



BTO 2017.075 | December 2017

BTO rapport

Grondwatermonitoring bij Geothermieputten

BTO

Grondwatermonitoring bij Geothermieputten

BTO 2017.075 | December 2017

Opdrachtnummer

401825.001

Projectmanager

Ir. M. van der Schans

Opdrachtgever

BTO - Speerpuntonderzoek

Kwaliteitsborger(s)

Prof. dr. P.J. Stuyfzand

Auteur(s)

Dr. Ir. D.G. Cirkel & Dr. N. Hartog

Verzonden aan

Brabant Water

Jaar van publicatie
2017

Meer informatie

Dr. ir. Gijsbert Cirkel
T 734

E Gijsbert.cirkel@kwrwater.nl

Keywords

Geothermie, grondwater,
monitoring, drinkwater

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



Watercycle
Research
Institute

BTO 2017.075 | December 2017 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

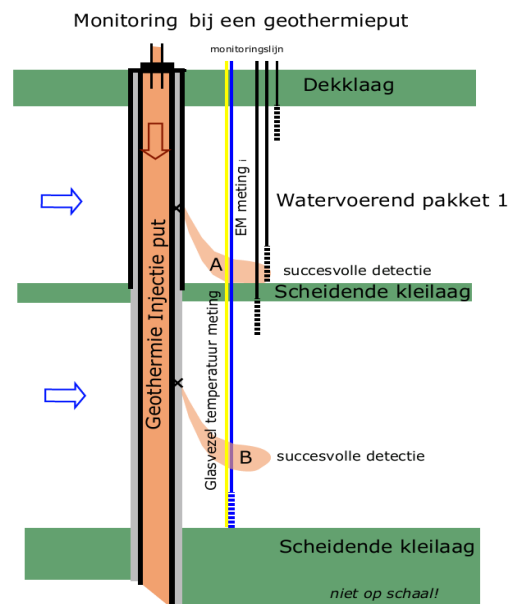
Niets uit deze uitgave mag worden vervaelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

BTO Managementsamenvatting

Handvatten voor grondwatermonitoring bij geothermieputten

Auteur(s) dr. ir. D.G. Cirkel & dr. N. Hartog

Monitoring van de impact op grondwater bij geothermieprojecten kan haalbaar en effectief, zo blijkt uit dit speerpuntonderzoek voor Brabant Water. Dat is belangrijk, omdat door de toenemende vraag naar duurzame energie ook de interesse in geothermie als bron van duurzame warmte toeneemt, terwijl dergelijke projecten wel risico's meebrengen voor de kwaliteit van het grondwater in de doorboorde pakketten. Voor geothermie wordt immers zeer zout water uit diepe aardlagen (2-3 km diepte) opgepompt, dat bij lekkages of kortsluitstroming het zoete grondwater kan verontreinigen. Reguliere monitoring voor het vroegtijdig signaleren van effecten op de grondwaterkwaliteit is te realiseren met bestaande monitoringstechnieken. De studie geeft handvatten voor de vormgeving van een dergelijke monitoring. Daarnaast kan het uitvoeren van onderzoeksmonitoring (bijvoorbeeld van het effect van warmteuitstraling) en numerieke modelberekeningen (gedrag van onverhoopt naar het grondwater weggelekt formatiewater) bijdragen aan kennisontwikkeling over processen die een risico vormen voor de grondwaterkwaliteit en aan de verdere ontwikkeling van effectieve methoden voor reguliere monitoring. Het is nu belangrijk om samen met de geothermiesector invulling te geven aan de wijze van uitvoering van reguliere grondwatermonitoring en zo de ervaring en kennis van beide sectoren samen te brengen.



Met nieuwe meettechnieken zoals glasvezel temperatuurmetingen en EM-metingen kunnen eventuele lekkages uit een geothermiesysteem efficiënt worden gedetecteerd over het relevante dieptebereik

Belang: monitoring van impact op grondwater ontbreekt bij geothermieputten

Geothermie is ook in Nederland in opkomst als duurzame warmtevoorziening. Voor deze techniek wordt warmte gewonnen door het oppompen van warm grondwater uit diepe aardlagen. Tot nu toe

blijkt dat water in Nederland zeer zout, en bevat het bovendien ook andere stoffen die nadelig kunnen zijn voor de drinkwaterproductie. Eerdere studies hebben laten zien dat lekkages vanuit geothermieputten en kortsluitstroming tussen verschillende watervoerende pakketten, een reëel

potentieel risico vormen voor de kwaliteit van het grondwater dat door een geothermieput wordt doorsneden. Goed functionerende beschermende voorzieningen én tijdige signalering in het grondwater van de impact van eventuele lekkages of kortsluitstromingen zijn van groot belang voor het waarborgen van de grondwaterkwaliteit. Bij de huidige generatie geothermieputten in Nederland is grondwatermonitoring echter nog niet vormgegeven en ontbreken handvatten voor efficiënte en effectieve grondwatermonitoring bij geothermieputten.

Aanpak: verkenning monitoringsbehoefte en beschikbare methodes voor grondwatermonitoring

Op basis van eerdere studies en recente ontwikkelingen zijn de relevante risico's voor de grondwaterkwaliteit geïnventariseerd. Er is gekeken naar analogieën in andere sectoren (bijv. grondwaterbewaking bij stortplaatsen) en bij geothermieprojecten in het buitenland. Daarnaast zijn een verkenning en een evaluatie uitgevoerd van mogelijke monitoringstechnieken voor putintegriteit en grondwaterkwaliteitsbewaking. Met de informatie hieruit is een aanzet gegeven voor vormgeving van grondwaterkwaliteitsmonitoring bij geothermiesystemen.

Resultaten: grondwatermonitoring kan effectief en efficiënt met bestaande monitoringstechnieken

Uit de inventarisatie bleek dat vooral lekkages risico's geven voor de grondwaterkwaliteit, zowel vanaf het maaiveld als op diepte vanuit putten. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen:

- reguliere monitoring tijdens de bedrijfsvoering, voor het vroegtijdig signaleren van effecten op de grondwaterkwaliteit en
- onderzoeksmonitoring, specifiek gericht op kennisontwikkeling over de processen die een risico vormen voor de grondwaterkwaliteit rondom geothermieputten

Onderzoeksmonitoring en aanvullend onderzoek dragen bij aan verdere ontwikkeling van efficiënte en effectieve reguliere monitoring.

Voor de reguliere monitoring bij geothermieputten zijn de volgende uitgangspunten geformuleerd:

- de monitoring moet in staat zijn te bevestigen dat er geen impact is op de grondwaterkwaliteit,
- de monitoring moet een onverhoopte impact kunnen detecteren,

- de monitoring moet zich vooral richten op de operationele fase, omdat daarbij de grootste risico's bestaan.

In delen van Duitsland is grondwatermonitoring van alle relevante watervoerende pakketten staande praktijk bij geothermische putten. De daar toegepaste monitoringstrategie sluit nauw aan bij de in Nederland bekende IBC systematiek voor grondwatermonitoring bij stortplaatsen. De monitoring in Duitsland bestaat uit het bemonsteren van monitoringsfilters op verschillende locaties en dieptes. Deze conventionele aanpak van monitoring kent beperkingen en brengt relatief hoge kosten mee.

In voorliggende studie is gezocht naar een effectieve en efficiënte invulling van reguliere grondwatermonitoring bij geothermieputten in de Nederlandse situatie. De belangrijkste bevindingen zijn:

- monitoring van effecten op grondwater moet en kan in het grondwater worden uitgevoerd,
- richt de monitoring op de belangrijkste indicatoren voor lekkage (zoutgehalte en temperatuur), met opvolging bij detectie van een afwijking,
- monitoring moet dicht op de putten worden uitgevoerd (indicatieve afstand 5-10 m). Dit betekent dat de monitoring met een beperkt aantal locaties kan worden vormgegeven,
- zet in op 'nieuwe' efficiënte en kosten effectievere technieken zoals EM-metingen (geleidbaarheid) en glasvezel-temperatuurmetingen,
- verifieer modelresultaten door warmteuitstraling daadwerkelijk onderzoeksmatig te meten en reken een groot aantal lekkagescenario's ter verificatie van de voorgestelde monitoringsopzet.

Implementatie: monitoring bij geothermie in samenwerking vormgeven

Belangrijk is nu om in concrete gevallen samen met operators invulling te geven aan deze monitoring. Zo kan ervaring en kennis van beide sectoren worden samengebracht.

Rapport

Dit Speerpuntonderzoek voor Brabant Water is beschreven in het rapport *Grondwatermonitoring bij Geothermieputten* (BTO 2017.075)

Inhoud

1	Inleiding	5
1.1	Aanleiding, motivering en doel	5
1.2	Leeswijzer	6
2	Potentiele effecten van geothermiebronnen op de grondwaterkwaliteit	7
2.1	Introductie	7
2.2	Boren en doorboren	7
2.2.1	Doorsnijden van beschermende (klei)lagen	7
2.2.2	Boorspoeling	8
2.2.3	Blowout	9
2.3	Warmteuitstraling	9
2.4	Lekkage van formatiewater	10
2.4.1	Samenstelling van formatiewater	10
2.4.2	Lekkage uit injectieputten	11
2.4.3	Lekkages bij ontwikkelen	12
2.5	Schatting van het lekdebiet tussen twee watervoerende pakketten bij een onvoldoende afgesloten annulus	13
2.6	Schatting van het lekdebiet uit een geothermische injectieput en de beïnvloedingszone	14
2.6.1	Schatting van het lekdebiet uit een geothermische injectieput	14
2.6.2	Schatting omvang en vorm van het beïnvloedingsgebied	16
2.7	Synthese	19
3	Monitoring bij geothermieputten	20
3.1	Basisprincipes bij monitoring van geothermiesystemen	20
3.2	Vereisten vanuit de Nederlandse wet- en regelgeving voor bewaking van de grondwaterkwaliteit bij (diepe) mijnbouwactiviteiten	21
3.3	Monitoringmethodes ter bescherming van ondiepe watervoerende lagen	23
3.3.1	Metten van annulus drukken	23
3.3.2	Geofysische metingen met 'wireline-tools'	24
3.3.3	Afpersen van putten	26
3.3.4	Grondwatermonitoring met waarnemingsfilters	26
3.3.5	Discussie bestaande monitoringsmethodes gericht op grondwaterbescherming	28
3.4	Innovatieve technieken voor continue monitoring over de diepte	30
3.4.1	EM metingen	31
3.4.2	Glasvezeltechnieken	33

3.5	Synthese	34
4	Reguliere grondwatermonitoring	36
4.1	Monitoringsconcept reguliere monitoring	36
4.1.1	Uitgangspunt	36
4.1.2	Analogie met stortplaatsen	36
4.1.3	Uitgangspunten bij het ontwerp	36
4.1.4	Layout van het systeem	37
4.1.5	Rekenregels voor het ontwerp conform IBC	38
4.1.6	Voorbeeldberekening toegepast op een geothermie(injectie)put	39
4.1.7	Alternatief: de conductor casing van de put inrichten voor monitoring?	40
4.2	Omvang monitoringspakket	41
4.2.1	Betekenisvolle indicatoren	41
4.3	Monitoring over de diepte	42
4.4	Schatting kosten reguliere monitoring	44
4.4.1	Eerste aanzet voor een monitoringsontwerp	44
4.5	Synthese	47
5	Kennisontwikkeling Grondwatermonitoring	48
5.1	Effecten van warmteuitstraling van geothermieput op omringend grondwater	48
5.1.1	Huidige stand van kennis	48
5.1.2	Kennisbehoefte ten behoeve van reguliere grondwatermonitoring	51
5.1.3	Verkenning benodigd onderzoek	51
5.2	Verspreiding van zout formatiewater door putlekkage in omringend grondwater	53
5.2.1	Huidige stand van kennis	53
5.2.2	Kennisbehoefte ten behoeve van reguliere monitoring	54
5.2.3	Verkenning benodigd onderzoek	55
6	Synthese en conclusies	56
7	Referenties	59

1 Inleiding

1.1 Aanleiding, motivering en doel

De komende jaren neemt de vraag naar duurzame energie toe. Ook de interesse in geothermie als bron van duurzame warmte neemt toe. Bij geothermie wordt warmte gewonnen uit warm formatiewater dat aanwezig is in diepe aardlagen. Dit water is in Nederland zeer zout en bevat daarnaast nog andere voor de drinkwaterproductie ongewenste stoffen. Vanuit de drinkwatersector zijn verschillende openstaande vragen over mogelijke effecten en risico's van geothermie op de kwaliteit van het grondwater, zowel tijdens de aanleg en de exploitatie als na het weer verlaten van de putten. Deze vragen worden steeds urgenter gezien de te verwachten toename van het aantal geothermie projecten in Nederland (zie energierapport 2016- Transitie naar Duurzaam). Uit Hartog and Cirkel (2015) & Hartog (2016) komt naar voren dat lekkages vanuit geothermieputten en kortsluitstroming tussen verschillende aquifers, een potentieel risico vormen voor de grondwaterkwaliteit. Tijdige signalering van eventuele lekkages is dan ook van groot belang voor het waarborgen van de grondwaterkwaliteit bij alle geothermieputten. Grondwatermonitoring is van primair belang voor het aantonen van de effectiviteit van aangebrachte en eventueel bewaakte barrières tussen het verpompte formatiewater en het ondiepere grondwater.

