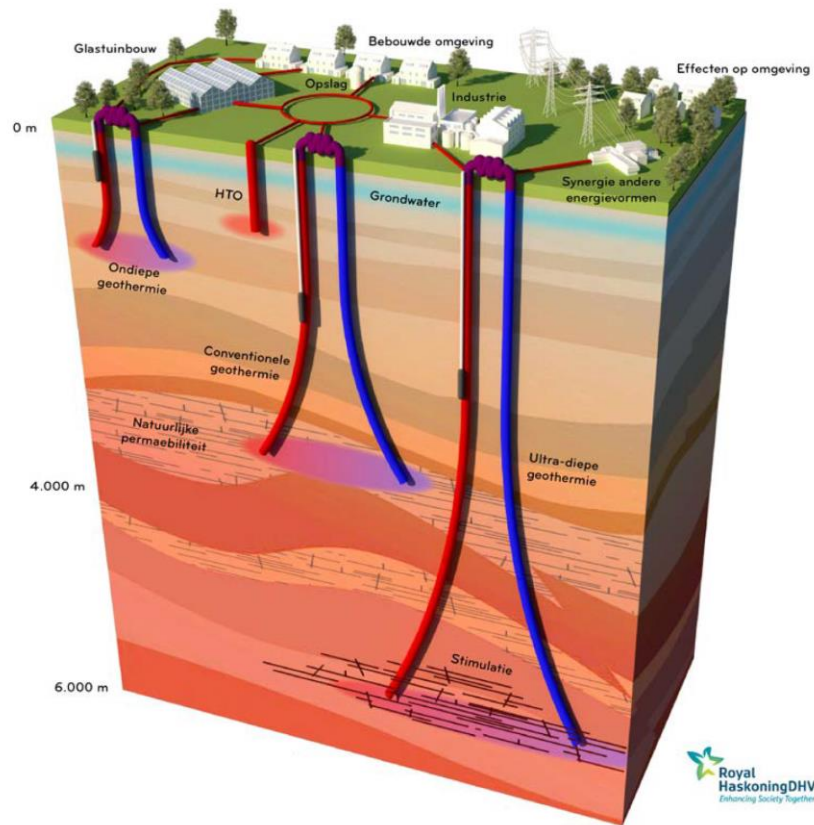
Deze Deltafact vat de huidige stand van de kennis ten aanzien van risico's met betrekking tot grondwaterkwaliteit samen en legt de kennisleemtes bloot over effecten die mogelijk kunnen bijdragen aan vergrijsing van grondwater. De feitelijke risico's van geothermie voor de vergrijsing van grondwaterkwaliteit, zover deze op

dit moment bekend zijn, lijken beheersbaar en/of worden er reeds beheersmaatregelen getroffen. Daarnaast geeft deze Deltafact zicht op handelingsperspectieven.

## 2. GERELATEERDE ONDERWERPEN EN DELTAFACTS

Trefwoorden: Geothermie, energietransitie, vergrijzing grondwater

Deltafacts: Klimaatverandering en grondwaterbeheer stedelijk gebied, ondergrondse waterberging, ecologische effecten koudwaterlozingen, deltasenario's en adaptief deltamanagement, Effecten open en gesloten bodemenergiesystemen op grondwaterkwaliteit .



Figuur 1 Dieptebereik van verschillende vormen van geothermie (Royal HaskoningDHV, 2018 (links) en schematische weergave van een 1e generatie geothermiedoublet met toediening van corrosie-inhibitoren (rechts). Het ontwerp is echter sterk in ontwikkeling: in de meest recente ontwerpen worden bijvoorbeeld corrosiebestendige GRE (Glass Reinforced Epoxy) binnenverbuizingen toegepast. Met de blauwe stipellijijn is een voorbeeld van een binnenverbuizing (waardoor een monitorbare annulus ontstaat) weergegeven. Voor een toelichting op de termen in de figuur wordt verwezen naar Tabel 1.

### 3. SCHEMATISCHE WEERGAVE

## 4. TECHNISCHE KENMERKEN

### Beschrijving van het thema geothermie

Met de term "geothermie" of aardwarmte doelen we op de winning van warmte uit de diepere ondergrond vanaf 500 meter diepte. De grens van 500 meter diepte is van belang, omdat daaronder de Mijnbouwwet van kracht is voor aardwarmte. Bij gebruikmaking van bodemwarmte tot 500 meter diepte is meestal sprake van opslag en onttrekking van warmte of koude (ondiepe bodemenergiesystemen, zowel open Warmte/Koude opslag, WKO, als gesloten bodemenergiesystemen), de diepte van deze systemen beperkt zich in de regel tot ongeveer 200 meter. Risico's ten gevolge van ondiepe bodemenergie, o.a. temperatuurseffecten, overlappen enigszins met die van geothermie, maar de gebruikte technieken en materialen, het systeem van toezicht en handhaving en de samenstelling van het verpompte water zijn wezenlijk anders bij geothermie. Voor de mogelijke risico's van bodemenergiesystemen wordt verwezen naar de Deltafact "Effecten open en gesloten bodemenergiesystemen op grondwaterkwaliteit".

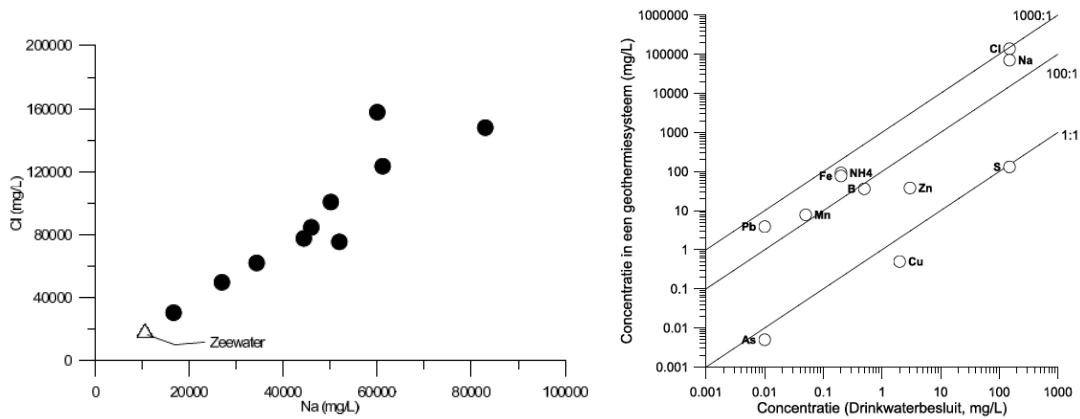
De winning van natuurlijke aardwarmte in Nederland vindt in de regel plaats vanaf grotere diepte, veelal vanaf 1500 meter, maar meestal dieper, tot rond de 2 à 3 kilometer. Twee van de huidige 28 projecten gelden als Lage Temperatuur Aardwarmte, waarbij op een diepte van tot 750 m-mv wordt onttrokken. Voor al de overige huidige projecten spreken we over conventionele geothermie. Vanaf 4 kilometer diepte wordt gesproken over ultradiepe geothermie. Omdat ultradiepe geothermie voor Nederland nog niet wordt toegepast, richten we ons in deze Deltafact op conventionele geothermie. Het reguliere winsysteem voor conventionele geothermie bestaat in Nederland uit minimaal twee putten, één put waaruit warm water wordt gewonnen (de productieput) en een andere (de injectieput) waarin het afgekoelde water wordt teruggepompt (geïnjecteerd) in hetzelfde reservoirinterval als waaruit wordt onttrokken. In het geval van twee putten is er sprake van een doublet. Er zijn ook winsystemen met drie (triplet) of meer (5-8) putten.

Systemen met één bron zijn technisch mogelijk. Het gaat hierbij om diepe bodemwarmtewisselaars (BWW's), 'Standing column wells (SCW's) en monobronnen. Met deze technieken is in Nederland nog geen ervaring. Uit een studie door IF (Buik & Aalten, 2017) blijkt verder dat SCW's economisch voor Nederland niet interessant

zijn, monobronnen mogelijk wel. Gezien het gebrek aan ervaring met deze techniek richt deze deltafact zich op open doubletsystemen.

Het systeem maakt gebruik van de natuurlijke permeabiliteit van de formatie. Tot op heden is geen enkele Nederlandse put zelf producerend en is men voor het water en daarmee de warmteproductie aangewezen op een diep (tot 1000 m-mv) afgehangen elektrische onderwaterpomp (de ESP), om het water naar maaiveld te verpompen. Met behulp van een warmtewisselaar wordt bovengronds warmte onttrokken uit het verpompte water. Na afkoelen wordt het onttrokken water weer teruggepompt in het reservoirinterval waardoor geen netto-onttrekking van formatiewater plaatsvindt. Om onderlinge beïnvloeding te voorkomen dienen de uiteinden van de putten voldoende ver van elkaar af te liggen. In de regel gaat het hierbij om 1-2 kilometer. Door gestuurd te boren kan dit vanaf één enkele productielocatie worden verwezenlijkt (schuin boren).

In Nederland is de samenstelling van het verpompte water bij conventionele geothermiesystemen wezenlijk anders dan bij (ondiepe) WKO-systemen. Allereerst kan het zoutgehalte sterk variëren, maar is in algemene zin veel hoger dan in zoetwater (zie Figuur 2, linker plaatje). Daarnaast kan het formatiewater afhankelijk van het reservoir zware metalen, ammonium, opgeloste gassen (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, ..), NORM (Naturally Occurring Radio-active Material) en olie bevatten. De concentraties hiervan variëren sterk afhankelijk van de diepte en het type reservoir waaruit gewonnen wordt. Deze samenstelling is van groot belang voor de risico's, zowel voor de mogelijke impact op het grondwatersysteem als voor de kans op aantasting van de installaties. Door de hoge CO<sub>2</sub>-concentraties in combinatie met hoge chloride en soms loodgehaltes is het formatiewater sterk corrosief (Hartog, 2016).



Figuur 2 Links: De zoutconcentratie van 11 Nederlandse geothermie systemen in vergelijking met zeewater (data Hartog, 2016; Wasch, 2014). Rechts: Indicatieve formatiewatersamenstelling van een Nederlands geothermiesysteem. In de rechterfiguur is de concentratie van een aantal anorganische componenten in het door deze geothermiebron opgepompte formatiewater ter referentie uitgezet ten opzichte van de norm voor deze componenten in het Drinkwaterbesluit. Bij punten op de 1:1 lijn is de concentratie in het geothermiewater gelijk aan de norm in het Drinkwaterbesluit. De chlorideconcentratie in het formatiewater ligt bijvoorbeeld een factor 1000 boven de drinkwaternorm van 150 mg/l (Hartog, 2016).

## Terminologie

Verschillende benamingen, fenomenen en risico's die binnen de mijnbouw exploratie en productie (E&P) als algemeen bekend gelden, zijn bij ondiepe hydrogeologie en hydrologie niet gebruikelijk. Met 'ondiep' doelen we op het grondwatersysteem dat een actieve rol speelt binnen de natuurlijke watercyclus. Vice versa zijn er binnen de ondiepe hydro(geo)logie risico's en fenomenen die als vanzelfsprekend worden gezien en binnen E&P niet of minder scherp in beeld zijn. In het vervolg van deze Deltafact wordt een aantal termen uit de E&P-wereld gebruikt. In onderstaande tabel worden enkele van deze termen vertaald en voorzien van een korte uitleg.

Tabel 1 Nomenclatuur voor typische geothermie termen. De Engelse taal is de gebruikelijke voertaal binnen de geothermie door de nauwe verbinding met het olie- en gasexploratie domein (omschrijvingen op basis van o.a. Schlumberger oilfield glossary).

