

BTO 2016.077 | November 2016

BTO rapport

Risico's van Geothermie voor Grondwater

KWR Watercycle Research Institute

BTO

Risico's van Geothermie voor Grondwater

BTO 2016.077 | November 2016

Opdrachtnummer
400554/171/005

Projectmanager
Jos Frijns

Opdrachtgever
BTO - Beleidsonderbouwend onderzoek

Kwaliteitsborger(s)
Dr. Ir. Gijsbert Cirkel

Auteur(s)
Dr. Niels Hartog

Verzonden aan
Rob Eijsink (Vewin)

Jaar van publicatie
2016

Meer informatie
Dr. Niels Hartog
T
E niels.hartog@kwrwater.nl

Keywords

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR Watercycle Research Institute

BTO | November 2016 © KWR

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

Samenvatting

Zorgvuldige omgang met onze grondwatervoorraden is van groot belang voor het voor de toekomst garanderen van een efficiënte productie van schoon en goed drinkwater. Tegelijkertijd is het gebruik van de ondergrond voor duurzame energie, zoals geothermie, sterk toegenomen. Incidenten bij diepe mijnbouwactiviteiten illustreren dat dit soort activiteiten niet zonder risico is en zijn voor Vewin aanleiding tot zorg over de risico's van geothermie voor grondwater. Vewin wenst daarom beter inzicht in de specifieke kenmerken en risico's van geothermiesystemen en mogelijke interferenties met grondwater en oppervlaktewater voor de drinkwatervoorziening. In deze studie is geïnventariseerd welke specifieke risico's voor grondwater zich voordoen. Ook is ingegaan op de vraag welke maatregelen mogelijk zijn om risico's te verminderen.

Uit deze studie zijn een aantal belangrijke risicofactoren van geothermie voor grondwater naar voren gekomen. Per risicofactor zijn hieronder de daarbij belangrijkste aspecten beschreven die het risico van geothermie voor grondwater bepalen. Ten dele gelden deze risicofactoren ook bij andere mijnbouwactiviteiten, zoals de risico's bij boren.

1) Het risico bij **Boren en doorboren** (Hoofdstuk 2) van grondwaterpakketten ten behoeve van de aanleg van geothermiesystemen wordt vooral bepaald door:
    a. Het kunnen op treden van kortsluitstroming door **onvoldoende afdichting van scheidende lagen.** Door kortsluitstroming kan vanuit boven –en of onderliggende lagen grondwaterverontreiniging optreden.
    b. Het doorboren en versmeren van **zaklagen** naar onderliggende watervoerende pakketten. Bij het boren op (mogelijk) met drijf- of zaklagen verontreinigde locatie, kunnen verontreinigingen versmeerd en verspreid worden naar grondwaterpakketten.
    c. Indringing van **verontreinigende boorspoeling** in een aquifer. Het gebruik van boorspoeling op basis of met toevoeging van potentieel verontreinigende stoffen kan mogelijk verontreiniging van grondwaterpakketten veroorzaken.
2) Bij boren in natuurlijke actieve breukzones in combinatie met hydraulic fracturing treedt risico op **Geïnduceerde Seismiciteit** (Hoofdstuk 3) op.
3) De **lekkage van formatiewater** (Hoofdstuk 4) is een belangrijk risico voor grondwater doordat dit kan optreden door:
    a. Onvoldoende veilige **tijdelijke opslag in foliebassins** tijdens putontwikkeling of putregeneratie. Door vermorsingen of lekkages uit de opslag bassins kan vanaf maaiveld ondiep grondwater verontreinigd raken.
    b. Het gebruik van **onvoldoende corrosie-bestendige staalsoorten** voor de putconstructie. Dit verhoogt het risico op verminderde put integriteit door corrosie en het optreden van lekkage naar het grondwater.
    c. Onvoldoende bescherming tegen lekkage door **niet-meerwandige putconstructie**. Het doorsnijden van grondwaterpakketten met (deels) enkelwandige putten versterkt het risico dat bij ontstaan van onvoldoende integriteit van de put, directe lekkage naar het grondwater optreedt. Tevens ontbreekt het bij enkelwandige putten aan de mogelijkheid om middels annulaire drukmetingen onvoldoende putintegriteit voortijdig op te merken.
4) De mate waarin warmte-uitstraling vanuit de put tot **opwarming van grondwater rond put** (Hoofdstuk 5) en veranderingen in grondwaterkwaliteit kunnen leiden. Warmte-

uitstraling vanuit putten treedt op en modelstudies geven aan dat de grote verhoging van de grondwatertemperaturen in de nabijheid van de put tot menging van grondwater kan leiden waar dit wellicht onwenselijk is. Op gebiedsschaal kan de opwarming in stroomafwaartse richting van de put tot licht verhoogde grondwater temperaturen leiden. Welke grondwaterkwaliteitsveranderingen door verhoogde grondwatertemperaturen kunnen ontstaan en in welke mate, is onbekend en waarschijnlijk sterk locatie-afhankelijk.

5) De **nabijheid van oude verlaten putten (met name olie -en gas)** nabij de injectieput van geothermiesystemen leidt tot een risico voor grondwater. Dit komt doordat deze oude putten mogelijk aangetast en/of onvoldoende zijn afgesloten waardoor zij mogelijk vanuit een geothermisch reservoir voor kortsluiting kunnen zorgen. Hierbij kan er formatiewater uit het geothermisch reservoir via een oude put omhoog en in het grondwater komen.

Geothermie heeft dus een aantal belangrijke risico's voor grondwater. Om deze risico's te beperken zijn aanvullende maatregelen nodig tijdens de ontwerp, aanleg en exploitatie fase. De risico's van geothermie voor grondwater, zoals beschreven in dit rapport, komen deels voort uit het nog jonge karakter van de sterk in ontwikkeling zijnde Nederlandse geothermiesector. Daarbij valt op dat een deel van de geïdentificeerde risicofactoren voor grondwater samen vallen met reeds door de geothermiesector zelf geconstateerde operationele problemen zoals scaling, corrosie en beperkte injectiviteit[1] (1, 2). Er is derhalve nog weinig kennis en ervaring met geothermie en dus ook weinig praktijkervaring vanuit de vraag welke risico's zich daadwerkelijk voordoen en hoe die het beste voorkomen kunnen worden. In hoofdstuk 8 van deze studie zijn daarom voor de geïdentificeerde risicofactoren mogelijke maatregelen verkend. Vanuit het voorzorgprincipe heeft daarbij de inzet op maatregelen die risico's helpen voorkomen (bv. verbeterde putconstructie en gebruik van hoogwaardiger materiaal) de voorkeur boven maatregelen die ter onderdrukking (bv. toepassing anti-corrosiemiddelen) worden toegepast.

In relatie tot waterwinning verdient het aanbeveling om beter zicht te krijgen op de impact van geothermie op grondwater in de praktijk, door gedegen veldmonitoringstudies. Op basis van veldgegevens kan getoetst worden in welke mate opwarming en andere effecten optreden. Ook is de validatie van de daarvoor gebruikte modellen om deze effecten te schatten nodig. Daarnaast is adequate monitoring van het grondwater bij geothermie nodig. Deze monitoring kan in een vroegtijdig stadium eventuele negatieve effecten op grondwater registreren teneinde maatregelen te kunnen treffen.

De ontwikkeling van geothermie in de praktijk moet hand in hand gaan met kennisontwikkeling over risico's en adequate maatregelen om die te beheersen. Ook dient daarbij onderzoek plaats te vinden naar het risicoprofiel van in Nederland nog in een beginstadium van ontwikkeling zijnde vormen van geothermie (met name *Enhanced Geothermal Systems,* EGS), welke in deze studie niet specifiek zijn beschouwd. Naast de risico's voor grondwater bij geothermische warmte en -electriciteitsproductie, dient er ook onderzoek plaats te vinden naar de risico's van ondergrondse technieken voor warmteopslag (bv. Hoge Temperatuur Opslag (3)) die mogelijk in combinatie met geothermie worden toegepast.

[1] Injectiviteit: de inspanning die nodig is om het onttrokken geothermische formatiewater, na warmte-extractie, te injecteren in de injectieput van een geothermisch doublet.

Inhoud

Samenvatting		**2**
Inhoud		**5**
1	**Introductie**	**6**
1.1	Aanleiding en doel	6
1.2	Aanpak	7
2	**Boren en doorboren**	**8**
2.1	Doorboren en afdichting	10
2.2	Boorspoeling en Boorgruis	12
2.3	Blowout	15
3	**Geïnduceerde Seismiciteit**	**17**
3.1	Hydraulic fracturing	18
3.2	Chemische stimulatie	18
4	**Lekkage van formatiewater**	**20**
4.1	Samenstelling formatiewater	20
4.2	Putontwikkeling en -regeneratie	24
4.3	Lekkage uit putten	26
5	**Opwarming grondwater rond de put**	**34**
5.1	Menging van grondwater	36
5.2	Grondwaterkwaliteitsveranderingen	38
5.3	Invloed van achtergrondstroming	38
6	**Oude verlaten putten**	**40**
7	**Grondwatermonitoring en beheersmaatregelen**	**42**
7.1	Grondwatermonitoring	42
7.2	Beheersing negatieve grondwaterbeïnvloeding	44
8	**Mogelijke maatregelen ter beperking van risico's**	**45**
8.1	Boren en doorboren	45
8.2	Geïnduceerde Seismiciteit	46
8.3	Lekken van Formatiewater	46
8.4	Opwarmen grondwater door warmte-uitstraling	47
8.5	Nabijheid oude verlaten putten	48
9	**Conclusies en Aanbevelingen**	**49**
9.1	Aanbevelingen	50
10	**Referenties**	**51**

1 Introductie

1.1 Aanleiding en doel

Zorgvuldige omgang met onze grondwatervoorraden is van groot belang om ook in de toekomst de efficiënte productie van schoon, goed drinkwater te garanderen. Tegelijkertijd is het gebruik van de ondiepe ondergrond voor duurzame energie sterk toegenomen, door vooral de toename van bodemwarmtewisselaars en koude- en warmteopslagsystemen. Met de afnemende beschikbaarheid van conventionele fossiele energiebronnen is er meer aandacht voor alternatieve energiebronnen waarbij ook de diepere ondergrond kan worden gebruikt. Zo is de mogelijke winning van schaliegas in Nederland onderzocht, wat heeft geleid tot een sterke maatschappelijke discussie over mogelijke effecten op de grondwaterkwaliteit van deze techniek. De ondergrond kan echter ook bijdragen aan de productie en opslag van niet-fossiele, maar juist duurzame energie. Zo kan geothermie ingezet worden voor het benutten van aardwarmte als duurzame, bron voor warmte als alternatief voor gas. Het is echter vooralsnog onduidelijk hoe en in welke mate de toepassing van geothermie de grondwaterkwaliteit kan beïnvloeden op de diepte van de Nederlandse grondwaterwinningen, met inbegrip van de strategische zoete grondwatervoorraden.

Wel lijkt duidelijk dat de ontwikkeling van geothermie in de toekomst sterk zal toenemen. In Nederland zijn op het moment 12 geothermiesystemen operationeel en 7 zijn in ontwikkeling (4). Dit zijn allen systemen waarbij er op diepten van ongeveer 2 tot 3 km onder maaiveld formatiewater van 70-90˚C wordt gewonnen voor verwarmingsdoeleinden. Vooralsnog liggen deze systemen grotendeels in gebieden waar geen duidelijke grondwaterbelangen spelen. De verdeling van de geschatte potentie voor geothermie varieert voor verschillende gebieden in Nederland en uit de verkenningen voor het planMER STRONG (5) blijkt dat gebieden die kansrijk zijn voor geothermie overlappen met kansrijke gebieden voor de drinkwatervoorziening.

Tot nu toe leveren de geothermiesystemen in Nederland warmte ten behoeve van de glastuinbouw, maar in toenemende mate is er aandacht voor het ontwikkelen van geothermie voor de levering van warmte aan andere afnemers, zoals industrie en woningen, vaak in combinatie met een warmtenet (bv. Warmtestad Groningen). Met deze groei van toepassingen voor geothermische warmte zullen geothermiesystemen in de toekomst niet alleen in (rurale) glastuinbouwgebieden maar ook in stedelijke/industriële gebieden worden gerealiseerd. Naast warmteproductie is er ook aandacht voor het aanboren van dieper gelegen aardlagen met hogere temperaturen zodat naast warmteproductie ook electriciteitsproductie doormiddel van stoomgeneratie tot de mogelijkheden gaat behoren. Voor dat laatste zijn inmiddels ook de eerste verkenningen gedaan naar de mogelijkheden van ultra-diepe geothermie in Nederland, waarvoor gebruik gemaakt zou moeten worden van zogeheten *Enhanced Geothermal Systems* (*EGS*) (6). Voor een groot deel zullen de risico's voor grondwater van deze systemen gelijkenissen vertonen met de nu al in Nederland toegepaste vormen van aardwarmtewinning.

Voor verdere standpuntbepaling over geothermie wenst Vewin beter inzicht in de specifieke kenmerken van geothermiesystemen en mogelijke interferenties met grondwater. In deze studie is geïnventariseerd welke specifieke risico's zich voordoen, hoe risico's kunnen worden gekwantificeerd, verminderd of voorkomen kunnen worden en welke voorzorgmaatregelen daarbij gewenst zijn.

1.2 Aanpak

Het doel van het onderzoek is om inzichtelijk te maken hoe geothermie kan resulteren in negatieve effecten op de grondwaterkwaliteit en de daarvan afhankelijke drinkwaterproductie, en hoe deze effecten beperkt kunnen worden. Inzicht hierin ondersteunt Vewin in haar positionering ten opzichte van de risico's van geothermie voor drinkwaterproductie.

In deze studie is een inventarisatie van risico-aspecten bij de toepassing van geothermie voor de grondwaterkwaliteit en drinkwaterproductie uitgevoerd. Hierbij is tevens kwalitatief aangegeven in hoeverre het aannemelijk is dat een effect zal of kan optreden. Voor de inventarisatie is geput uit algemeen beschikbare informatie, (wetenschappelijke) literatuur, als ook de eigen onderzoekservaringen in de Nederlandse geothermiepraktijk. Hierbij is er voor gekozen om een algemeen beeld te schetsen van de risico's voor grondwater van geothermie in Nederland. Referenties naar specifieke geothermiesystemen zijn daarom zoveel mogelijk vermeden. Het onderzoek heeft zich gericht op geothermie zoals die bedreven wordt in Nederland: het oppompen van warm water uit reservoirs ten behoeve van warmtevoorziening. Voor de eenvoud wordt daar in dit rapport over gesproken als "geothermie" of "conventionele geothermie". Geothermische ontwikkelingen nog onbekend in Nederland, zoals *EGS* zijn grotendeels buiten beschouwing gelaten.

In de volgende hoofdstukken worden de belangrijkste factoren besproken die bij geothermie tot risico's voor de grondwaterkwaliteit leiden, wordt uitgelegd hoe deze effect kunnen hebben op het grondwater. In de bespreking van deze factoren en de details daarvan wordt ruwweg de volgorde van de aanleg tot exploitatie en verlaten van een geothermiesysteem gehanteerd. Mogelijke maatregelen ter vermindering van de risico's voor grondwater worden in een apart hoofdstuk besproken.

2 Boren en doorboren

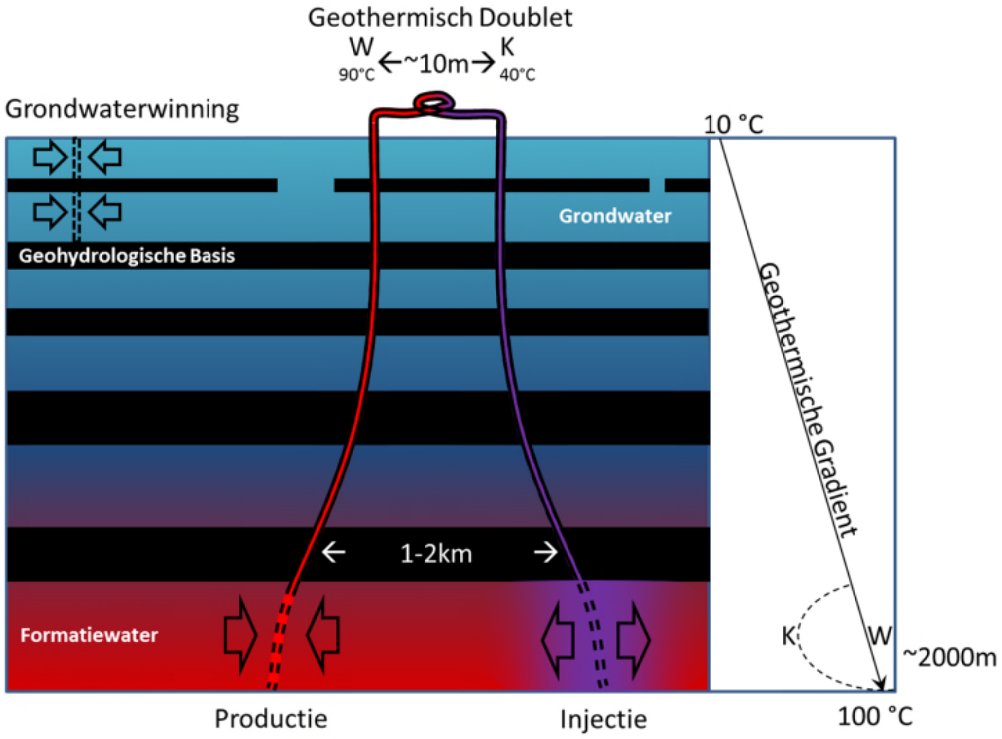
Om met een geothermiesysteem aardwarmte te winnen wordt er naar grote diepte geboord. Met toenemende diepte neemt namelijk de temperatuur van de ondergrond toe, al hangt de mate daarvan af van de lokale geothermische gradiënt (Figuur 2.2). Bij de Nederlandse geothermiesystemen wordt tot nog toe water van 70 tot 90°C gewonnen op 2 tot 3 km diepte (Figuur 2.3). Deze diepte is vergelijkbaar met de boordiepte voor olie- en gaswinning. De risico's van boren naar grote diepte gelden dan ook niet specifiek alleen voor geothermie. Wel worden er voor één geothermiesysteem twee boringen gezet. Eén ten behoeve van de put voor de productie van het warme formatiewater en één voor de injectie van het afgekoelde formatiewater (Figuur 2.2). In de mijnbouwregelgeving is vastgelegd aan welke eisen een diepe boring moet voldoen en welke veiligheidseisen daarbij in acht genomen moeten worden. De eisen voor boringen ten behoeve van geothermie zijn in principe hetzelfde als die voor olie en gas (7). Hiermee zijn bij de het boren voor geothermie in principe vergelijkbare risico-reducerende maatregelen van kracht als bij boringen voor conventionele olie- en gaswinning (3, 8). De aspecten bij het boren die extra aandacht verdienen ten behoeve van de bescherming van grondwater zullen hieronder worden besproken.



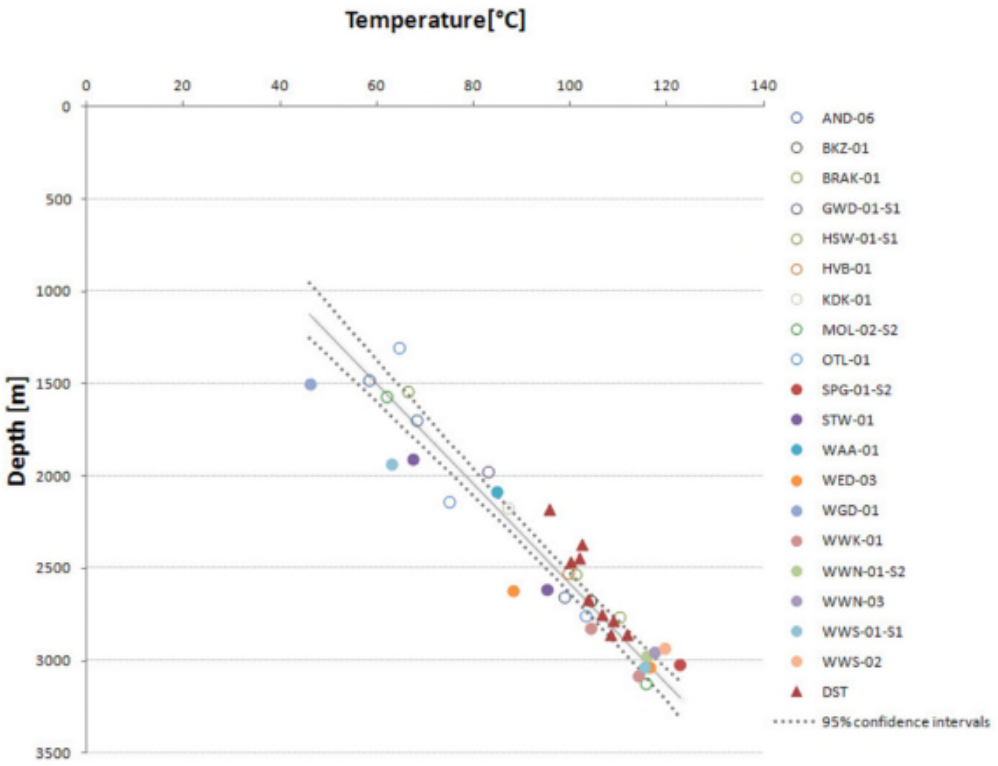
FIGUUR 2.1: VOORBEELD VAN EEN BOORLOCATIE TIJDENS DE REALISATIE VAN EEN RECENT GEOTHERMIESYSTEEM IN NEDERLAND. HET UIT HET FORMATIEWATER VRIJKOMENDE GAS, GROTENDEELS BESTAANDE UIT METHAAN, WORDT AFGEFAKKELD

Grondwater met (mogelijke) waarde voor drinkwaterproductie in Nederland wordt gewonnen uit het ondiepe grondwatersysteem boven de geohydrologische basis. Deze basis, die in Nederland grotendeels door Tertaire kleien wordt gevormd, bevindt zich op maximaal enkele honderden meters diepte. In voor drinkwaterproductie geschikte gebieden zal ten behoeve van geothermie dus door de voor grondwaterwinning geschikte pakketten heen geboord moeten worden. Omdat geothermieputten op diepte schuin worden geboord (Figuur 2.2) is

het tot een paar kilometer buiten deze gebieden mogelijk om onder, maar niet door de bovenliggende grondwaterpakketten te boren.