Daarnaast kunnen door opwarming rond de geothermieput kwaliteitsveranderingen optreden (Armienta et al., 2014; Bonte, 2015; Bonte et al., 2013a; Bonte, Stuyfzand, van den Berg, & Hijnen, 2011; Bonte, van Breukelen, & Stuyfzand, 2013b; de la Loma Gonzales & Hartog, 2016b). Vooralsnog is de opwarming van grondwater rond geothermieputten alleen modelmatig beschouwd en ontbreken metingen om zowel de opwarming als de eventueel optredende kwaliteitseffecten te kwantificeren. Deze metingen zijn belangrijk om de modelresultaten te kunnen valideren en om kwantitatief inzicht te verkrijgen in de opwarming en hieraan gerelateerde fysisch-chemische processen.

Het doel van deze studie is het opstellen van een handreiking voor de monitoring van grondwaterkwaliteitseffecten van geothermie activiteiten. Deze studie dient verschillende monitoringsdoelen en maakt daarom onderscheid tussen (1) onderzoeksmonitoring welke specifiek gericht is op kennisontwikkeling over processen die een risico vormen voor de grondwaterkwaliteit rondom geothermieputten; en (2) reguliere monitoring welke tijdens de bedrijfsvoering wordt ingezet voor het vroegtijdig signaleren van effecten op de grondwaterkwaliteit (lekkages) van eventueel falen en fouten bij aanleg, exploitatie en verlaten van de putten. Belangrijke uitgangspunten bij het vormgeven van de reguliere monitoring zijn:

- Reguliere monitoring richt zich op het bevestigen van geen impact (bv lekkage) op grondwater
- Richt zich op het detecteren en kwantificeren van de impact als dat onverhoopt toch gebeurt
- En richt zich vooral op de operationele fase (daar grootste risico's)

De resultaten van deze studie vormen een aanzet om te komen tot effectieve en efficiënte monitoringsstrategie voor de grondwaterkwaliteit bij geothermieactiviteiten.

1.2 Leeswijzer

Deze rapportage is opgebouwd uit 4 delen. Allereerst gaan we in hoofdstuk 2 in op de ons inziens relevante risico's voor de grondwaterkwaliteit. Vervolgens (hoofdstuk 3) geven we een algemeen overzicht van monitoringstechnieken gericht op grondwaterbescherming bij geothermieputten. In hoofdstuk 4 gaan we dieper in op de vraag hoe grondwatermonitoring bij geothermieputten vorm kan worden gegeven. In hoofdstuk 5 gaan we in op de kennisvragen die nog beantwoord moeten worden om te komen tot effectieve en efficiënte reguliere grondwatermonitoring bij geothermieprojecten.

2 Potentiele effecten van geothermiebronnen op de grondwaterkwaliteit

2.1 Introductie

Zorgvuldige omgang met onze grondwatervoorraden is van groot belang om ook voor de toekomst een efficiënte en duurzame drinkwaterproductie te kunnen garanderen. Tegelijkertijd staat Nederland voor een belangrijke transitie naar duurzame vormen van energie. Het benutten van (diepe) aardwarmte kan hier een belangrijke bijdrage aan leveren, maar vormt mogelijk ook een bedreiging voor de Nederlandse grondwatervoorraden. Het is dan ook van groot belang om te onderzoeken onder welke voorwaarden geothermieprojecten vormgegeven kunnen worden vanuit het oogpunt van het grondwatervoorraden in Nederland. Het zoveel mogelijk beperken van risico's voor de grondwaterkwaliteit – het voorzorgsprincipe – is hierbij leidend. Monitoring ter validatie en verificatie van het technisch goed functioneren van risico-mitigerende maatregelen speelt hierbij een belangrijke rol. Om meer zicht te krijgen op deze mogelijke risico's heeft KWR in 2016 in opdracht van Vewin de risico's van geothermie activiteiten voor de grondwaterkwaliteit in beeld gebracht (Hartog, 2016). In dit hoofdstuk sluiten we aan bij de bevindingen (in willekeurige volgorde) uit deze rapportage. Voor monitoring is op onderdelen nadere kwantificering nodig van een deel van de mogelijke effecten. We proberen in dit hoofdstuk een eerste aanzet te geven op basis van een aantal analytische overwegingen.

2.2 Boren en doorboren

Grondwater met (mogelijke) waarde voor drinkwaterproductie wordt in Nederland gewonnen uit het ondiepe grondwatersysteem boven de geohydrologische basis. Deze basis, die in Nederland grotendeels door Tertiaire kleien wordt gevormd, bevindt zich in grote delen van Nederland op maximaal enkele honderden meters diepte. De situatie in de centrale slenk is hierbij afwijkend met tot op grotere dieptes voor de drinkwatervoorziening en industriële onttrekkingen relevante pakketten. 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 is het tot een paar kilometer buiten deze gebieden mogelijk om onder, maar niet door de bovenliggende grondwaterpakketten te boren.

2.2.1 Doorsnijden van beschermende (klei)lagen

Bij het boren voor geothermieputten worden net als bij olie- en gasputten meerdere kleilagen, waaronder de kleilagen die veelal de geohydrologische basis vormen, doorsneden. Voor de bovenste tientallen meters wordt veelal, maar niet altijd, een zogenaamde koolstofstalen conductor casing ingeheld (bijlage I). In het geval van heien zal de aansluiting op doorsneden kleilagen veelal behoorlijk goed zijn. In andere gevallen wordt, net als voor het vervolgetraject gebruik gemaakt van roterend spuitboren. Bij dit type boring stroomt de spoeling terug naar het maaiveld door de ruimte (annulus) tussen de boorstang en de boorgatwand/bovenliggende casing (verbuizing). Bij spuitboringen zijn boorbeschrijvingen meestal zeer onbetrouwbaar door het ontmengen van de opgeboorde grond door de lage opvoersnelheid. Daarnaast is hierdoor een dikke (bentoniet) boorspoeling noodzakelijk wat

de detectie van doorboorde kleilagen verder bemoeilijkt. 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. Eventueel kunnen de boringen die op locatie uitgevoerd worden voor het realiseren van de grondwatermonitoring gebruikt worden voor het gedetailleerd karakteriseren van de aanwezige scheidende lagen.

Afdichting van de annulus tussen casing en boorgatwand vindt bij geothermieputten net als bij olie- en gasputten grotendeels plaats door cementering, mede ter versterking en bescherming van de putconstructie op grotere diepte. Deze cementeringen beschermen de casings (verbuizingen) tegen corrosie van buitenaf en voorkomen kortsluitstroming tussen casings en tussen de buitenste casing en de formatie. Hoewel grote zorg wordt besteed aan deze cementeringen en er standaard controles worden uitgevoerd (o.a. cement bond logs), bestaat er altijd een risico op onvoldoende afdichting van de buitenste annulus door bijvoorbeeld krimp van het cement of invallen van de doorboorde formatie.

Het goed afdichten van kleilagen onder en boven watervoerende pakketten is van groot belang voor de bescherming van het grondwater voor drinkwaterproductie. Deze kleilagen schermen het grondwater in de watervoerende pakketten immers af van invloeden vanuit onder- en bovenliggende watervoerende lagen. Deze lagen kunnen verontreinigd zijn of een ongewenste watersamenstelling bevatten. 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 zijn bestaande uit stoffen met agrarische (pesticiden) of industriële (Per, Tri, koolwaterstoffen) toepassingen. Bij ongewenste watersamenstellingen kan ook worden gedacht aan de aanwezigheid van brak of zout grondwater in een onder- of bovenliggend pakket. Deze ongewenste stoffen kunnen ofwel door drukgradiënten of door dichtheidsverschillen migreren naar het voor drinkwater van belang zijnde watervoerende pakket. 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 verwijdert niet de versmering en migratie die mogelijk al tijdens het boorproces zijn opgetreden.

2.2.2 Boorspoeling

Bij het boren ten behoeve van diepe putten zoals die voor geothermiesystemen wordt gebruik gemaakt van een speciaal samengestelde boorvloeistof. 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. In het verleden werd vooral gebruik gemaakt van dieselolie en soms ruwe olie als bestanddeel. Nadelig zijn uiteraard de milieu- en gezondheidsrisico's door de hoge gehalten 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 toxische eigenschappen voor milieu en personeel. De meest toegepaste toevoeging aan boorspoelingen is bentoniet. Naast bentoniet worden veelal biopolymeren en andere additieven toegevoegd zoals bariet (BaSO_4), kaliumchloride (KCl) en lage concentraties biocides. In Nederland wordt tegenwoordig als regel minimaal tot de hydrologische basis (de surface casing) met een boorspoeling op waterbasis geboord. Voor de diepere trajecten wordt bij het doorboren van klei(steen) of zoutlagen wel gebruik gemaakt van spoelingen op oliebasis.

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. Deze spoeling wordt aan maaiveld behandeld en opgeslagen en aan- en afgevoerd. Deze activiteiten vormen een risico voor lekkage vanaf maaiveld die, in potentie, een bedreiging voor het onderliggende grondwater vormt. Ook kan naar het maaiveld gebracht formatiemateriaal bij onzorgvuldige opslag een (beperkt) uitloogrisico vormen. Om deze risico's te ondervangen dient op boorlocaties een omvangrijke bodembeschermende voorziening aanwezig te zijn met onder andere vloeistofdicht asfalt en milieugoten. In Nederland wordt verder gebruik gemaakt van 'closed loop systems' en opslag in bovengrondse tanks en containers die de kans op lekkages en vermorsingen sterk verkleinen. Dat deze voorschriften geen 100% garantie geven, blijkt echter 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. Dit blijkt ook uit de jaarverslagen van het SodM (Staatstoezicht op de Mijnen): daarin staan, bijvoorbeeld voor de periode van 2007 tot en met 2012, 150 gevallen van lekkages en vermorsing met verontreinigende stoffen bij mijnbouwactiviteiten vermeld. Bij 30 van deze gevallen 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. Controle of de bodembeschermende voorzieningen van de boorplaats effectief zijn voor de bescherming van het grondwater door bijvoorbeeld grondwatermonitoring blijft dus belangrijk.

2.2.3 Blowout

De meest catastrofale calamiteit die kan optreden bij boren van diepe putten 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 neemt 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. 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 dan naar boven willen verplaatsen. Als dit ongecontroleerd gebeurt, kan dit een grote calamiteit veroorzaken aan maaiveld. Om ongecontroleerde situaties te voorkomen wordt bij het boren altijd gebruik gemaakt van zogenaamde blow-out preventers waarmee de put effectief kan worden afgesloten bij een calamiteit. Grote overdrukken komen in conventionele reservoirs vooral voor in het noorden van Nederland en offshore (Verweij, 2003). In Nederland is vooralsnog één catastrofale blow-out opgetreden tijdens het boren van een put op het vaste land. Het gaat hierbij om de blow-out bij 't Haantje in de omgeving van Sleen in 1965. In het algemeen is de kans op blow-outs in Nederland klein, maar nooit geheel uit te sluiten (Meiners, 2012; SodM, 2010).