Geothermie	Grondwater equivalent	Uitleg
Formatiewater	Grondwater	Water dat zich in een bepaalde formatie (aardlaag) bevindt en in tegenstelling tot grondwater niet (meer) deel neemt aan de hydrologische kringloop. In de regel wordt de zogenaamde "geohydrologische basis" als grens aangehouden tussen grond- en formatiewater. Formatiewater uit diepe gesteentelagen is in Nederland meestal veel zouter dan ondiep grondwater.
Reservoir	Aquifer, watervoerend pakket	Een gesteente met voldoende porositeit en permeabiliteit voor



<b>Geothermie</b>	<b>Grondwater equivalent</b>	<b>Uitleg</b>
		opslag en stroming van vloeistoffen en/of gassen.
Mud	Boorvloeistof	Vloeistof waarmee losgeboord materiaal naar maaiveld wordt gebracht.
Kick, Blow-out	Onvoldoende tegendruk bij artesische put	Kick is een onverwachte ondergrondse druktoename en/of instroming in de put. Door het nemen van boortechnische maatregelen (o.a. verzwaren van de boorvloeistof) wordt deze instroming onder controle gebracht. Als alle tegenmaatregelen niet voldoende effect sorteren kan een blow-out (ongecontroleerd uitstromen van gas, olie of formatiewater) optreden. Blow-outs zijn bijvoorbeeld opgetreden na het aanboren van een onverwachte gasbel. Vergelijkbaar bij het boren van een grondwaterput kan de druk in een aquifer verhoogd zijn ten opzichte van het hydrostatische drukprofiel, waardoor de tegendruk van de boorvloeistof onvoldoende kan zijn.
Blowout preventor (BOP)	-	Grote afsluiter aan de bovenkant van een put waarmee de put kan worden afgesloten als de boorploeg controle verliest over formatievloeistoffen of gassen
Liquifaction	Opbarsten, drijfzand	Ontsnappend gas vermengt met grondwater en maakt de ongeconsolideerde bodem als het ware vloeibaar.
Casing, verbuizing	Mantelbuis	Primair doel van casings is het bieden van stabiliteit aan het boorgat en het afschermen van doorboorde formaties van de in de put stromende gassen en/of vloeistoffen.
Conductor casing	Buitenste mantelbuis	De als eerste geïnstalleerde casing die geplaatst wordt om te voorkomen dat de bovenste ongeconsolideerde lagen instorten tijdens het boren. Daarnaast isoleert deze buis het bovenste grondwater van de put. De conductor casing wordt geheid of met ondiepe boortechnieken zoals zuigboren geplaatst.
Surface casing	Eerste verbuizing	Eerste binnen de conductor geplaatste verbuizing. Deze verbuizing geeft structurele integriteit aan de put.
Production liner	Productie verbuizing	Verbuizing naar het reservoir waaraan filters worden bevestigd.
Production tubing	Haalbuis	Een buis die samen met andere elementen formatiewater produceert. Bij geothermische productieputten is vaak de ESP aan

Geothermie	Grondwater equivalent	Uitleg
		het uiteinde van deze tubing gehangen.
Liner hanger	~	Mechaniek om een buis op te hangen aan de binnenkant van een eerdere gecementeerde casing
Annulus	Annulus	De (al dan niet gecementeerde) ruimte tussen twee casings
Cementering	Omstorting/kleiproppen/groueten	Met specifieke cementmixen worden de casings verankerd aan de formatie en wordt de annulus tussen de casings onderling en de annulus tussen de buitenste casing en de formatie afgedicht. Primair doel is het bieden van stabiliteit en het voorkomen van lekstromen door en langs de put.
Stimuleren/ontwikkelen	Ontwikkelen	Het verbeteren van de toestroming naar een put door het verwijderen van resten boorspoeling en het eventueel verbeteren van de permeabiliteit met chemische of mechanische technieken.
Jutten	Jutten	Het als onderdeel van het ontwikkelen gedurende enkele dagen/weken plotseling en sterk variëren van de druk in de put, waardoor deeltjes in de formatie en op de boorgatwand los komen.
Electrical Submersible Pump (ESP)	Onderwaterpomp	Pomp waarmee het warme water uit de productieput wordt gepompt
Producers vs. Injectoren	Onttrekken vs. Infiltreren	Het uit een reservoir oppompen (producers) van water vs. het in het reservoir terugpompen van water
Insluiten	Buiten gebruik stellen	Het afsluiten en tijdelijk buiten gebruik stellen van een put
Abandonneren	Verlaten en afdichten	Abandonneren is het zorgvuldig verlaten en afdichten van een uitgeproduceerde put zodat geen schade aan het reservoir en geen schade aan bovenliggende aquifers op kan treden
Well pad	Boorlocatie	Een well pad is een afgesloten stuk terrein dat geschikt is gemaakt voor het plaatsen van een boorinstallatie. De well pad omvat tevens bodembeschermende voorzieningen (vloeiëtdichte vloeren, milieugoten) om verontreiniging van het ondiepe grondwater tegen te gaan.

## 5. GOVERNANCE

(deze paragraaf is gebaseerd op [Holleman \(2019\)](#), [Hartog en Cirkel \(2015\)](#) en [www.geothermie.nl](http://www.geothermie.nl))

Conventionele geothermie valt met windieptes dieper dan 500 meter onder de mijnbouwwetgeving. Het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat is hiervoor het bevoegd gezag. Provincie en gemeente hebben bij vergunningverlening adviesrecht. Drinkwaterbedrijven kunnen indien drinkwaterbelangen in het geding zijn door provincies worden uitgenodigd om advies voor de provinciale reactie in te brengen. Handhaving van de mijnbouwwetgeving en gerelateerde milieuwetgeving en toezicht op mijnbouwactiviteiten is gedelegeerd aan Staatstoezicht op de Mijnen (SodM). Voor de bescherming van het grondwater geldt de Waterwet en de Omgevingswet.

De wet- en regelgeving met betrekking tot geothermie is uitgewerkt in de Mijnbouwwet, het Mijnbouwbesluit, de Mijnbouwregeling en het Besluit Algemene Regels Milieu Mijnbouw (BARMM) (van Adrichem et al., 2013). Het gaat hierbij om algemene wet- en regelgeving ten aanzien van mijnbouwactiviteiten. Deze wetgeving heeft betrekking op zowel de olie- en gasproductie als op andere vormen van ondergronds ruimtegebruik, zoals opslag van productiewater, CO<sub>2</sub>-opslag, zoutwinning en winning van aardwarmte (geothermie).

Hoofdstuk 2 van de Mijnbouwwet gaat over vergunningen voor opsporen en winnen van delfstoffen en aardwarmte. Artikel 9 en 12 geven aan dat een aanvraag voorafgaand aan opsporing en winning getoetst wordt op:

- de veiligheid voor omwonenden of het voorkomen van schade aan gebouwen of infrastructurele werken of de functionaliteit daarvan;
- het planmatig gebruik of beheer van delfstoffen, aardwarmte, andere natuurlijke rijkdommen, waaronder grondwater met het oog op de winning van drinkwater, of mogelijkheden tot opslaan van stoffen;
- de nadelige gevolgen die voor het milieu worden veroorzaakt;
- de nadelige gevolgen die voor de natuur worden veroorzaakt.

Artikel 1b van het Mijnbouwbesluit definieert schade als aantasting van een aantal belangen, die in de Mijnbouwwet (artikel 49, tweede en derde lid) zijn genoemd. Belangrijk om te realiseren is dat de Nederlandse mijnbouwwetgeving gebruik maakt van doelstellende bepalingen, waarmee ingespeeld kan worden op (onverwachte) gebeurtenissen/ontwikkelingen. In de context van deze deltafact zijn artikel 67 en 68 van het Mijnbouwbesluit van betekenis.

- Artikel 67 beschrijft (onder meer) dat bij het aanleggen, gebruiken, onderhouden, repareren en buiten gebruik stellen van een boorgat maatregelen worden genomen ter voorkoming van schade.
- Artikel 68 eist dat putactiviteiten slechts verricht mogen worden indien de desbetreffende stoffen uit de ondergrondse formaties onder controle worden gehouden.

De implicaties van deze artikelen zijn verstrekkend. Een operator moet van de toezichthouder aantonen dat ze voldoet aan haar zorgplicht en op geen enkele wijze enige schade veroorzaakt. Indien dit niet gebeurt, legt de toezichthouder de operatie stil tot het moment dat de problemen zijn opgelost. Dit is in het recente verleden een aantal keer gebeurd. In de praktijk wordt door SodM gebruik gemaakt van middelvoorschriften, bijvoorbeeld het opstellen van een werkprogramma zoals gedefinieerd in hoofdstuk 8 van de Mijnbouwregeling. Een voorbeeld hiervan zijn de in hoofdstuk 8.2 van de Mijnbouwregeling beschreven "Werkprogramma's voor boorgaten en putten alsmede rapportages voor boorgaten". De omschrijving maakt geen onderscheid tussen olie- en gaswinputten en geothermieputten. Artikel 8.2.1.1 meldt dat het werkprogramma tenminste moet bevatten:

De wijze van isolatie van de zoet- en zoutwaterlagen onder opgave van:

- de lokale grondwaterhydrologie;
- de identificatie van zoet- en zoutwaterlagen;
- de beoogde isolatie na het doorboren van de zoet- en zoutwaterlagen;
- de wijze van verificatie van de nieuwe isolatie na doorboring.

Bovenstaande werkwijze evaluerend stelt SodM in 2017 in haar rapportage '[Staat van de Sector geothermie](#)' het volgende:

"de Mijnbouwwet heeft een doelstellend karakter wat past bij de volwassen olie- en aardgasindustrie, maar waar de jonge en onervaren geothermiesector mee worstelt. Het is zoeken naar de manier waarop men in de praktijk effectief en efficiënt aan de doelstellende normen kan voldoen. Daarom zou de wetgeving voorschrijvend moeten zijn zoals bijvoorbeeld bij de milieuwetgeving waarin vaak een best beschikbare techniek (BBT) wordt voorgeschreven."

SodM stelt hiermee dat voor de zich nog ontwikkelende geothermiesector meer specifieke regels nodig zijn. Regels die niet alleen de doelen stellen, maar ook de

middelen/technieken voorschrijven. Er is zodoende behoefte aan industriestandaarden waarin best beschikbare technieken worden voorgeschreven (BBT's) voor aanleg, exploitatie, monitoring en abandonnering. Door de sector wordt hier inmiddels volop aan gewerkt; Dutch Association Geothermal Operators (DAGO, sinds 2021 onderdeel van Geothermie Nederland) heeft de 'Gedragscode Omgevingsbetrokkenheid bij Aardwarmteprojecten' opgesteld (DAGO, 2019) en Geothermie Nederland heeft met EBN de [Industriestandaard Duurzaam Putontwerp](#) opgesteld (Geothermie Nederland, 2021). De Industriestandaard duurzaam putontwerp voor aardwarmteputten is begin 2021 in werking getreden. De kern van de gedragscode is dat de omgeving in een zo vroeg mogelijk stadium wordt betrokken bij aardwarmteprojecten. Voor meer informatie over deze aanpak en de ambities van de sector wordt verwezen naar het Masterplan Aardwarmte in Nederland ([Masterplan aardwarmte, 2018](#)), Geothermie Nederland ([www.geothermie.nl](http://www.geothermie.nl)) en Kamerbrief voortgang geothermie, 28 mei 2020.

In provinciale milieu- en omgevingsverordeningen zijn in lijn met artikel 1.2 wet milieubeheer zones aangewezen waar een bijzonder beschermingsregime voor het grondwater van toepassing is. Het gaat hierbij om:

- Waterwingebieden
- Grondwaterbeschermingsgebieden
- Boringsvrije zones
- Strategische voorraden (ook wel aanvullende strategische watervoorraad (ASV's) genoemd)
- Soms nog extra zones zoals 100-jaarsaandachtsgebieden

In waterwingebieden zijn alleen activiteiten voor drinkwaterproductie toegestaan. Mijnbouw is niet toegestaan in de grondwaterbeschermingsgebieden. In de nieuwe Mijnbouwwet is een amendement opgenomen waardoor er in grondwaterbeschermingsgebieden en boringsvrije zones sprake is van functiescheiding tussen drinkwaterproductie en geothermieproductie. Beschermingsbeleid en regels voor de ASV's verschillen tussen provincies: vaak is ook hier functiescheiding tussen drinkwaterproductie en geothermie het uitgangspunt.