FIGUUR 2.2: SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN EEN GEOTHERMIESYSTEEM (LINKS) BESTAANDE UIT EEN DOUBLET VAN EEN PRODUCTIEPUT (W) EN EEN INJECTIEPUT (K). DE RUIMTELIJKE VERHOUDING VAN HET ONDIEPE GRONDWATERSYSTEEM BOVEN DE GEOHYDROLOGISCHE BASIS TEN OPZICHTE VAN HET DIEP GELEGEN GEOTHERMISCH RESERVOIR WAARUIT WARM FORMATIEWATER GEPRODUCEERD WORDT IS GLOBAAL AANGEGEVEN SAMEN MET DE TEMPERATUURVERHOUDINGEN (RECHTS).



FIGUUR 2.3: GEOTHERMISCHE GRADIËNT IN NOORD-BRABANT (9)

2.1 Doorboren en afdichting

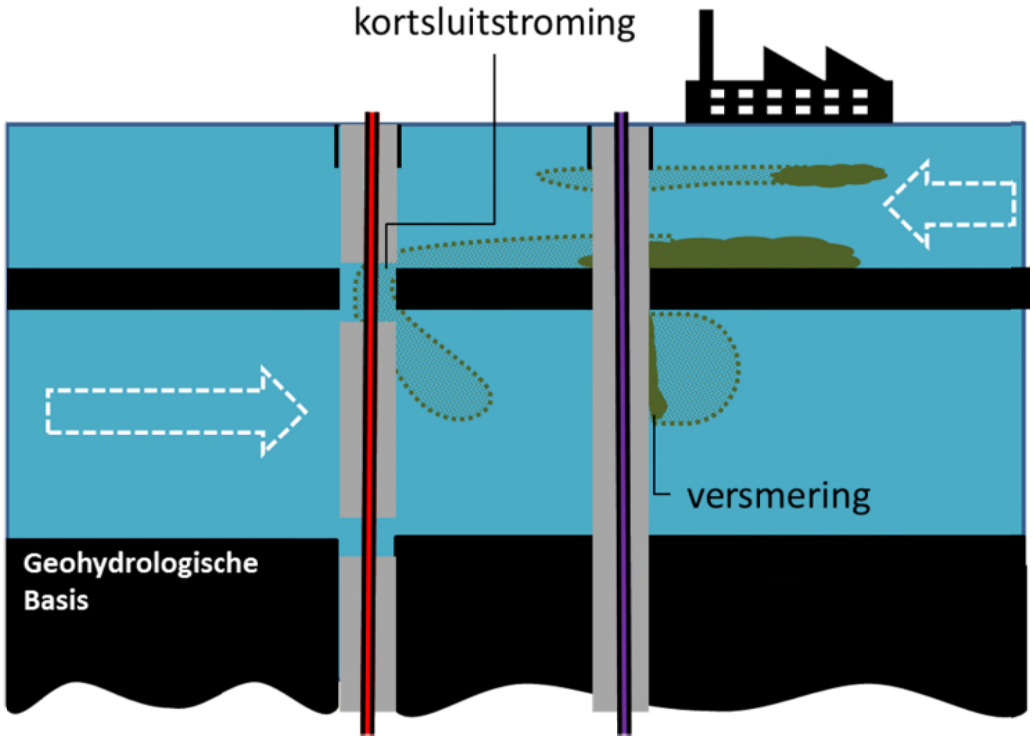
Bij het boren voor geothermieputten worden meerdere kleilagen, waaronder de kleilagen die de geohydrologische basis vormen, doorboord. De boormethoden gebruikt voor geothermie zijn vergelijkbaar met die voor het boren van olie- en gasputten. Bij dit soort diepe boringen wordt gewoonlijk gebruik gemaakt van roterend spuitboren waarbij de spoeling terug naar het maaiveld stroomt door de ruimte (annulus) tussen de boorstang en de boorgatwand. Bij spuitboringen zijn boorbeschrijvingen meestal onbetrouwbaar door het ontmengen van de opgeboorde grond door de lage opvoersnelheid. Daarnaast is hierdoor vaak een dikke boorspoeling (paragraaf 2.2) noodzakelijk. Het gebruik van een boormethode waarmee geen accurate boorbeschrijvingen gemaakt kunnen worden vormt een risico, omdat de exacte diepte en dikte van aanwezige scheidende lagen niet kan worden vastgesteld. Daarmee kan ook de mate waarmee deze scheidende lagen na het boorproces voldoende zijn afgedicht, onvoldoende worden vastgesteld.

Afdichting bij geothermieputten vind grotendeels plaats door cementering, mede ter versterking van de putconstructie op grotere diepte. Cruciaal voor de integriteit van diepe putten zijn de cementeringen van de annulus. Deze cementeringen beschermen de casings (verbuizingen) voor corrosie van buitenaf en voorkomen kortsluitstroming tussen casings en tussen de buitenste casing en de formatie. Lekkages langs cement-casing grensvlakken en cement gesteente grensvlakken kunnen worden veroorzaakt door een slecht uitgevoerde cementering bij aanleg van een geothermie put, maar ook door volumetrische krimp van het cement. Een krimp van 4% wordt door de industrie niet als ongewoon beschouwd (3). De kwaliteit van de cementering wordt standaard bepaald met akoestische apparatuur (bv. *Cement Bond Log*). Waar deze kwaliteit onvoldoende wordt bevonden, kunnen er door de verbuizing kleine gaten worden geboord waardoor er extra cement ingeperst kan worden. Doordat deze kleine gaten in de verbuizing worden afgesloten met nieuw cement (10), ontstaat hier een potentieel zwakke plek waarlangs lekkage uit de casings kan plaatsvinden

(paragraaf 4.3). Daarnaast kan het (deels) invallen van de boorgatwand tijdens het boren ervoor zorgen dat (een deel van) de doorboorde scheidende laag niet afgedicht kan worden. Het risico dat de afdichting door invallen van de boorgatwand onvoldoende is, is groter naarmate afsluitende lagen dunner en dieper gelegen zijn.

Na het doorboren van scheidende kleilagen kan de afdichting van het boorgat ter hoogte van deze lagen onvoldoende zijn (Figuur 2.4). Deze kleilagen schermen het grondwater in de watervoerende pakketten af van invloeden vanuit onder- en bovenliggende lagen. Een goede boorgatafdichting is dan ook van belang om het risico op kortsluitstroming en ongewenste (toekomstige) migratie van verontreinigingen en menging van verschillende watertypes te voorkomen (8). 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 (pesticiden) of industriële (Per, Tri) toepassing 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 drijflagen op het grondwater aanwezig zijn of juist als zogenaamde ‘zaklagen’ (bv. Per of Tri) en op diepte of bijvoorbeeld kleilagen geaccumuleerd zijn. Bij het doorboren van op de locatie aanwezige drijf- of met name zaklagen kunnen deze mogelijk naar de diepte toe versmeerd worden (Figuur 2.4) en al tijdens het boorproces tot indringing van de onderliggende grondwaterlagen leiden, vergelijkbaar met de indringing verontreinigende boorspoeling (paragraaf 2.2). Dit kan leiden tot een langdurende bron voor verontreiniging van het grondwater leiden. Een afdoende boorgatafsluiting na het boorproces voorkomt verdere migratie van zaklagen, maar verwijderd niet de versmering en migratie die al tijdens het boorproces is opgetreden.

Een goede afdichting van scheidende lagen is niet alleen van belang ter voorkoming van kortsluitstroming met antropogene verontreiniging vanuit bovenliggende lagen. Een goede afdichting is ook belangrijk voor de doorboorde lagen die de geohydrologische basis vormen. De samenstelling en stijghoogten van het grondwater onder de geohydrologische basis zijn grotendeels onbekend, echter in het algemeen zouter dan het bovenliggende grondwater. Het optreden van kortsluitstroming door de stijghoogte verlaging nabij een winning zou daardoor voor ongewenste menging van watertypen kunnen zorgen. Onvoldoende cementering van scheidende lagen op grotere diepte of degradatie van cementering kunnen maken het mogelijk dat vanuit grotere diepte vooral gassen zich omhoog kunnen bewegen langs de put. Een goede afdichting van de doorboring van de geohydrologische basis is daarom van belang om te voorkomen dat deze het grondwater boven de geohydrologische basis kunnen bereiken.



FIGUUR 2.4: SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN VOORBEELDEN VAN RISICO'S OP VERONTREINIGING BIJ DOORBORING VAN GRONDWATERLAGEN DOOR KORTSLUITSTROMING ALS GEVOLG VAN ONVOLDOENDE BOORGATAFDICHTING (GRIJS) VAN EEN SCHEIDENDE LAAG (LINKS) EN DOOR VERSMERING VAN BOVENLIGGENDE ZAKLAGEN (OLIJFGROEN). DE PIJLEN GEVEN ILLUSTRATIEF DE GRONDWATERSTROMING WEER.

2.2 Boorspoeling en Boorgruis

Bij het boren ten behoeve van diepe putten zoals die voor geothermiesystemen wordt vrijwel altijd gebruik gemaakt van een speciaal samengestelde boorvloeistof. Deze boorvloeistof heeft een aantal belangrijke functies: (1) afvoer van boorgruis bij boorkop, (2) in suspensie houden van boorgruis en afvoeren naar maaiveld, (3) koelen en smeren van de boorkop, (4) afdichten en stabiliseren van de boorgatwand, (5) geven van tegendruk voor de in de doorboorde formaties heersende drukken (kick en blow-out control), en (6) aandrijven van de door boorspoeling voortgedreven boorkop (downhole motor). Bovengronds wordt middels schudzeven de grove fractie uit de boorspoeling verwijderd waarna de spoeling weer via de boorbuis het boorgat in wordt gepompt.

Grofweg wordt gebruik gemaakt van spoelingen op basis van water en spoelingen op basis van olie of een olieachtige synthetische vloeistof. Spoelingen op basis van olie bestaan uit een emulsie van water in olie. Belangrijk voordeel van de spoeling op basis van olie is dat er goed in sterk zwellende kleien of kleistenen kan worden geboord. Verder zijn de spoelingen op oliebasis goed bestand tegen hoge temperaturen, is het corrosierisico kleiner en kan beter door steenzoutlagen worden geboord. In het verleden werd vooral gebruik gemaakt van dieselolie en soms ruwe olie als bestanddeel. Nadeel hiervan zijn uiteraard de milieu- en gezondheidsrisico's door de hoge gehaltes aan aromaten. Om deze reden zijn zogenaamde Synthetic-Based Muds (SBM) ofwel Low Toxicity Oil Based Muds ontwikkeld. Deze spoeling heeft als hoofdbestanddeel een aromaat-arme synthetische olie met vergelijkbare booreigenschappen maar minder toxisch voor milieu en personeel. Het heeft echter de

voorkeur geen boorspoeling op synthetische of minerale oliebasis te gebruiken, waartoe in Queensland, Australië in het algemeen al toe is besloten (11). Ook als een potentieel verontreinigende boorspoeling alleen gebruikt wordt voor de doorboring van dieper gelegen pakketten, kan deze tot indringing leiden als de annulus rond de surface casing door de bovenste grondwaterpakketten onvoldoende afgewerkt is.

De meest toegepaste toevoeging aan boorspoelingen is bentoniet (montmorilloniet klei). Een bentoniet suspensie heeft de eigenschap op te stijven bij stilstand (gel vorming) en weer vloeibaarder te worden bij beweging. Deze eigenschap wordt wel thixotropie genoemd. Hierdoor blijft boorgruis ook bij eventueel stilvallen van de stroom boorspoeling in suspensie. Daarnaast vormt de bentoniet een slechtdoorlatende laag op de boorgatwand, de zogenaamde filtercake. Hiermee wordt verweking of zwel van de boorgatwand en verlies van boorspoeling voorkomen. Naast bentoniet worden veelal biopolymeren (verhogen viscositeit, verbeteren thixotropie, verminderen spoelingsverlies) en andere speciale additieven toegevoegd. Bij extreme spoelingsverliezen worden zogenaamde *lost circulation materials* aan de spoeling toegevoegd. Het gaat hierbij bijvoorbeeld om zaagsel of notendoppen. Bij hoge formatiedrukken is verzwaring van de boorspoeling nodig om voldoende tegendruk te bieden. Een veel toegepaste stof om de spoeling te verzwaren is bariet ($BaSO_4$) met een soortelijk gewicht van ca. 4.3 kg/l. Ter voorkoming van bacteriegroei (risico destabilisering boorspoeling, corrosie) worden biocides (bijv. glutaaraldehyde) toegevoegd.

Tijdens het boren van de surface casing komen watervoerende lagen in contact met boorspoeling. Afhankelijk van het type boorspoeling kunnen hierbij milieugevaarlijke stoffen worden geïntroduceerd in watervoerende lagen. 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 (12). Toch kan uitloging vanuit resten boorspoeling op oliebasis, en dan in het bijzonder op dieselbasis, een risico vormen voor de grondwaterkwaliteit (12). Een voorbeeld hiervan in Nederland is de ontdekking in 2003 van een verontreiniging door een in het watervoerende pakket ingedrongen boorspoeling op een voormalige olie/gaswinplaats in de directe omgeving van winning Ridderkerk.

Ook als tot in de geohydrologische basis met een niet-verontreinigende boorspoeling geboord wordt, is de boorspoeling die voor de resterende diepte gebruikt wordt vaak in meer of mindere mate potentieel bedreigend voor bodem en ondiep grondwater. Hiermee is er een risico voor lekkage vanaf maaiveld die, in potentie, een bedreiging voor het onderliggende grondwater kan vormen. Ook kan naar het maaiveld gebracht formatiemateriaal bij onzorgvuldige opslag een (beperkt) uitloogrisico vormen. Een omvangrijke bodembeschermende voorziening dient echter aanwezig te zijn als maatregel tegen bodemverontreiniging. Tevens is er sprake van transport en opslag van boorspoeling aan maaiveld. De boorspoeling wordt daarom in gesloten bakken opgevangen en uiteindelijk afgevoerd naar een erkende verwerker. In Nederland wordt gebruik gemaakt van closed loop systems en opslag in tanks die de kans op lekkages en vermorsingen sterk verkleinen. Voor eisen aan opslag en afvoer van boorgruis en boorspoeling wordt verwezen naar (13). Dat dit geen garanties geeft blijkt bijvoorbeeld uit het feit dat bij het boren van een geothermieput in 2010 ca. vier kubieke meter boorspoeling weglekte en gedeeltelijk in een naastgelegen sloot verdween.

Door de grote diepte van de geothermische reservoirs, komt er bij het boren voor geothermieputten ook een aanzienlijke hoeveelheid boorgruis vrij. Of het boorgruis een milieurisico vormt hangt af van de gebruikte boorspoeling en de aard van het doorboorde formatiemateriaal. Los van resten boorspoeling kan het losgeboorde formatiemateriaal zelf

ook potentieel verontreinigende stoffen bevatten (11). Het gaat hierbij vooral om organische stof rijke lagen zoals (zwarte) schalielagen en koollagen, maar ook om eventuele steenzoutlagen. Voor wat betreft de zwarte schalies (in Nederland o.a. de Posidonia schalie en Geverik schalie) gaat het hierbij onder andere om zware metalen, koolwaterstoffen en van nature radioactief materiaal (*naturally occuring radioactive material,* NORM) (14-18). Omdat de schalies vaak ook hoge concentraties pyriet bevatten kan oxidatie leiden tot mobilisatie van metalen uit de schalies. Carboon afzettingen zoals de Geverikschalie bevinden zich in Nederland met uitzondering van Limburg op grote diepte. Doorboring van deze afzettingen is bij de aanleg van geothermie systemen dan ook niet te verwachten. In de praktijk wordt het losgeboorde materiaal (cuttings) op de boorlocatie gescheiden van de boorspoeling en in gesloten containers afgevoerd naar een gespecialiseerde afvalverwerker. Deze afvalverwerkers scheiden resten boorspoeling en schadelijke stoffen van de cuttings waarna de cuttings kunnen worden gestort op specifiek aangewezen locaties. In de boorspoeling gebruikte olie wordt teruggewonnen voor hergebruik.

Voor de aanleg van geothermiesystemen in Nederland wordt het risico op morsen van kleine hoeveelheden chemicaliën zoals gebruikt in de boorspoeling beperkt door toepassing van onder andere vloeistofdicht asfalt en milieugoten, als onderdeel van het waterbeheersingssysteem. In het besluit Algemene milieuregels mijnbouw (BARMM) wordt aangegeven dat doeltreffende maatregelen moeten worden getroffen om laden en lossen lekvrij te doen geschieden en lekkages te voorkomen. In de praktijk wordt de beheersing van risico's aan maaiveld vertaald naar de dimensionering van het waterbeheerssysteem op de boorlocatie. Hierin wordt vastgelegd welk minimaal percentage van het totaal gebruikt volume aan vloeistoffen en van het volume van een opslagtank door het waterbeheersingssysteem opgevangen moet kunnen worden. Na aanleg van het waterbeheersingssysteem worden de voorzieningen getoetst door een onafhankelijke inspecteur, waarna na goedkeuring een 'PBV verklaring vloeistofdichte voorziening' wordt afgegeven. Conform CUR/PBV-Aanbeveling 44 vindt uiterlijk 3 maanden voor het einde van de periode waarvoor de PBV verklaring is afgegeven een herkeuring plaats. Mocht een redelijk vermoeden van bodemverontreiniging zijn ontstaan, dan moet een herhalingsonderzoek van de bodemkwaliteit worden uitgevoerd. Zoals de eerder genoemde lekkage van boorspoeling naar een sloot kunnen vermorsingen ondanks voorzorgsmaatregelen toch optreden en soms tot verontreiniging leiden. Dat dit niet uitgesloten kan worden blijkt ook uit de jaarverslagen van het SodM: daarin staan, alleen al voor de periode van 2007 tot en met 2012, 150 mijnbouwincidenten met verontreinigende stoffen vermeld. Bij 30 van deze incidenten was er sprake van bodemverontreiniging buiten de beschermende voorzieningen van de productielocaties, waardoor extra maatregelen noodzakelijk waren om verontreinigingen te voorkomen of effecten te beperken. Het ging hierbij overwegend om relatief kleine en beheersbare incidenten.

Bij het ontwikkelen van de put (paragraaf 4.2) en vooral in combinatie met hydraulic fracturing (paragraaf 3.1) van slecht doorlatende zand of kalksteenlagen, komen grote hoeveelheden (vervuild) water vrij. Het gaat hierbij vooral om opgeloste zouten maar mogelijk ook koolwaterstoffen en vluchtige stoffen als kwik. Als dit water bij een calamiteit (bijvoorbeeld bij een blow-out, paragraaf 2.3) ongecontroleerd vrijkomt, zijn de bodem beschermende voorzieningen mogelijk onvoldoende en bestaat een verhoogd risico op vervuiling van bodem en grondwater.

Bij transport buiten het met vloeistofdichte vloeren uitgeruste gebied bestaat risico op lekkages en vervuiling van grondwater. Voor transport van deze vloeistoffen wordt gebruik gemaakt van onder meer gecompartimenteerde tankwagens. Wetgeving ten aanzien van wegtransport van (gevaarlijke)stoffen is vastgelegd in de Wvgs (Wet vervoer gevaarlijke

stoffen), het Bvgs (Besluit vervoer gevaarlijke stoffen), de Vlg (Regeling vervoer over land van gevaarlijke stoffen) en de ADR (accord Européen relatif transport de marchandises Dangereuzes par Route). Deze regelgeving beperkt de risico's voor grondwater buiten de geothermie locatie in belangrijke mate.