2.3 Warmteuitstraling

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. Het bestaan van een temperatuurverschil tussen het opgepompte formatiewater in een geothermische put en het omringende ondiepe grondwater daarbuiten is dus inherent aan het bedrijven van geothermie. Aangezien het door het geothermiesysteem onttrokken formatiewater veel warmer is dan in de omringende ondiepere formaties en doordat de materialen die gebruikt worden voor de putconstructie

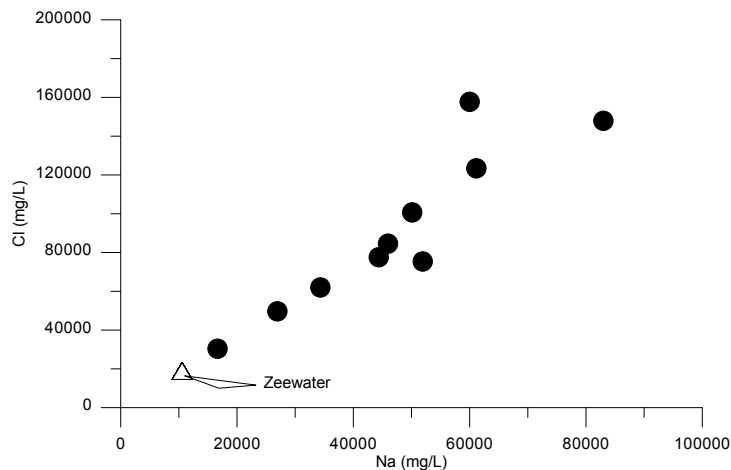
warmtegeleidend zijn, treedt thermische conductie en warmte-uitstraling naar de omringende aquifer altijd op. Te verwachten is dat de warmte-uitstraling bij geothermiesystemen voornamelijk op zal treden rond de productieput en in mindere mate voor de injectieput, aangezien de temperatuur van het geïnjecteerde water is verlaagd ($\sim < 50^\circ$) na de bovengrondse warmte-extractie. 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 (de la Loma Gonzales & Hartog, 2016b; van Lopik, Hartog, Zaadnoordijk, Cirkel, & Raoof, 2015). Uit deze studies komt naar voren dat de temperatuur van het grondwater direct rond de put fors kan oplopen en dat deze verhoging van de grondwatertemperatuur 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 grondwatertemperaturen leiden. Welke grondwaterkwaliteitsveranderingen door verhoogde grondwatertemperaturen kunnen ontstaan en in welke mate, is onbekend en waarschijnlijk sterk locatie-afhankelijk.

2.4 Lekkage van formatiewater

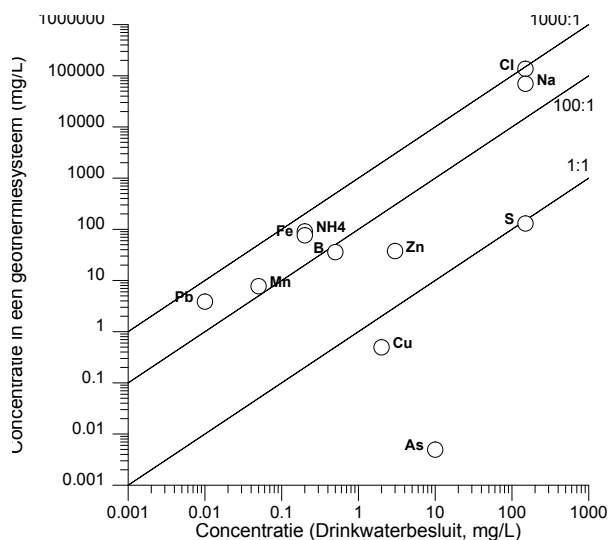
2.4.1 Samenstelling van formatiewater

De samenstelling van het formatiewater dat bij Nederlandse geothermiesystemen van grote diepte omhoog wordt gepompt, vormt een potentieel risico voor grondwaterkwaliteit van ondiepe watervoerende lagen. Dit formatiewater is gewoonlijk zeer zout (Figuur 2-1); de zoutconcentratie bedraagt in de regel meerdere malen die van zeewater (Hartog, 2015; Hartog & Cirkel, 2015). Zowel de concentraties chloride en natrium, die voornamelijk de zoutconcentratie bepalen, als de concentraties van andere elementen, zoals barium (Ba), verschillen sterk per geothermisch systeem, maar zijn 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 wel 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. Daarnaast zijn de componenten lood (Pb), boor (B), mangaan (Mn), IJzer (Fe) en ammonium (NH_4) meer dan 100 keer hoger dan de drinkwaternorm (Figuur 2-2).

De formaties met geothermische potentie komen in Nederland deels overeen met de lagen met (vroeger) winbare olie- en of gasvoorkomens. Afhankelijk van de hydrostatische druk en diepte waarop in Nederland geothermisch water gewonnen wordt, kunnen in de Nederlandse situatie dan ook forse hoeveelheden opgelost gas en in mindere mate olie meekomen. Daarnaast worden aan het formatiewater inhibitoren toegevoegd om o.a. de putcasings te beschermen tegen corrosie, scaling en biofouling. Deze stoffen kunnen afhankelijk van de toxiciteit en concentraties een aanvullend risico vormen bij lekkage.



FIGUUR 2-1 CONCENTRATIES NATRIUM EN CHLORIDE IN VERSCHILLENDE NEDERLANDSE GEOTHERMIESYSTEMEN. TER REFERENTIE IS DE SAMENSTELLING VAN ZEEWATER AANGEGEVEN (HARTOG, 2015, 2016).



FIGUUR 2-2 CONCENTRATIES AAN ANORGANISCHE COMPONENTEN IN EEN GEOTHERMIESYSTEEM IN NEDERLAND TEN OPZICHTE VAN MAXIMUM TOELAATBARE WAARDEN VOOR ZOVER OPGENOMEN IN HET DRINKWATERBESLUIT (HARTOG, 2016).

2.4.2 Lekkage uit injectieputten

Door het continu met hoge debieten (~100-200 m³/uur) 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 ook is gebleken bij een geothermiesysteem in Landau, Duitsland (tiefgeothermie.de, 2015). Ook geothermieputten in Frankrijk kennen een lange geschiedenis van integriteitsproblemen (Ungemach, 2001). Daarnaast is vanuit de olie- en gasindustrie bekend dat de injectie van het zoute afvalwater gepaard gaat met corrosie en falende putintegriteit (Hartog & Cirkel, 2015). 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 (Cooley & Donnelly, 2011). Of bij injecterende geothermieputten vergelijkbare problemen te verwachten zijn als bij (water)injecterende putten in de olie- en gasindustrie 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 samenhang met aantasting van de tubing in de put en de putkop, en nog niet met aantasting van de verschillende beschermende casings en cementeringen rond de put. Bij geothermische injectieputten staat de binnenkant van de casing in direct contact met het corrosieve formatiewater wat kan leiden tot aantasting van het bij de huidige generatie geothermieputten toegepaste onvoldoende corrosie-bestendige casingstaal.

Vanwege de verhoogde drukken en grote debieten zal aan de hand van de productiegegevens alleen het optreden van instantane grotere lekkages goed worden gedetecteerd. Door de grotendeels enkelwandige uitvoering en volledige cementeringen is het uitvoeren van annulaire drukmetingen, als detectiemethode voor lekkages, bij de huidige generatie geothermieputten eveneens niet mogelijk. Het is hierdoor erg moeilijk om tijdig kleinere lekkages te registreren, omdat deze weinig effect hebben op de gemeten debieten en drukken. Deze lekkages kunnen echter op langere termijn tot relatief grote totale lekverliezen leiden. Het in potentie weglekkende zoute formatiewater vormt een duidelijke bedreiging voor het zoete grondwater. Ter illustratie, uitgaande een chloride concentratie van 150.000 mg/l van formatiewater (ongeveer het maximum in Figuur 2-1), kan de menging van 1 m³ formatiewater met zoet grondwater leiden tot overschrijding van de drinkwaternorm in 1000 m³ grondwater, uitgaande van een norm voor chloride van 150 mg/l.

2.4.3 Lekkages bij ontwikkelen

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 m³ per put. Tijdens de aanleg van de productie- en injectieput wordt dit vrijkomende formatiewater gewoonlijk tijdelijk opgeslagen in foliebassins (Figuur 2-3). Hierbij kunnen zowel morsingen als lekkages uit de opslag plaatsvinden.

In de afgelopen jaren zijn meerdere voorbeelden bekend van vrijkomen van formatiewater bij het ontwikkelen van geothermiesystemen. Zo is in 2009 via een overstort bij een productietest vrijkomend formatiewater geloosd op het oppervlaktesysteem. Hierdoor raakte het oppervlaktewater sterk verontreinigd met (vooral) zouten, voor andere gebruiksdoeleinden kon men geen water inlaten en het Hoogheemraadschap van Delfland moest extra water inlaten voor doorspoeling van het watersysteem (Hartog & Cirkel, 2015). 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 (SODM, 2016). Verder is SodM van mening dat de hiervoor geldende Nederlandse Richtlijn Bodembescherming (NRB) aanvulling behoeft, bijvoorbeeld wat betreft kwaliteitseisen van gebruikte materialen en gebruik- en werkwijze bij tijdelijke opslag (SodM, 2017).



FIGUUR 2-3 TIJDELIJK OPSLAG VAN FORMATIEWATER BIJ PUTONTWIKKELING

2.5 Schatting van het lekdebiet tussen twee watervoerende pakketten bij een onvoldoende afgesloten annulus

De ruimte tussen casing en boorgatwand wordt volgens wettelijke voorschriften en industriestandaarden van onderen af tot maaiveld opgevuld met cement. Indien deze cementering niet of onvolledig plaatsvindt, ontstaat er een pad waarlangs verticale vloeistofstroming kan optreden tussen diepere en ondieper gelegen watervoerende pakketten. De omvang van deze kortsluitstroming hangt hierbij, uitgaande van gelijke dichtheid, af van het stijghoogteverschil tussen het onderliggende en bovenliggende watervoerende pakket en de weerstand die deze stroming in de buitenste annulus (ruimte tussen de buitenste casing en de formatie) ondervindt. Deze weerstand wordt bepaald door de mate waarin de opening is opgevuld, over welke afstand (dikte scheidende laag) en met welk materiaal (NOGEPA, 2016; Royal HaskoningDHV, 2015).

De vloeistofstroming zal kleiner zijn als de overgebleven annulus ruimte na onvolledige cementatie opgevuld wordt met sedimenten die weerstand bieden tegen stroming, dan wanneer de annulus open blijft. Ook naarmate de afstand tussen twee kortgesloten watervoerende pakketten groter is, of het stijghoogteverschil tussen beide pakketten kleiner is, neemt de vloeistofstroming af. Veronderstellen we stijghoogte (verwaarloosbaar stijghoogte effect van het lek) en weerstand constant in de tijd, dan wordt de verticale flux (NOGEPA, 2016; Royal HaskoningDHV, 2015)

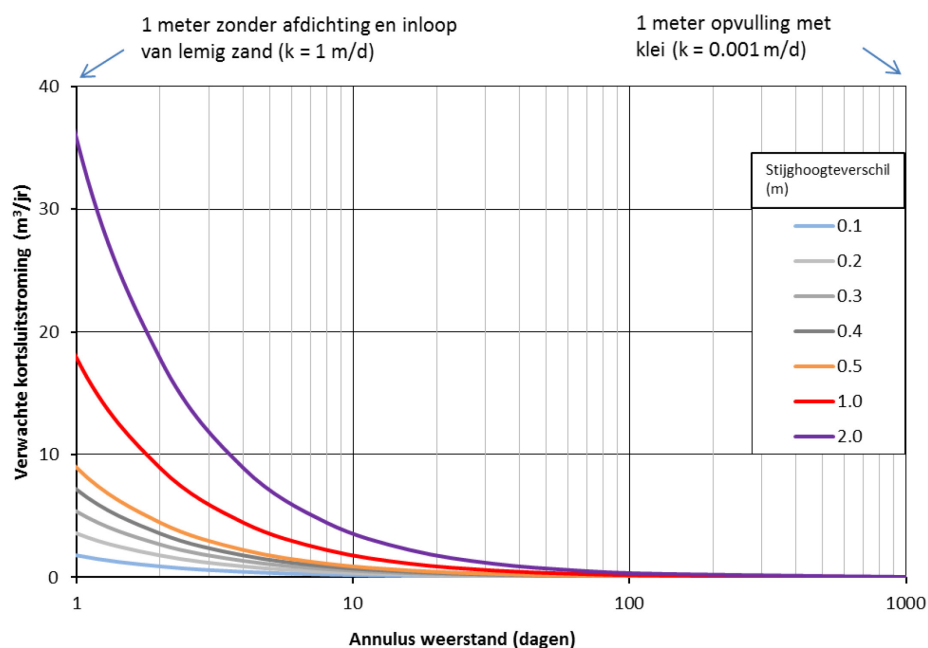
$$Q_{\text{vert}} = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{c} \cdot A \cdot t$$

waarin: Q_{vert} = verticale kortsluitstroming (m^3/d), φ_1, φ_2 = de stijghoogte in de twee gescheiden aquifers (m), c = de weerstand (d), A = het doorstroomde oppervlak (m^2) en t = de tijdsduur (d).