## 6. MOGELIJKE RISICO'S VAN GEOTHERMIESYSTEMEN VOOR DE GRONDWATERKWALITEIT

Hieronder wordt per fase van een geothermiewinning (aanleg – bedrijf – einde levensduur en afsluiting) aangegeven wat de belangrijkste risico's zijn, met specifieke aandacht voor verontreiniging en lange-termijn "vergrijzing" van grondwater. Bij de aanleg, productie en abandonnering van een geothermiewinning gelden regels en voorschriften zoals beschreven in de voorafgaande paragraaf. Met het oog op het onder de aandacht brengen van mogelijke "vergrijzing" van grondwater en het formuleren van handelingsperspectieven voor grondwaterbeheerders en andere stakeholders, en gegeven de te verwachten groei van geothermie, worden de verschillende risico's, zover bekend, hieronder op een rijtje gezet. Indien onvoldoende bekend is wat de kans en het effect van een risico is, wordt dat ook aangegeven.

Mogelijke risico's als gevolg van aardbevingen en tektoniek worden in de factsheet niet behandeld, omdat volgens de geraadpleegde experts hiervan geen risico's voor de grondwaterkwaliteit worden verwacht. Verder wordt actieve stimulatie ('fracken') slechts summier behandeld, omdat dit niet wordt toegepast en niet wordt voorzien bij conventionele geothermie (zie verder). Mogelijke risico's ten gevolge van hoge temperatuuropslag (HTO) overlappen enigszins met die van geothermie, maar de gebruikte technieken en materialen, het systeem van toezicht en handhaving en de samenstelling van het verpompte water zijn wezenlijk anders. Temperatuuropslag is daarom geen onderdeel van deze factsheet.

### De Aanlegfase

#### **Verontreiniging door werkwater, boorgruis, boorspoeling, brandstoffen en andere materialen**

Tijdens aanleg worden verschillende boorvloeistofadditieven gebruikt die per vrachtwagen worden aangevoerd en tijdelijk worden opgeslagen op het werkterrein. Daarnaast zijn generatoren en brandstofopslag aanwezig. Tijdens boren komt verder aanzienlijke hoeveelheden boorgruis en boorspoeling vrij. Ook al deze (vloei)stoffen worden tijdelijk opgeslagen en per as aan- en/of afgevoerd. Om deze reden wordt, net als bij andere mijnbouwactiviteiten, het werkterrein voorafgaand aan de diepe boring voorzien van vloeistofdichte vloeren, putkelders en milieugoten, als onderdeel

van het waterbeheersingssysteem. Hiermee wordt invulling gegeven aan de in het besluit Algemene milieuregels mijnbouw (BARMM) opgenomen eis dat doeltreffende maatregelen moeten worden getroffen om laden en lossen lekvrij te doen geschieden en lekkages te voorkomen. De dimensionering van het waterbeheersingssysteem is afgestemd op de op het werkterrein aanwezige volumes bodem- en grondwatergevaarlijke stoffen en de te verwachten hoeveelheden neerslag. Het risico op bodemverontreiniging wordt hiermee sterk ingeperkt.

Tijdens het boren komt boorspoeling in contact met de doorboorde formaties. Om deze reden wordt de conductor casing (buitenste verbuizing, Figuur 1, rechter figuur) geheid of geplaatst door middel van een zuig- of spoelboring met een boorvloeistof op waterbasis zoals gebruikelijk voor drinkwater en WKO-putten. Binnen deze in de regel tientallen tot enkele honderden meters lange conductor casing wordt vervolgens naar grotere dieptes geboord. Als de conductor casing is aangebracht wordt verder geboord voor het plaatsen van de surface casing (Figuur 1, rechter figuur). Tijdens het boren van de surface casing komen watervoerende lagen in contact met de boorspoeling. Over het algemeen gaat het hierbij om kleine hoeveelheden en is de indringing zeer beperkt. De samenstelling van de boorspoeling is er immers op gericht een dunne, waterdichte 'filtercake' te vormen op de boorgatwand. Om verontreiniging zoveel mogelijk te voorkomen wordt in de praktijk de eerste honderden meters tot de Tertiaire kleien (waarbij contact met o.a. voor drinkwater bestemd grondwater kan optreden) geboord met een boorspoeling op waterbasis waaraan minerale additieven zoals bentoniet en bariet zijn toegevoegd. Pas nadat de surface casing volledig is gecementeerd en het grondwater is afgeschermd, wordt soms met een andere boorspoeling, zoals een zogenaamde 'oil based mud', verder geboord. In sommige landen is het gebruik van boorspoeling op basis van synthetische of minerale olie in het algemeen niet meer toegestaan bij het doorboren van watervoerende pakketten (EHP, 2013). In Nederland zijn geen wettelijke beperkingen, maar wordt gebruik gemaakt van doelstellende bepalingen. In dit kader kan verwezen worden naar artikel 67 van het Mijnbouwbesluit waarin wordt gesteld dat 'schade' moet worden voorkomen. In tegenstelling tot andere landen kan de toezichthouder (SodM) in Nederland hiertoe ook zelf maatregelen inzetten of voorschrijven, bijvoorbeeld ten aanzien van het gebruik van boorspoeling additieven. In de praktijk betekent dit dat een 'oil based mud' niet zal worden toegestaan in het traject waar contact met grondwater kan optreden. De

Nederlandse geothermiesystemen zijn vrijwel allemaal over het gehele traject geboord met een boorspoeling op waterbasis.

Het boorgruis wordt bovengronds opgevangen en volgens de gangbare normen en regels afgevoerd voor een verantwoorde verwerking. Hier zijn stringente regels voor opgesteld in Nederland, zodat het risico dat er vermorsing optreedt is geminimaliseerd. Indien het boorgruis onverhoopt toch terecht komt in de natuurlijke omgeving kan dit een milieurisico vormen. De hoogte van het milieurisico van het boorgruis, hangt af van de gebruikte boorspoeling en de aard van het doorboorde formatiemateriaal. Losgeboord formatiemateriaal, vooral bij doorboring van kool-, schalie- en steenzoutlagen kan namelijk zelf ook potentieel verontreinigende stoffen bevatten (EHP, 2013). Voor wat betreft de schalies (in Nederland o.a. de Altena groep) gaat het hierbij onder andere om zware metalen, koolwaterstoffen en van nature radioactief materiaal (NORM) (Kombrink et.al (2008), Jochum et.al. (1995), Zimmerle (1995)). Hierbij moet opgemerkt worden dat het gaat om beperkte hoeveelheden en dat men ervan uit kan gaan dat als boorgruis of ander materiaal onverhoopt toch buiten de bodembeschermende voorzieningen terecht komt er onmiddellijk een sanering plaatsvindt om dit risico te minimaliseren.

Ondanks de vergaande voorzorgsmaatregelen zullen op de boorlocatie lekkages en vermorsingen optreden, die in enkele gevallen tot verontreiniging buiten de bodembeschermende voorzieningen leiden. Uit door SodM aangeleverde cijfers over de periode 2010-2019 komen 16 incidenten naar voren van lekkages en vermorsingen op geothermielocaties. Het ging hierbij om hydraulische olie (7x), formatiewater en vervuild water (3x), boorspoeling (3x), zuur (3x) en diesel (1x) in (zeer) geringe hoeveelheden variërend van 'enkele spetters' tot zover bekend maximaal enkele m<sup>3</sup>. In twee gevallen is een zeer geringe hoeveelheid materiaal (hydraulische olie en vervuild water) buiten de beschermende voorziening terecht gekomen waarna de bodem direct is gesaneerd. Uit bovenstaande blijkt dat de bodembeschermende voorzieningen en het systeem van melding en opvolging een effectieve barrière vormt tegen verontreiniging van bodem en grondwater. De bescherming staat of valt bij effectief management van het waterbeheersingssysteem behorende bij de bodembeschermende voorzieningen. Bij extreme regenval kan het systeem overlopen als het niet tijdig wordt gelegegd. In de bovengenoemde periode is dit zover bekend drie keer voorgekomen waarbij in twee



gevallen het systeem daadwerkelijk is overgelopen. In één geval is hemelwater op het riool geloosd om overloop naar de omgeving te voorkomen.

### **Verontreiniging door het doorboren van bestaande bodem- en grondwaterverontreinigingen**

Boringen voor geothermiesystemen zullen gezien de beoogde aansluiting op warmtenetten ([Masterplan aardwarmte, 2018](#)) meer en meer plaatsvinden nabij en in bestaand stedelijk gebied. In deze gebieden is er een verhoogde kans op de aanwezigheid van bestaande bodem- en grondwaterverontreinigingen. Het doorboren van deze verontreinigingen kan leiden tot vermenging met de boorvloeistof en daardoor verdere verspreiding over het gehele boortraject. Een gedegen vooronderzoek op bodemverontreinigingen en zorgvuldige afscherming van de verontreiniging voorafgaand aan het boren is hierom belangrijk. Een voorbeeld waarbij op een zorgvuldige manier door een bestaande bodemverontreiniging is geboord, is het geothermiesysteem op de Balmatt site in Mol België (SGS, 2015). Zowel in de BRL 2100, protocol 2101 mechanisch boren (boringen tot 500 meter) als in de NOGEP A Industriestandaard 41 is een vooronderzoek op bestaande verontreinigingen vereist. Bij naleving van de genoemde protocollen, waaronder het protocol over de werkwijze bij aanwezigheid van een verontreiniging, wordt het risico geminimaliseerd dat onbewust een bodem- en grondwaterverontreiniging wordt doorboord en dat verspreiding van de verontreiniging plaatsvindt.

### **Risico van kortsluitstroming en verspreiding verontreinigingen door inadequaat herstel van doorboorde scheidende lagen**

Gerelateerd aan bovenstaande bestaat er een kans op verspreiding van bestaande grondwaterverontreinigingen als doorboorde scheidende kleilagen onvoldoende goed worden afgedicht en daarmee een vergroting van het risico op verontreiniging van schoon grondwater. De aard van en mate waarin ondiepe bovenliggende lagen verontreinigd kunnen zijn varieert per omgeving (ruraal, stedelijk of industrieel). Afhankelijk van de locatie waarin geboord wordt, kunnen dit bijvoorbeeld (historische) antropogene verontreinigingen met stoffen met agrarische of industriële oorsprong zijn. Voor opgeloste verontreinigingen zal de verspreiding tijdens het boorproces gering zijn. Echter, als de waterdruk in het bovenliggende pakket hoger is, kan kortsluitstroming bij slechte boorgatafdichting tot verspreiding van verontreinigingen naar het onderliggende pakket leiden. Ook kunnen sommige verontreinigingen (bv. diesel) als drijfslagen op het grondwater aanwezig zijn of juist als zogenaamde 'zaklagen' (bv. Per of Tri) en op diepte of bijvoorbeeld kleilagen

geaccumuleerd zijn. Een goede afdichting van scheidende lagen is niet alleen van belang ter voorkoming van kortsluitstroming met antropogene verontreiniging vanuit bovenliggende lagen maar ook belangrijk voor doorboorde scheidende lagen die verschillende kwaliteiten grondwater scheiden. Bijzonder aandachtspunt hierbij zijn de scheidende lagen die de geohydrologische basis vormen. De samenstelling en stijghoogten van het water onder de geohydrologische basis zijn grotendeels onbekend, echter in het algemeen zouter dan het bovenliggende grondwater. Kortsluitroutes tussen verschillende watervoerende pakketten zijn vooralsnog niet aangetoond bij geothermie en zijn ook moeilijk te detecteren door de in de regel geringe drukverschillen en het ontbreken van hierop gerichte monitoring. Wel komt uit data van SodM één geothermieput naar voren waar via de annulus tussen de surface casing en conductor casing mogelijk contact is tussen een formatie beneden de geohydrologische basis en het oppervlak. De discussie over de oorzaak hiervan is nog niet afgerond. Er zijn verder geen aanwijzingen voor lekkage naar het grondwater buiten de surface- en conductorcasing.