2.3 Blowout

De meest catastrofale calamiteit die kan optreden bij boren en hydraulic fracturing (paragraaf 3.1) is een blow-out. In de meeste gevallen worden blow-outs veroorzaakt door het aanboren van gas, olie of water dat onder zeer hoge druk staat. Dit kan het geval zijn in het geothermische reservoir, of in bovenliggende gesteentelagen waar doorheen wordt geboord. De kans op een blow-out bij boring van diepe putten zoals voor geothermie is veel groter dan voor grondwaterputten voor WKO of drinkwaterproductie in de ondiepere Kwartaire afzettingen. Daar zijn geen grote overdrukken te verwachten en daardoor ook geen blow-outs. De kans daarop neemt echter toe met de diepte en specifiek na het doorboren van Paleogene kleilagen zoals die van de Rupel (o.a. laagpakket van Boom), Dongen en Landen formaties. In Nederland vormen deze kleilagen grotendeels de hydrologische basis van het ondiepe grondwatersysteem. Bij de boring van geothermieputten is het optreden van een blow-out dan ook een reëel risico.

Een blow-out kan optreden als de boorvloeistof bij het aanboren van een formatie met verhoogde druk onvoldoende tegendruk biedt. Het gas, de olie of het water op die diepte zal zich naar boven willen verplaatsen. Als dit ongecontroleerd gebeurt, kan dit een grote calamiteit veroorzaken aan maaiveld. Grote overdrukken komen in conventionele reservoirs vooral voor in het noorden van Nederland en offshore (19).In het algemeen is de kans op blow-outs in Nederland klein, maar nooit geheel uit te sluiten (DNV, 2013)

Om te kunnen omgaan met (onverwacht) hoge drukken of ongecontroleerde stroming (kick) vanuit een reservoir zijn blowout preventors (BOPs) ontwikkeld. Het gebruik van BOPs is in Nederland verplicht. Naast het controleren van stroming en druk in het boorgat, zorgt de BOP ervoor dat boormateriaal (boorbuizen, casings) in het boorgat blijven bij een blow out. Onder normale booromstandigheden zorgt het gewicht van de kolom boorspoeling voor voldoende tegendruk. Als de druk in het boorgat te hoog oploopt sluit de BOP de annulus tussen boorbuis en casing. Vervolgens wordt boorspoeling met een hogere dichtheid (toevoeging bariet) in de put gepompt om voldoende tegendruk te genereren. Een belangrijke noodvoorziening op de BOP is de shear ram. Dit apparaat kan in geval van een calamiteit het boorgat geheel afsluiten, zelfs als een boorstang aanwezig is.

Er zijn maar beperkt gegevens beschikbaar over het aantal blow-outs bij diepe boringen. Op basis van offshore gegevens schatten (20) het aantal in op 1 a 10 per 10.000 boringen, waarbij nog geen BOP (blow-out preventor) is geïnstalleerd. Deze cijfers komen overeen met Canadese ervaringen en cijfers van Det Norske Veritas (21). Op basis van data van olie en gas producenten (OGP) geeft (21) een kans van $6\ 10^{-3}$ voor blow-outs bij verkenningsboringen als gevolg van ondiep gas.

Blow-outs kunnen optreden aan maaiveld, maar ook ondergronds als bijvoorbeeld een BOP de put aan maaiveld afsluit en de vloeistof of gas zich een weg zoekt door zwakke plekken in casings en cementeringen (20). In Nederland is vooralsnog één catastrofale blow-out opgetreden tijdens het boren van een put. Het gaat hierbij om de blow-out bij 't Haantje in de omgeving van Sleen in 1965. Ten opzichte van de jaren '60 zijn de techniek en de kennis van de ondergrond sterk verbeterd, waardoor de kans op een blow-out kleiner is geworden. Echter zoals verwoord door de inspecteur generaal der Mijnen in een brief aan de minister naar aanleiding van de ramp met de Deepwater Horizon (22), kan nooit worden uitgesloten

dat de techniek en/of de mens die met de techniek werkt faalt. Wel kan worden getracht de emergency response zo efficiënt mogelijk vorm te geven, om de gevolgen van de catastrofe te beperken. Deze opmerking wordt ondersteund door de conclusies van het onderzoek naar de Deepwater Horizon blow-out (23). Uit dit onderzoek blijkt dat een keten van falende techniek en het negeren van verontrustende signalen en veiligheidswaarschuwingen uiteindelijk hebben geleid tot de catastrofe.

3 Geïnduceerde Seismiciteit

Aardbevingen die kunnen ontstaan door het realiseren of het exploiteren van een geothermiesysteem worden geïnduceerde seismiciteit genoemd. De geïnduceerde seismiciteit kan bestaan uit “micro” aardbevingen (< 1 op de schaal van Richter) die alleen met gevoelige seismische meetapparatuur kunnen worden waargenomen, tot bevingen die door de mens fysiek gevoeld kunnen worden en tot schade kunnen leiden. Naast de schade die in zijn algemeenheid door sterke aardbevingen kan ontstaan aan bovengrondse infrastructuur, is het meest directe risico voor grondwater van geïnduceerde seismiciteit het beschadigen van geothermieputten waardoor de putintegriteit minder wordt en de kans op lekkage naar het grondwater groter wordt. De kans op en mate van geïnduceerde seismiciteit bij geothermie is afhankelijk van het type geothermiesysteem, het wel of niet toepassen van hydraulic fracturing en de natuurlijke seismische activiteit van het gebied waar geothermie plaatsvindt. Er zijn ons geen gevallen of mechanismen bekend die wijzen op een risico van geïnduceerde seismiciteit door het boorproces zelf.

Het risico op geïnduceerde seismiciteit bij geothermie wordt geïllustreerd door het vaak aangehaalde voorbeeld van het optreden van een serie sterke geïnduceerde aardbevingen bij de ontwikkeling van een Enhanced Geothermal System (EGS) in de stad Basel (Zwitserland). Zoals gebruikelijk bij EGS werden er onder hoge druk grote volumes water geïnjecteerd voor hydraulische stimulatie. Dit had tussen december 2006 en februari 2007 de zwaarste aardbevingen (2,9 tot 3,2 op de schaal van Richter) tot gevolg (24-26). De locatie van dit EGS systeem was nabij een actieve breuk van waaruit in het jaar 1356 een aardbeving met een kracht van 6,5 op de schaal van Richter ontstond die de stad volledig verwoestte. Het induceren van aardbevingen wordt echter door seismologen ook vaak gezien als preventief voor het optreden van nog sterkere, natuurlijke aardbevingen (26).

In Nederland hebben we vooral ervaring met geïnduceerde seismiciteit die optreedt door de decennialange gaswinning in Groningen. Door de drukafname die ontstaat in het reservoir waaruit het gas gewonnen wordt zakken de bovenliggende gesteentelagen langs breukvlakken in. De geologische formaties in Nederland met geothermische potentie zijn ten dele ook formaties waaruit gas en/of olie gewonnen wordt of werd (bijvoorbeeld Slochteren Formatie). Belangrijk is echter te realiseren dat er bij een geothermisch doublet van een alghele drukafname in het reservoir geen sprake is omdat het uit een geothermische reservoir geproduceerde formatiewater gelijktijdig, na afkoeling weer in het zelfde reservoir geïnjecteerd wordt.

Geïnduceerde seismiciteit bij geothermie kan globaal op twee manieren veroorzaakt worden:

1 *De injectie van het afgekoelde formatiewater via de injectieput nabij een actieve breuk tijdens de exploitatiefase.*
De injectie van formatiewater levert een kans op het induceren van seismiciteit als dit plaatsvind nabij een actieve breuk. De meest actieve natuurlijke breukzones in Nederland zijn in Brabant en Zuid-Limburg in het Nederlandse deel van de Roerdalslenk te vinden. Breuken worden gezien als “actieve” breuken als hierlangs in een, geologisch gezien, recent verleden verschuiving zijn waargenomen. Die activiteit geeft aan dat deze breuken dus waarschijnlijk spanning opbouwen die tot een grotere kans op toekomstige verschuivingen en geïnduceerde seismiciteit kunnen leiden. Hierbij kan ook

scheurvorming door de gesteentespanning die ontstaat door afkoeling bij de injectieput speelt een rol bij Enhanced Geothermal Systems. Voor conventionele geothermiesystemen is meerwaarde van het sterker afkoelen van het injectiewater ter verhoging van de injectiviteit echter onduidelijk (27).

2 *Door met hydraulische stimulatie (fracken) het reservoirgesteente door injectie te laten scheuren tijdens de ontwikkelfase om het reservoir en/of de putcapaciteit te verbeteren.* Hydraulische stimulatie is onderdeel van de aanpak bij Enhanced Geothermal Systems (EGS), dit om gesteente met gewoonlijk hogere temperaturen (>150°C) en lage doorlatendheid geschikt te maken als geothermisch reservoir. Hydraulische stimulatie kan ook worden toegepast bij conventionele geothermie systemen bij tegenvallende put- of reservoircapaciteit. Door het scheuren van gesteente leidt dit sowieso tot “micro” aardbevingen. Met hogere drukken en volumes waarmee gestimuleerd wordt neemt ook de kans toe dat scheuren een verbinding maken met een actieve natuurlijke breuken en een aardbeving induceren.

De kans op geïnduceerde seismiciteit is nagenoeg afwezig voor geothermiesystemen zonder hydraulische stimulatie en in de afwezigheid van nabije actieve natuurlijke breuken. Zoals het eerder beschreven voorbeeld van Basel illustreert, worden de risico’s hoger door de toepassing van hydraulische stimulatie met name in gebieden met natuurlijke seismische activiteit.

3.1 Hydraulic fracturing

Als blijkt dat een geothermisch reservoir onvoldoende doorlatend is, kan worden overgegaan op hydraulisch stimuleren van het reservoir, ook wel hydraulic fracturing genoemd, om de doorlatendheid te verbeteren (28). Zover bekend is hydraulic fracturing tot op heden nog niet toegepast bij Nederlandse geothermieprojecten. Het is van belang twee typen hydraulic fracturing te onderscheiden (28): conventioneel en waterfracken. Bij conventioneel fracken wordt gebruik gemaakt van een viskeuze vloeistof, bijvoorbeeld een polymeergel. Door de viscositeit van de vloeistof kan voldoende druk worden opgebouwd om scheuren te openen. Conventioneel fracken wordt voornamelijk toegepast in gesteentes met een redelijke initiële doorlatendheid (10-50 millidarcy) zoals zand en kalksteen formaties en kan dus ook worden toegepast bij geothermieprojecten om de injectiviteit te verhogen. Bij conventioneel hydraulic fracturing loopt de druk op de casing op tot 100 tot 250 bar. Het waterfracken wordt daarentegen vooral toegepast in gesteentes met een zeer lage doorlatendheid, zoals bij de exploratie voor schaliegas. Daarbij kan de druk op de casing oplopen tot boven 700 bar, veel hoger dan bij conventioneel hydraulic fracturing (3). Schaliegasproductie gerelateerde aardbevingen zijn echter vooral gerelateerd aan de injectie in diepe aquifers van het bij schaliegasproductie vrijkomende afvalwater (29).

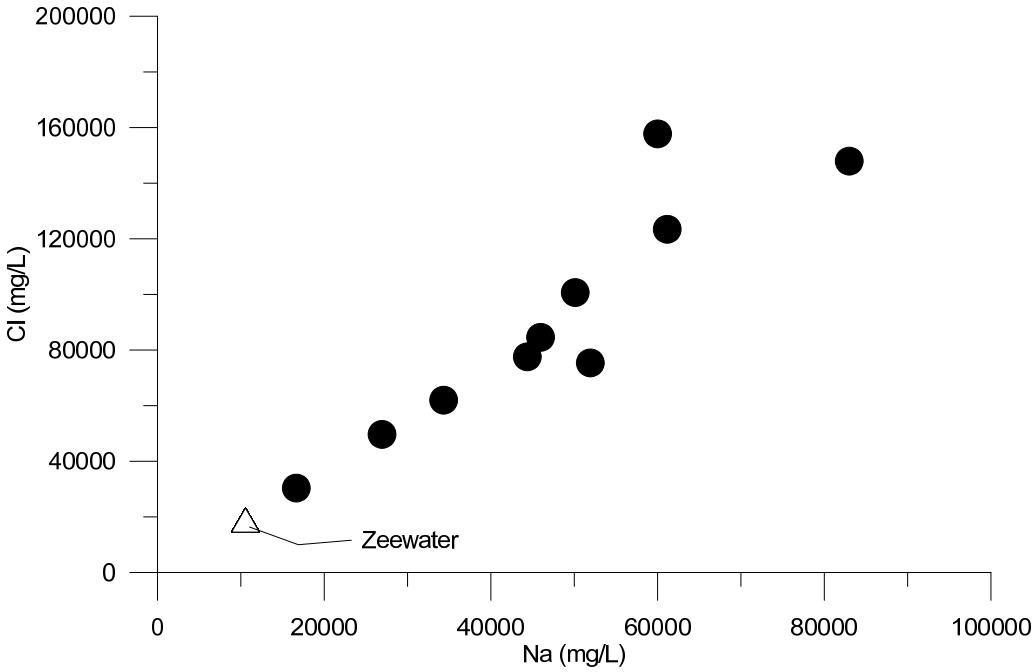
3.2 Chemische stimulatie

Een andere manier om de doorlatendheid van gesteentes te verhogen is chemische stimulatie (28), ook wel “soft stimulation” genoemd. Chemische stimulatie wordt in de olie- en gasindustrie al vele jaren toegepast. Het principe van chemische stimulatie berust op het oplossen van bepaalde in het gesteente aanwezige mineralen. In de praktijk gaat het hierbij voornamelijk om silica en carbonaten. Bij al redelijk doorlatende gesteentes wordt onder iets hogere druk dan die in de formatie heerst, vloeistof in het reservoir gepompt. Hierdoor ontstaan rond de put scheurtjes in het gesteente. Door vervolgens een zuur in de ontstane scheurtjes te pompen lossen delen van het gesteente op. Door de heterogeniteit van de gesteentes lossen bepaalde delen sneller op dan andere. Hierdoor blijven de ontstane ruimtes bij het terugpompen van het zuur open staan. De meest gebruikte zuren zijn: zoutzuur (HCl) voor het oplossen van carbonaten en waterstoffluoride (HF) voor het oplossen

van silicaten. Naast zuren worden ook complexvormers toegepast. Het gaat hierbij om complexvormers van de EDTA familie (EDTA, HETA, NTA, HEIDA). In vloeistoffen worden maximaal enkele tientallen procenten zoutzuur en enkele procenten waterstoffluoride toegevoegd. Bij lage zuurconcentraties (> 63% water) is het noodzakelijk om tegen corrosie beschermende stoffen toe te voegen. Bij zuurbehandelingen is ijzercontrole altijd noodzakelijk om neerslagen van ijzer te voorkomen (30). Voordeel van chemische stimulatie is het seismisch milde karakter; er ontstaat geen extra seismiciteit als gevolg van de behandeling. Een nadeel zijn de risico's die optreden bij vervoer en verwerking van de chemicaliën, zoals beschreven voor de afvoer van boorspoeling (paragraaf 2.2).

4 Lekkage van formatiewater

De samenstelling van het formatiewater dat bij geothermie van grote diepte omhoog wordt gepompt zorgt voor een belangrijk risico voor grondwater. Dit formatiewater is gewoonlijk zeer zout; het zoutgehalte bedraagt in de regel één tot meerdere malen het zoutgehalte van zeewater (1, 3). Naast hoge concentraties chloride en natrium, die voornamelijk het zoutgehalte bepalen, zijn ook de concentraties van andere elementen relatief hoog. Allereerst wordt hier kort de samenstelling van geproduceerd formatiewater van geothermiesystemen in Nederland geïllustreerd. Vervolgens wordt in gegaan op de factoren die de kans op lekkage beïnvloeden.



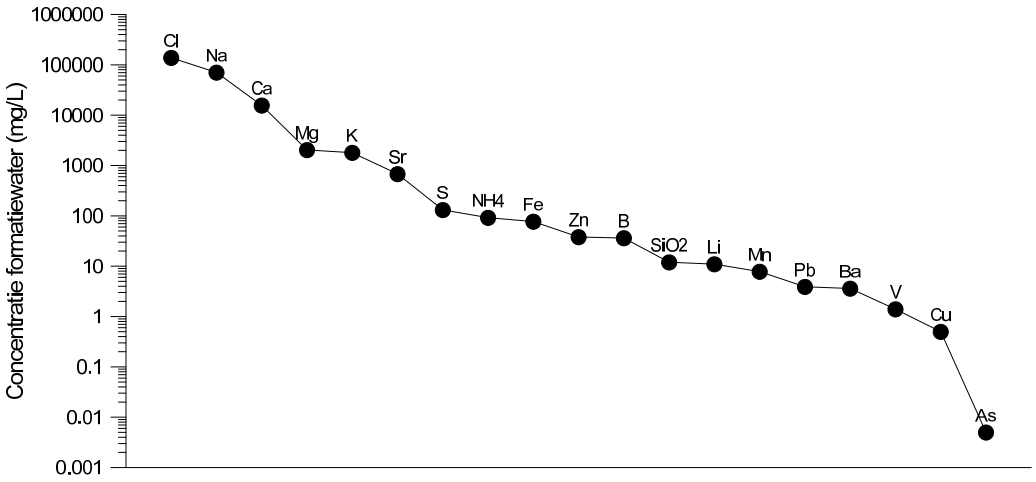
FIGUUR 4.1: CONCENTRATIES AAN OPGELOST NATRIUM EN CHLORIDE IN VERSCHILLENDE NEDERLANDSE GEOTHERMIE SYSTEMEN. TER REFERENTIE IS DE SAMENSTELLING VAN ZEEWATER AANGEGEVEN. BEWERKT FIGUUR UIT EN MET DATA UIT HET ONDERZOEK VAN (1).

4.1 Samenstelling formatiewater

Het formatiewater in de Nederlandse reservoirs waaruit geothermische warmte wordt gewonnen is gewoonlijk zeer zout (Figuur 4.1). Dit zoutgehalte wordt voornamelijk bepaald door hoge concentraties chloride en natrium.

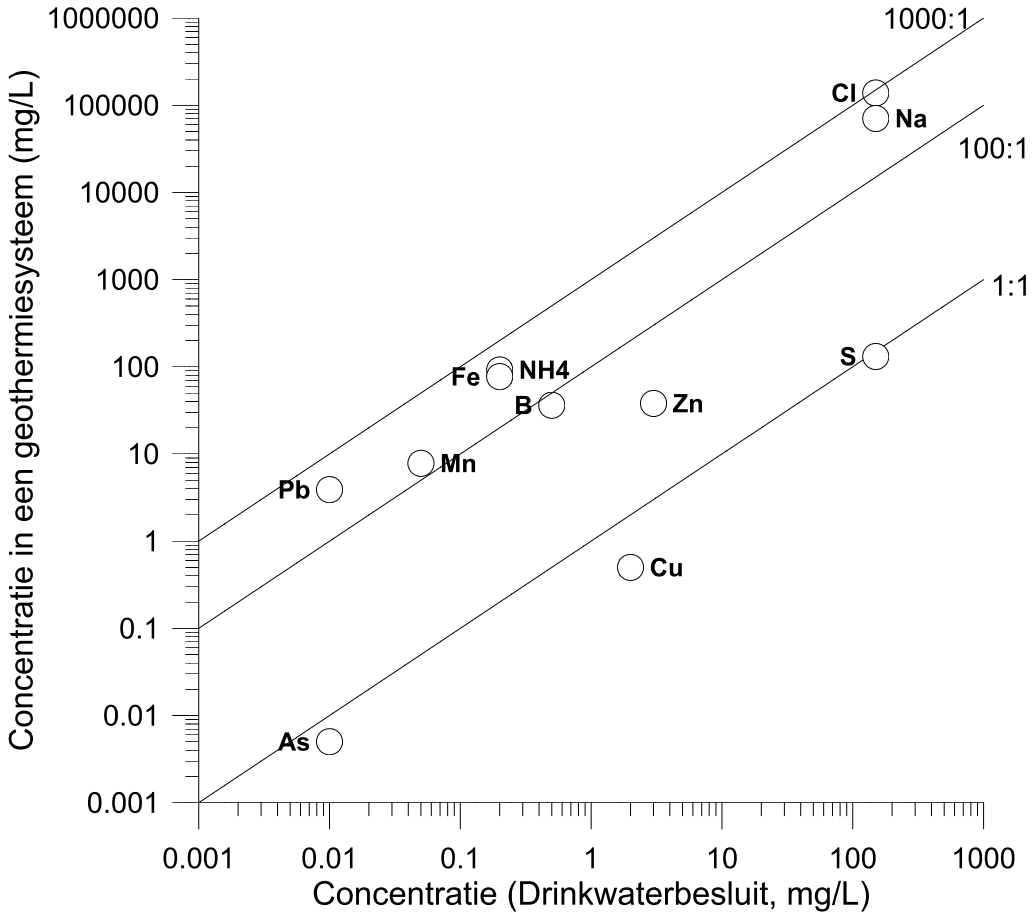
Doordat in een geothermiesysteem continu grote hoeveelheden (~100-200 m^3/uur) zout formatiewater worden verpompt is hierdoor de indringing van zeer zout water bij lekkage een intrinsiek risico. Door het continue met hoge debieten rondpompen van zout formatiewater gedurende een lange levensduur (~20-30 jaar) is het op een bepaald moment optreden van lekkage van het zeer zoute formatiewater een reëel risico, zoals recentelijk ook

is gebleken voor putten bij zoutwinning (31). Ter illustratie, uitgaande een chloride gehalte van 150000 mg/L van formatiewater (ongeveer het maximum in Figuur 4.1), kan de menging van 1 m^3 formatiewater met zoet grondwater leiden tot overschrijding van de drinkwaternorm in 1000 m3 grondwater, uitgaande van een norm voor chloride van 150 mg/L.