Uitgaande van een standaard 16-inch boorgat en een casing van 13 3/8-inch is er per boorgat een open ringvormige ruimte (annulus) van maximaal 0.05 m^2 voor vloeistofstroming (volledig afwezige afdichting). Het invallen van sedimenten en de eventuele zwelling/deformatie van de scheidende laag zal in de regel leiden tot een kleiner doorstroomd oppervlak en een hydraulische weerstand tussen casing en boorgat die al snel oploopt van enkele dagen tot enkele tientallen dagen. Uitgaande van doorboring van een kleilaag met een dikte van 1 meter, bedraagt de weerstand voor verticale stroming door de

annulus 1 dag bij opvulling met lemig zand met een doorlatendheid van 1 m/d en 1000 dagen bij een opvulling met klei met een doorlatendheid van 0.001 m/d.

In Figuur 2-4 is de relatie weergegeven tussen de annulus weerstand en de te verwachten kortsluitstroming over 30 jaar voor verschillende waarden van het stijghoogteverschil. Fluxen van enkele tot tientallen kubieke meter per jaar zullen optreden bij stijghoogteverschillen van enkele decimeters tot meters. Deze stijghoogteverschillen treden vooral op in de nabijheid van grondwateronttrekkingen voor bijvoorbeeld industrie en drinkwatervoorziening.



FIGUUR 2-4 RELATIE TUSSEN DE OMVANG VAN DE KORTSLUITSTROMING TUSSEN TWEE WATERVOERENDE PAKKETTEN EN DE STROMINGSWEERSTAND DOOR DE ANNULUS BIJ VERSCHILLENDE WAARDEN VOOR HET STIJGHOOGTEVERSCHIL (NAAR: ROYAL HASKONINGDHV, 2015; NOGEP, 2016).

2.6 Schatting van het lekdebiet uit een geothermische injectieput en de beïnvloedingszone

2.6.1 Schatting van het lekdebiet uit een geothermische injectieput

Of en in welke mate er bij het lek raken van een geothermieput formatiewater naar het omringende grondwater optreedt, hangt af van een aantal zaken. Allereerst treedt er alleen lekkage naar buiten toe op als er een hogere druk in de put heerst ten opzichte van de druk in de doorsneden watervoerende pakketten. In Nederland heeft de ondergrond vrijwel overal een hydrostatische drukverdeling (Verweij, 2003) en wordt aan de productiekant van een geothermie doublet onttrokken met een onderwaterpomp. Aan de productiekant zal dan ook water de put instromen bij een eventuele lekkage als de put in bedrijf is. Als de put buiten bedrijf is zal de vloeistofkolom door de hogere dichtheid van het formatiewater terugzakken naar de bronformatie.

Aan de injectiekant is de situatie anders, zo heerst er in de injectieput een veel hogere druk dan in het watervoerende pakket. De hoogte van deze druk is mede afhankelijk van de gehanteerde injectiedruk. Om scheurvorming en seismiciteit in het reservoir waar geïnjecteerd wordt te voorkomen wordt een maximale injectiedruk opgelegd door de toezichthouder. Hiervoor wordt de volgende vergelijking aangehouden (SodM & TNO-AGE, 2013):

$$THP_{\max} = Dt * (0.135 - i_{inj})$$

Waarin: $THP_{\max}$ = Maximale Tubing Head Pressure (bar), Dt = Diepte van de injectieput van maaiveld tot de top van het reservoir (m), i_{inj} = Hydraulische gradiënt injectiewater als functie van zoutgehalte en temperatuur (bar/m)

Bij een diepte Dt van 2000 meter en een i_{inj} van 0.105 geeft dit een $THP_{\max}$ van 60 bar. Nu zal in de praktijk de injectiedruk meestal lager zijn dan deze hoge maxima, maar injectiedrukken van >10-20 bar zijn gewoon.

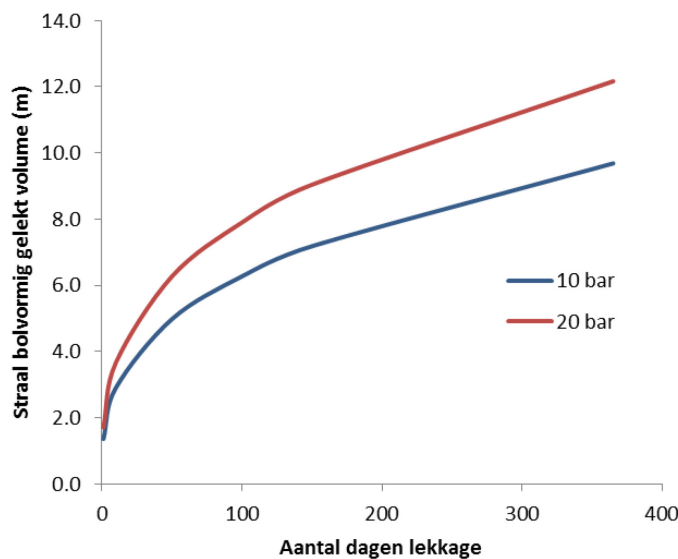
De lekkage is naast het drukverschil ook afhankelijk van de grootte van het lek en van de doorlatendheid van de aquifer. De grootte van het lek is uiteraard een onbekende waar een aanname voor gedaan moet worden. Bij een vuistregel opgesteld voor lekke stijgbuizen van putten (Maas, 2010), wordt het lek gezien als een piepklein putje in een oneindig driedimensionaal poreus medium. Door de geringe omvang van het lek wordt er van uitgegaan dat het lek een verwaarloosbare invloed heeft op de stijghoogtes in de omgeving. Daarmee is de grootte van het lekdebiet afhankelijk van slechts het stijghoogteverschil binnen en buiten de casing, de doorlatendheid van het poreuze medium en de dimensie van het lek zelf (Leunk & Raat, 2011; Maas, 2010):

$$Q_{leak} \approx \Delta\phi k \phi$$

Waarin: Q_{leak} = Lekdebiet (m^3/d), $\Delta\phi$ = Stijghoogteverschil tussen het water in de put en de aquifer (m), k = Doorlatendheid van de aquifer (m/d), ϕ = De diameter van een cirkelvormig lek (m)

Uitgaande van een diameter van 1 mm en een doorlatendheid van het watervoerende pakket van 40 m/d resulteert dit in een lekdebiet van 3.9 m^3/d (1423 m^3/jr) bij een $\Delta\phi$ van 10 bar.

Voor een porositeit van 0.38 is vervolgens een bolvormige beïnvloedingsfeer (geen achtergrondstroming) berekend voor verschillende drukken en duur van de lekkage (Figuur 2-5, Figuur 2-6).

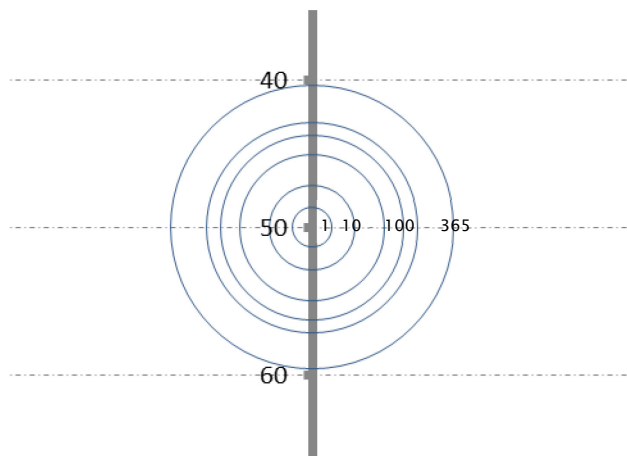


FIGUUR 2-5 ONTWIKKELING VAN DE STRAAL VAN HET (BOLVORMIGE) GELEKTE VOLUME UIT EEN INJECTIEPUT ALS GEVOLG VAN EEN KLEIN LEK (DIAMETER 1 MM) EN EEN DOORLATENDHEID VAN 40 M/D.

2.6.2 Schatting omvang en vorm van het beïnvloedingsgebied

Het bolvormige gelecte volume heeft naar schatting na 365 dagen een straal van 9.7 meter bij een stijghoogteverschil van 10 bar en 12.2 meter bij 20 bar stijghoogteverschil. Gezien de aannames is dit een grove schatting. Aan de ene kant is de gebruikte afmeting van het lek van 1 mm erg klein, bijvoorbeeld vergeleken met de resolutie van sommige wireline tools (paragraaf 3.3.2). Bij een grote lekkage is het uitgangspunt van verwaarloosbare beïnvloeding van stijghoogtes in de omgeving mogelijk niet meer geldig. Anderzijds is voor het afleiden van de vuistregel aangenomen dat de wet van Darcy geldig is. Gezien de grote drukverschillen bij het lek zou echter deels turbulente stroming kunnen optreden waardoor het debiet lager zou uitvallen. Daarnaast zou een lek zichzelf mogelijk kunnen dichten door biologische en/of chemische processen of kan het lek juist groter worden door voortschrijdende corrosie en erosie. Ook bij scheurvorming als gevolg van stress door opwarmen en afkoelen van het staal verwachten wij dat een opening groter zal zijn dan de hier aangenomen diameter van 1 mm.

Praktijkcijfers van lekkages zijn echter zeer beperkt beschikbaar. Uit een tracer leak off test door Ungemach, Ventre, Nicolaon, and GPC (2002) volgde een verlies van enkele tientallen m³ gedurende de test. Het ging hierbij om een lekkage op ca. 100 meter diepte in een kalksteen aquifer. Om welk drukverschil het hierbij ging en hoe lang de tracer uitstroomde is echter niet vermeld.