KWR en IF Technology (2013) hebben onderzoek gedaan door middel van analytische en numerieke berekeningen naar de mogelijke effecten van kortsluitstroming bij gesloten bodemenergiesystemen. Hierbij is voor enkele putten aangetoond dat de lekkageflux bij adequate afdichting en van nature voorkomende drukverschillen nihil is. Alleen voor scenario's waarbij uit is gegaan van een volledig met grind of niet afgedichte put, en in combinatie met een groot stijghoogteverschil, worden aanzienlijke fluxen verwacht ( $> 0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ). Dit is conform recente bevindingen in wetenschappelijk literatuur ([Casasso et al., 2020](#)). Dergelijke drukverschillen komen in de regel alleen voor in de omgeving van grondwateronttrekkingen. Een uitzondering hierop is de Roerdal slenk waar over grote gebieden stijghoogteverschillen van meerdere meters aanwezig zijn als gevolg van grootschalige grondwaterwinning onder de Waalre kleien. TNO (2021b) concludeert op basis van numerieke berekeningen voor GBES dat de mate van kortsluitstroming als gevolg van slechte afdichting van putten in Noord Brabant naar verwachting gering zal zijn. En TNO (2022) maakt inzichtelijk welke regio's meer en minder kwetsbaar zijn voor kortsluitstroming door doorboringen voor GBES.

Het risico van een lekkageflux is afhankelijk van de duur van het optreden en van het verschil in grondwaterkwaliteit tussen de verschillende aquifers, en mede daardoor sterk locatie gebonden. In NOGEP A Industriestandaard 41, Annex I wordt een risico-evaluatiemethode uitgewerkt voor ongewenste menging van

grondwatertypes (boven de geohydrologische basis) als de cementering mogelijk onvoldoende is (NOGEPA, 2016). Hiervoor zijn kwetsbare gebieden geïdentificeerd en is inzichtelijk gemaakt waar drukverschillen tussen watervoerende pakketten hoog zijn zoals in de nabijheid van grondwaterwinningen en is inzichtelijk wanneer een onvoldoende cementering tot mogelijk ongewenste menging leidt en monitoring nodig is.

### **Verontreiniging door onvoldoende zorgvuldige opslag van formatiewater tijdens putontwikkeling en/of regeneratie**

Het ontwikkelen bestaat bij conventionele geothermieputten uit schoonpompen, het toevoegen van zuren (citroenzuur) dispergeermiddelen (polyacrylamides, polyfosfaten) bij kleigebaseerde boorspoelingen of oxidatoren bij polymerspoelingen, en het vervolgens jutteren en schoonpompen van de put. Hiermee wordt vervuiling in de omgeving rond het putfilter verwijderd. Vervolgens worden formatietesten uitgevoerd. In totaal komen hierbij aanzienlijke hoeveelheden formatiewater vrij,  $\sim 3000-5000 \text{ m}^3$  per put (IF Technology, 2008; Royal HaskoningDHV, 2020). Actieve stimulatie van het reservoir zelf, bij tegenvallende permeabiliteit van de formatie, is bij de Nederlandse conventionele systemen niet aan de orde. Overigens oordeelt het Duitse Umweltbundesamt dat de effecten op grondwater van stimulatieactiviteiten bij diepe systemen bij naleving van de huidige regels verwaarloosbaar klein zijn (Plenefisch et al., 2015).

Deze grote hoeveelheid water wordt gewoonlijk tijdelijk opgeslagen in foliebassins buiten het met vloestofdichte vloeren uitgeruste gebied. De huidige generatie bassins wordt dubbelwandig uitgevoerd met lekdetectie. Gezien de samenstelling van het formatiewater vormt de opslag en eventueel daarop volgend transport een potentieel risico voor het grondwater. Uitgaande van het chloridegehalte van het in Figuur 2 (rechts) uitgewerkte geothermiesysteem kan lekkage van  $1 \text{ m}^3$  formatiewater van dit specifieke systeem  $1000 \text{ m}^3$  grondwater tot de drinkwaternorm voor chloride verontreinigen. Na aanleg van de putten kan het tijdelijk opgeslagen water, dat o.a. door de beluchting vlokken en deeltjes bevat, na behandeling worden geïnjecteerd, echter om het verstoppingsrisico te verkleinen wordt vaak gekozen voor afvoer en - waar dat is toegestaan- lozing van het water. Bij onzorgvuldig handelen, falen van de bodembeschermende voorzieningen of onvoorziene weersomstandigheden kunnen zowel tijdens opslag als tijdens overslag en transport vermorsingen, lekkages en overstromingen optreden (Hartog & Cirkel, 2015). Uit cijfers van SodM blijkt dat er in de periode 2006-2019 zeven incidenten zijn gemeld

van zeer variabele aard en omvang. Het gaat hierbij om lekkages en vermorsingen tijdens verladen en transport, maar ook om lekkage uit het bassin. In 4 gevallen is formatiewater in het milieu gekomen, waarbij in één geval na lekkage uit het bassin is overgegaan op sanering. Op één locatie zijn verhoogde chloridegehalten gemeten in het grondwater nabij het bassin, wat mogelijk duidde op lekkage. Na deze constatering is de voering van het bassin direct vervangen. Bij alle geothermie projecten wordt continu gemonitord op lekkage vanaf de productielocatie en dit voorbeeld laat zien dat deze monitoring en opvolging effectief is geweest.

### **Optreden van een blow-out**

Een blow-out, een ongecontroleerde uitstroom van gas en/of vloeistof uit de boorput, is een ernstig incident dat op kan treden bij boren in de diepe ondergrond naar olie, gas of warm water voor geothermie. Tijdens het boren worden daarom altijd maatregelen genomen om een blow-out te voorkomen, waardoor een dergelijk incident zeer zelden optreedt.

De poriedruk in de ondergrond neemt toe met de diepte en wordt vooral bepaald door de druk die wordt uitgeoefend door de waterkolom vanaf het oppervlak (hydrostatische druk). Als er geboord wordt moet vanuit de put tegendruk worden gegeven om te voorkomen dat de vloeistoffen uit de formatie de put instromen. Deze tegendruk wordt geleverd door de boorvloeistof in de put. De dichtheid van deze boorvloeistof wordt in het algemeen hoger gehouden dan de dichtheid van het formatiewater, zodat in de boorkolom een beperkte overdruk is ten opzichte van de poriedruk in de formatie. Hierbij wordt door de ingenieur, die het plan voor de boorvloeistof maakt (mud-engineer), gekeken naar de beschikbare informatie van de ondergrond en wordt de dichtheid dusdanig gekozen dat er een ruime veiligheidsmarge is. Het kan voorkomen dat de druk in de formatie hoger is dan de hydrostatische druk, bijvoorbeeld als er olie of gas in de formatie zit. Als hier kans op is dan wordt de dichtheid van de boorspoeling over dat betreffende boortraject verhoogd om voldoende tegendruk te kunnen leveren.

Een blow-out kan optreden als er een formatie wordt aangeboord met een overdruk waar deze niet verwacht wordt en waar de overdruk dusdanig hoog is dat de veiligheidsmarge wordt overschreden. Een andere mogelijke oorzaak is een plotseling verlies van de boorvloeistof, bijvoorbeeld bij het doorboren van een breukzone, waarbij de tegendruk in de boorkolom plots wegvalt. Het gas, de olie of het water op die diepte zal zich dan naar boven willen verplaatsen. Als dit

ongecontroleerd gebeurt, kan dit een grote calamiteit veroorzaken aan maaiveld. Om dit te voorkomen worden diepe putten in Nederland altijd geboord met een 'blow-out preventor' (BOP). Een BOP is een mechanische zekering bovenop de boorput die de boorput direct kan afsluiten in het geval dat er onverwacht hoge drukken of ongecontroleerde stroming optreden. In Nederland is het verplicht om bij boringen onder de geohydrologische basis een BOP toe te passen.

Het effect van een blow-out is groot. In Nederland is vooralsnog één catastrofale blow-out opgetreden tijdens het boren van een put voor gaswinning. Het gaat hierbij om de blow-out bij 't Haantje in de omgeving van Sleen in 1965. Op deze locatie lekt nog steeds gas naar bovenliggende Kwartaire formaties (Schout et al., 2018). Aangezien het effect van een blow-out zo groot is, wordt er in de voorbereiding van een boring alles aan gedaan om de kans op het optreden hiervan te minimaliseren. De toezichthouder ziet daarop toe. Voorafgaand aan de boring werken de geologen, geomechanische experts en de ingenieurs samen om een verwacht drukprofiel tijdens het boren op te stellen. Hierbij wordt de bestaande kennis over de ondergrond en informatie van boringen die in het verleden in de nabijheid zijn geboord bij elkaar gebracht. Verder wordt op seismiek gekeken of er aanwijzingen zijn op aanwezigheid van olie en of gas in de ondiepe en diepe ondergrond en eventueel al directe aanwijzingen voor overdruk.

Doordat voor geothermie wordt geboord naar water, is de kans op overdruk kleiner dan wanneer er naar olie en gas wordt geboord. Het gas dat vaak mee komt met het warme water bevindt zich in oplossing en is dus niet als vrij gas aanwezig. Olie- en gasvelden bevinden zich daarnaast vaak ook in zogenaamde structurele hogen in de ondergrond, waar voor geothermie vaak in de structurele lagen wordt geboord, omdat de temperatuur daar hoger is. Desalniettemin wordt er ook in het voortraject bij geothermieprojecten aandacht besteed aan de kans op het aantreffen van overdrukken en wordt het boorvloeistof-schema daarop aangepast. Voor de veiligheid wordt daarom ook bij geothermie boringen een BOP geïnstalleerd voor het geval dat ondanks de voorbereidingen toch nog een formatie met onverwacht zeer hoge overdruk wordt aangeboord. Ten opzichte van de jaren '60 zijn de techniek en de kennis van de ondergrond sterk verbeterd, en de procedures aangescherpt, waardoor de kans op een blow-out geminimaliseerd is (DNV, 2013).

## De Productiefase

Een deel van de risico's tijdens de productiefase is gezien de relatie met processen tijdens aanleg al behandeld in de voorgaande paragraaf. Het gaat hierbij om het risico op kortsluitstroming bij onvoldoende goede afdichtingen en de opslag en verwerking van formatiewater tijdens putregeneraties.

### **Lekkage van formatiewater uit installaties**

Tijdens productie worden grote volumes formatiewater rondgepompt (100-400 m<sup>3</sup>/uur), waarbij het water op boven-atmosferische druk wordt gehouden (>~4 atm). Aan dit water wordt warmte onttrokken met behulp van een warmtewisselaar, waarna het water weer wordt geïnjecteerd in de formatie waaruit het onttrokken is. Tijdens dit proces treedt vaak ontgassing op en kunnen neerslagen vormen. Het vrijkomende gas wordt afgevangen en afhankelijk van de aard van het gas nuttig gebruikt (verwarming van het water en/of om stroom mee op te wekken voor het laten draaien van de bovengrondse installatie), of incidenteel bij uitzondering (tijdens de testfase) afgefakkeld. Als alternatief wordt het water in de bovengrondse installatie op druk gehouden om te voorkomen dat het gas uittreedt. Geproduceerde neerslagen in de waterstroom worden deels afgevangen met zakfilters om te voorkomen dat de injectieput verstopt raakt.