FIGUUR 4.2: VOORBEELD VAN CONCENTRATIES IN GEPRODUCEERDE WATER IN EEN GEOTHERMIESYSTEEM IN NEDERLAND. DE COMPONENTEN MET CONCENTRATIES BOVEN HUN DETECTIELIMIETEN ZIJN LANGS DE X-AX GESORTEERD IN AFNEMENDE CONCENTRATIE IN MG/L.

Zowel het zoutgehalte door natrium en chloride als de concentraties aan andere elementen verschillen sterk per geothermisch systeem, maar velen zijn relatief hoog ten opzichte van natuurlijk ondiep zoet grondwater. Zo is in (Figuur 4.2) een voorbeeld van de samenstelling van het geproduceerde water in een Nederlands geothermiesysteem met 145 g/L zoutgehalte ruim vier keer zouter dan zeewater. Naast de hoge concentraties van chloride en natrium, zijn ook die van andere componenten, zoals barium (Ba), relatief hoog ten opzichte van gebruikelijk waargenomen in ondiep Nederlands grondwater. Veel van deze componenten zijn niet opgenomen in het Drinkwaterbesluit. Van de geanalyseerde anorganische componenten die zijn opgenomen in het Drinkwaterbesluit, zijn vooral chloride (Cl) en natrium (Na) in dit voorbeeld relatief hoog, tot 1000 keer de in het besluit gestelde maximum waarden (Figuur 4.3). Daarnaast zijn de componenten lood (Pb), boor (B), mangaan (Mn), IJzer (Fe) en ammonium (NH4) meer dan 100x hoger dan de drinkwaternorm.



FIGUUR 4.3: CONCENTRATIES AAN ANORGANISCHE COMPONENTEN IN EEN GEOTHERMIESYSTEEM IN NEDERLAND (FIGUUR 4.2) TEN OPZICHTE VAN MAXIMUM WAARDEN VOOR ZOVER OPGENOMEN IN HET DRINKWATERBESLUIT.

4.1.1 Aanwezigheid olie en gas

Geothermisch formatiewater in Nederland bevat gewoonlijk significante hoeveelheden gas en kan olie bevatten. Het grootste deel van het aanwezige gas bestaat uit methaan (Figuur 4.4). Bij ondergrondse lekkage uit een put tijdens exploitatie zullen dus naast verhoogde zoutconcentraties ook verhoogde methaangehalten verwacht kunnen worden. Als na het verlaten van putten geothermisch formatiewater niet langer actief omhoog gepompt wordt is het gezien de hoge dichtheid van het formatiewater onwaarschijnlijk dat deze nog tot verontreiniging van ondiepe grondwater kan leiden. Wel kan er mogelijk nog methaan omhoog migreren bij gebrekkige putintegriteit en -afdichting.

Zoals eerder aan gegeven komen in Nederland de formaties met geothermische potentie deels overeen met de lagen waar, nu of in het verleden, zich ook winbare olie- en of gasvoorkomens bevinden. Afhankelijk van de hydrostatische druk en diepte waarop in Nederland geothermisch water gewonnen wordt, kunnen in de Nederlandse situatie forse hoeveelheden opgelost gas meekomen (1). Gasproductie in Nederlandse geothermiesystemen vindt primair plaats door ontgassing (1), niet door het omhoogkomen van vrij gas (8). Methaan vormt de grootste fractie van de opgeloste gassen in het formatiewater. Door de hydrostatische drukverlaging die optreedt bij het omhoog pompen van het formatiewater treedt er ontgassing op, van vooral methaan. Het bij de productie vrijkomende methaan moet worden afgevangen middels een ontgasser en afgefakkeld

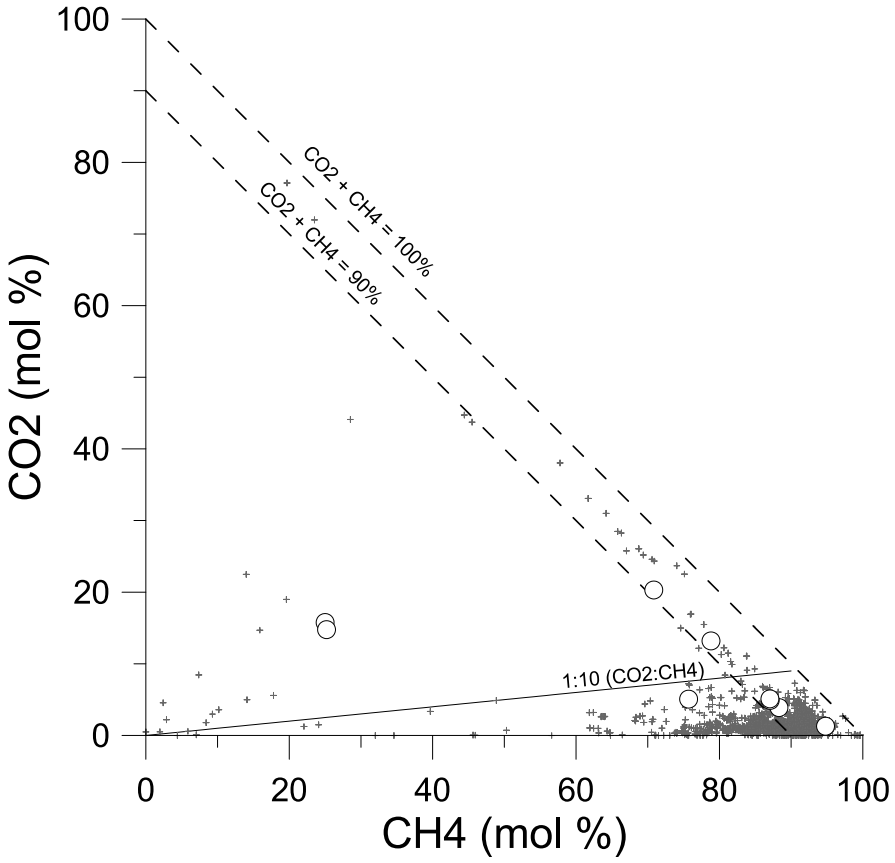
(Figuur 2.1). Volgens het besluit algemene milieuregels Mijnbouw moet de installatie minimaal 99% van het meegekomen methaangas verbranden. (8). Als de hoeveelheden methaan in het formatiewater tijdens productie voldoende groot is, kan dit worden benut voor extra verwarming. Dit wordt bij enkele Nederlandse geothermiesystemen reeds toegepast. Informatie over de geproduceerde hoeveelheden ontbreekt, maar in sommige geothermische systemen in Nederland is ook de bijvangst van olie bekend. Deze kan middels een oliescheider worden geïsoleerd en moet vervolgens worden afgevoerd volgens BARMM (zie paragraaf 2.2).

4.1.2 Gassamenstelling

Zoals aangegeven bestaat het grootste deel van het gas in formatiewater uit methaan (CH_4). Daarnaast varieert het aandeel CO_2 van enkele procenten tot enkele tientallen procenten (Figuur 4.4) tot nog hoger (2). Het CO_2 aandeel in het gas uit Nederlandse geothermiesystemen lijkt daarmee in het algemeen verhoogd ten opzichte van de samenstelling van het vrij gas dat wordt onttrokken uit deels dezelfde formaties tijdens olie- en gaswinning. Dit vergroot het corrosierisico van geothermieputten ten opzichte van gas putten (2).

Van belang voor de corrosiegevoeligheid (4.3.2) is de totale CO_2 concentratie (of partiële gasdruk). Deze wordt bepaald door de relatieve samenstelling en de totale gasdruk. Voor Nederlandse geothermiesystemen ontbreekt echter helaas een goed overzicht van totale gasdrukken (*bubble point pressures*), mede doordat in meerdere systemen de ontgassing reeds in de productieput optreedt. Echter, rekening houdend met de diepte waarop Nederlandse systemen thans opereren, zijn op basis van hydrostatische condities in principe gasdrukken tot enkele honderden bars mogelijk. Als de range van CO_2-fracties in Nederlandse geothermiesystemen (bv. (1, 2)) wordt vergeleken met de wel bekende totale gasdrukken voor ondermeer *bottom-hole* monsters, dan lijkt de waarschijnlijke range van partiële CO_2-gasdrukken in Nederlandse geothermiesystemen zich van enkele tot wellicht tientallen bars uit te strekken. Dit wordt beeld wordt bevestigd door modelberekeningen (2).

Naast CO_2 is ook H_2S een corrosief gas, maar vooralsnog blijkt dit gas in de Nederlandse geothermiereservoirs geen rol te spelen (1, 2). Wel moet de eventuele aanwezigheid van H_2S voor toekomstige geothermiesystemen een aandachtspunt blijven (2, 32). Des te meer als nu nog niet voor geothermie aangeboorde formaties in productie genomen gaan worden. Zo is het bekend dat hoge H_2S concentraties in Nederland voorkomen in Zechstein afzettingen en dan in het bijzonder de zogenaamde stink schalies of stinkkalk (ZEZ2C) (33).



FIGUUR 4.4: DE MOLFRACTIES AAN CO_2 UITGEZET TEGEN METHAAN (CH_4) VAN GEOTHERMIESYSTEMEN IN NEDERLANDS (OPEN CIRKELS) UIT VERSCHILLENDE ONDERZOEKEN, WAARONDER (1). TER VERGELIJKING ZIJN DE GEMETEN FRACTIES IN GAS IN NEDERLANDSE OLIE- EN GASPUTTEN (GRIJZE PLUSJES, BRON:NLOG.NL) WEERGEGEVEN.

4.2 Putontwikkeling en -regeneratie

Het risico op lekkages en vervuiling van grondwater vanaf maaiveld is verhoogd vooral tijdens het ontwikkelen en regenereren van de put, waarbij formatiewater wordt afgevoerd of opgeslagen buiten het met vloeistofdichte vloeren uitgeruste gebied. Voor transport van deze vloeistoffen wordt gebruik gemaakt van onder meer gecompartimenteerde tankwagens. Net zoals beschreven voor boorspoeling is de wetgeving ten aanzien van wegtransport van (gevaarlijke)stoffen vastgelegd in de Wvgs (Wet vervoer gevaarlijke stoffen), het Bvgs (Besluit vervoer gevaarlijke stoffen), de Vlg (Regeling vervoer over land van gevaarlijke stoffen) en de ADR (Accord Européen relatif transport de marchandises Dangereuzes par Route).

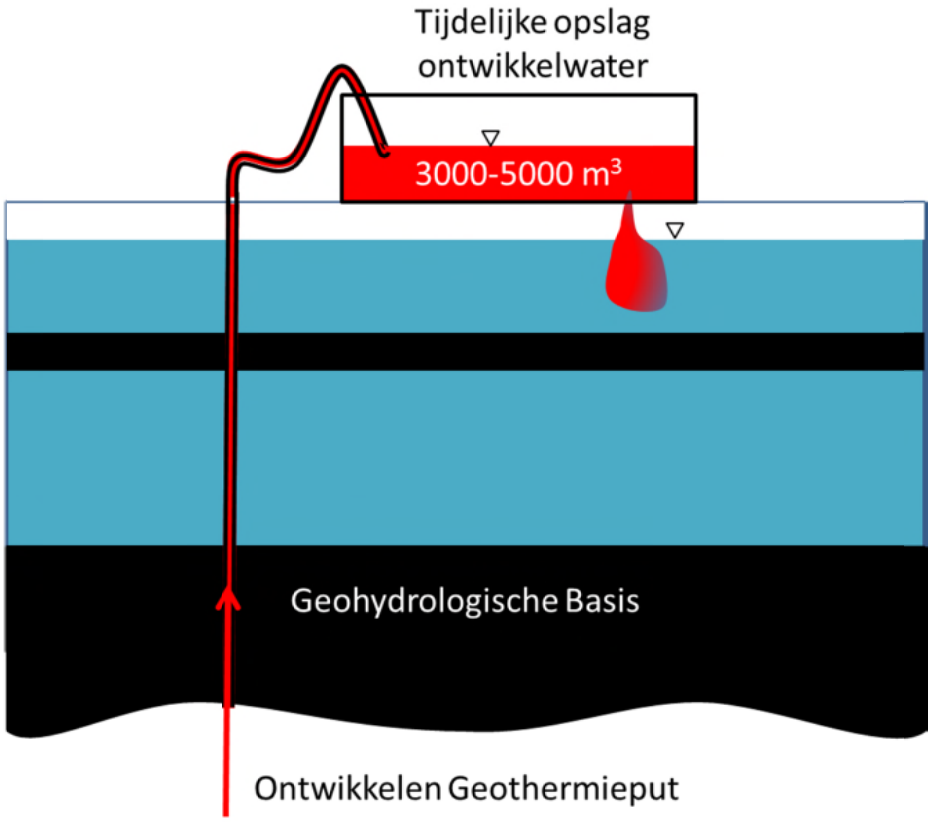
Achtergebleven resten boorspoeling en fijne deeltjes die uit de doorboorde formaties loskomen zorgen voor verstopping van de boorgatwand in het filtertraject. Na het plaatsen van het filter moet de boorgatwand dan ook schoon gemaakt worden (ontwikkelen). Door het gebruik van zware boorspoeling bij het boren van geothermieputten (paragraaf 2.2) is bij putontwikkeling een intensievere behandeling noodzakelijk dan bij drinkwater en WKO-putten.



FIGUUR 4.5: VOORBEELD VAN EEN FOLIEBASIN VOOR DE TIJDELIJKE OPSLAG VAN ONTWIKKELWATER TIJDENS DE REALISATIE VAN EEN RECENT GEOTHERMIESYSTEEM IN NEDERLAND

Het ‘ontwikkelen’ bestaat bij geothermieputten uit schoonpompen, het toevoegen van dispergeermiddelen (polyacrylamides, polyfosfaten) bij kleigebaseerde boorspoelingen of oxidatoren bij polymeerspoelingen, en het vervolgens jutteren en schoonpompen van de put. Het ontwikkelen kan enkele weken duren waarbij grote hoeveelheden formatiewater vrijkomen, ~3000-5000 m^3 per put. Tijdens de aanleg van de productie- en injectieput wordt het vrijkomende formatiewater gewoonlijk tijdelijk opgeslagen in foliebassins (Figuur 4.5). Hierbij kunnen zowel morsingen als lekkages uit de opslag plaatsvinden (Figuur 4.6). Nadat de putten zijn aangelegd kan het water na behandeling (verwijdering zwevende delen) worden geïnjecteerd in de injectieput van het geothermische systeem. Een belangrijk risico hierbij echter is dat neerslagen ontstaan door contact met zuurstof, waardoor verstopping van de injectieput kan optreden. Ter bescherming van de gerealiseerde putten wordt daarom gewoonlijk gezocht naar een manier om het water te lozen. Lozen van dit water op kleine en zoete oppervlaktewaterlichamen of riolering is gezien het zoutgehalte en andere in het water aanwezige stoffen echter niet mogelijk. Ook gecontroleerd lozen in een ondiep watervoerend pakket is vanuit milieuoogpunt (kaderrichtlijn water) niet mogelijk (het lozingswater is veel zouter en warmer dan ‘ondiep’ grondwater). Onder verdunning lozen op een nabij gelegen grote rivier kan worden toegestaan op basis van een vergunning 'lozing buiten inrichting' van Rijkswaterstaat. Door de hoge mate van verdunning die optreedt bij de relatief hoge afvoerdebieten in grote rivieren (bv. >1000 m3/seconde) lijken de consequenties van een enkele lozing voor benedenstrooms gelegen oppervlaktewaterwinningen gering. Het is echter gewenst dat bij eventuele vergunningen goed rekening wordt gehouden met benedenstroomse drinkwaterfuncties van het oppervlaktewater en dat in de lozingseisen daarmee rekening wordt gehouden. Het transport van vrijkomend formatiewater kan plaatsvinden per vrachtwagen wat gezien het transportvolume van 30m^3 vraagt om 100 vrachtwagens voor 3000 m^3, of per pijplijn. Eventueel kan dit transport ook naar een effluent gemaal aan zee gebeuren. Deze laatste mogelijkheid is gebruikt bij geothermiesystemen in het westen van het land. Afhankelijk van de wijze waarop het in de aanlegfase geproduceerde water wordt verwerkt kunnen verschillende risico’s voor grondwater ontstaan (bv. lekkages tijdens transport).

In de afgelopen jaren zijn meerdere voorbeelden bekend van vrijkomen van formatiewater en boorspoeling bij aanleg en ontwikkelen van geothermiesystemen. Zo is in 2009 via een overstort bij een productietest vrijkomend formatiewater geloosd naar het oppervlaktesysteem. Hierdoor raakte het oppervlaktewater sterk verontreinigd met (vooral) zouten, andere functies konden hierdoor geen water inlaten en het Hoogheemraadschap van Delfland moest extra water inlaten voor doorspoelen van het watersysteem (3). Vanwege signalering van ongewenste situaties bij de opslag en afvoer van vrijkomend formatiewater is recent besloten dat SodM hiervoor zal optreden als bevoegd gezag . Voor de opslag en afvoer van vrijkomend formatiewater is een aparte melding in het kader van het Besluit algemene regels milieu mijnbouw (Barmm) nodig (34). Verder is SodM van mening dat de hiervoor geldende Nederlandse Richtlijn Bodembescherming (NRB) hiervoor aanvullling behoeft, bijvoorbeeld wat betreft kwaliteitseisen van gebruikte materialen en gebruik- en werkwijze.

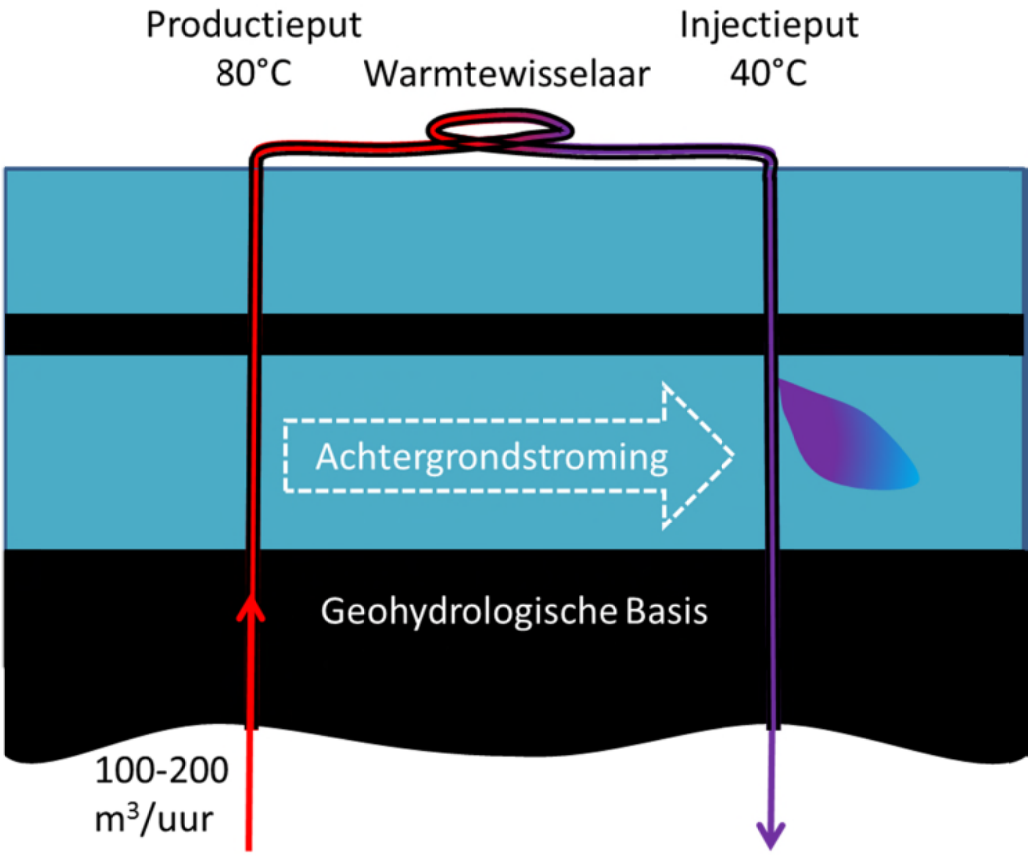


FIGUUR 4.6: SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN TIJDELIJKE OPSLAG VAN WATER DAT VRIJKOMT TIJDENS HET ONTWIKKELEN VAN EEN GEOTHERMIEPUT. TER ILLUSTRATIE VAN HET RISICO VAN VERONTREINIGING VANAF MAAIVELD IS EEN LEKKAGE VANUIT DE OPSLAG ALS VOORBEELD WEERGEGEVEN.