FIGUUR 2-6 ONTWIKKELING (1 DAG TOT 365 DAGEN) VAN EEN BOLVORMIGE LEKKAGE VANUIT EEN GAATJE MET EEN DIAMETER VAN 1 MM EN EEN STIJGHOOGTEVERSCHIL VAN 10 BAR (ZIJAAANZICHT)

In bovenstaande is uitgegaan van een te verwaarlozen regionale grondwaterstroming. Consequentie van deze aanname is dat de bel symmetrisch rond het lek zal uitgroeien. Daarnaast is het effect van dichtheidsverschillen tussen de weglekkende vloeistof en het van nature aanwezige grondwater niet in beschouwing genomen. Beide aspecten hebben consequenties voor de vorm van de bel weglekkend formatiewater. In het geval van significante achtergrondstroming of een zeer klein lekdebiet, zal de bel vervormd worden in de stromingsrichting van het grondwater en ontstaat er een boot- of sigaarvormige verontreinigingspluim in benedenstroomse richting. Door Ceric and Haitjema (2005) is een methode ontwikkeld om te verkennen of uitgegaan kan worden van cirkelvormige beïnvloeding of dat er vervorming optreedt. Hierbij wordt uitgegaan van een volkomen filter, geen dichtheidseffecten en constante onttrekking of injectie. De mate van vervorming door achtergrondstroming wordt hierbij uitgedrukt in de dimensieloze parameter $\tilde{T}$. Bij $\tilde{T} < 0.1$ is sprake van een cirkelvormig beïnvloedingsgebied, bij $0.1 < \tilde{T} < 1.0$ kan bij benadering nog steeds worden uitgegaan van een cirkelvormige invloed en bij $\tilde{T} > 1.0$ is sprake van een boot- of zelfs sigaarvorm (Figuur 2-7). Ceric and Haitjema (2005) geven de volgende vergelijking voor $\tilde{T}$

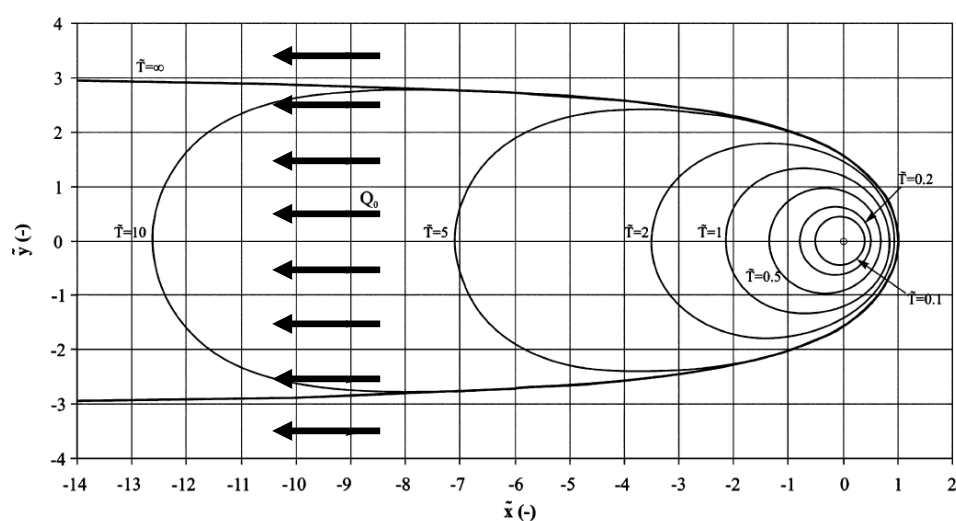
$$\tilde{T} = \frac{2\pi(kDi)^2 T}{nDQ}$$

Waarin: k = doorlatendheid (m/d), D = dikte van het watervoerende pakket, i = hydraulische gradiënt (-), T = lekkageduur (d), n = porositeit (-) en Q = het geïnjecteerde debiet (m³/d).

Omdat Ceric and Haitjema (2005) uitgaan van een cilindervormige in plaats van een bolvormige injectie is er voor de vooralsnog berekening van uitgegaan dat het lek elke meter over de diepte voorkomt. Daarnaast is uitgegaan van een doorlatendheid van 40 m/d, een porositeit van 0.3, een T van 365 dagen en een D van 50 meter. Uit deze berekening blijkt dat alleen bij heel steile gradiënten (bijvoorbeeld dicht bij een grondwateronttrekking) vervorming van de cirkelvormige beïnvloeding is te verwachten binnen de tijd waarin een lekkage gedetecteerd zou moeten worden (hier gekozen voor 1 jaar)(Tabel 2-1). Bij een enkel lek ontstaat zoals aangegeven echter een bolvormige of ellipsoïde verontreiniging. Deze bol of ellipsoïde zal eerder vervormen dan een cilinder, doordat de straal minder snel toeneemt met de tijd dan bij een cilinder. In dit geval bedraagt dit verschil een factor 2.4. Echter zelfs bij deze factor blijft in de meeste gevallen de aanname van een cirkel (bol) vormige beïnvloeding een redelijke benadering.

TABEL 2-1 VERVORMING VAN EEN CIRKELVORMIG BEÏNVLOEDINGSGEBIED ($\tilde{T}$) ALS FUNCTIE VAN DE HYDRAULISCHE GRADIËNT IN HET WATERVOERENDE PAKKET BIJ EEN CILINDERVORMIGE INJECTIE VAN 3.9 M³ /D/M VOOR EEN LEKKAGE DUUR VAN ÉÉN JAAR?.

Hydraulische Gradiënt i (-)	Vervorming $\tilde{T}$ (-)
0.01	0.859
0.004	0.137
0.002	0.034
0.001	0.009
0.0001	0.000
0.00005	0.000



FIGUUR 2-7 RELATIEVE VORM VAN DE INJECTIEBEL BIJ VERSCHILLENDE WAARDEN VOOR $\tilde{T}$ (AANGEPAST NAAR: CERIC AND HAITJEMA (2005). AFSTANDEN ZIJN DIMENSIELOOS.

Het weglekkende thermaal water heeft zowel een hogere temperatuur als een (in Nederland veelal fors) hogere zoutconcentratie (paragraaf 2.4.1). De dichtheid van het formatiewater is door dit hoge zoutgehalte eveneens fors hoger dan het grondwater in het watervoerende pakket, maar wordt initieel voor een deel gecompenseerd door de hogere temperatuur wat een dichtheidverlagend effect heeft. De dichtheid van het formatiewater zal gezien de hoge zoutconcentraties echter altijd flink hoger zijn dan het omringende grondwater en waarschijnlijk een dominante invloed hebben op de stroming. De mate waarin dichtheidstroming dominant kan zijn ten opzichte van convectieve stroming als gevolg van de lekkage kan worden uitgedrukt in een zogenaamde “mixed convection ratio” M (Ward, Simmons, & Dillon, 2007). We gaan er hierbij van uit dat de lekkage dominant is ten opzichte van de achtergrondstroming. Omgeschreven voor een bolvormig volume weglekkend formatiewater krijgen we de volgende vergelijking voor M :

$$M = \frac{4\pi r^2}{Q} \bar{\alpha} k$$

Waarin: k = doorlatendheid (m/d), r = straal van het bolvormige gelekt volume (m), $\bar{\alpha}$ = ratio van het dichtheidsverschil (-) en Q = lekkage (m³/d). Als $M < 1$ dan domineert convectieve stroming als gevolg van de lekkage, bij $M > 1$ domineert dichtheidstroming. Voor een dichtheid van 1080 kg/m³ voor het formatiewater met een temperatuur van 40 °C en een zoutgehalte van ca. 100 g/kg (van Lopik et al., 2015), het voorbeeld debiet van 3.9 m³/d, een straal van 1 meter en een doorlatendheid van 40 m/d resulteert in een M van 19.1. Stroming als gevolg van dichtheidseffecten is dus dominant. Bij een lekkage zal de bel formatiewater in het watervoerende pakket naar beneden zakken langs de put. Dit heeft consequenties voor de vorm van de bel weggelekt formatiewater. Nader onderzoek naar de verspreiding van weglekkend formatiewater is dan ook gewenst.

2.7 Synthese

Het aanleggen en exploiteren van een geothermiesysteem is een potentieel bodem- en grondwater bedreigende activiteit. Een geothermieput zal het grondwater rond de put opwarmen, wat mogelijk de kwaliteit van het water kan beïnvloeden. Het risico wordt daarnaast gevormd door onbedoelde migratie van verontreinigende stoffen door versmering van al aanwezige verontreinigingen tijdens boren of door kortsluitstroming bij onvoldoende goede afdichting van beschermende kleilagen. Een voorbeeld hiervan is indringing van brak of zoutwater via een onvoldoende gecementeerde kleilaag. Anderzijds vormt het verpompen en tijdelijk opslaan van diep formatiewater zelf een risico. Het kan hierbij gaan om falen van opslag voorzieningen zoals foliebassins door technische of operationele fouten, maar ook om lekkages uit leidingen en uit de putten zelf. Dit laatste is niet hypothetisch zoals blijkt uit een aantal recente lekkages en integriteitsproblemen in Nederland en Duitsland.

Door het hydrostatische drukverschil in de Nederlandse ondergrond vormt hierbij vooral het falen van de injectieput een risico. Om een beeld te krijgen van de orde grootte van lekkages zijn een aantal verkennende berekeningen uitgevoerd. Een onopgemerkte lekkage uit een injectieput kan resulteren in lekkage van honderden kubieke meters zeer zout formatiewater in zoete watervoerende pakketten. Deze lekkage is beduidend groter dan bijvoorbeeld de te verwachten kortsluitstroming bij een onvoldoende afdichting van de annulus bij een kleilaag. Bij dit laatste gaat het enkele tot hooguit enkele tientallen m³/jr. De verwachting is dat een lekkage uit een injectieput een bel zal vormen rond de put. Een pluim is alleen aannemelijk bij zeer hoge grondwatersnelheden in de directe nabijheid van een grondwateronttrekking. Wel zal dit water door het forse dichtheidsverschil uitzakken naar de onderkant van het watervoerende pakket. Nader onderzoek naar de verspreiding van eventueel weglekkend water is gewenst.

3 Monitoring bij geothermieputten

3.1 Basisprincipes bij monitoring van geothermiesystemen

Er zijn verschillende redenen om te monitoren bij een potentieel milieubedreigende activiteit als geothermie (Hunt, 2001):

1. Het verkrijgen van data op basis waarvan rationele en goed geïnformeerde management beslissingen genomen kunnen worden door ontwikkelaars en toezichthouders;
2. Verifiëren dat genomen managementbeslissingen ook resulteren in de gewenste uitkomsten;
3. Het verkrijgen van vertrouwen bij (publieke) stakeholders in de genomen beschermende maatregelen voor milieu en het bijzonder drinkwater;
4. Het leveren van een bijdrage aan het opbouwen van kennis over geothermiesystemen en hoe deze op een voor het milieu verantwoorde manier te ontwikkelen zijn.

Voor het goed vormgeven van een monitoringsprogramma dient een aantal basisprincipes (Hunt, 2001) te worden gerespecteerd:

1. Met monitoring moet gestart worden voordat begonnen wordt met het ontwikkelen van een geothermiesysteem, zodat een goede baseline kan worden verkregen.
2. Monitoring moet worden uitgevoerd met een frequentie die geschikt is om natuurlijke variaties te onderscheiden van door de aanleg en exploitatie geïnduceerde veranderingen
3. Er moet op geschikte locaties en met geschikte methodes gemeten worden zodat de kans om gebeurtenissen te missen zo klein mogelijk is.
4. De verzamelde data moet worden geïnterpreteerd en met regelmaat worden vergeleken met vooraf vastgestelde criteria. Geen verandering is hierbij net zo belangrijk als een verandering en is geen geldige reden om de monitoring te beëindigen. Wel kan eventueel (afhankelijk van de meetmethode en het doel) de meetfrequentie worden verlaagd. na een lange periode waarin geen veranderingen zijn opgetreden
5. De verzamelde data moeten betrouwbaar zijn. Het meetinstrumentarium moet regelmatig (minimaal voor elke meetronde) worden gekalibreerd en metingen moeten worden uitgevoerd door een competente persoon. Deze persoon is zich goed bewust van de reden van de metingen en heeft bij voorkeur eerder vergelijkbare metingen uitgevoerd.
6. Meetlocaties moeten duidelijk worden aangegeven. Het meetinstrumentarium moet worden voorzien van deugdelijke beschermende constructies en regelmatig worden onderhouden.

Tenslotte moet men zich bij het vormgeven van een monitoringsprogramma realiseren dat:

1. Het monitoringsprogramma hoogstwaarschijnlijk zal lopen over meerdere jaren of zelfs decennia. Om deze reden moeten alle meetmethodes en meetdata worden gedocumenteerd en opgeslagen in een geschikt en langjarig toegankelijk (publiek beheerd) archief;
2. Gedurende de levensduur van geothermiesystemen zullen waarschijnlijk personele wisselingen optreden. Gedegen overdracht van kennis en methodes is dan cruciaal

opdat metingen op een vergelijkbare manier worden uitgevoerd en metingen compatibel blijven;

3. Het programma zal waarschijnlijk aangepast moeten worden gedurende de levensduur van een geothermiesysteem.

Bovenstaande impliceert dat monitoring dus niet alleen het fysiek valideren, verifiëren of detecteren van een 'probleem' betreft, maar ook een goede rolverdeling en verantwoordelijkheid tussen operator en regionale of nationale overheid vereist als integraal onderdeel van de monitoringsinspanning.