Door de hoge druk en het corrosieve karakter van het verpompte water is er voor de gehele installatie een risico op corrosie bij stalen leidingen en verbuizingen, wat kan leiden tot lekkage als integriteitsfalen niet tijdig wordt geconstateerd. Corrosie is het sterkst in de productieput. Door onder andere de ontgassing van CO<sub>2</sub> is de corrosiedruk lager in de bovengrondse installatie en de injectieput. Gebleken is dat de wanddikte van de casings van eerste generatie geothermieputten in Nederland sneller afneemt dan verwacht waardoor de verwachte levensduur van de putten niet wordt gehaald. Het gaat hierbij om tot circa 2016 gerealiseerde putten waarbij in de put-integriteitsplannen onvoldoende aandacht was voor mogelijke corrosie-effecten in relatie tot de verwachte levensduur van de putten. Om beter zicht te krijgen op de problematiek is door SodM (2019) een onderzoek uitgevoerd op 38 putten bij 13 actieve systemen. Bij drie putten bleek de casing lek te zijn, deze putten zijn gesloten, waarna één put is gerepareerd en weer in bedrijf. Bij acht putten bleken reparaties nodig en drie putten bleken niet meer aan de minimaal toegestane wanddikte te voldoen gebaseerd op de sterkte van casing. Deze putten zijn gerepareerd en weer in bedrijf genomen. De metingen die de ondernemers aan de

putten verrichten bevestigen het beeld dat corrosie/erosie van de verbuizing het meest optreedt bij de productieputten, en dan vaak op de diepte van de pomp (ca. 800-500m-mv). Hierdoorheen speelden ook beschadigingen door mechanische effecten van de in de put afgehangen ESP. Bij de injectieputten is wel corrosie waargenomen, maar heeft dit nog niet geleid tot doorbraak van de verbuizing.

Hoewel corrosie aan de productiekant van de systemen het sterkst optreedt, is de kans op lekkage uit de productieput laag omdat er onder Nederlandse condities in de regel een afpompings van enkele honderden meters ontstaat tijdens productie. Weglekkend water uit de productiepijp boven de Electrical Submersible Pump (ESP) zal bij een lekkage binnen de casing blijven en niet naar het grondwater weglekken. Bij een lekke casing zal ondiep grondwater gezien de drukverschillen juist de productieput instromen. Ook bij stilstand van de ESP zal het water gezien de hoge dichtheid terugzakken naar de formatie en zal grondwater eerder de put in- dan uitstromen.

Door de bovengrondse installatie goed te inspecteren en te onderhouden, komt eventueel integriteitsverlies goed in beeld en kunnen tijdig maatregelen worden genomen. Indien toch lekkage optreedt uit de bovengrondse installatie, is de productielocatie uitgerust met de eerder beschreven bodembeschermende voorzieningen (vloeiëtdichte verhardingen en milieugoten) waardoor het risico op lekkage naar bodem en grondwater verder wordt beperkt. Hoewel de corrosiedruk in de injectieput aanmerkelijk lager is ten opzichte van de productieput verdient de injectieput bijzondere aandacht met betrekking tot lekkagerisico's. Bij integriteitsfalen kan hier namelijk over de gehele putlengte lekkage optreden doordat de druk in de injector sterk is verhoogd ten opzichte van het (veelal) hydrostatische drukprofiel buiten de put. De hoge injectiedrukken (tussen 4 en 60 bar) zijn nodig om het afgekoelde water te injecteren. In sommige situaties is er sprake van afnemende injectiviteit waardoor de druk verder moet worden verhoogd om eenzelfde debiet te behouden, in Nederland is dit vooralsnog beperkt gebleven tot één voorbeeld (Hartog, 2016; Cirkel & Hartog, 2017). Injectiedrukken worden overigens begrensd door de normen zoals opgenomen in het Protocol bepaling maximale injectiedrukken bij aardwarmtewinning ([SodM & TNO-AGE, 2013](#)), waarvan op korte termijn een update wordt verwacht. Een praktijkvoorbeeld van lekkage uit een injectieput is de lekkage bij een geothermiesysteem in Landau Duitsland waarbij grondwater verontreinigd raakte (Tiefe geothermie.de, 2015). In Nederland zijn geen voorbeelden bekend van lekkages uit een injectieput.

Vanwege de verhoogde drukken en grote debieten kan aan de hand van de productiegegevens alleen het optreden van grote lekkages goed worden opgemerkt. Kleinere lekkages kunnen onopgemerkt blijven, maar op termijn tot grote verontreiniging leiden. Het risico op lekkages is verhoogd bij enkelwandige injectieputten en bij het gebruik van - gezien de corrosierisico's ongeschikte staalsoorten (bijv. L80-1, K55) - door blootstelling aan het formatiewater zonder toepassing van inhibitoren (Wood Group, 2017; Veldkamp et al., 2016). Dit is het geval bij vrijwel de gehele eerste generatie geothermieputten. Bij enkelwandige putten eist SodM dat met regelmaat putinspecties (interval 1-3 jaar) worden gedaan. Inmiddels vindt professionalisering plaats en wordt ingezet op meervoudige barrières in het grondwatertraject (meerdere casings, gebruik van tubing bij injectie) en wordt gezocht naar corrosiebestendigere materialen (zie bijvoorbeeld de [Richtlijn voor veilige aardwarmte, 2019](#) en [Industriestandaard Duurzaam Putontwerp, 2021](#)). Ook worden in nagenoeg alle geothermieputten inmiddels corrosie-inhibitoren toegepast, waardoor de corrosiedruk in de regel afneemt. De inhibitoren zelf kunnen echter een aanvullend milieueffect hebben bij lekkage en zijn vanuit dit oogpunt ongewenst. Een alternatief met aantoonbaar verminderd risico is om bijvoorbeeld meer corrosiebestendigere staalsoorten (bijv. 13Cr) of alternatieve materialen (bijvoorbeeld stalen verbuizingen gelamineerd met glass reinforced epoxy, GRE) te kiezen en putten dubbelwandig uit te voeren. Bij volledige uitvoering van de boven- en ondergrondse installaties met GRE, vervalt de noodzaak voor het toedienen van corrosie-inhibitoren. Bij gebruik van dubbelwandige barrières (met een niet volledig gecementeerde binnenbuis), kan de annulus gemonitord worden en kunnen met behulp van drukmetingen ook kleinere lekkages worden opgemerkt. Met de invoering van de Industriestandaard Duurzaam Putontwerp wordt elke operator, aangesloten bij de branchevereniging Geothermie Nederland, geacht een redundante put barrière tussen geothermisch reservoir en zoetwater aquifer in te voeren en continue drukcontroles uit te voeren. Inmiddels zijn de eerste doubletten met GRE binnenverbuizingen gerealiseerd. Daarnaast worden stappen gezet naar monitoring in het grondwater bij de put ([Witteveen+Bos & KWR, 2020](#)).

### **Temperatuureffecten op de biochemische samenstelling van het grondwater**

Warmte-uitstraling nabij geothermieputten zal het sterkste optreden rondom de productieput waar water met een temperatuur van 70-90 °C vanuit de diepte (~2 km) wordt onttrokken. Na onttrekking van warmte in de warmtewisselaar wordt het tot 15-40 °C afgekoelde water aan de injectiezijde geïnjecteerd. Deze temperaturen



liggen (ver) boven de gangbare grondwatertemperatuur (10-15 °C) in doorboorde ondiepe (~0-300m) aquifers. De putten zullen dan ook door warmteuitstraling leiden tot een bepaalde mate van opwarming van het grondwater in de directe nabijheid. Vooralsnog is deze warmteuitstraling enkel modelmatig onderzocht waarbij de temperatuur van de buitenste casing en de achtergrondstroming is gevarieerd (Van Lopik et al., 2015; De la Loma Gonzales & Hartog, 2016). Hierbij is geen rekening gehouden met eventuele isolatie door met gasen gevulde annulaire ruimte die ontstaat door de afpompings in de put. Zonder achtergrondstroming ontstaat bij deze randvoorwaarden een temperatuurgradiënt vanaf de casingtemperatuur tot een temperatuurverhoging van 1,5 °C op 100 meter afstand na 40 jaar productie. In deze situatie kan convectiestroming en daarmee menging van verschillende waterkwaliteiten optreden. Bij significante, maar voor delen van Nederland realistische achtergrondstroming ontstaat een warmtepluim benedenstrooms van de put. Stabilisatie van het warmtepatroon trad op na 3-10 jaar met een 1,5 graden contour op een maximale afstand van enkele honderden meters benedenstrooms van de put. Convectiestroming werd in deze situatie sterk onderdrukt (De la Loma Gonzales & Hartog, 2016).

Naast menging door convectiestroming heeft de verhoogde temperatuur invloed op chemische evenwichten en de snelheid (kinetiek) van (bio)chemische processen in het grondwater en kan daardoor het oplossen en neerslaan van mineralen, de binding van stoffen en de afbraak van stoffen versnellen of juist vertragen. Theoretisch gezien zullen effecten op bodem en grondwater tot een opwarming van 25-30°C klein zijn (Hartog et al., 2013). Dit 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](#)). Boven deze temperatuur nemen de effecten toe. In de Deltafact "Effecten open en gesloten bodemenergiesystemen op grondwaterkwaliteit" wordt uitgebreid ingegaan op de stand van de kennis over effecten van een verhoogde temperatuur op de grondwaterkwaliteit.

Gedetailleerde modelstudies, metingen en vooral veldvalidatie ontbreken om de warmteuitstraling, de opwarming van bodem en grondwater en de eventueel optredende kwaliteitseffecten te kwantificeren. Door het uitvoeren van veldonderzoek nabij bestaande geothermieputten kunnen betrouwbare inzichten opgedaan worden over de mate en effecten van warmteuitstraling (Witteveen+Bos, 2019). Recent is een inventarisatie uitgevoerd van beschikbare studies en vertaling

van de resultaten naar conclusies over de mogelijke effecten van opwarming ([TNO, 2021a](#)). In deze studie wordt op basis van bestudeerde laboratoriumtesten en computermodellen geconcludeerd dat chemische en microbiologische effecten waarschijnlijk alleen dicht bij de put waarneembaar zijn, maar dat veldmetingen nodig zijn om dit te bevestigen. Een project waarbij daadwerkelijk aan opwarming wordt gemeten is in voorbereiding. Temperatuurschommelingen kunnen ook van invloed zijn op de integriteit van de put, in de volgende paragraaf wordt hier nader op ingegaan.

## Abandonnering

### **Lekkage van vloeistoffen en/of gassen na abandonnering**

In Nederland is nog geen ervaring met het abandonneren van geothermieputten. Wel is veel ervaring opgebouwd met het abandonneren van andere mijnbouwwerken zoals olie- en gasputten. Nederland kent uitgebreide regels voor het verlaten van mijnbouwputten. Deze regels zijn beschreven in de Mijnbouwregeling. Bij het abandonneren worden meerdere cementpluggen van tientallen meters (minimaal 50 meter bij afsluitende lagen) in de put geplaatst. Deze sluiten de put af en vormen een drukdichte barrière. De Mijnbouwregelingen zijn in 2019 aangepast voor abandonneren. Alle lagen waar stroming mogelijk is, moeten nu afgedicht worden op de afdichtende laag boven dat reservoir of watervoerende pakket. De putten worden een aantal meter onder de grond afgesloten en afgezaagd en ook de bovengrondse installaties worden verwijderd ([Masterplan Aardwarmte, 2018](#)). Op basis van beschikbare informatie kan gesteld worden dat conform de Mijnbouwregeling verlaten putten volgens internationale 'best practices' zijn verlaten. Echter, ook de integriteit van volgens 'best practices' verlaten en afgedichte putten neemt af met de tijd en kan bij veranderend gebruik van de diepe ondergrond onvoldoende blijken.