4.3 Lekkage uit putten

Tijdens exploitatie worden grote hoeveelheden formatiewater door het geothermiesysteem gepompt (100-200m3/uur, Figuur 4.7), waarbij het formatiewater op boven-atmosferische drukken (>~4 atm) wordt gehouden. Hierdoor is er in elk deel van de installatie een intrinsieke kans op lekkage. Zo werd er in 2010 bij een geothermieput een lekke afsluiter geconstateerd waardoor formatiewater weglekte in de boorkelder waarna dit water werd weggepompt met een dompelpomp naar het riool. Omdat de kans op lekkages aan maaiveld tijdens productie dus reëel is, worden in Nederland onder meer omvangrijke

bodembeschermende voorzieningen, zoals vloeistofdichte vloeren voorgeschreven. Door menselijk en/of technisch falen kan de bescherming door deze risico-beperkende maatregelen echter verminderd of te niet gedaan worden.



FIGUUR 4.7 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HET OPTREDEN VAN LEKKAGE VAN GEOTHERMISCH FORMATIEWATER VANUIT EEN GEOTHERMIEPUT NAAR HET OMRINGENDE GRONDWATER EN VERSPREIDING MET GRONDWATER IN DE RICHTING VAN EEN HEERSENDE ACHTERGRONDSTROMING. TER ILLUSTRATIE IS EEN WILLEKEURIGE POSITIE OP DE INJECTIEPUT ALS VOORBEELD GENOMEN.

Tijdens exploitatie is het hoogste risico op lekkages naar grondwater in het ondergrondse deel van het geothermiesysteem, onder de vloeistofdichte voorzieningen aan maaiveld. In principe is het risico voor lekkage naar grondwater vanuit de productieput tijdens exploitatie laag, aangezien er door de afpomping een overdruk vanuit het omringende grondwater ten opzichte van de put heerst. Hoewel er in de *production tubing* boven de *ESP* pomp (Figuur 4.8) gewoonlijk een overdruk ten opzichte van de hydrostatische druk van ondiep grondwater heerst, zal lekkage uit die tubing naar de casing toe plaatsvinden niet naar het grondwater. Wel kan er bij perioden van stilstand vanuit een aangetaste productieput lekkage naar grondwater plaatsvinden. Hoewel bij de injectieput de temperatuur en de CO2-spanning (na ontgassing) tot een minder hoge corrosierisico's leidt (paragraaf 4.3.2) verdient de injectiekant wat betreft de lekkagerisico's extra aandacht. Lekkage van formatiewater uit een put kan daarbij over de gehele diepte vanaf maaiveld plaatsvinden. Dit komt doordat de injectie gepaard gaat met extra overdruk om het afgekoelde formatiewater te injecteren. Daarnaast heeft vanuit operationeel oogpunt vooral het realliseren van voldoende injectiviteit

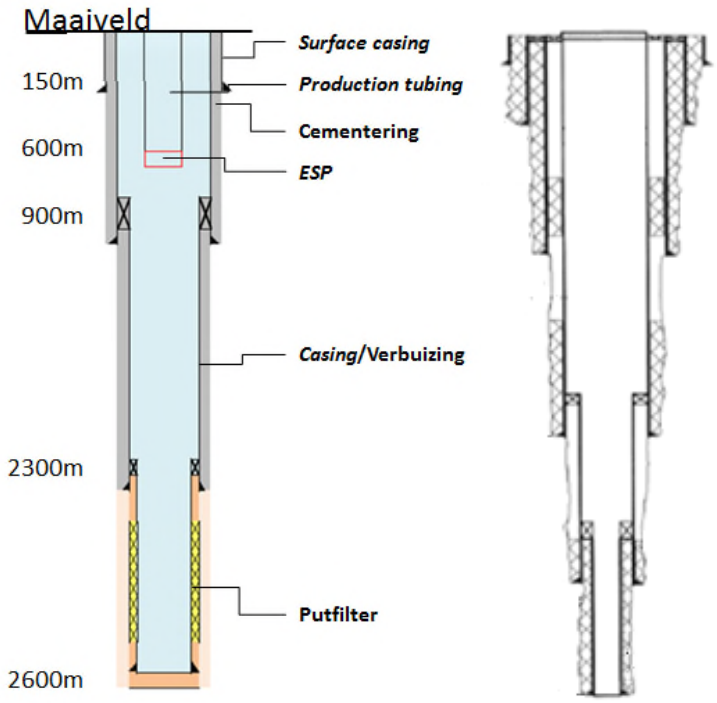
(1), of te wel zo makkelijk mogelijk het afgekoelde formatiewater kunnen injecteren, de aandacht. Het verhogen van de druk om voldoende het formatiewater te kunnen injecteren door bijvoorbeeld afnemende injectiviteit door het neerslaan van carbonaatmineralen (1) heeft daarmee een negatieve impact op het eventueel optreden van lekkages. Door een hoger drukverschil met de omringende grondwaterpakketten kan bij lekkage de impact op het grondwater worden versterkt door het optreden van grotere verliezen (Figuur 4.7).

Ook in de praktijk zijn de risico's bij injectieputten al gebleken. Zo is bij een geothermiesysteem in Landau in Duitsland in 2014 grondwater verontreinigd geraakt met formatiewater door de lekkage 3m onder maaiveld bij de wellhead van de injectieput (tiefegeothermie.de, 2015). Daarnaast is vanuit de olie- en gasindustrie bekend dat de injectie van het zoute afvalwater gepaard gaat met corrosie en falende putintegriteit (3). Daarbij is goede regelgeving ten aanzien van putconstructie en controle, geen garantie voor goed geconstrueerde putten, omdat menselijk falen en falende techniek niet kunnen worden uitgesloten (35). Of bij injecterende geothermieputten vergelijkbare problemen te verwachten zijn als bij (water)injecterende putten in de olie-en gas industrie is niet duidelijk. Een belangrijk verschil bleek de aanwezigheid zuurstof in de waterinjecterende putten, wat grote corrosie risico's meebrengt. Een geothermiesysteem is tijdens exploitatie gesloten van de atmosfeer en wordt onder druk gehouden, waardoor de kans op zuurstoftoetreding vele malen kleiner is. Daartegenover staat dat een groot deel van de integriteitsproblemen bij de genoemde waterinjecterende putten samenhing met aantasting van de tubing in de put en de putkop, en nog niet met de verschillende beschermende casings en cementeringen rond de put. In geothermische productieputten gaat deze tubing echter niet over de volledige lengte van de put en wordt met een onderwaterpomp (*ESP*) gewerkt (Figuur 4.8). Doordat de binnenkant van de casing hierdoor in direct contact met formatiewater staat leidt dit tot aantasting van niet-bestendige casing (paragraaf 4.3.2).

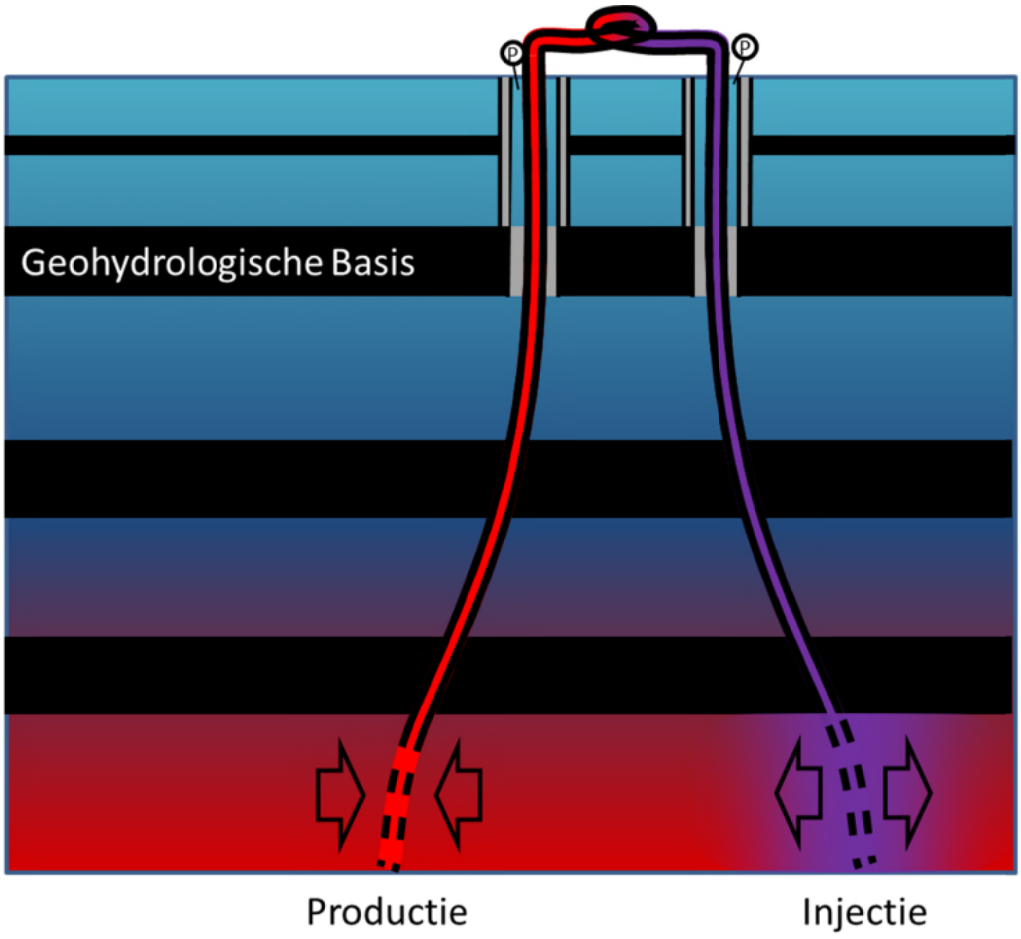
Vanwege de verhoogde drukken en grote debieten kan aan de hand van de productiegegevens alleen het optreden van instantane grotere lekkages goed worden gedetecteerd. Een stuk lastiger is het om kleinere lekkages te registreren, omdat deze weinig effect hebben op de gemeten debieten en drukken. Lekkages die kleinschalig plaatsvinden en qua lekvolumes relatief klein zijn ten opzichte van het gehanteerde geothermische debiet hebben een grote kans niet gedetecteerd te worden. Deze lekkages kunnen echter op langere termijn tot relatief grote totale lekverliezen leiden.

4.3.1 Putconstructie

Ter voorkoming van ongecontroleerd vrijkomen van olie, gas en formatiewater is het noodzakelijk veel zorg te besteden aan de constructie van deze putten. In tegenstelling tot de in de olie- en gas industrie gebruikelijk meerwandige putconstructies tot op grote diepte, worden vooralsnog bij Nederlandse geothermiesystemen grotendeels enkelwandige putconstructies gebruikt (Figuur 4.8). Het gebrek aan meerwandigheid van putconstructies bij geothermiesystemen verhoogt het risico op lekkage naar grondwater en vermindert tevens de mogelijkheden voor lekkage detectie zoals annulaire drukmonitoring. Bij deze monitoringstechniek wordt in de annulaire ruimte tussen de casings onderling en tussen de buitenste casings en de (deels) met cement gevulde boorgatwand druk gemeten. Annulaire drukmonitoring kan hierdoor bijdragen aan het registreren van lekkage voordat de lekkage voortgaat tot buiten de buitenste wand en een grondwaterverontreiniging veroorzaakt. Voor het detecteren van lekkage naar het grondwater is grondwatermonitoring nabij de put, in bijzonder bij enkelwandige putconstructies, noodzakelijk (Hoofdstuk 7). Ook omdat annulaire drukmonitoring niet de aard en omvang van lekkages kan detecteren (36).



FIGUUR 4.8: LINKS: VOORBEELD VAN OPBOUW VAN EEN GROTENDEELS ENKELWANDIGE GEOTHERMIEPUT IN NEDERLAND (LINKS) MET GEBRUIKTE BENAMINGEN VOOR PUTONDERDELEN (*ESP: ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMP*). INDICATIEVE DIEPTEN BENEDEN MAAIVELD STAAN AANGEGEVEN. RECHTS: TER VERGELIJKING EEN VOORBEELD VAN DE TOT OP GROTE DIEPTE MEERWANDIGE CONSTRUCTIE VAN EEN GAS PUT IN NEDERLAND



FIGUUR 4.9: SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN MEERWANDIGE PUTTEN TOT IN DE GEOHYDROLOGISCHE BASIS TER BESCHERMING VAN BOVENLIGGENDE GRONDWATERPAKKETTEN. DE MEERWANDIGHEID BIEDT OOK DE MOGELIJKHEID VOOR ANNULAIRE DRUKMETINGEN (P) VOOR LEKDETECTIE.

4.3.2 Gebruikte materialen en corrosie

Het risico's op lekkage vanuit de putten (productie en injectieput) is in hoofdzaak te wijten aan corrosie van de verbuizing (casing). Corrosie kan op twee manieren resulteren in lekkage naar omliggende grondwaterpakketten:

1 Vorming van openingen in de stalen casing
2 Verzwakking van de casing, waardoor deze kan bezwijken.

Bij geothermiesystemen is het optreden van putcorrosie door de interactie van zout formatiewater met verschillende putonderdelen een bekend verschijnsel (37-43). De mate waarin deze corrosie optreedt, is sterk afhankelijk van de samenstelling en temperatuur van het formatiewater, de in de put gebruikte materialen en de eventueel toegepaste dosering van "corrosion inhibitors". Ter minimalisatie van de risico's door het gebruik van waterbehandelingsmiddelen zoals corrosie en scaling "*inhibitors*" is het van belang te letten op een doelmatig (minimaal) gebruik ervan. Daarnaast moet voor de beschouwing van de mogelijke risico's voor ondiep grondwater bij de selectie van het middel (en de wijze van toediening) gelet worden op mogelijke negatieve kwaliteitseffecten van de middelen. Het

gebruik van corrosie en scaling "*inhibitors"* wordt ook voor Nederlandse geothermiesystemen voorzien (44). Het is echter nog onbekend welke typen gebruikt (zullen) worden en in welke mate, als ook wat daar de effectiviteit van zal zijn. Daarom is ter vermindering van het risico op grondwaterkwaliteit het van belang het optreden van corrosie zoveel mogelijk te voorkomen, zonder deze te onderdrukken met inhibitors.

Corrosie kan op veel manieren plaatsvinden, deze drie algemene vormen worden wel onderscheiden:

- algemene of uniforme corrosie (waaronder galvanische corrosie): dit is een gradueel proces, waarbij de dikte van het staal afneemt in de tijd;
- lokale corrosie (waaronder 'pitting' en spleetcorrosie): pitting begint vaak als een microscopisch klein gaatje, maar kan binnen relatief korte tijd diep in het metaal doorzetten. Spleetcorrosie is vergelijkbaar met pitting maar vind plaats op spleetvormige oppervlakken zoals koppelingen of flenzen tussen casings en is in de regel minder diep dan 'pitting';
- (mechanische) erosie corrosie: dit treedt op als het gevolg van hoge stroming en dan met name in bochten, connecties of ander obstructies.

Met toenemende corrosiebestendigheid van de gebruikte staalsoorten nemen alle vormen van corrosie af, en in het bijzonder algemene corrosie (2).

Er is op dit moment geen duidelijke norm opgelegd vanuit de toezichthouder (SodM) voor de materiaalkeuze van casings voor geothermische doubletten. Het komt er in de praktijk op neer dat voor geothermische installaties vergelijkbare stalen casings worden gekozen zoals die ook bij de olie- en gasproductie worden gebruikt (45). Het gaat hierbij gewoonlijk om lage kwaliteit koolstofstaalsoorten (*carbon steel, mild steel* gebruikt (2), vaak L80-1 voor de casings en een minder sterke, milde staalsoort zoals K55 voor de *surface casing* (Figuur 4.8). Hierbij is de afweging uit bedrijfseconomisch oogpunt eerder gericht op het selecteren van een casingmateriaal dat waarschijnlijk voldoet voor de levensduur van het systeem, terwijl vanuit grondwaterbeschermingsoogpunt hogere zekerheid gewenst is.

Door het ontbreken van duidelijke richtlijnen is de staalkeuze uiteindelijk een afweging tussen investeringskosten en corrosiebestendigheid (2, 32). De keuze voor relatief gevoelige koolstofstaalsoorten voor de casings in Nederlandse geothermieputten is echter opvallend omdat in vergelijking met olie-en gas productie de corrosiedruk aanmerkelijk hoger is. Dit komt onder meer door het zeer zoute formatiewater dat wordt verpompt en de hogere CO_2-drukken (enkele tot tientallen bars, paragraaf 4.1.2). Op basis van deze condities zou de selectie van corrosiebestendiger staal, bijvoorbeeld met tenminste een 13% chroom gehalte (pCO_2>0,15 bar, pH_2S<0,1 bar) voor de hand liggen (Figuur 4.10). Investeerders (banken) herkennen dan ook corrosie als een van de belangrijkste risico's van het investeren in geothermie, niet zozeer vanuit een milieukundig, maar vanuit een kosten-technisch operationeel oogpunt (32). Juist door in de boor- en bouwfase in te zetten op optimale kwaliteit van materialen en uitvoering, kunnen risico's in de exploitatie worden afgedekt (46).

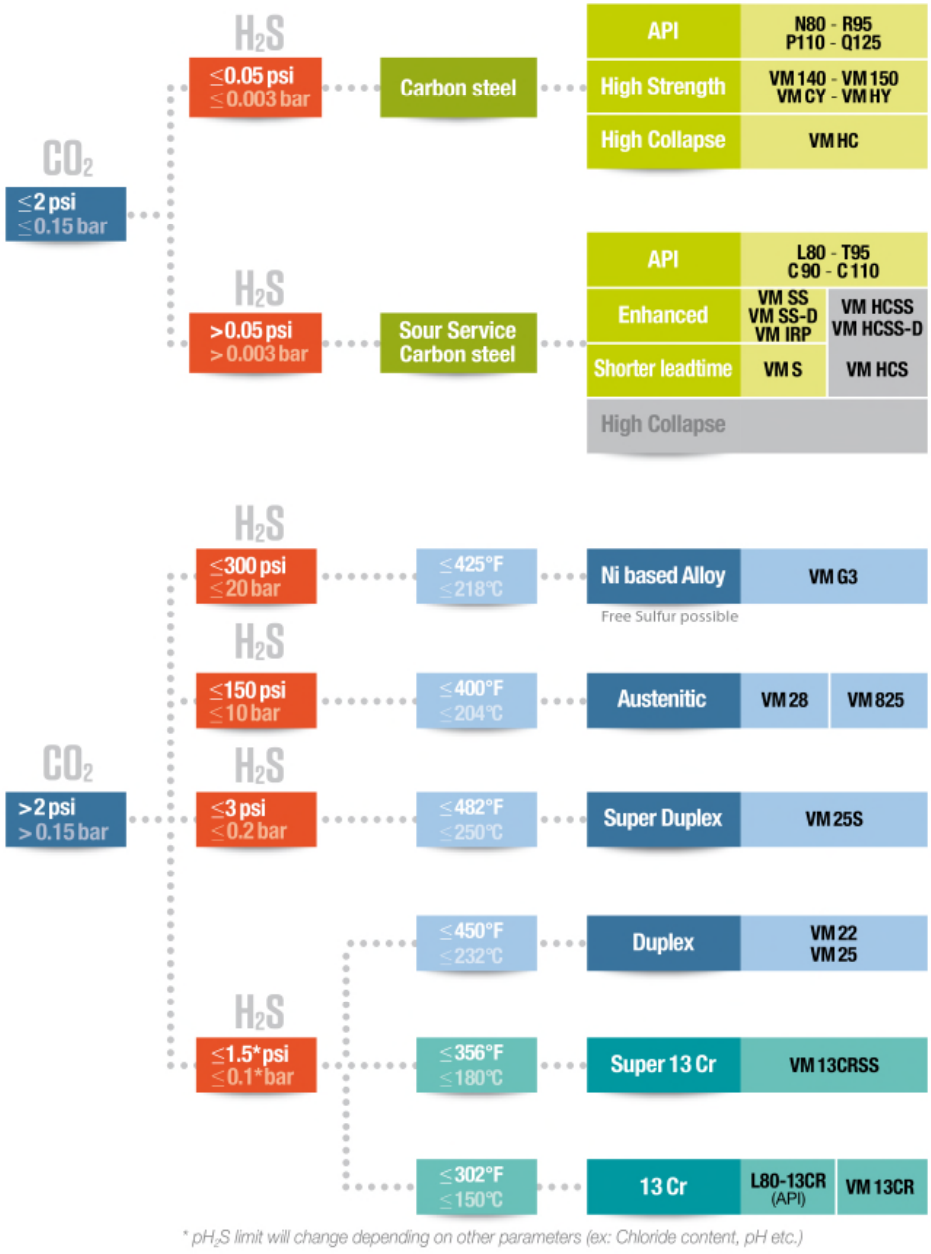
In tegenstelling tot geothermieputten worden voor waterinjectieputten in de Nederlandse olie-en gas industrie meestal wel duurdere en meer corrosiebestendiger staalsoorten zoals 16% Cr-staal voor de casings gebruikt. Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) geeft aan dat er weinig problemen zijn met deze putten (32).