3.2 Vereisten vanuit de Nederlandse wet- en regelgeving voor bewaking van de grondwaterkwaliteit bij (diepe) mijnbouwactiviteiten

Geothermieactiviteiten zijn gereguleerd middels de algemene mijnbouwwetgeving die ook wordt toegepast voor olie- en gasexploitatie. Hierbij moet opgemerkt worden dat in het verleden (te) soepel is omgegaan met de handhaving van deze regels bij de aanleg en exploitatie van geothermieputten. Onder andere na het aantreffen van koolwaterstoffen in de volumestroom is besloten om de handhaving aan te scherpen. Het in Nederland gebruikelijke, systeemgerichte en risico-gestuurde toezicht bleek voor deze jonge sector niet geschikt en meer toezicht bleek noodzakelijk (SodM, 2017).

Milieu-aspecten tijdens activiteiten met ook voor geothermieputten gebruikelijke mobiele installaties (boren, work-overs, etc.) worden gereguleerd door het Besluit Algemene Regels Milieu Mijnbouw (BARMM). Milieu-aspecten tijdens normale exploitatie worden gereguleerd via generieke wet- en regelgeving zoals vastgelegd in o.a. de wet Milieubeheer, de wet Bodembescherming, het Activiteiten besluit en de Waterwet. Voorwaarden ten aanzien van milieubescherming zijn in dit stadium vergelijkbaar met die voor andere industriële activiteiten, en zijn gericht op het voorkomen van verontreiniging van lucht, bodem en grond- en oppervlaktewater. Het verlenen van vergunningen en het toetsen van de naleving van zowel de specifieke mijnbouwwetgeving als de generieke milieuwetgeving wordt uitgevoerd door het Staatstoezicht op de Mijnen (SodM).

In Nederland is er vergaande regelgeving ter voorkoming van bodemverontreiniging bij bedrijfsmatige activiteiten. Vereisten aan installaties en de inrichting van terreinen zijn vastgelegd in de Nederlandse Richtlijn Bodembescherming (NRB). Deze richtlijn geeft voor bodembedreigende, bedrijfsmatige activiteiten een beschrijving van geschikte combinaties van voorzieningen en maatregelen. Deze maatregelen en voorzieningen zijn erop gericht om tot een verwaarloosbaar bodemrisico te komen (Categorie A). Maatregelen omvatten activiteiten gericht op controle en onderhoud van beschermende voorzieningen zoals onderdelen van installaties, vloeistofdichte of vloeistofkerende vloeren en verhardingen en opvangvoorzieningen zoals lekbakken. Daarnaast is toezicht vereist op het goed functioneren van de voorzieningen en gerichte interventie in het geval van ongelukken.

Bij inrichtingen waar gewerkt wordt met bodembedreigende stoffen moet voorafgaand aan de activiteiten een bodemkwaliteitsonderzoek (nulsituatie onderzoek) worden uitgevoerd. Na beëindiging van de activiteiten of inrichting moet worden vastgesteld of de bodemkwaliteit ten opzichte van de beginsituatie is veranderd (eindsituatie onderzoek). Bij verslechtering moet de bodemkwaliteit worden hersteld in de oorspronkelijke situatie (nul situatie) of de achtergrondwaarden uit het Besluit bodemkwaliteit. Het onderzoek richt zich alleen op stoffen die tijdens de bedrijfsactiviteit in de bodem kunnen komen.

Voor mijnbouwlocaties is op basis van het BARMM een verwaarloosbaar bodemrisico vereist. Dit kan worden verwezenlijkt door voorzieningen zoals onder meer vloeistofdichte putkelders, foliebassins en vloeistofkerende verhardingen en opvangvoorzieningen in combinatie met regelmatige inspectie. Op de hoeken van de boorlocatie worden daarnaast minimaal 4 peilbuizen geïnstalleerd. Deze monitoringsputten zijn gericht op mogelijke verontreiniging van het ondiepe (freatische) grondwater door lekkages en vermorsingen aan de oppervlakte en zijn typisch niet uitgevoerd met filters in diepere watervoerende pakketten. In bijzondere gevallen wordt hier van afgeweken. Een voorbeeld hiervan is het plaatsen van diepere monitoringsfilters bij een gasput in het noorden van Nederland (Langezwaag). Bij deze gasput was na aanleg onvoldoende vertrouwen in de buitenste cementering die de doorboring van een kleilaag tussen twee watervoerende pakketten moest afdichten. Hierdoor kon in theorie brak tot zout grondwater via de annulus tussen casing en formatie naar het bovenliggende watervoerende pakket stromen. Om dit te bewaken worden in de monitoringsfilters de druk en het zoutgehalte gemeten.

Reguliere monitoring van de waarnemingsputten op mijnbouwwerken wordt uitgevoerd conform NEN 5744. Monsternamen worden zo vaak als nodig uitgevoerd, maar minimaal vóór de start van de activiteiten met mobiele installaties, binnen 6 maanden na het beëindigen van de activiteiten met mobiele installaties en minimaal elke 5 jaar daarna gedurende de productieve levensduur van de put. Monitoringsresultaten dienen minimaal 5 jaar te worden bewaard en moeten op aanvraag direct beschikbaar zijn voor SodM. Elke aanwijzing voor verontreiniging dient direct te worden gemeld aan SodM. Daarnaast moeten direct maatregelen worden getroffen om vervuilde grond en grondwater te saneren. Na afronding van activiteiten met mobiel materieel wordt de winlocatie, zoals al aangegeven, gereguleerd via generieke milieuwetgeving. In de praktijk blijven de voorafgaande aan de boorfase geplaatste ondiepe peilbuizen actief gedurende de productieve levensduur van de boorlocatie. Na afdichten en verlaten van de diepe putten en sluiting van de boorlocatie worden ook de monitoringsputten buiten gebruik gesteld.

Gedurende productie worden annulaire drukken gemeten om de integriteit van de boorput te borgen. Abnormale drukken moeten direct aan SodM worden gerapporteerd en acties moeten worden ingezet om de putintegriteit te controleren en zo nodig te herstellen. Probleem bij de huidige generatie geothermieputten is dat door het ontbreken van meerdere verbuizingen (enkelwandige systemen) het in het geheel niet mogelijk is om annulaire drukken te meten.

Zoals al aangegeven, worden in de Nederlandse praktijk normaliter geen monitoringsfilters in (semi-) afgesloten watervoerende pakketten geplaatst. Het ontbreken van monitoring in deze watervoerende pakketten wordt gemotiveerd door verwijzing naar het bestaan van meerdere barrières, i.e. meerdere gecementeerde verbuizingen in combinatie met drukmetingen en de analogie met bemeten dubbelwandige opslagsystemen. In dat geval is aanvullende grondwaterkwaliteitsmonitoring mogelijk niet verplicht dankzij een verwaarloosbaar bodemrisico conform de NRB. Bij de huidige in de geothermiesector gebruikelijke enkelwandige systemen of systemen met een tot maaiveld gecementeerde annulus zijn zoals gezegd deze metingen niet mogelijk en is een verwaarloosbaar bodemrisico niet te garanderen. Aanvullende grondwatermonitoring is ons inziens gezien de corrosiegevoeligheid en bodembedreigende vloeistoffen dan ook een minimale vereiste bij deze geothermie(injectie)putten.

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 (SODM, 2016). Verder is SodM van mening dat de hiervoor geldende Nederlandse Richtlijn Bodembescherming (NRB) hiervoor aanvulling behoeft, bijvoorbeeld wat betreft kwaliteitseisen van gebruikte materialen en gebruik- en werkwijze.

3.3 Monitoringmethodes ter bescherming van ondiepe watervoerende lagen

In de wetenschappelijke en grijze literatuur is zeer summier informatie beschikbaar over specifiek op grondwaterbescherming gerichte monitoring m.b.t. geothermie. Als over milieueffecten en monitoring daarvan wordt gesproken, heeft dit veelal betrekking op licht, geluid, emissies, trillingen en geïnduceerde seismiteit (Agemar, Weber, & Schulz, 2014; Rybach, 2003). Als er al ingegaan wordt op effecten op de grondwaterkwaliteit wordt zonder verdere onderbouwing aangenomen dat deze effecten verwaarloosbaar zijn (Rybach, 2003). Uit de bevindingen in hoofdstuk 2 blijkt echter dat deze aanname op z'n minst aanvechtbaar is. Toch moet worden geconcludeerd dat monitoring bij geothermiesystemen zich vooral richt op voor de bedrijfsvoering relevante aspecten (productietemperaturen, debieten, injectiviteit, scaling, corrosie, ...) (Seibt, Kabus, Wolfgramm, Bartels, & Seibt, 2010). Uiteraard is een deel van deze informatie (o.a. debieten, temperaturen, corrosie) eveneens relevant voor het monitoren van eventuele lekkages of beïnvloeding van de grondwaterkwaliteit in de doorboorde, zoete watervoerende pakketten. In het onderstaande geven we een overzicht van gebruikte monitoringstechnieken die gericht zijn op putintegriteit en grondwaterbescherming. Een deel van deze technieken wordt ook daadwerkelijk toegepast bij geothermieputten, andere minder of niet. Daarnaast heeft elke techniek voor en nadelen qua ontwerp, installatie, detectiemogelijkheden kosten etc.. Onderstaande geeft een eerste overzicht van deze aspecten.

3.3.1 Meten van annulus drukken

Bij olie- en gasputten is het vrij gebruikelijk om de buitenste casings tot aan maaiveld door te laten lopen. Lage enthalpie geothermieputten worden meestal uitgevoerd met een enkele telescopisch vormgegeven casing tot in het reservoir. Gezien de thermische stress die op deze casing wordt uitgeoefend is een uniforme, volledige cementatie noodzakelijk over de volledige lengte. Bij de Nederlandse putten is er geen annulus die gemonitord kan worden met uitzondering van een paar doubletten waar de cementering problematisch was en (onbedoeld) een te bemeten B-annulus (annulaire ruimte tussen de productie casing en de surface casing of de conductor casing) ontstond (Ikenwilo, 2016).

Bij olie- en gasputten is het (al dan niet online) meten van de druk en temperatuur in de verschillende annuli een belangrijk onderdeel van het bewaken van de putintegriteit. Deze bewaking is opgenomen in de vigerende mijnbouw wet- en regelgeving. De druk in de annuli zal variëren afhankelijk van de productie door opwarming en uitzetting van de vloeistoffen in de annuli. Afwijkingen van deze variaties zijn een indicatie voor lekkages. Dergelijke anomalieën moeten in Nederland altijd worden gemeld aan de toezichthouder SoDM. Vervolgens kan indien nodig de productie worden gestopt en nader onderzoek worden ingesteld.

Door het ontwerp van de huidige generatie geothermieputten is door het ontbreken van annulaire ruimte (zie bijlage I) het meten van annulaire drukken normaliter niet mogelijk als onderdeel van het bewaken van de putintegriteit (Ikenwilo, 2016). Ook bij buitenlandse geothermiesystemen (Frankrijk, Duitsland) lijkt het meten van de annulaire druk en temperatuur niet standaard. Wel wordt verhoudingsgewijs meer aandacht besteed aan het isoleren van de put van ondiepe zoete aquifers. Het geothermiesysteem Illkirch-Graffenstaden in Frankrijk is bijvoorbeeld uitgevoerd met drie tot aan maaiveld gecementeerde casings om de kwetsbare Rijn-aquifer (0-120 m-mv) te beschermen (Ravier,

Baujard, Dalmais, Maurer, & Cuenot, 2016). Ook de Duitse putten zijn veelal meerwandig uitgevoerd. Bij een aantal van deze putten is de B-annulus niet volledig tot aan maaiveld gecementeerd en zijn er mogelijkheden om annulaire drukmetingen uit te voeren (Plenefisch et al., 2015).