Cementpluggen vertonen geringe degradatie met de tijd maar zijn gevoelig voor fouten tijdens de aanleg (Benedictus, 2009). Juist de kans op deze fouten is moeilijk te kwantificeren. Belangrijk is verder dat de integriteit van de bestaande cementeringen tussen casings en tussen casing en formatie op orde is bij abandonnering, zodat geen routes mogelijk zijn om de geplaatste pluggen heen (Vrålstad et al. 2019). Het optreden van annulaire ruimtes kan bijvoorbeeld worden veroorzaakt door een slecht uitgevoerde cement job, maar ook door volumetrische krimp van het cement. Daarnaast kunnen herhaaldelijke druk- en

temperatuurveranderingen als gevolg van operatie van de put en (semi)natuurlijke spanningen (o.a. door compactie van het reservoir) resulteren in verlies van hechting tussen cementeringen en casings en scheurvorming (Celia, 2005; Cirkel, 2014). Indien onvoldoende kan ervoor worden gekozen om een plug te plaatsen over de gehele diameter van het boorgat en hiervoor delen van bestaande casings en cementeringen te verwijderen (Vrålstad et al. 2019). Onvoldoende integriteit en lekkage na abandonnering is in Nederland aangetoond bij één gasput op het vasteland (Schout et al., 2019). Deze put is inmiddels opnieuw geabandonneerd.

Gezien de hydrostatische gradiënt en de door het zoutgehalte hoge dichtheid van het formatiewater in Nederlandse geothermie reservoirs is stroming van vloeistoffen naar bovenliggende grondwaterlagen na abandonneren onwaarschijnlijk, zolang de druk in het geothermische reservoir niet wordt verhoogd. Het risico op vrijkomen van formatiewater uit een geabandonneerde geothermieput is hiermee dan ook zeer klein. Wel dient bij het abandonneren aandacht te zijn voor de afsluiting van doorboorde kleilagen tussen watervoerende pakketten. Ook na abandonneren moet voorkomen worden dat de put een kortsluitroute kan vormen tussen deze pakketten.

## 7. KENNISLEEMTES

Diverse onderzoeken lopen om kennisleemtes in te vullen. Uit contacten met experts blijkt dat het voortschrijden van kennis hard gaat, waardoor het overzicht wellicht snel kan verouderen. Met betrekking tot de effecten van conventionele geothermie op de grondwaterkwaliteit kunnen op dit moment (april 2022) de volgende kennisleemtes worden geïdentificeerd:

- Integriteit van afdichting van doorboorde kleilagen met cement  
Net als bij andere mijnbouwputten wordt voor het vullen van de annulus tussen formatie en de buitenste casing en tussen casings onderling gebruik gemaakt van cement. Deze cementslurry wordt vanaf de onderkant van een bepaalde casingsectie omhoog geperst waarna de cement uithardt. Het gaat hierbij in de regel om lengtes van tientallen tot honderden meters. De integriteit van cement als afdichting op de zeer lange termijn (vele decennia en langer) is echter niet voldoende bekend door ondermeer vragen over de effecten van druk- en temperatuurschommelingen. Bij ondiepe putten (tot ca. 400 meter) wordt in ongeconsolideerde formaties zwelklei (bentoniet) gebruikt. Welke afdichtingsmaterialen en manier van afdichting effectiever is

voor kleilagen in ongeconsolideerde formaties moet nader onderzocht worden. Een KIRA (Kennis Innovatie Roadmap Aardwarmte) project is hiervoor in voorbereiding.

- Gedrag en evolutie van een lekkage uit een injectieput  
Mede om monitoring goed vorm te kunnen geven is meer inzicht in het potentiële lekgedrag vanuit geothermie(injectie)putten naar watervoerende pakketten noodzakelijk. Het extreem grote drukverschil (> 10 à 20 bar) tussen het water in de injectieput en het grondwater in de omringende ondiepe watervoerende pakketten en het relatief warme en zoute water in de injectieput maken het voorspellen van lekstroming uit de put niet eenvoudig. Een project met betrekking tot deze onderzoeksvraag is in voorbereiding.
- Opwarming ondergrond rond productie- en injectieput  
Opwarming van het bodem en grondwater rond geothermieputten is op basis van theoretische overwegingen en modelberekeningen waarschijnlijk. Er zijn echter geen metingen in een praktijksetting beschikbaar voor verificatie van de modellen en voorspelde kwaliteitsbeïnvloeding. Hiervoor is een KIRA praktijkonderzoek in de opstartfase. Wel is in het recente rapport van [Witteveen+Bos en KWR \(2020\)](#) voor het bepalen van de impact van geothermieputten op grondwater het realiseren van monitoring van grondwatertemperatuur beschouwd. Uit een wetenschappelijke literatuurstudie naar de effecten van opwarming blijkt dat chemische en microbiologische effecten waarschijnlijk alleen dicht bij de put waarneembaar zijn, maar veldmetingen nodig zijn om dit te bevestigen ([TNO, 2021a](#)). Tenslotte is onbekend wat de gevolgen zijn van eventuele opwarming van (afsluitende) kleilagen voor hun samenstelling en integriteitsbehoud.
- Effecten van opwarming op microbiologische en hydrogeochemische processen  
De effecten van temperatuur zijn tot een opwarming van ca. 30 °C redelijk in beeld. Bij verdere opwarming - wat in de nabijheid van geothermiesystemen mogelijk lijkt -, zijn de effecten onzeker.
- Lange termijn integriteit van geabandonneerde boorgaten  
In algemene zin is inzicht gewenst in de lange termijn integriteit van verlaten boorgaten. Zeker gezien de beoogde groei van het aantal systemen en mogelijk ander gebruik van de ondergrond in de toekomst.
- Grondwatermonitoring op diepte  
Voor eventuele verontreinigingen vanaf maaiveld zijn conventionele

monitoringsystemen beschikbaar. Bij geothermiesystemen kunnen lekkages naar het grondwater vanuit de injectieput echter optreden vanaf maaiveld tot aan de hydrologische basis die op honderden meters diepte kan liggen.

Conventionele grondwatermonitoringsystemen zijn hiervoor technisch niet geschikt en zijn extreem duur. Nieuwe technieken gestoeld op distributed temperature sensing (DTS) en elektromagnetische (EM) inductie moeten nog nader uitgewerkt worden en zich in de praktijk bewijzen.

- Breuken

Gebleken is dat stakeholders en beleidsmakers behoefte hebben aan inzicht in de risico's voor de grondwaterkwaliteit wanneer geothermieputten worden aangelegd in, door of langs bestaande breuken in de ondergrond. Tijdens de consultatiegesprekken met experts zijn breuken echter niet geïdentificeerd als risico voor vergrijzing van het grondwater. Dit onderwerp is daarom niet behandeld in deze Deltafact.

## 8. HANDELINGSPERSPECTIEVEN

Zoals uit voorgaande tekst blijkt, lijken de feitelijke risico's van geothermie voor de vergrijzing van grondwaterkwaliteit, zover deze op dit moment bekend zijn, beheersbaar en/of worden er reeds beheersmaatregelen getroffen. Voortgaande identificatie en mitigatie van risico's voor de grondwaterkwaliteit blijft niettemin belangrijk. Dit is een gezamenlijke taak voor overheden (rijksoverheid, provincies), kennisinstututen, toezichthouder (SodM) en de sector zelf (o.a. Geothermie Nederland) (o.a. [Herijking Grondwaterbeschermingsbeleid](#), Royal HaskoningDHV, 2021 en Industriestandaard Duurzaam Putontwerp, Geothermie Nederland, 2021). Van belang hierbij is de aanbeveling van de Algemene Rekenkamer (2021) dat de Ministers van EZK en IenW de regie versterken bij de inrichting en het beheer van de ondergrond en dat er meer samenhang komt in wet- en regelgeving voor de ondergrond. Hieronder volgt een overzicht van de geïdentificeerde risico's en de wijze waarop deze (verder) kunnen worden beheerst en gereduceerd. Hierbij dient te worden benadrukt dat uit het raadplegen van experts is gebleken dat veel van de handelingsperspectieven op het moment van schrijven reeds in de praktijk worden gebracht of in gang zijn gezet, maar nog niet in alle gevallen zijn vastgelegd in regelingen, standaarden en/of protocollen.

Geïdentificeerd risico	Beheersbaarheid en handelingsperspectief
Verontreiniging door lekkages en vermorsingen op de boorlocatie	De voorgeschreven bodembeschermende voorzieningen en regels ten aanzien van melding en opvolging bij eventuele verontreinigingen zijn in de regel afdoende om het risico op verontreiniging van bodem en grondwater te minimaliseren. Hierbij wordt toegezien op een effectief waterbeheersysteem. Wel moeten opvangsystemen door de operator tijdig worden geleegd zodat geen overstort naar de bodem, oppervlaktewater of riolering optreedt bij zware regenval.
Verspreiding van verontreiniging door het doorboren van bestaande bodem- en grondwaterverontreinigingen	Zowel in de richtlijnen voor ondiepe boringen (BRL2100) als in de praktijkstandaard voor olie- en gaswinning (NOGEPA Industriestandaard 41) is een vooronderzoek naar eventuele bodemverontreinigingen en een werkwijze bij aantreffen verontreiniging opgenomen. Beheersing van dit risico is mogelijk door bij de aanleg van geothermiesystemen aan te sluiten bij deze standaarden en de begin 2021 in werking tredende geothermie industriestandaard voor duurzaam putontwerp.
Risico van kortsluitstroming en verspreiding verontreinigingen door inadequaat herstel van doorboorde scheidende lagen	In de NOGEPA Industriestandaard 41 is een risico-evaluatiemethode uitgewerkt. Door bij deze methode aan te sluiten kan het risico worden beperkt. Als uit de evaluatie een risico blijkt dan inzetten op afdoende reparatie van de afdichting of als dat niet mogelijk is overgaan op het plaatsen van waterkwaliteitsmonitoring in het traject waar vraagtekens zijn over de isolatie van de watervoerende pakketten. Met name voor isolatie van ongeconsolideerde pakketten wordt aanbevolen om de effectiviteit van cement ten opzichte van andere afdichtingen (zoals zwellende kleien) te onderzoeken.
Verontreiniging door onvoldoende zorgvuldige opslag en transport van formatiewater tijdens putontwikkeling en/of regeneratie	Om het risico te beperken moeten tanks en foliebassins dubbelwandig worden uitgevoerd en goed gecontroleerd worden op lektheid. Ook moet voorkomen worden dat transportleidingen tussen de putten en de bassins kunnen lekken en moeten de bassins berekend zijn op extreme weersomstandigheden. Om lektheid te verifiëren is het aan te bevelen om het grond- en oppervlaktewater in de nabijheid van de bassins met regelmaat te bemonsteren op chloride als indicator stof. In algemene zin moet het streven zijn om formatiewater in zo klein mogelijke hoeveelheden en zo kort mogelijk op maaiveld op te slaan.
Optreden van een blow-out	Met geologisch vooronderzoek en naleving van de regels en voorschriften ten aanzien van boren en de installatie van beveiligingen zoals een BOP is de kans op een blow-out sterk verkleint. Door de toezichthouder wordt hier op toegezien.
Lekkage van formatiewater uit installaties	Om dit risico te verkleinen is allereerst inzet op het gebruik van corrosiebestendigere materialen en meervoudige barrières (dubbelwandigheid met inspecteerbare annulus) van groot belang, wat al wordt vormgegeven in de meest recente ontwerpen. Dit kan door dit in het ontwerp van nieuwe putten mee te nemen, maar ook door bestaande putten aan te passen door bijvoorbeeld het aanbrengen van injection tubing. Het gaat hierbij dus om het prevaleren van preventieve maatregelen boven curatieve zoals het gebruik van corrosie-inhibitoren. Daarnaast zijn regelmatige controles (logging campagnes) en innovatieve grondwatermonitoring op diepte, zeker in het geval van enkelwandige putten met mindere staalsoorten, noodzakelijk om respectievelijk te controleren of de integriteit van de putten op orde is en om te verifiëren dat geen lekkage is opgetreden. Omdat onbekend is hoe een lekkage van zout, warm formatiewater zich in ondiepe watervoerende putten ontwikkeld is aanvullend (model)onderzoek nodig.