Naast de algemeen optredende CO_2-corrosie, is het bekend dat er ook loodcorrosie kan plaatsvinden in sommige geothermiesystemen en dan in het bijzonder bij systemen in de

Slochteren formatie waarvan het bekend is dat het formatiewater een relatief hoge concentratie (radioactief) lood (47) bevat. Naast scaling heeft dat ook geleid verstopping van de injectieput (48). Deze scaling kan plaatsvinden door dat opgelost lood (en eventueel koper) kan leiden tot galvanische corrosie van de minder edele (koolstof)stalen casings.

Vanuit operationeel oogpunt heeft corrosiebestrijding dan ook de aandacht bij de huidige geothermiesystemen in Nederland. Bovengrondse erosie en corrosie kan tot lekkages en gegeven de hoge temperaturen en drukken waaronder het formatiewater wordt rondgepompt ook tot veiligheidsrisico's leiden . Daarnaast draagt de mobilisatie van geërodeerde corrosiedeeltjes samen met scalingproducten bij aan het vollopen van filterzakken en mogelijk injectiviteitsproblemen.

Terwijl voor toekomstige geothermiesystemen corrosiebestendiger putmaterialen geselecteerd kunnen worden, richt de aandacht zich bij de huidige systemen vooral op de bestrijding van corrosie (2). Hierbij wordt onder meer naar de rijke buitenlandse ervaring met corrosiemanagement gekeken, bijvoorbeeld in de toepassing van corrosion inhibitors en cathodische bescherming. De werking daarvan is echter niet eenduidig en sterk afhankelijk van de specifieke formatiewatersamenstelling. Daarbij verschillen de formatiewatercondities in Nederland zich op belangrijke aspecten van die in het buitenland (bv. hoge CO_2-spanning). De selectie en dosering van een geschikte inhibitor gebeurt daarom vooral op trial-and-error basis (2).

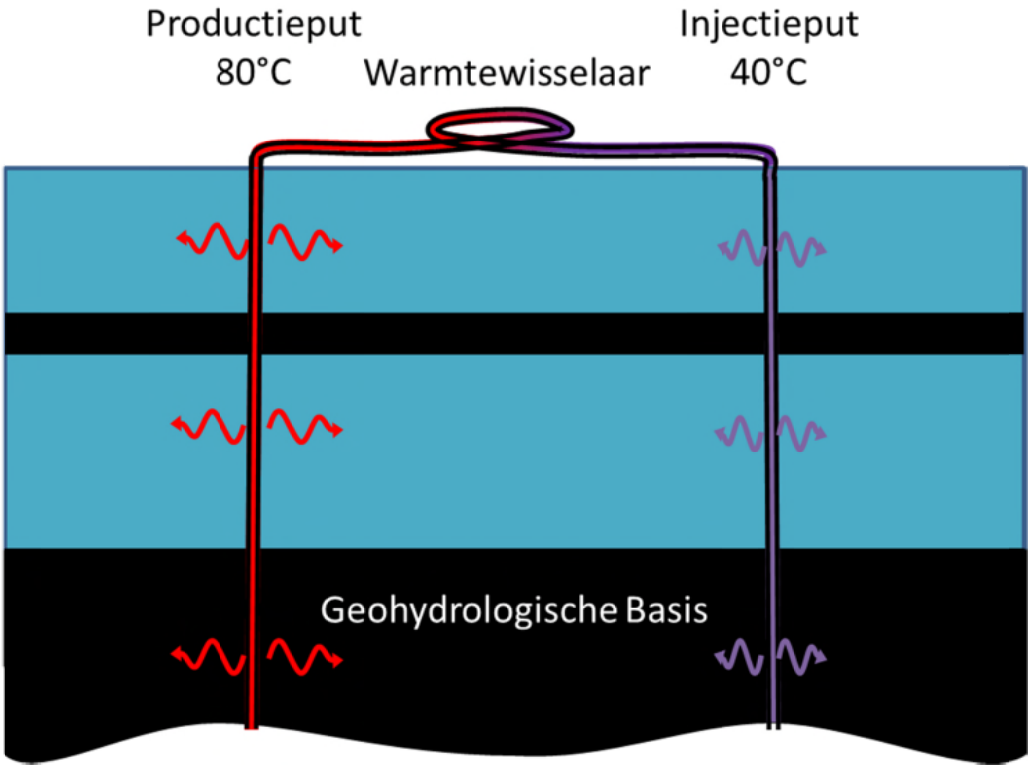


FIGUUR 4.10 VOORBEELD VAN EEN DIAGRAM VOOR STAALSELECTIE OP BASIS VAN CO_2- EN H_2S CONDITIES (BRON: WWW.VALLOUREC.COM). KOOLSTOFSTAALSOORTEN WAARONDER L80 VALLEN IN DE GROEPEN BOVENAAN WEERGEGEVEN IN GROEN.

5 Opwarming grondwater rond de put

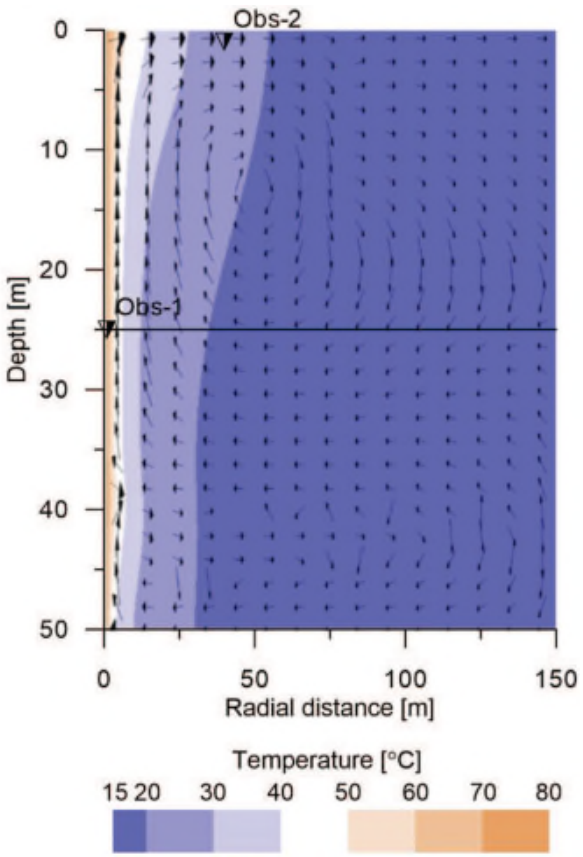
Bij geothermiesystemen wordt warm formatiewater van grote diepte naar maaiveld gepompt. De temperatuur van het onttrokken water is afhankelijk van de windiepte. In Nederland neemt de temperatuur van de ondergrond gemiddeld toe met een geothermische gradiënt van 31°C/km (Figuur 2.3). Het bestaan van een temperatuurverschil tussen het opgepompte formatiewater in een geothermische put en het omringende ondiepe grondwater daarbuiten is dus intrinsiek aan het bedrijven van geothermie. Aangezien het door het geothermiesysteem onttrokken formatiewater warmer is dan in de omringende ondiepere formaties en doordat de materialen die gebruikt worden voor de putconstructie warmtegeleidend zijn, treedt thermische conductie en warmte-uitstraling naar de omringende aquifer altijd op (Figuur 5.1). Te verwachten is dat de warmte-uitstraling bij geothermiesystemen voornamelijk op zal treden rond de productieput en in mindere mate voor de injectieput, aangezien de temperatuur van het geïnjecteerde water is verlaagd (~<50°) na de bovengrondse warmte-extractie. De warmte accumuleert in de omringende formaties, maar leidt, door de hoge debieten, gewoonlijk tot slechts een zeer kleine temperatuurafname (~<1°C) van het geproduceerde water ten opzichte van de reservoirtemperatuur.

Dat warmteverlies naar omringende aquifers optreedt is bekend, al zijn de effecten daarvan op grondwater in de praktijk nog niet vastgesteld. De mogelijke effecten van warmte-uitstraling worden daarom beschouwd op basis van de uitkomsten van recente modelstudies (49, 50)



FIGUUR 5.1: SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE WARMTEUITSTRALING NAAR OMLIGGENDE PAKKETTEN VANUIT DE WARME PRODUCTIEPUT EN DE MINDER WARME INJECTIEPUT

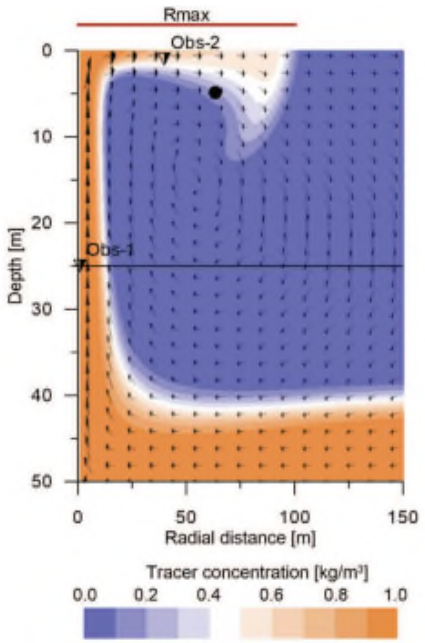
In een recente studie is voor verschillende hydrogeologische- en putcondities het effect van warmte-uitstraling naar het omringende grondwater modelmatig onderzocht. Hierbij is een temperatuur van de buitenste putcasing aangenomen in een situatie waarin initieel geen grondwaterstroming plaatsvindt (50). De snelheid waarmee warmtegeleiding optreedt hangt af van de dikte en het type van de gebruikte materiaal in de putconstructie. Voor gebruikelijke putconstructies is de verwachting dat de temperatuur van de buitenste casing binnen enkele jaren de temperatuur in de put benaderen (50). In het referentiescenario is een buitenste putcasing van 80°C en omringend grondwater van 15°C beschouwd. Onder deze condities zorgt warmte-uitstraling voor een langzame opwarming van het grondwater langs de put, waarbij dichtbij de put het grondwater de temperatuur van het verpompte formatiewater benaderd (Figuur 5.2). Met toenemende afstand van de put neemt de temperatuur snel af, tot onder de 50°C binnen enkele meters vanaf de put. Dit door de sterke warmtegeleiding de aquifer in. Met de tijd echter, dringt de opwarming verder de aquifer in. Na dertig jaar is het grondwater tot op 50 meter afstand opgewarmd tot boven de 20°C. Deze opwarming vindt sterker plaats boven in de aquifer doordat de sterke opwarming van het grondwater nabij de put leidt tot het lichter worden en het netto opdrijven van het opgewarmde grondwater. De simulaties geven aan dat boven in de aquifer, op 40 meter afstand van de put, het ongeveer 4 jaar duurt voordat een temperatuurverhoging waargenomen kan worden (Figuur 5.2). Hierbij is aangenomen dat er geen regionale grondwaterstroming optreedt.



FIGUUR 5.2: GEMODELLEERDE TEMPERATUURVERDELING NA 30 JAAR ROND EEN PUT VAN 80°C IN GRONDWATER MET EEN ACHTERGRONDTEMPERATUUR VAN 15°C (50). DE PIJLEN GEVEN DE RELATIEVE STERKTE EN RICHTING VAN DE DOOR DE WARMTE-UITSTRALING VAN DE PUT GEÏNDUCEERDE GRONDWATERSTROMING AAN.

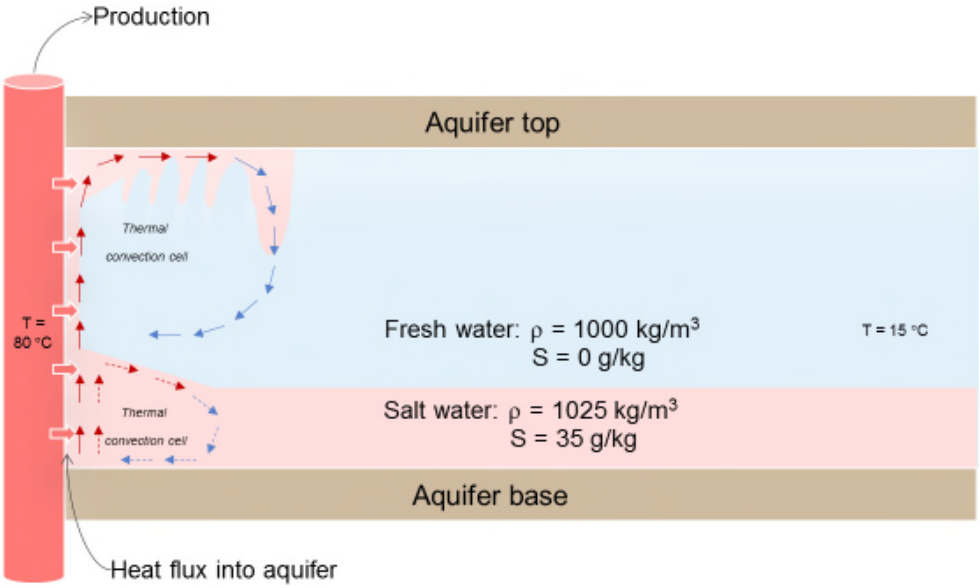
5.1 Menging van grondwater

Het opdrijven van opgewarmd grondwater langs de put zorgt ervoor dat onderin de aquifer water toestroomt. Hierdoor treedt menging op van het grondwater in de door de put doorsneden aquifer. Netto ontstaat er uiteindelijk een zogenaamde convectiecel waarbij opgewarmd grondwater omhoog stroomt langs de buitenkant van de put en vervolgens horizontaal wegstroomt bij het bereiken van de top van de aquifer en afkoelt bij het indringen van de koelere aquifer. In Figuur 5.3 illustreren de pijlen de sterkte en richting van de door de warmte-uitstraling geïnduceerde grondwaterstroming. In de in Figuur 5.3 gepresenteerde modelresultaten, resulteert deze stroming in menging van een conservatieve stof (tracer) die zich initieel alleen onder in de aquifer bevindt, maar zich gaandeweg over de volledige dikte van de aquifer verspreid. Voor condities zonder regionale grondwaterstroming kan de beschreven convectie dus zorgen voor menging van het grondwater binnen een watervoerende pakket.



FIGUUR 5.3: GEMODELLEERDE VERSPREIDING VAN EEN CONSERVATIEVE TRACER NA 30 JAAR ROND EEN PUT VAN 80°C IN GRONDWATER MET EEN ACHTERGRONDTEMPERATUUR VAN 15°C (50), ZONDER REGIONALE GRONDWATERSTROMING. DE PIJLEN GEVEN DE RELATIEVE STERKTE EN RICHTING VAN DE DOOR DE WARMTE-UITSTRALING VAN DE PUT GEÏNDUCEERDE GRONDWATERSTROMING AAN.

Zelfs in de aanwezigheid van een van nature redelijk stabiel grensvlak tussen zoet (lichter) en brak/zout water (zwaarder) kan warmte-uitstraling voor menging over dit grensvlak zorgen. Door warmte-geïnduceerde stroming zal er langs een put versterkte menging van het zoet en zoute grondwater over het grensvlak optreden (Figuur 5.4). Door het transport van zout naar het initieel zoete deel van de aquifer treedt dan vervolgens verzilting op (50). Bij voldoende opwarming en relatief kleinere zoutcontrasten kan het zoute (of brakke) grondwater zelfs lichter worden dan het bovenliggende grondwater waardoor de menging versterkt wordt. Modelresultaten geven aan dat bij zoutcontrasten van <1000mg/L de mate van menging minimaal verschilt met die in een volledig zoete aquifer (50).



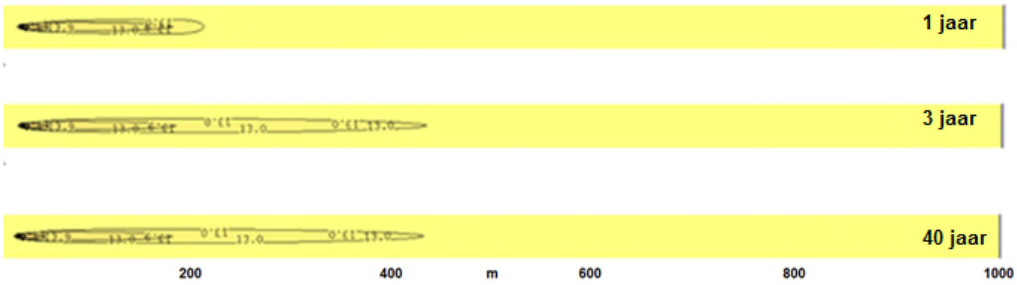
FIGUUR 5.4: SCHEMATISCH OVERZICHT VAN DE INVLOED VAN WARMTETRANSMISSIE UIT PUTTEN EN HET OPTREDEN VAN THERMISCH GEDREVEN DICHTHEIDSTROMING TE MODELLEREN, MET ALS VOORBEELD DE MOGELIJKE MENGEFFECTEN DAARVAN OP GESTRATIFICEERD ZOUT-ZOET GRONDWATER (50).

5.2 Grondwaterkwaliteitsveranderingen

In de aanwezigheid van grondwaterkwaliteitsverschillen binnen de watervoerende pakketten kunnen veranderingen in grondwaterkwaliteit optreden als gevolg van de door warmte-uitstraling-geïnduceerde menging en verspreiding. Naast effecten door menging kan ook de opwarming van grondwater rond de put leiden tot veranderingen van de grondwatersamenstelling. De gevolgen van opwarming van grondwater zijn in de context van onderzoek aan WKO systemen uitvoerig bestudeerd (51) en zijn altijd zeer afhankelijk van lokale hydrogeochemische omstandigheden. Een eerste verkenning van hoe warmte-uitstraling uit putten mogelijk effecten kan hebben op processen die grondwaterkwaliteit beïnvloeden is recent getest voor arseendesorptie. Gezien de sterke afname van de temperatuur met afstand van de put, vinden de sterkste temperatuur-geïnduceerde waterkwaliteitveranderingen op korte afstand van de put plaats (49).

5.3 Invloed van achtergrondstroming

Recent is uit modelonderzoek (49) gebleken dat in de aanwezigheid van achtergrondstroming, het ontstaan van verticale menging sterk vermindert of zelfs geheel kan verdwijnen (49). Dit is afhankelijk van de achtergrondsnelheid waarmee het grondwater dwars op de geothermische put stroomt. Achtergrondstroming zorgt ervoor dat ten opzichte van de casingtemperatuur de temperatuurverhoging rondom de put minder hoog is. Tegelijk wijzen de resultaten van de modelsimulaties in dit onderzoek er op dat zich in dat geval stroomafwaarts van de geothermische put een pluim met verhoogde temperaturen ten opzichte van de natuurlijke achtergrondtemperatuur vormt.