3.3.2 Geofysische metingen met 'wireline-tools'

Naast continue monitoring is het in de olie- en gasindustrie gebruikelijk om periodiek de toestand van de put te inspecteren. Het gaat hierbij zowel om de toestand van de casing(s) als de toestand van de cementering. Hiervoor zijn door de industrie verschillende technieken ontwikkeld. Voor deze metingen moeten de ESP (Electrical Submersible Pump) en de productiepijp worden uitgebouwd met een workover rig. Een dergelijke operatie kost al snel één tot anderhalve week exploitatie en is kostbaar (DAGO, 2015; Ungemach et al., 2002). Geothermie operators zijn inmiddels door SodM verplicht om een wanddikte log uit te voeren om een beeld te krijgen van corrosie.

Belangrijke vraag blijft de frequentie voor het uitvoeren van dergelijke metingen. Door de noodzaak van het uitbouwen van de put lijkt een jaarlijkse inspectie te kostbaar voor de meeste operators en wordt een frequentie van 5 jaar voorgesteld door DAGO. In Frankrijk wordt bij o.a. Soultz, Rittershofen en Illkirch-Graffenstaden verschil gemaakt tussen de injectiebron en de onttrekkingsbron voor de frequentie van geofysische metingen in de putten (Ravier et al., 2016). Voor de injectiebron wordt een frequentie van eens in de 3 jaar aangehouden en voor de onttrekkingsbron een frequentie van eens per 6 jaar. Dit is primair ingegeven door de tijdsduur en kosten van een dergelijke operatie aan de onttrekkingskant. Daarnaast is gezien de hoge temperatuur aan de onttrekkingskant bij deze hoge temperatuursystemen de kans op groei van sulfaatreducerende bacteriën kleiner (Ravier et al., 2016). In Nederland is het waarschijnlijk eveneens te verantwoorden om aan de productiekant een lagere frequentie aan te houden. Gezien de hydrostatische drukverdeling in de ondergrond en de forse afpompingsdruk zal water uit ondiepe aquifers bij een lekkage eerder de onttrekkingsput instromen dan dat er formatiewater de aquifers instroomt. Ook zal een groot deel van het (voor het ondiepe grondwater relevante) dieptebereik van de productieput niet in contact staan met corrosief formatiewater tijdens productie.

Belangrijk punten van aandacht bij de het gebruik van wire-line tools zijn de interpretatie en de resolutie van de meetgegevens over de kwaliteit van casings en in het bijzonder de cementering. Door het combineren van verschillende moderne meetmethodes (o.a. cement bond logs (CBL), flexural attenuation measurements, ultrasonic acoustic impedance) kan de onzekerheid over de kwaliteit van de cementering inmiddels sterk worden teruggebracht (Hayden et al., 2011). Hayden et al. (2011) geven echter ook aan dat cementevaluatie afhankelijk van omstandigheden (bijvoorbeeld bij gebruik van dikke synthetische vloeistoffen) complex kan zijn en niet altijd tot eenduidige resultaten zal leiden. Ook zijn de mogelijkheden voor beoordelen van de aansluiting van het cement op de formatie nog steeds gelimiteerd. Voor het bepalen van de toestand van de casings wordt eveneens gebruik gemaakt van een combinatie van technieken, zowel mechanisch (calliper) als ultrasoon en elektromagnetisch. In Tabel 3-1 is een overzicht gegeven van mogelijke meetmethodes tijdens verschillende fases van ontwikkeling.

Tenslotte is er nog het punt van de resolutie van de huidige generatie tools. Een voorbeeld hiervan is de USIT tool van Schlumberger. De metingen met deze tool geven informatie over interne en externe corrosie van een casing, scaling aan de binnenzijde, vervormingen van de casing en defecten of gaten in de casing en de aansluiting van cement op de casing. Defecten en gaten zijn detecteerbaar vanaf een diameter van 1.2 inch (3.05 cm) (Baticci, Genter, Huttenloch, & Zorn, 2010; Schlumberger, 2007). Hogere resoluties zijn haalbaar met

de huidige generatie multifinger callipers (Veldkamp, Goldberg, Bressers, & Wilschut, 2016). Deze callipers maken gebruik van meervoudige voelarmpjes. Het aantal armpjes loopt inmiddels op tot 60 voor buizen met een inwendige diameter van 9.63" (244.6 mm) (www.Sparteksystems.com). De meetnauwkeurigheid van de wanddikte is hierbij met 0.03" (0.76 mm) hoog, met een nog hogere resolutie. De radiale resolutie wordt bepaald door het aantal armpjes. Bij een buisdiameter van 244.6mm en 60 armpjes bedraagt de hart op hart afstand van de armpjes ca. 13 mm. Ten opzichte van de totale inspecteerbare lengtes zijn dit vrij hoge resoluties, maar het is niet uit te sluiten dat 'kleine' defecten over het hoofd worden gezien. Temeer omdat scaling onderliggende beschadigingen kan verhullen.

Voor de Nederlandse geothermieputten zijn de keuze en de ontwikkeling van het juiste type log nog niet geheel eenduidig. Uit een evaluatie van in 2015 uitgevoerde logs bij verschillende geothermieprojecten blijken voor een aantal de interpretatie en dus ook de rapportage complexer dan voorzien (DAGO, 2015). Ultrasoon metingen in het formatiewater blijken bijvoorbeeld nadelig te worden beïnvloed door gasbelletjes in het water. Ook is de centralisatie van de ultrasone tools van invloed. Als hier afwijkingen in ontstaan resulteert dit in mogelijk verkeerd te interpreteren afwijkingen in het beeld.

Het uitvoeren van metingen met wireline tools wordt bepaald door de huurkosten van high tech materieel. Hoe meer verschillende tools ingezet worden, hoe hoger de kosten. De OPEX voor het inspecteren van de productiecasing en injectiecasing met wireline tools bedraagt bij de Illkirch-Graffenstaden geothermielocatie, afhankelijk van de ingezette tools, respectievelijk 50 k€/6 jaar en 60 k€/3 jaar (Ravier et al., 2016). Vergelijkbare kosten worden aangehouden voor Nederlandse geothermiesystemen (DAGO, 2015). Deze kosten zijn exclusief de kosten voor het uitbouwen van de putten. Deze kosten bedragen ongeveer 100 – 200 k€ per operatie (DAGO, 2015).

TABEL 3-1 MOGELIJKE TECHNIEKEN VOOR LEKDETECTIE (VELDKAMP ET AL. 2016; KOLENBERG ET AL., 2012). (-- = NIET MOGELIJK, - = NIET AANBEVOLEN, + = AANVULLENDE TECHNIEK, ++ = EERSTE KEUZE VOOR INTEGRITEITSMONITORING)

	Nieuwe put	Bestaande put	In bedrijf	Na verlaten
Ultrasonic leak detector	+	+	+	--
Surface wellhead pressure	++	++	++	+
Down hole camera	+	+	+	--
Temperature logging	+	+	+	--
Continuous temperature measurement	--	--	++	+/-
Multi-finger calliper	+	++	+	--
Magnetic thickness	+	++	+	--
Ultrasonic casing imager	+	+	+	--
Strain monitoring	-	-	++	--
CBL/VDL	++	++	++	--
Ultrasonic imaging tool	+	+	+	--
Segmented bond log	+	+	+	--
Water flow log	+	+	+	--
Tracer logging	+/-	+/-	+	--
Microseismics	--	--	+	+
Reservoir pressure monitoring	--	--	++	+

3.3.3 Afpersen van putten

Het afpersen van de putcasing over bepaalde intervallen (zogenaamde casing leak off tests) is een in de olie-industrie populaire methode om te controleren of er lekkage optreedt vanuit de put (Ikenwilo, 2016; Ungemach et al., 2002). Net als bij de 'wireline' tools moet hiervoor echter de put uit productie worden genomen en moet de put worden uitgebouwd waarvoor een workover rig nodig is. Ikenwilo (2016) adviseert dan ook deze druktesten uit te voeren na afloop van wireline logging als een put buiten bedrijf is. Als alternatief zijn bij sterk door corrosie aangetaste doubletten in het bekken van Parijs zogenaamde tracer leak-off testen uitgevoerd. Voordeel hiervan is dat uitbouwen van de put niet nodig is (Ungemach et al., 2002). Met deze tracertests zijn goede resultaten bereikt, maar opgemerkt moet worden dat het hierbij ging om artesische putten waardoor de tracertests relatief eenvoudig uitgevoerd konden worden.

3.3.4 Grondwatermonitoring met waarnemingsfilters

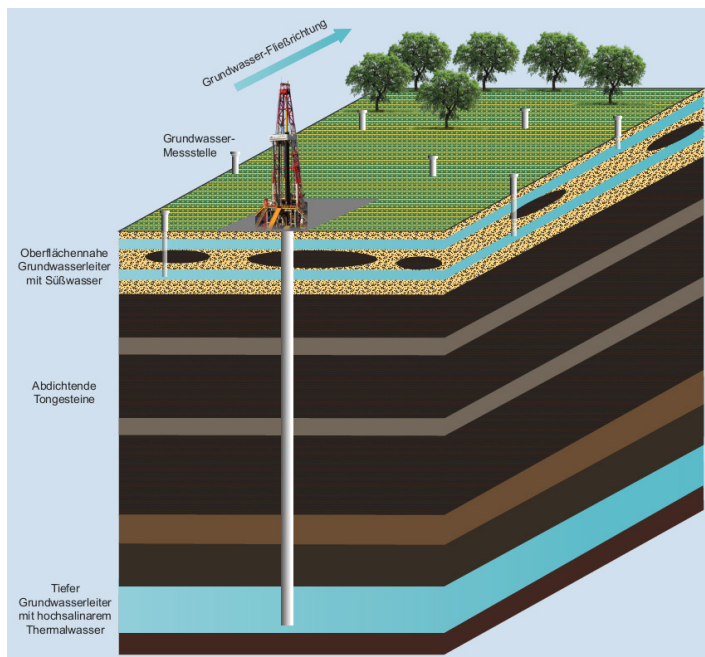
Zoals al aangegeven in paragraaf 3.2 is grondwatermonitoring bij mijnbouwwerken veelal beperkt tot het monitoren van een aantal freatische waarnemingsfilters (tot enkele meters – mv) rond de boorlocatie. Dit om te komen tot een verwaarloosbaar bodemrisico conform de NRB. Deze monitoring richt zich op het risico op verontreinigingen door lekkages en vermorsingen aan maaiveld dat door de vanuit de NRB voorgeschreven beschermende voorzieningen al sterk is teruggebracht. Ons is in Nederland één geval bekend waarbij aanvullende grondwaterkwaliteitsmonitoring plaatsvindt in op grotere diepte gelegen watervoerende pakketten. Deze monitoringsopzet richt zich op het kunnen detecteren van eventuele kortsluitstroming van zout water via de mogelijk onvoldoende gecementeerde annulus rond de buitenste casing van een zout watervoerend pakket naar een bovenliggend zoet watervoerend pakket.

In Duitsland verschillen de voorwaarden die gesteld worden per bundesland maar heeft bescherming van de grondwaterkwaliteit rond geothermiesystemen inmiddels ook bij de sector de hoogste prioriteit (Deutsche Erwärme & Geothermal Engineering, 2017). In gebieden waar het opgepompte formatiewater potentieel bedreigend is (hoge zoutconcentraties, hoge concentraties sporenmetalen etc.) of waar in het proces stoffen worden gebruikt die een risico vormen voor de grondwaterkwaliteit is grondwatermonitoring inmiddels staande praktijk (Geothermal Engineering, 2017; Plenefisch et al., 2015). Het Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) geeft een aantal aanbevelingen voor het vormgeven van grondwatermonitoring (Plenefisch et al., 2015):

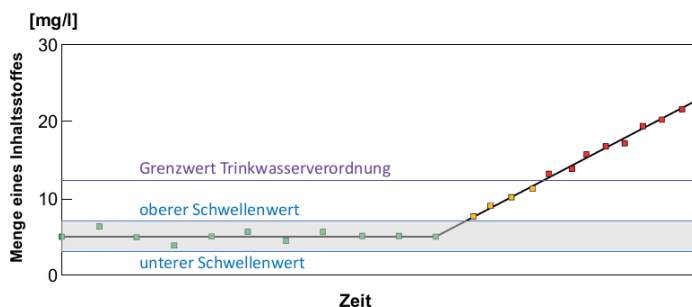
- Start in het kader van de bewijslast met monitoren van stijghoogtes en de chemische samenstelling van het grondwater voordat gestart wordt met boren
- Maak waar mogelijk gebruik van bestaande grondwatermeetlocaties. Vul deze aan met meetlocaties die het, door hun positionering (benedenstrooms van de boring) en over het dieptebereik van het watervoerende pakket, mogelijk maken om de grondwaterkwaliteit te bewaken.
- De omvang van de monitoring kan niet in algemene zin opgelegd worden, maar is afhankelijk van:
 - De te verwachten risico's van o.a. het formatiewater en de te toe te passen hulpstoffen
 - De lokale hydro(geo)logische eigenschappen, zoals afsluitende kleilagen en breuken.
 - De geplande hydraulische behandelingen van het gesteente (diepte, drukken, volumina)
 - de afstand / reistijd tot het meest nabije grondwaterputtenveld

- Bij de analyse moeten betekenisvolle indicatoren gebruikt worden, waarbij de nulmeting als vergelijkingsmateriaal wordt gebruikt. Maak hiervoor gebruik van een stoplichtmethodiek (zie Figuur 3-2) die verbonden is met een set maatregelen. Bij detectie van lekkend zout water of water met een duidelijk andere samenstelling kan dan aanvullende monitoring worden vormgegeven.