Geïdentificeerd risico	Beheersbaarheid en handelingsperspectief
Temperatuureffecten op de biochemische samenstelling van het grondwater	Veldverificatie van modelstudies is noodzakelijk om gedegen uitspraken te kunnen doen over opwarmingspatronen en effecten op de grondwaterkwaliteit. Voor de waterkwaliteitseffecten van opwarming kan worden aangesloten bij nieuwe of lopende initiatieven rond HTO waar deze problematiek ook speelt.
Lekkage van vloeistoffen en/of gassen na abandonnering	Lekkage van vloeistoffen uit Nederlandse geothermische reservoirs lijkt na abandonneren geen risico van betekenis te vormen. Wel moet oog zijn voor mogelijke gaslekage als vrij gas aanwezig is in de doorboorde formaties. In algemene zin is het van belang om ten aanzien van de eisen bij abandonnering oog te hebben voor mogelijk nog niet te voorzien toekomstig gebruik van de ondergrond. Afdichtingen moeten voor de eeuwigheid integer blijven.
Invulling kennisleemten	Verdere beheersing van eventuele risico's is mogelijk door invulling te geven aan de geïdentificeerde kennisleemten.

## 9. PRAKTIJKERVARING EN LOPEND ONDERZOEK

Hieronder worden noemenswaardige afgesloten en lopende onderzoeken weergegeven en wordt een overzicht van handige websites gegeven.

### Lopende onderzoeken:

#### [Kennisagenda Aardwarmte / Kennis Innovatie Roadmap Aardwarmte](#)

In de Kennisagenda Aardwarmte is van 2014-2018 onderzoek naar de ontwikkeling van aardwarmte gefinancierd vanuit Kas als Energiebron. De Kennisagenda heeft, net zoals het programma Kas als Energiebron, een vraaggestuurd karakter. Voor de invulling en aansturing van de Kennisagenda is een kenniscoördinatiegroep vanuit bedrijfsleven en overheid is ingesteld, bestaande uit: Platform Geothermie, DAGO, Glastuinbouw Nederland, ministerie van EZK, ministerie van LNV, TNO Age, SodM en RvO. Inmiddels is vanuit het ministerie van EZK een groter en breder kennis- en innovatieprogramma opgezet in overleg en samen met genoemde betrokken partijen en EBN: de Kennis & Innovatie Roadmap Aardwarmte (KIRA).

#### [SCAN](#)

SCAN onderzoekt waar de Nederlandse diepe ondergrond, in de delen waarover wij nog weinig informatie hebben, geschikt zou kunnen zijn voor de winning van aardwarmte. SCAN is dus eigenlijk de verkenningsploeg die ervoor zorgt dat een beter en completer beeld ontstaat van onze ondergrond. Met die kennis kunnen de mogelijkheden van aardwarmte voor Nederland beter worden ingeschat en de kans op succesvolle projecten worden vergroot.

Aardwarmte is duurzaam. Het is een warmtebron die niet afhankelijk is van weer of wind. Momenteel wordt in Nederlandse tuinbouwkassen al gebruik gemaakt van aardwarmte. In de toekomst kan aardwarmte ook in woonwijken een duurzame bron van energie zijn, als alternatief voor aardgas. Daarvoor is het noodzakelijk om te weten hoe de ondergrond eruit ziet. Want overal in de aardbodem is warm water aanwezig, het hangt echter van het gesteente af of dit ook uit de ondergrond kan worden gehaald.

Grote delen van de Nederlandse ondergrond zijn al in kaart gebracht. Tijdens de opsporing en winning van olie en gas is men veel te weten gekomen over de eigenschappen van de aardlagen onder onze voeten. Toch vertoont de kaart van het ondergrondse landschap nog veel witte vlekken. SCAN kleurt de aardwarmtekaart van Nederland verder in. En streeft ernaar een zo compleet mogelijk beeld te creëren van de Nederlandse ondergrond. SCAN helpt ook bij het in kaart brengen van lagen die mogelijk geschikt zijn voor het winnen van Ultradiepe Geothermie, of UDG.

#### [WarmingUP](#)

Het belangrijkste doel van WarmingUP is de ontwikkeling van collectieve warmtesystemen die betaalbaar, duurzaam, betrouwbaar, praktisch uitvoerbaar en maatschappelijk aanvaardbaar zijn. Het betekent bijvoorbeeld dat met nieuwe kennis duurzame warmtebronnen met verschillende niveaus van temperatuur en volumes slim gecombineerd kunnen worden. Ook kennisontwikkeling voor het realiseren van grootschalige warmteopslagsystemen en het integreren daarvan in warmtenetten is een beoogd resultaat. Onderzocht wordt bijvoorbeeld waar en tegen welke kosten warmte gewonnen kan worden via aquathermie of geothermie. Tot slot richt het samenwerkingsverband zich op de ontwikkeling van nieuwe samenwerkings- en financieringsvormen én nieuwe werkwijzen om maatschappelijk draagvlak te realiseren.

#### [HEATSTORE](#)

De belangrijkste doelstellingen van het HeatStore project zijn het verlagen van de kosten, het verminderen van de risico's, het verbeteren van de prestaties van technologieën voor ondergrondse thermische energieopslag (HT-UTES) bij hoge temperaturen (~25°C tot ~90°C) en het optimaliseren van het beheer van de vraagzijde van het warmtenetwerk (DSM).



## **Afgesloten onderzoeken:**

### [Onderzoek naar risico's van opwarming van de ondiepe ondergrond door geothermie \(TNO, 2021a\)](#)

Door het winnen van aardwarmte verwarmt de put en de omgeving van de put. SodM heeft Adviesgroep Economische Zaken en Klimaat van TNO een inventarisatie van beschikbare studies en vertaling van de resultaten naar conclusies over de mogelijke effecten van opwarming laten uitvoeren. De hoofdconclusie van het onderzoek is dat chemische en microbiologische effecten waarschijnlijk alleen dicht bij de put waarneembaar zijn volgens het bestudeerde werk (laboratoriumtesten en computermodellen), maar er zijn veldmetingen nodig om dit te bevestigen.

### [Bescherming drinkwater bij het boren naar aardwarmte \(Algemene rekenkamer, 2021\)](#)

De Algemene Rekenkamer heeft onderzocht of de rijksoverheid de bescherming van drinkwaterbronnen bij de ontwikkeling van geothermie de afgelopen jaren doeltreffend heeft geregeld en uitgevoerd. In hun onderzoek belichten ze de spanningen die de winning van zowel drinkwater als aardwarmte uit de bodem met zich meebrengt. Ze bevelen de ministers van EZK en IenW aan om de regie te versterken bij de inrichting en het beheer van de ondergrond. Het is belangrijk dat er meer samenhang komt in wet- en regelgeving voor de ondergrond. De Drinkwaterwet kent de drinkwatervoorziening een 'zwaarwegend' belang toe, maar in de Structuurvisie Ondergrond hebben de drinkwatervoorziening en geothermie een 'nevengeschied' belang.

### [Risico-inventarisatie, onderdeel van HEATSTORE](#)

In dit rapport zijn de potentiële risico's in verband met warmteopslag in watervoerende lagen (HT-ATES) beoordeeld. Dit is gedaan door het bouwen van een risico-inventarisatie-instrument, dat potentiële risico's voor HT-ATES-systemen omvat. Deze tool is opgebouwd uit een uitgebreide literatuurstudie en uit interpretaties van deskundigen, wat heeft geleid tot de ontwikkeling van een gestructureerde Risk Inventory tool. De Risico Inventarisatie bevat risico's en de mogelijke risicobeperkende maatregelen in verband met HT-ATES. Het doel van de inventarisatie is om te dienen als een checklist voor het identificeren en beheren van alle risico's die van toepassing zijn op een specifieke casestudy. De robuustheid en

waarde van de Risico Inventarisatie is getest door de tool toe te passen op de Nederlandse demonstratiecase op HT-ATES in Middenmeer, waaruit de toegevoegde waarde van de tool kon worden gevalideerd.

[Staat van de sector Geothermie \(SodM, 2017\).](#)

In deze Staat van de Sector Geothermie geeft SodM naast een algemeen overzicht van de sector, inzicht in wat er goed en niet goed gaat en wat onderliggende problemen zijn. SodM schetst ook de belangrijkste milieu- en veiligheidsrisico's. Deze voor SodM eerste Staat van de Sector sluit af met aanbevelingen. De aanbevelingen zijn gericht aan de geothermiesector en aan het Ministerie van Economische Zaken. Maar ook aan de politiek en samenleving om te helpen reflecteren over daadwerkelijk veilige geothermie, nu en in de toekomst.

[Evaluatie van de Staat van de sector Geothermie \(SodM, 2021\)](#)

SodM evalueerde de Staat van de Sector Geothermie (2017) om te onderzoeken wat er met de aanbevelingen uit het rapport is gedaan en of geothermie intussen veiliger is geworden voor mens en milieu. SodM heeft een documentstudie gedaan, inspectierapporten op geothermielocaties zijn geanalyseerd, ca. 15 externe en interne interviews zijn gehouden en relevante ontwikkelingen zijn in kaart gebracht. SodM concludeert dat het ministerie van EZK sinds 2017 werkt aan het aanpassen van de wet- en regelgeving, het opstellen van normen en het wegwerken van achterstanden voor het instemmen op winningsplannen. In 2021 is dit nog niet afgerond. Dit is in de ogen van SodM een belangrijke randvoorwaarde voor de doorontwikkeling van geothermie. Verder concludeert SodM dat in de afgelopen jaren het naleefgedrag en de veiligheidsprestaties bij geothermiebedrijven zijn verbeterd. Bedrijven met meerdere geothermiesystemen en bedrijven met langjarige ervaring in de energiesector presteren over het algemeen beter dan bedrijven die geothermie als nevenactiviteit hebben. De professionalisering is in gang gezet, maar nog niet op het gewenste niveau. Dat moet en kan beter.

[Masterplan Aardwarmte \(Stichting Platform Geothermie, DAGO, Stichting Warmtenetwerk, EBN, 2018\):](#)

Hierin wordt beschreven hoe op een duurzame, veilige en maatschappelijk verantwoorde manier en op basis van de productie van de huidige 3 petajoule Nederlandse aardwarmte per jaar, via 50 petajoule per jaar in 2030, meer dan 200 petajoule per jaar in 2050 kan worden geproduceerd. Door de brede samenstelling

van de groep initiatiefnemers van dit Masterplan zijn meerdere invalshoeken en belangen vertegenwoordigd.

[Grondwatermonitoring bij geothermiesystemen: een praktijkverkenning \(Witteveen+Bos & KWR, 2020\)](#)

In dit onderzoek is het realiseren van de grondwatermonitoring om de impact van geothermieputten op grondwater te bepalen als uitgangspunt genomen. Dit rapport gaat in op de invloed van de verschillende ondergrond condities in Nederland op de realisatie, de technische uitvoering en de kosten van deze grondwatermonitoring bij geothermieputten.