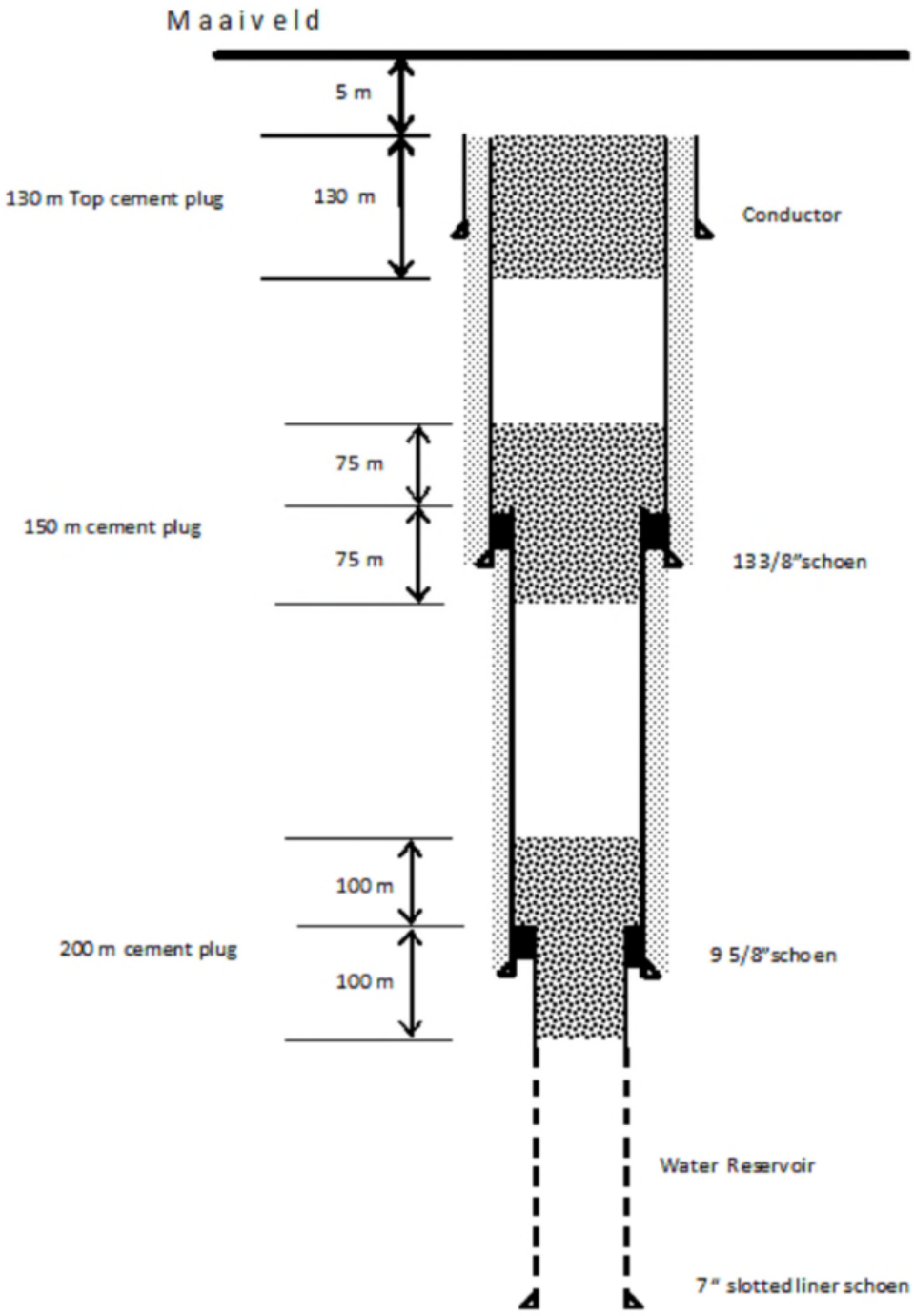


FIGUUR 5.5: GEMODELEERDE VERSPREIDING (49) VAN WARMTE IN DE RICHTING VAN GRONDWATERSTROMING (VAN LINKS NAAR RECHTS) MET EEN SNELHEID VAN 32CM/DAG (117M/JAAR) VOOR VERSCHILLENDE TIJDEN NA AANVANG WARMTEUITSTRALING DOOR EEN PUT VAN 80°C. DE BUITENSTE CONTOUR GEEFT 13°C WEER. AFSTANDEN ZIJN IN METERS VANAF DE PUT.

In genoemde modelstudie zijn de effecten van achtergrondstroomsnelheden van 16 en 32 cm/dag (58 en 117 m/jaar) onderzocht. Voor een put van 80 °C blijkt uit de simulaties dat de thermische pluim zich in enkele jaren honderden meters kan verspreiden. Bij hogere stroomsnelheid waren de maximale temperaturen in de pluim lager en stabiliseerden de temperatuurcontouren zich sneller en op kortere afstand van de put dan bij lagere snelheden.

6 Oude verlaten putten

De regels rond het verlaten van putten zijn in Nederland vanaf 1964 gedetailleerd vastgelegd in het Mijnreglement en later in de Mijnbouwregeling hoewel daarvoor ook al beperkte regelgeving van kracht was. In vergelijking met de regelgeving in andere landen kunnen de huidige Nederlandse regels ten aanzien van het afsluiten en verlaten van diepe putten als zeer rigide worden gezien. Zo moet voor elke afsluiting van een put moet worden getest op sterkte en integriteit. Ook moet voordat een put buiten gebruik wordt gesteld, deze gevuld worden met een vloeistof die een zodanig soortelijk gewicht heeft dat iedere in de put te verwachten druk kan worden weerstaan. De vloeistof heeft bovendien een zodanige samenstelling dat corrosie wordt voorkomen en dat geen schade wordt toegebracht aan eventuele delfstofvoorkomens. In de regel wordt gebruik gemaakt van cementpluggen. Andere middelen zijn toegestaan, mits dat resulteert in ten minste een gelijkwaardige afsluiting (44). De feitelijke afsluiting vindt plaats doormiddel van meerdere tientallen meters dikke cementpluggen onder maaiveld en ter hoogte van casing overgangen (Figuur 6.1). Met deze wijze van afsluiten resteert er een verwaarloos risico vanuit de verlaten put voor grondwater boven de geohydrologische basis. Vanwege door het hoge zoutgehalte ook hoge dichtheid is opwaartse migratie van formatiewater niet een reëel risico. Wel kan er langs de put nog migratie van gassen omhoog plaatsvinden, maar de risico’s daarvan zijn te ondervangen middels goede boorgatafdichtingen (paragraaf 2.1). Voor geothermiesystemen vormt vooral de nabijheid van oude verlaten olie- en gasputten nabij de injectieput een risico voor grondwater. Dit komt doordat deze oude putten mogelijk aangetast en/of onvoldoende zijn afgesloten waardoor zij mogelijk vanuit een geothermisch reservoir voor kortsluiting kunnen zorgen (52). Hierbij zou er formatiewater uit het geothermisch reservoir via een oude put omhoog en in het grondwater kunnen komen.

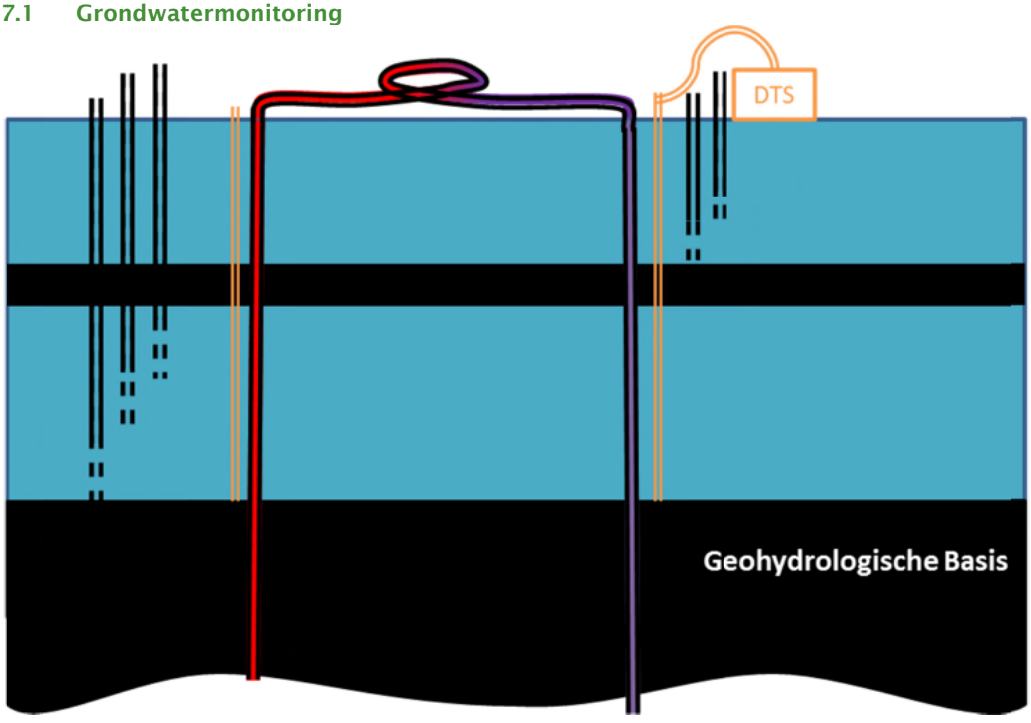


FIGUUR 6.1: AFDICHTING VAN GEOTHERMIEPUT MET CEMENTPLUGGEN ZOALS VOORGESCHREVEN IN NEDERLAND (44)

7 Grondwatermonitoring en beheersmaatregelen

De recent ontdekte putlekkage bij een zoutwinning illustreert dat bij onvoldoende grondwatermonitoring een grote grondwaterverontreiniging kan ontstaan (31) die decennia lang onopgemerkt kan blijven. De risico's voor grondwater door de factoren zoals in de vorige hoofdstukken beschreven kunnen verder worden verkleind, maar nooit volledig worden weggenomen. Naast het nemen van adequate voorzorgsmaatregelen ter bescherming van grondwater zorgt effectieve grondwatermonitoring nabij geothermiesystemen zowel voor bevestiging van die bescherming, als voor snelle detectie en diagnose mocht er toch een verontreiniging van grondwater optreden. Door het gebrek aan grondwatermonitoring bij geothermiesystemen ontbreekt vooralsnog het inzicht hoe deze monitoring op een adequate en doelmatige manier in te richten. Toekomstige grondwatermonitoring bij geothermiesystemen kan daar in belangrijke mate invulling aan geven. Naast een snelle efficiënte detectie van eventuele negatieve grondwaterbeïnvloeding kunnen door monitoring negatieve effecten beperkt blijven en beheersmaatregelen effectief worden toegepast. Hieronder wordt in het kort een handreiking voor die opzet gedaan.

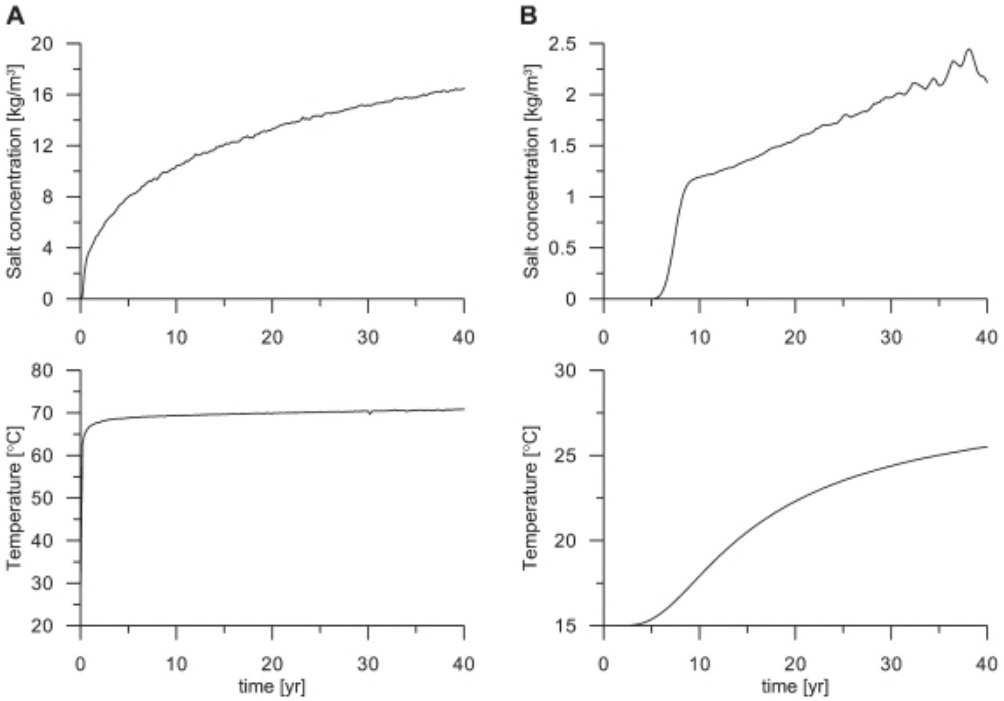
7.1 Grondwatermonitoring



FIGUUR 7.1: SCHEMATISCHE ILLUSTRATIE VAN MOGELIJKE GRONDWATERMONITORING NABIJ GEOTHERMIEPUTTEN DOOR MIDDEL VAN MULTI-LEVEL FILTERS (LINKS) EN GLASVEZELKABEL LANGS DE PUT VOOR LOGGING VAN BIJVOORBEELD TEMPERATUUR MET DISTRIBUTED TEMPERATURE SENSING (DTS).

Voor de exploitatie van geothermiesystemen wordt gerekend met een lange levensduur van 20-30 jaar. Terwijl sommige van de effecten van geothermie op grondwater zich langzaam opbouwen (effecten warmte-uitstraling (Figuur 7.2), kortsluitstroming), kunnen andere

effecten op een bepaald moment een relatief snel en groot effect hebben (effecten lekkage). Voor het detecteren van beide typen effecten in een vroeg stadium, is het goed om de grondwatermonitoring zo dicht mogelijk bij de geothermieputten uit te voeren, op een zo continue mogelijke basis, zodat zowel geleidelijke of relatief abrupte temperatuursveranderingen goed waargenomen kunnen worden. Hiervoor kunnen levelloggers in monitoringsputten voor druk, temperatuur en geleidbaarheidsmetingen gebruikt worden. De toepassing van glasvezelkabel voor temperatuurmetingen (*DTS*) biedt daarbij als voordeel dat over de gehele dikte van de grondwaterpakketten gemonitord kan worden (Figuur 7.1). Ter verificatie van de online metingen en het vaststellen of er geen verontreinigingen door kortsluitstroming, versmering of door indringing van boorspoeling zijn opgetreden kunnen periodiek grondwatermonsters uit de monitoringsfilters genomen worden.



FIGUUR 7.2: GEMODELLEERDE ONTWIKKELING VAN ZOUTCONCENTRATIE (BOVEN) EN TEMPERATUUR (ONDER) VOOR TWEE GESELECTEERDE OBSERVATIEPUNTEN (A) HALVERWEGE EEN AQUIFER OP 0,75M AFSTAND (OBS-1 IN FIGUUR 5.2) EN (B) IN DE TOP VAN EEN AQUIFER OP 40M AFSTAND (OBS-2 IN FIGUUR 5.2) VAN EEN PUT VAN 80°C. DE TOENAME IN ZOUTGEHALTE IS HET GEVOLG VAN MOBILISATIE VAN EEN DIEPER GELEGEN ZOET (0 KG/M³)/ZOUT (35 KG/M³) GRENSVLAK DOOR WARMTEUITSTRALING VOOR EEN SITUATIE ZONDER REGIONALE GRONDWATERSTROMING (50).

De locatie en diepte van monitoringspunten (Figuur 7.1) zijn afhankelijk van de belangrijkste paden waarlangs verontreiniging van het grondwater kan optreden en de aard en het gedrag van eventuele verontreinigende stoffen. Het kan hierbij bijvoorbeeld gaan om vermorsingen aan maaiveld, lekkages uit leidingen en opslagtanks of lekkages tijdens transport. Maar het kan ook gaan om lekkages op diepte door een falende putcasing. Daarnaast zijn de aard en het gedrag van de gelekte stoffen van groot belang. Gassen zullen naar boven migreren, terwijl zout formatiewater door de hoge dichtheid juist naar de onderkant van een watervoerend pakket zal uitzakken. Voor de locatiebepaling dient ook rekening gehouden te worden met de richting van de heersende achtergrondstroming (53). Op basis van de monitoring en detectie van veranderingen in temperatuur en saliniteit (Figuur 7.2), kunnen

nadere handmatige grondwateranalyses worden verricht ter bepaling van de aanleiding van de geobserveerde veranderingen.

7.2 Beheersing negatieve grondwaterbeïnvloeding

Mocht er door monitoring zijn aangetoond dat verontreiniging van het grondwater is opgetreden, dan kan besloten worden om in de nabijheid van de geothermiebron of injectieput een grondwaterput te installeren en lokaal het grondwater te onttrekken en zo verdere verspreiding van de verontreiniging tegen te gaan. Het kan overwogen worden om deze zogenaamde interceptiebron al voor de aanleg van de geothermieput te installeren zodat deze ook voor het monitoren van de grondwaterkwaliteit gebruikt kan worden. De duur van een beheersmaatregel wordt bepaald door onder meer de grootte van de verontreiniging en of de oorzaak van de verontreiniging weg te nemen is.

8 Mogelijke maatregelen ter beperking van risico's

Hoewel de risico's voor verontreiniging van het grondwater bij geothermie nooit tot nul te reduceren zijn, geeft de huidige geothermiepraktijk in Nederland ruimte voor het verminderen van de risico's. Vanuit het voorzorgsprincipe heeft de inzet op preventieve maatregelen (bv. putconstructie en materiaalgebruik) de voorkeur boven maatregelen die ter onderdrukking (bv. toepassing anti-corrosiemiddelen) worden toegepast.

Ter gedachtenvorming worden hieronder mogelijke maatregelen ter beperking van de risico's van geothermie voor grondwater benoemd. Welke kostentechnische aspecten hiermee verbonden zijn is hierbij niet uitgewerkt, deze zijn namelijk in hoge mate locatie-specifiek. Hoe verschillende maatregelen de business case van een geothermiesysteem beïnvloeden is hiermee buiten beschouwing gelaten. De mogelijke maatregelen zijn geordend in de volgorde van de in de eerdere hoofdstukken beschreven risico's.

8.1 Boren en doorboren

- *Het gebruik van zuigboringen voor het doorboren van grondwaterlagen*
  Voor het boren van putten voor drinkwater en WKO toepassing zijn zuigboringen voorgeschreven. Voordeel van zuigboringen is dat in ongeconsolideerde pakketten een tamelijk goede boorbeschrijving gemaakt kan worden (8). Een goede boorbeschrijving is een randvoorwaarde voor het goed afdichten van het boorgat ter hoogte van afsluitende kleilagen waardoor de kans op kortsluitstroming verkleind wordt. Door bij het doorboren van watervoerende pakketten ten behoeve van geothermie gebruik te maken van een zuigboring, bijvoorbeeld voor het plaatsen van de surface casing tot in de geohydrologische basis (paragraaf 4.3.1), kan een gedetailleerde boorbeschrijving worden gemaakt. Dit is een vereiste om tijdens het afdichten met voldoende aandacht en zorgvuldigheid de doorboorde scheidende lagen goed af te dichten en deze achteraf ook op de positie van die lagen voldoende te kunnen controleren.

- *Het gebruik van niet-krimpend materiaal voor afdichting in grondwaterpakketten*
  Het gebruik van niet-krimpend cement of zwellend materiaal is bevorderlijk voor de kwaliteit van de afdichting van scheidende lagen tot aan de geohydrologische basis. Afhankelijk van de diepte van de af te dichten scheidende laag kan er een voorkeur zijn voor zwellende klei of niet-krimpend cement. Dit bijvoorbeeld vanwege de benodigde sterkte en boorgatwandstabiliteit (paragraaf 2.1). Voordeel van het gebruik van zwellende klei is dat het werkt als flexibele afsluiting die kan meevormen met eventuele vervormingen van de casing. De aanwezigheid van hoge zoutconcentraties beperken echter de mate waarin zwelling kan optreden. Voor doorboringen onder de hydrologische basis is het gezien de hoogte van de formatiedrukken aan te bevelen om gebruik te maken van niet-krimpend cement

- *Extra aandacht op (mogelijk) verontreinigde locaties*
  Zorgdragen voor een goede afdichting van scheidende lagen is extra van belang voor boringen die plaatsvinden op locaties die (mogelijk) verontreinigd zijn. In de meeste gevallen zal vooraf bekend zijn of een locatie mogelijk verontreinigd is.

Anders is dit met (historisch) aanvullend locatieonderzoek vast te stellen. Met name het doorboren van eventueel aanwezige drijf- en of zaklagen moet worden voorkomen.

- *Het gebruik van niet-verontreinigende boorspoelingen op basis van water of lucht*
  Om verontreiniging door indringing van de gebruikte boorspoeling te voorkomen wordt het bovenste deel met grondwaterhoudende pakketten wel geboord met een boorspoeling op basis van zoet water of lucht (15). Pas nadat de surface casing volledig is gecementeerd wordt met een andere boorspoeling gewerkt. In Queensland, Australië is het gebruik van boorspoeling op basis van synthetische of minerale olie in het algemeen niet meer toegestaan (11). In Nederland zijn geen wettelijke beperkingen, maar wordt gebruik gemaakt van doelstellende bepalingen. In de praktijk wordt deze niet toegepast in het ondiepe deel van boringen. 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 alleen niet-potentieel verontreinigende boorspoelingadditieven.

8.2 Geïnduceerde Seismiciteit

- *Voorkom het gebruik van hydraulic fracturing in actieve natuurlijke breukzones.* Bij boren buiten natuurlijke actieve breukzones en zonder het gebruik van hydraulic fracturing is de kans op geïnduceerde seismiciteit waarschijnlijk verwaarloosbaar.

8.3 Lekken van Formatiewater

- *Voorkom lekkage tijdens opslag van ontwikkel- en of regeneratiewater*
  De tijdelijke opslag aan maaiveld van tijdens putontwikkeling opgepompt formatiewater vormt de belangrijkste risicofactor voor lekkages vanaf maaiveld. Dit risico kan verminderd worden door de wijze van opbouw van het tijdelijke bassin, bijvoorbeeld door het toepassen van het meest lekbestendige geotextiel en het minimaliseren van de risico’s van perforatie, door het bassin op een gladde, bij voorkeur vloeistofdichte, ondergrond te plaatsen. Dit kan gecombineerd worden met lekdetectie aan de randen een en back-up beveiliging om eventuele lekkage op te vangen. Daarnaast wordt het risico op lekkage verminderd door voor zowel de tijdelijke als de uiteindelijke voorzieningen de meest geschikte (bv. zeer corrosie-resistente) materialen en onderdelen te selecteren. Daarnaast is een goed veiligheidsmanagementsysteem noodzakelijk om vermorsingen te kunnen voorkomen en daar goed op te kunnen reageren indien zich toch calamiteiten voordoen.