### **Websites en tools:**

Samenwerkende partijen Geothermie Nederland, EBN, Stichting Warmtenetwerk:

[www.allesoveraardwarmte.nl](http://www.allesoveraardwarmte.nl)

EBN in samenwerking met de Stichting Platform Geothermie, DAGO (Dutch Association Geothermal Operators) en het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat: [www.hoewerктаardwarmte.nl](http://www.hoewerктаardwarmte.nl)

Geothermie Nederland: [www.geothermie.nl](http://www.geothermie.nl)

Stichting Warmtenetwerk: [www.warmtenetwerk.nl](http://www.warmtenetwerk.nl)

EBN: [www.ebn.nl](http://www.ebn.nl)

NLOG : [www.nlog.nl/geothermie](http://www.nlog.nl/geothermie)

Staatstoezicht op de Mijnen: [www.sodm.nl](http://www.sodm.nl)

Basisregistratie Ondergrond: <http://www.basisregistratieondergrond.nl>

Nationaal georegister (NGR): [nationaalgeoregister.nl](http://nationaalgeoregister.nl)

PDOK: [pdok.nl](http://pdok.nl)

Atlas van de Leefomgeving: [atlasleefomgeving.nl](http://atlasleefomgeving.nl)

## 10. REFERENTIES

Algemene Rekenkamer (2021). Bescherming drinkwater bij het boren naar aardwarmte, Stille wateren, in diepe gronden, <https://www.rekenkamer.nl/binaries/rekenkamer/documenten/rapporten/2021/06/17/bescherming-drinkwater-bij-het-boren-naar-aardwarmte/Rapport+Bodemenergie+en+drinkwater+WR.pdf>.

Adrichem A. van et al., 2014 Handboek Geothermie 2014, Handboek geothermisch operator

Buik en Aalten (2017) Single hole geothermische systemen, IF Technology, Arnhem

- Benedictus, T. et al., 2009. Well Abandonment: Long-term integrity for CO2 storage, TNO-034-UT2009-01427
- 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>
- 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>
- Celia, M.A., Bachu, S., Nordbotten, J.M., Kavetski, D., Gasda, S.E., 2005. Modeling Critical Leakage Pathways in a Risk Assessment Framework: Representation of Abandoned Wells Paper presented at Fourth Annual Conference on Carbon Capture and Sequestration DOE/NETL.
- Cirkel, D.G., Leunk, I. (2012) Quickscan risico's verschillende boor en winningstechnieken. KWR Nieuwegein
- Cirkel, D.G. (2014) Lange termijn integriteit en monitoring van verlaten diepe putten. BTO 2014.017 KWR, Nieuwegein
- Cirkel, D. G. en Hartog, N. (2017). Grondwatermonitoring bij Geothermieputten. BTO 2017.075, KWR Nieuwegein
- De la Loma Gonzales, B. and Hartog, N. (2016). Impact of Heat Loss from Geothermal Wells on Shallow Groundwater Quality. KWR 2016.051, KWR Watercycle Research Institute.
- Dutch Association Geothermal Operators (2019). Gedragscode Omgevingsbetrokkenheid bij Aardwarmteprojecten.
- EHP (2013) Characterisation and Management of Drilling Fluids and Cuttings in the Petroleum Industry. Department of Environment and heritage protection Queensland Government Australia 2013.
- 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>
- Geothermie Nederland (2021). Factsheet Industriestandaard Duurzaam Putontwerp, Geothermie Nederland en EBN, [https://www.ebn.nl/wp-content/uploads/2021/03/Factsheet\\_Industriestandaard\\_duurzaam\\_putontwerp-133120.pdf](https://www.ebn.nl/wp-content/uploads/2021/03/Factsheet_Industriestandaard_duurzaam_putontwerp-133120.pdf)
- 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.
- Hartog, N. (2016) Risico's van Geothermie voor Grondwater. BTO 2016.077, KWR Nieuwegein

- Hartog, N. & Cirkel D.G. (2015) Geothermie en HTO: Evaluatie van de risico's voor grondwaterkwaliteit. KWR 2015.037, KWR Nieuwegein
- Holleman (2019) Richtlijn aanvullende maatregelen toepassing geothermie Brabant, Stuurgroep Green Deal Geothermie Brabant ref BF9543I&BRP1805291643 RoyalHaskoningDHV, <https://geothermiebrabant.nl/wp-content/uploads/2019/02/Richtlijn-Toepassing-Geothermie-Brabant.pdf>.
- Kamerbrief Voortgang geothermie 28 mei 2020. Directoraat-generaal Klimaat en Energie, DGKE/ 20145402, <https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/kamerstukken/2020/05/28/kamerbrief-over-voortgang-geothermie/kamerbrief-over-voortgang-geothermie.pdf>.
- KWR & IF Technology (2013). Effecten en risico's van gesloten bodemenergiesystemen.
- Kombrink H, van Os B.J.H., van der Zwan C.J. (2008) Geochemistry of marine and lacustrine bands in the Upper Carboniferous of the Netherland. Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw. 87(4):309 – 22.
- IF-Technology, 2008. Geothermie Den Haag Zuidwest. Ontwerp geothermisch doublet. IF Technology, Arnhem
- Jochum J., Friedrich G., Leythaeuser D., Littke R. (1995) Intraformational redistribution of selected trace elements in the Posidonia Shale (Hils Syncline, NW Germany) caused by the thermal influence of the Vlotho Massif. Ore Geology Reviews. 9(5):353-62.
- Masterplan Aardwarmte (2018). Masterplan Aardwarmte in Nederland, Een brede basis voor een duurzame warmtevoorziening. Stichting Platform Geothermie, DAGO, Stichting Warmtenetwerk, EBN, <https://geothermie.nl/images/Onderzoeken-en-rapporten/20180529-Masterplan-Aardwarmte-in-Nederland.pdf>
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat: Beleidsbrief Geothermie, 8 februari 2018, <https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/kamerstukken/2018/02/08/kamerbrief-over-geothermie/kamerbrief-over-geothermie.pdf> .
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat: Klimaatplan 2021-2030, Publicatie-nr. 0220-068, April 2020, <https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/beleidsnotas/2020/04/24/klimaatplan-2021-2030/Klimaatplan+2021-2030.pdf>.
- NOGEPa (2016). INDUSTRY STANDARD NO. 41 Well Engineering and Construction Process <https://www.nogepa.nl/downloads/standards-guidelines/>
- Geothermie Nederland: [www.geothermie.nl](http://www.geothermie.nl)
- Plenefisch, et al, Tiefe Geothermie – mögliche Umweltauswirkungen infolge hydraulischer und chemischer Stimulationen, November 2015, Umweltbundesamt Deutschland

- 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>
- Richtlijn voor veilige aardwarmte, 2019: [Veilige geothermie in Brabant - Geothermie Brabant](#)
- Royal HaskoningDHV (2018). Innovatie Roadmap Geothermie Nederland. Rapport BF9701\_I&B\_RP\_180509.
- Royal HaskoningDHV (2020) Onderzoek naar de verwerking van testwater afkomstig van geothermie in het kader van de landelijke Kennisagenda Aardwarmte. Rapport BF6178-RHD-RP-001-RP-001.
- Royal HaskoningDHV (2021). Herijking grondwaterbeschermingsbeleid, beschermen om te blijven, rapport BH4198WATRP2010291113, [https://herijkinggrondwaterbeschermingsbeleid.ireport.royalhaskoningdhv.com/FbContent.ashx/pub\\_1000/downloads/BH4198%20Rapport%20Herijking%20grondwaterbeschermingsbeleid%20versie%205%20november.pdf](https://herijkinggrondwaterbeschermingsbeleid.ireport.royalhaskoningdhv.com/FbContent.ashx/pub_1000/downloads/BH4198%20Rapport%20Herijking%20grondwaterbeschermingsbeleid%20versie%205%20november.pdf)
- Schout, G., Hartog, N., Hassanizadeh, S. M., & Griffioen, J. (2018). Impact of an historic underground gas well blowout on the current methane chemistry in a shallow groundwater system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(2), 296-301.
- Schout, G., Griffioen, J., Hassanizadeh, S. M., de Lichtbuer, G. C., & Hartog, N. (2019). Occurrence and fate of methane leakage from cut and buried abandoned gas wells in the Netherlands. *Science of the Total Environment*, 659, 773-782.
- SGS (2015) Kennisgeving en ontwerp tekst Milieueffectrapport Geothermisch project BALMATT-SITE te Mol, SGS Belgium nv
- 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.
- Staatstoezicht op de Mijnen (2017). Staat van de sector Geothermie, <https://www.sodm.nl/binaries/staatstoezicht-op-de-mijnen/documenten/rapporten/2017/07/13/staat-van-de-sector-geothermie/SvdS+Geothermie.pdf>.
- Staatstoezicht op de Mijnen (2021). Evaluatie aanbevelingen Staat van de Sector geothermie, <https://www.sodm.nl/binaries/staatstoezicht-op-de-mijnen/documenten/publicaties/2021/09/30/evaluatie-aanbevelingen-staat-van-de-sector-geothermie/Evaluatie+Aanbevelingen+Staat+van+de+Sector+Geothermie.pdf>
- Staatstoezicht op de Mijnen & TNO-AGE (2013). Protocol bepaling maximale injectiedrukken bij aardwarmtewinning – versie 2,

<https://www.sodm.nl/documenten/publicaties/2013/11/23/protocol-bepaling-maximale-injectiedrukken-bij-aardwarmtewinning>.

- TNO (2021a). Rapportage milieuhygiënische risico's thermische vervuiling nabij geothermieputten, auteurs: S.H.J. Peeters, H.F. Mijnlief en B.M.M. van Kempen, TNO-referentie AGE 21-10.017, <https://www.sodm.nl/binaries/staatstoezicht-op-de-mijnen/documenten/rapporten/2021/04/16/onderzoek-naar-risico%E2%80%99s-van-opwarming-van-de-ondiepe-ondergrond-door-geothermie/Rapportage+Milieuhygi%C3%ABnische+risicos+thermische+vervuiling+nabij+geothermieputten.pdf>.
- TNO (2021b). Grondwaterkwaliteitsrisico's van bodemenergiesystemen door doorboren van kleilagen in de Brabantse situatie. TNO rapport 2021 R11454.
- TNO (2022). Beschermingskaart doorboringen, Kennisimpuls water. 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.
- Vrålstad, T., Saasen, A., Fjær, E., Øia, T., Ytrehus, J. D., & Khalifeh, M. (2019). Plug & abandonment of offshore wells: Ensuring long-term well integrity and cost-efficiency. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 173, 478-491.
- Veldkamp, J.G., T.V. Goldberg, P.M.M.C. Bressers, F. Wilschut (2016) Corrosion in Dutch geothermal systems Final report, TNO 2015 R10160
- Wasch, L.J., 2014. Geothermal Energy – Scaling Potential with Cooling and Co2 Degassing. TNO 2013 R111661.
- Witteveen+Bos & Arcadis & Fugro (2013). Aanvullend onderzoek naar mogelijke risico's en gevolgen van de opsporing en winning van schalie- en steenkoolgas in Nederland.
- Witteveen+Bos (2019) Risico-inventarisatie geothermie, Witteveen+Bos, Deventer, rapportnr. 113604/19-015.284.
- Witteveen+Bos & KWR (2020). Grondwatermonitoring bij geothermiesystemen: een praktijkverkenning, Kennisagenda Aardwarmte, Witteveen+Bos, Deventer, rapportnr. 109557/20-009.001, [https://www.kasalsenergiebron.nl/content/user\\_upload/109557-20-009.001-rapid-Grondwatermonitoring\\_bij\\_geothermiesystemen-signed.pdf](https://www.kasalsenergiebron.nl/content/user_upload/109557-20-009.001-rapid-Grondwatermonitoring_bij_geothermiesystemen-signed.pdf) .
- Wood group (2017) Corrosion Review and Materials Selection for Geothermal Wells, Kennisagenda Aardwarmte WGI 5099A
- Zimmerle W. (1995) *Petroleum sedimentology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

## 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.

Auteurs

Onder redactie van: Gijsbert Cirkel (KWR), Joris Dijkstra, Mariëlle van Vliet (TNO)

Versie

Versie 2, mei 2022