- *Het meerwandig uitvoeren van putten tot in de geohydrologische basis*
  Naast extra beschermingslagen geeft meerwandigheid ook de mogelijkheid voor het monitoren op lekkage op basis van annulaire drukken. Ter bescherming van het gehele grondwaterpakket moet deze meerwandigheid dan ook tot in de geohydrologische basis worden doorgezet (Figuur 4.9).

- *Het uitvoeren van corrosiemonitoring*
  Er is al ervaring bij Nederlandse geothermiesystemen met het uitvoeren van periodieke corrosiemonitoring in de put (bv. caliper logs, of corrosion coupons) of continue worden uitgevoerd. Hiermee kan een indicatie verkregen worden in de mate waarin corrosie optreedt. Naast periodieke monitoring kan ook continue monitoring worden toegepast. Sinds de jaren ’60 is het gebruikelijk om

corrosiemonitoring uit te voeren op diepe olie- en gasputten. Hierbij wordt de elektrische weerstand op de put continu gemeten. Deze meting geeft inzicht in het dikteverlies van het materiaal met de tijd. Ook bij geothermieputten is het aan te bevelen om deze metingen uit te voeren. De effectiviteit van corrosiemonitoring ten behoeve van grondwaterbescherming wordt echter wel beperkt door de frequentie waarmee gemonitord wordt (bij periodieke monitoring) en de beperkte mate waarmee het optreden van lokale corrosie eenduidig kan worden aangetoond.

- *Handhaven van putinjectiviteit ter minimalisatie van benodigde injectiedrukken*
  Het voorkomen van verstoppingsproblemen van de injectieput heeft van operationeel oogpunt de aandacht, maar is ook belangrijk vanuit grondwaterbeschermingsoogpunt. Het zo laag mogelijk houden van de benodigde injectiedrukken vermindert tevens de kans op, en de impact op het grondwater van eventuele lekkages. Vanuit dit oogpunt is het beter en effectiever om putverstopping te voorkomen middels waterbehandeling, dan deze te herstellen door putregeneratie (1).

- *Het gebruik van corrosiebestendige(r) staalsoorten*
  Het gebruik van corrosiebestendige(r) staalsoorten voor putten dan de nu gebruikelijke koolstofstaalsoorten verkleint het risico op lekkage naar grondwater sterk. Tevens vermindert dit de afhankelijkheid van toediening van corrosie-inhibitoren waarvan de werking onduidelijk en de mate van risicoreductie onzeker is. Het niet hoeven toedienen van corrosie-inhibitoren voorkomt ook het risico van verontreiniging van grondwater met de hiervoor gebruikte stoffen.

- *Overweging van het gebruik van composiet*
  Een mogelijk geschikt alternatief voor de beperking van het lekkagerisico door corrosie ten opzichte van staal is het gebruik van composiet materiaal. Composiet casings zijn gemaakt van glasvezel en harsen en is een nieuw materiaal voor geothermische toepassing. Gezien de onbekendheid met de toepassing van dit materiaal moet er wel aandacht zijn voor mogelijke gevoeligheid voor andere factoren waardoor er lekkages kunnen ontstaan, zoals slijtage of breuk.

8.4 Opwarmen grondwater door warmte-uitstraling

- *Warmte-uitstraling: niet te stoppen, wel te monitoren*
  Omdat de voor de putconstructie gebruikte materialen warmte geleiden, net als de geologische lagen in de ondergrond, is het optreden van warmte uitstraling niet te voorkomen of te mitigeren. De keuze voor casings met een kleinere warmtegeleidingscapaciteit (zoals composietmateriaal) heeft waarschijnlijk weinig effect op de te verwachten warmte-uitstraling. Dit omdat de bulk van de weerstand voor warmteconductie bepaald wordt door de voor de boorgatafdichting gebruikte materialen (klei/cement). De mate van warmteuitstraling kan wel door put-nabije grondwatermonitoring (paragraaf 7.1) worden vastgesteld.

- *Behoefte aan veldvalidatie van optredende temperatuureffecten en grondwaterkwaliteitsveranderingen onder praktijkcondities*
  Dat warme putten warmte uitstralen naar omliggende pakketten is bekend. Het is echter onbekend welke effecten dat heeft in de praktijk. De inzichten komen vooralsnog van zo realistisch mogelijke scenariosimulaties. Deze moeten echter gevalideerd worden met grondwatermonitoring (paragraaf 7.1) onder praktijkcondities om zo de te verwachten effecten van warmte-uitstraling op grondwater onder verschillende condities op de het juiste niveau te kunnen schatten.

8.5 Nabijheid oude verlaten putten

- Voorkom dat er zich in de hydraulische invloedsfeer van geothermische putten geen oude, mogelijk niet goed verlaten en/of inmiddels niet integere, olie- en/of gas putten bevinden.

9 Conclusies en Aanbevelingen

Incidenten bij diepe mijnbouwactiviteiten illustreren dat deze niet zonder risico zijn en geven Vewin aanleiding tot zorg over de risico's van geothermie voor grondwater. Slechts ten dele worden deze geadresseerd in de bestaande wetgeving en handhaving zoals die al voor olie- en gasputten wordt toegepast (Mijnbouwwet). De belangrijkste risicofactoren van geothermie voor grondwater zijn in deze studie geïdentificeerd en uitgewerkt. Per risicofactor zijn de belangrijkste conclusies ten aanzien van het risico van geothermie voor grondwater hieronder beschreven. Ten dele gelden deze risicofactoren ook bij andere mijnbouwactiviteiten, zoals de risico's bij boren.

1) Het risico bij **Boren en doorboren** (Hoofdstuk 2) ten behoeve van de aanleg van geothermie wordt vooral bepaald door:
   a. Het kunnen op treden van kortsluitstroming door **onvoldoende afdichting van scheidende lagen.** Door kortsluitstroming kan vanuit boven –en of onderliggende lagen grondwaterverontreiniging optreden.
   b. Het doorboren en versmeren van **zaklagen** naar onderliggende watervoerende pakketten. Bij het boren op (mogelijk) met drijf- of zaklagen verontreinigde locatie, kunnen verontreinigingen versmeerd en verspreid worden naar grondwaterpakketten.
2) Indringing van **verontreinigende boorspoeling** in een aquifer. Het gebruik van boorspoeling op basis of met toevoeging van potentieel verontreinigende stoffen kan mogelijk verontreiniging van grondwaterpakketten veroorzaken. Bij boren in natuurlijke actieve breukzones in combinatie met hydraulic fracturing is er risico op **Geïnduceerde Seismiciteit** (Hoofdstuk 3).
3) De **lekkage van formatiewater** (Hoofdstuk 4) is een belangrijk risico voor grondwater doordat dit kan optreden door:
   a. Onvoldoende veilige **tijdelijke opslag in foliebassins** tijdens putontwikkeling of putregeneratie. Door vermorsingen of lekkages uit de opslag bassins kan vanaf maaiveld ondiep grondwater verontreinigd raken.
   b. Het gebruik van **onvoldoende corrosie-bestendige staalsoorten** voor de putconstructie. Dit verhoogt het risico op verminderde put integriteit door corrosie en het optreden van lekkage naar het grondwater.
   c. Onvoldoende bescherming tegen lekkage door **niet-meerwandige putconstructie**, Het doorsnijden van grondwaterpakketten met (deels) enkelwandige putten versterkt het risico dat bij ontstaan van onvoldoende integriteit van de put, directe lekkage naar het grondwater optreedt. Tevens ontbreekt het bij enkelwandige putten aan de mogelijkheid om middels annulaire drukmetingen onvoldoende putintegriteit voortijdig op te merken.
4) De mate waarin warmte-uitstraling vanuit de put tot **opwarming van grondwater rond de put** (Hoofdstuk 5) en veranderingen in grondwaterkwaliteit kunnen leiden. Warmte-uitstraling vanuit putten treedt op en modelstudies geven aan dat de grote verhoging van de grondwatertemperaturen in de nabijheid van de put tot menging van grondwater kan leiden waar dit wellicht onwenselijk is. Op gebiedsschaal kan de opwarming in stroomafwaartse richting van de put tot licht verhoogde grondwater temperaturen kan leiden. Welke grondwaterkwaliteitsveranderingen door verhoogde

grondwatertemperaturen kunnen ontstaan en in welke mate, is onbekend en waarschijnlijk sterk locatie-afhankelijk.

5) De (onbekende) **nabijheid van oude verlaten putten (vooral olie –en gas)** nabij de injectieput van geothermiesystemen vormt een risico voor grondwater. Dit komt doordat deze oude putten mogelijk aangetast en/of onvoldoende zijn afgesloten waardoor zij mogelijk vanuit een geothermisch reservoir voor kortsluiting kunnen zorgen. Hierbij kan er formatiewater uit het geothermisch reservoir via een oude put omhoog en in het grondwater komen.

In de huidige geothermiepraktijk in Nederland kunnen de risico's voor grondwater nog sterk verminderd worden. Een deel van de geïdentificeerde risico's voor grondwater valt samen met de door de sector zelf al geconstateerde operationele aandachtspunten zoals scaling, corrosie en injectiviteit. Om risico's te beperken zijn aanvullende maatregelen gewenst tijdens de ontwerp-, aanleg- en exploitatiefase van het geothermiesysteem. Vanuit het voorzorgsprincipe heeft de inzet op preventieve maatregelen (bv. verbeterde putconstructie en gebruik van hoogwaardiger materialen) daarbij de voorkeur boven maatregelen die ter onderdrukking (bv. toepassing anti-corrosiemiddelen) worden toegepast.

Vooralsnog ontbreekt veldonderzoek op geothermielocaties naar de mate waarin opwarming en andere effecten optreden alsook de validatie van de daarvoor gebruikte modellen om deze effecten te schatten. Ook adequate monitoring welke in staat is om in een vroegtijdig stadium eventuele negatieve effecten op het grondwater te registreren ontbreekt momenteel. Grondwatermonitoring biedt de mogelijkheid om negatieve beïnvloeding van grondwater vroegtijdig te signaleren en adequate maatregelen te treffen.

9.1 Aanbevelingen

Gezien het risicoprofiel van geothermie en praktijkervaringen met faalincidenten is het gewenst om aandacht te besteden aan de beschreven risico's en om aanvullende risico-beperkende maatregelen te borgen. In relatie tot grondwaterwinning dient beter zicht te worden verkregen op de impact van geothermie op grondwater door gedegen veldmonitoringstudies. Daarnaast moet ontwikkeling van geothermie hand in hand gaan met kennisontwikkeling over risico's en adequate beheersingsmaatregelen. Ook is aanvullend onderzoek nodig naar de risico's van voor in Nederland nog in ontwikkeling zijnde vormen van geothermie (met name *Enhanced Geothermal Systems,* EGS), welke in deze studie niet specifiek zijn beschouwd. Naast de risico's voor grondwater bij geothermische warmte en –elektriciteitsproductie, moeten ook de risico's van ondergrondse technieken voor warmteopslag (bv. Hoge Temperatuur Opslag (3)) worden onderzocht, aangezien deze in combinatie met geothermie toegepast kunnen gaan worden.

10 Referenties

1. Hartog N. Geochemical Assessment of Injectivity Problems in Geothermal Wells - A Case Study for several Greenhouse Geothermal Systems in The Netherlands. KWR Watercycle Research Institute, 2015 KWR 2015.012.
2. Veldkamp JG, Goldberg TV, Bressers PMMC, Wilschut F. Corrosion in Dutch geothermal systems. 2016 TNO 2015 R10160.
3. Hartog N, Cirkel DG. Geothermie en HTO: Evaluatie van de risico's voor grondwaterkwaliteit. Nieuwegein, NL: KWR Watercycle Research Institute, 2015 Juli 2015. Report No.: KWR 2015.037.
4. DAGO. 2016; Available from: http://www.dago.nu.
5. Gerritsen M, Nijboer M, van der Sommen I. Conceptresultaten planMER STRONG. Tauw, 2016 R001-1224711EMG-ege-V01-NL.
6. Boxem T, Veldkamp JG, Carpentier S, Goldberg TV, Lipsey L. Ultra-diepe geothermie in Nederland. 2015 TNO 2015 11617.
7. Kamp HGJ. Reactie op vragen naar aanleiding van opsporingsvergunningen aardwarmte Friesland, Utrecht, Overijssel en Noord-Brabant. In: Zaken MvE, editor. 2013. p. 4.
8. Cirkel DG, Leunk I. Quickscan risico's verschillende boor en winningstechnieken. KWR Watercycle Research Institute, 2012 KWR 2012.004.
9. Maaijwee C, Rombaut B, Buik N. Geothermal study of Triassic reservoirs in the province of Noord-Brabant IF Technology, 2012 3/60125/NB.
10. Bos/Arcadis/Fugro W. Aanvullend onderzoek risico's schalie- en steenkoolgas in Nederland: Bijlagenrapport. Ministerie van Economische Zaken, 2013.
11. EHP. Characterisation and Management of Drilling Fluids and Cuttings in the Petroleum Industry. Department of Environment and heritage protection Queensland Government Australia 2013.
12. Caenn R, Chillingar GV. Drilling fluids: State of the art. Journal of Petroleum Science and Engineering. 1996;14(3):221-30.
13. Besluit algemene regels milieu mijnbouw. Sect. BWBR0023771 (2008).
14. Kombrink H, van Os BJH, van der Zwan CJ. Geochemistry of marine and lacustrine bands in the Upper Carboniferous of the Netherland. Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw. 2008;87(4):309 – 22.
15. NYSDEC. Revised Draft Supplemental Generic Environmental Impact Statement On The Oil, Gas and Solution Mining Regulatory Program -Well Permit Issuance for Horizontal Drilling And High-Volume Hydraulic Fracturing to Develop the Marcellus Shale and Other Low-Permeability Gas Reservoirs. New York State Department of Environmental Conservation, Bureau of Oil & Gas Regulation, Division of Mineral Resources., 2011.
16. DiGiulio DC, Wilkin RT, Miller C, Oberley G. Investigation of Ground Water Contamination near Pavillion , Wyoming. EPA Office of Research and Development National Risk Management Research Laboratory, Ada, Oklahoma, 2011.
17. Zimmerle W. Petroleum sedimentology. . editor. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 1995.
18. Jochum J, Friedrich G, Leythaeuser D, Littke R. 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. 1995; 9(5):353-62.
19. Verweij JM. Fluid Flow Systems Analysis on Geological Timescales in Onshore and Offshore Netherlands: With Special Reference to the Broad Fourteens Basin: Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO, National Geological Survey; 2003.
20. Groat CG, Grimshaw TW. Fact-Based Regulation for Environmental Protection in Shale Gas Development. The Energy Institute. University of Texas at Austin. Austin, Texas., 2012.

21. Meiners HG. Fracking in unkonventionellen erdgas lagerstätten in Nordrhein-Westfalen. Gutachten mit risicostudie zur exploration und gewinnung von erdgas aus unkonventionellen lagerstätten in Nordrhein-Westfalen (NRW) und deren auswirkungen auf den naturhaushalt insbesondere die öffentliche trinkwasserversorgung. Ministerium für klimaschutz, landwirtschaft, natur- und verbraucherschutz des landes Nordrhein-Westfalen, 2012.
22. SodM. Veiligheid van booractiviteiten in Nederland. brief aan de minister van economische zaken. 2010.
23. The National Petroleum Council. Plugging and Abandoning Oil and Gas Wells. Paper #2-25 Prepared by the Technology Subgroup of the Operations & Environment Task Group. Working Document of the NPC North American Resource Development Study 2011.
24. Häring MO, Schanz U, Ladner F, Dyer BC. Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system. Geothermics. 2008;37:469-95.
25. Deichmann N, Evans K. Injection-induced seismicity: lessons learned and open questions. 2010; Available from: http://www.ecgs.lu/ecgs-fkpe-workshop-induced-seismicity/.
26. Eradus WJ. Geothermie schokt inwoners Basel. Reformatorisch Nieuwsblad; 2007 [updated 23-01-2007; cited 2015 17-6-2015].
27. Veldkamp JG, Loeve D, Peters E, Nair R, Pizzocolo F, Wilschut F. Thermal fracturing due to low injection temperatures in geothermal doublets. 2015 TNO 2015 R11739.
28. Willemsen A, Heller R, van Wees JDAM. Diepe geothermie 2050. Een visie voor 20% duurzame energie voor Nederland. 2011 Contract No.: 23.822/109143/GW.
29. Keranen KM, Savage HM, Abers GA, Cochran ES. Potentially induced earthquakes in Oklahoma, USA: Links between wastewater injection and the 2011 Mw 5.7 earthquake sequence. Geology. 2013.
30. Portier S, André L, Vuataz FD. Review on chemical stimulation techniques in oil industry and applications to geothermal systems. Deep Heat Mining Association Switzerland, 2007.
31. Ministerie van Economische Zaken. Herstel van lekkage bij boorput 335 (zoutwinning) van AkzoNobel in Enschede. In: Zaken MvE, editor. 2016. p. 4.
32. Nederlandse Vereniging van Banken. Technische aspecten van geothermie projecten. Tweede rapportage van het Expertisecentrum financiering duurzame energieprojecten. 2015.
33. Lokhorst A. (ed.) NW European Gas Atlas. Haarlem (NITG-TNO): 1997.
34. SODM. Toelichting op toezichtsontwikkelingen inzake geothermie. In: Zaken MvE, editor. 2016.
35. Cooley H, Donnelly C. Hydraulic Fracturing and Water Resources: Separating the Frack from the Fiction. Oakland California: Pacific Institute, 2011.
36. Vignes B. Contribution toWell Integrity and Increased Focus onWell Barriers from a Life Cycle Aspect. (PhD thesis) University of Stavanger. 2011.
37. Karlsdóttir SN. 7.08 - Corrosion, Scaling and Material Selection in Geothermal Power Production. In: Sayigh A, editor. Comprehensive Renewable Energy. Oxford: Elsevier; 2012. p. 241-59.
38. Würdemann H, Westphal A, Lerm S, Kleyböcker A, Teitz S, Kasina M, et al. Influence of Microbial Processes on the Operational Reliability in a Geothermal Heat Store – Results of Long-term Monitoring at a Full Scale Plant and First Studies in a Bypass System. Energy Procedia. 2014;59(0):412-7.
39. Réveillère A, Hamm V, Lesueur H, Cordier E, Goblet P. Geothermal contribution to the energy mix of a heating network when using Aquifer Thermal Energy Storage: Modeling and application to the Paris basin. Geothermics. 2013;47(0):69-79.
40. Pátzay G, Stáhl G, Kármán FH, Kálmán E. Modeling of scale formation and corrosion from geothermal water. Electrochimica Acta. 1998;43(1–2):137-47.
41. Bozau E, Häußler S, van Berk W. Hydrogeochemical modelling of corrosion effects and barite scaling in deep geothermal wells of the North German Basin using PHREEQC and PHAST. Geothermics. 2015;53(0):540-7.
42. Mundhenk N, Huttenloch P, Bäßler R, Kohl T, Steger H, Zorn R. Electrochemical study of the corrosion of different alloys exposed to deaerated 80 °C geothermal brines containing CO2. Corrosion Science. 2014;84(0):180-8.

43. Hurley MF, Olson CR, Ward LJ, Jaques BJ, Johnson KA, Gunnerson JK, et al. Transgranular stress corrosion cracking of 304L stainless steel pipe clamps in direct use geothermal water heating applications. Engineering Failure Analysis. 2013;33(0):336-46.
44. van Adrichem A, van den Bosch R, Hagedoorn S, van Heekeren V, Verkade G-J, Vorage R, et al. Handboek Geothermie2013.
45. Dijcker R, Slob S. Verkenning effecten en risico's van geothermie in Hanzeland-Zwolle voor de drinkwatervoorziening. Witteveen+Bos, 2016 ZL511-12/16-012.664.
46. Kamp HGJ. Financieringsproblematiek geothermieprojecten (Kamerbrief). In: Zaken MvE, editor. 2016. p. 2.
47. Schmidt AP. Naturally occurring radioactive materials in the gas and oil industry: origin, transport and deposition of stable lead and 210Pb from Dutch gas reservoirs: Universiteit Utrecht; 2000.
48. GreenhouseGeopower. Koekoekspolder. 2013 [cited 2016 27-05-2016.]; Available from: http://www.greenhousegeopower.nl/.
49. De la Loma Gonzales B, Hartog N. Impact of heat loss from geothermal wells on shallow groundwater quality. KWR Watercycle Research Institute, 2016 KWR 2016.051.
50. van Lopik J, Hartog N, Zaadnoordijk WJ, Cirkel DG, Raoof A. Salinization in a stratified aquifer induced by heat transfer from well casings. Advances in Water Resources. 2015;86(Part A):32–45.
51. Bonte M. Impacts of Shallow Geothermal Energy on Groundwater Quality: IWA Publishing; 2014.
52. Cirkel DG. Lange termijn integriteit en monitoring van verlaten diepe putten. KWR Watercycle Research Institute, 2014 KWR 2014.017.
53. van Wezel A, Cirkel G, Hartog N, de la Loma Gonzales B, Sjerps R, Kools S, et al. Schaliegas & Drinkwater: Betrouwbaarheid. 2014 BTO 2014.044.