In onder andere de Boven-Rijnslenk in Rheinland Pfalz is bovenstaande methodiek inmiddels gangbare praktijk. Afhankelijk van de lokale geohydrologische condities wordt hiervoor minstens één meetpunt bovenstrooms geplaatst en meerdere meetpunten benedenstrooms van de geothermielocatie (Figuur 3-2). Meetpunten worden hierbij in alle voor de drinkwater verzorging relevante watervoerende pakketten geplaatst. Ook bij hoge enthalpie systemen in Neder Saksen (Horstberg, Groß Buchholz) zijn grondwatermonitoringsmeetnetten geïnstalleerd. Ook hier wordt een nulmeting in het grondwatermeetnet vereist gevolgd door jaarlijkse bemonstering van de monitoringsfilters. Op de monsters wordt een volledige analyse uitgevoerd van o.a. kationen, anionen, sporenelementen, opgeloste gassen (inclusief koolwaterstoffen) en BTEX (pers. com. Georg Houben, BGR). Duidelijke wettelijke voorschriften zijn in Duitsland (nog) niet beschikbaar en de toezichthouders kunnen naar inzicht meer of minder intensieve monitoring voorschrijven.



FIGUUR 3-1 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN EEN GRONDWATERMONITORINGSOPZET ROND EEN DUITSE GEOTHERMIELOCATIE IN RHEINLAND PFALZ (BRON: DEUTSCHE ERWÄRME AND GEOTHERMAL ENGINEERING (2017))



FIGUUR 3-2 VOORBEELD VAN DE O.A. IN RHEINLAND PFALTZ GEHANTEERDE STOPLICHTMETHODIEK BIJ GEOTHERMIE MET VOORAF GEDEFINIEERDE LOKALE GRENSWAARDEN OP BASIS VAN DE NATUURLIJKE VARIATIE EN DE GRENSWAARDE UIT DE DRINKWATERVERORDENING (BRON: DEUTSCHE ERWÄRME AND GEOTHERMAL ENGINEERING (2017))

Ook aan de Franse kant van de Boven-Rijnslenk wordt grondwatermonitoring uitgevoerd bij de Illkirch-Graffenstaden geothermielocatie. Ook hier wordt het opgepompte, zeer zoute formatiewater met de hierin opgeloste sporenelementen als potentiële bedreiging gezien voor de lokale, voor de drinkwatervoorziening en landbouwwatervoorziening belangrijke Rijn-aquifer. De grondwatermonitoring bij Illkirch-Graffenstaden wordt uitgevoerd met behulp van 4 rond de vloeistofdichte voorziening geplaatste waarnemingsfilters: één waarnemingsfilter bovenstreams op ca. 8 m-mv, twee waarnemingsfilters benedenstreams op ca. 8 m-mv en één diep filter op ca. 110 m-mv te plaatsen (Ravier et al., 2016). In de waarnemingsfilters worden pH, EC, redox potentiaal en temperatuur continu gemeten. Daarnaast wordt maandelijks grondwater bemonsterd en geanalyseerd op kationen, anionen, sporenelementen, en niet nader benoemde verontreinigingsindicatoren en organische verbindingen.

De CAPEX van het grondwatermonitoringnetwerk bij Illkirch-Graffenstaden is door Ravier et al. (2016) begroot op ca. 100 k€. Dit bedrag wordt voor een groot deel bepaald door de boorkosten voor het waarnemingsfilter op 110 m-mv. De OPEX (grondwatermonsternamen, analyse en interpretatie) is door Ravier et al. (2016) begroot op 10 k€/jaar, wat opvallend laag is voor het beschreven analysepakket en de meetfrequentie.

Diepe (<150 m-mv) waarnemingsputten worden in Nederland niet heel frequent geplaatst. Om een beeld te krijgen van de aanlegkosten is een viertal in de afgelopen 10 jaar geplaatste waarnemingsputten onderzocht. Het ging hierbij om zuigboringen met luchtliften tot een diepte variërend tussen 170 m-mv en 300 m-mv. In deze boorgaten zijn 8-10 monitoringsfilters geplaatst. De kosten voor boren en afwerken van de monitoringsfilters resulteren in ca. €240,- per meter boorlengte. Het plaatsen van waarnemingsfilters in de bovenste 300 meter van de bodem bedraagt hiermee 72 k€. De boorkosten zijn hiermee in Nederland ondanks de uitgebreide afwerking lager dan in het Franse Illkirch-Graffenstaden voorbeeld. Ondiepere boringen met een kleinere diameter kunnen enkele tientallen euro's per meter boorlengte goedkoper worden geplaatst.

De voor olie-, gas- en geothermie-putten gebruikte techniek van roterend spuitboren maakt het mogelijk om snel en goedkoop grote boorlengtes te halen. Nadeel van deze techniek is de noodzaak van een dikke boorspoeling om het gruis boven te krijgen, die deels de formatie in kunnen dringen. Ook is het hierdoor niet goed mogelijk om goede boorbeschrijvingen te maken. De boorbeschrijvingen van de waarnemingsputten vormen hiermee een waardevolle aanvulling op de informatie van de boring van de geothermieput,

3.3.5 Discussie bestaande monitoringsmethodes gericht op grondwaterbescherming
Annulaire drukmeting en interpretatie vormen een belangrijk early warning systeem bij olie- en gasputten. Bij de huidige generatie Nederlandse geothermieputten zijn deze metingen door het enkelwandige putontwerp en cementeringen naar maaiveld niet mogelijk. Hoewel het meerwandige ontwerp en de aanwezigheid van een B-annulus bij een deel van de Duitse geothermieputten deze metingen wel toestaan, lijkt het daar ook geen standaard praktijk. Het is sterk aan te bevelen om bij nieuwe putten meerdere gecementeerde casings toe te

passen en annulaire drukmetingen uit te voeren in de B-annulus als het putontwerp dit toelaat.

Een tweede standaard in de industrie is het periodiek uitvoeren van (geo)fysische metingen met 'wireline-tools'. Zowel tijdens aanleg om verbuizingen en cementeringen te controleren, als in de productiefase om corrosie en vervormingen van de casings te volgen. Voor deze metingen moet echter de productie worden stilgelegd en de ESP worden getrokken. Dit resulteert in productieverlies en gaat gepaard met hoge kosten. Monitoring wordt daarom vaak pas uitgevoerd als periodiek onderhoud nodig is. De monitoringsfrequentie ligt om deze redenen bij geothermieputten tussen 3 en 6 jaar. Een ander punt van aandacht is de resolutie van de metingen. Hoewel de huidige technologie vergeleken met de grote te inspecteren afstanden een redelijke resolutie heeft, kunnen kleine beschadigingen (enkele cm diameter) worden gemist. Gezien de hoge injectiedrukken kunnen ook via kleine gaatjes forse hoeveelheden productiewater weglekken (Zie par 2.6.1). Bij de gebruikte monitoringsfrequentie is het daardoor mogelijk dat een injectieput geruime tijd onopgemerkt kan lekken. Gezien de hoge injectievolumestroom en -druk en andere gelijktijdig optredende mechanismen zoals scaling en verstopping, is het daarbij zeer de vraag of een dergelijke, verhoudingsgewijs kleine lekkage wordt opgemerkt op basis van monitoring van de productievolumes en drukken (Ungemach, 2001).

Het afpersen van putten en casingsecties is een betrouwbare methode om ook kleinere lekkages op te sporen. Probleem hierbij is echter wederom dat de put hiervoor moet worden uitgebouwd wat hoge kosten en verlies van productie met zich mee brengt. De frequentie van dergelijke monitoring is hiermee vergelijkbaar met die van geofysische metingen.

Mede om bovenstaande redenen is het bij Duitse toezichthouders inmiddels de praktijk om indien nodig aanvullende grondwaterkwaliteitsbewaking te eisen. De mate waarin grondwatermonitoring wordt verplicht, is hierbij afhankelijk van de samenstelling van het opgepompte formatiewater en de in het proces gebruikte hulpstoffen. Het voor geothermie gewonnen formatiewater in het Zuid-Duitse Molassebekken kenmerkt zich bijvoorbeeld door een zeer lage mineralisatie en zijn daarmee minder punt van zorg dan het formatiewater in Noord Duitsland en de Rijn slenk (Plenefisch et al., 2015). De door BGR opgestelde aanbevelingen over grondwatermonitoring zijn inmiddels ook door Franse operators in de Rijn-slenk overgenomen (Ravier et al., 2016). De voorgeschreven analysepakketten zijn hierbij aanzienlijk en omvatten volledige analyses van de ionensamenstelling en sporenelementen, enkele organische verbindingen en opgeloste gassen. De voorgestelde stoplichtmethodiek (Figuur 3-2) met signaalwaarden en grenswaarden lijkt sterk op de in de Uitvoeringsregeling Stortbesluit bodembescherming voorgeschreven Ontwerp-procedure grondwatermonitoring stortplaatsen (Vereniging van Afvalverwerkers, 1995). In deze systematiek is de lokale signaalwaarde om rekening te houden met natuurlijke fluctuaties en analytische ruis gesteld op $1.3 \cdot$ de achtergrondconcentratie. Als stoffen in de nulsituatie onder de detectiegrens voorkomen, wordt overschrijding van de detectiegrens als signaalwaarde aangehouden. Ook de in de Duitse methode aanbevolen plaatsing van referentiebuizen en monitoringsbuizen sluit aan bij deze Nederlandse systematiek. Groot voordeel ten opzichte van de situatie bij stortplaatsen is dat de x-y coördinaten van een mijnbouwput bekend zijn. Nadeel is echter dat vooral bij doorboorde dikke watervoerende pakketten de z-coördinaat van een lekkage uit een geothermieput juist onbekend is. Daarnaast zal het gedrag van een eventuele pluim worden beïnvloed door het (extreem) hoge zoutgehalte en de verhoogde temperatuur van de lekkende vloeistof die beiden de dichtheid van de vloeistof beïnvloeden.

Het met behulp van waarnemingsfilters monitoren van eventuele beïnvloeding van de grondwaterkwaliteit door lekkages is dus geen sinecure. Een gedegen kennis van de ondergrond en grondwaterstroming is hiervoor een voorwaarde. Bij meetnetten met waarnemingsfilters gaat het om discrete metingen in ruimte en tijd. Zeker in het geval van kleine lekkages in een tientallen meters dik doorboord watervoerend pakket is er bij conventionele monitoring met filters een groot risico op het missen van een verontreinigingspluim en daarmee op schijnzekerheid. In gebieden met dikke sedimentaire pakketten zoals de Centrale Slenk in Nederland is er verder een afwisseling van watervoerende pakketten en slecht doorlatende lagen. De stromingsrichting zal in deze watervoerende lagen echter niet per definitie gelijk zijn. Voor monitoring benedenstrooms van een geothermielocatie zijn dan mogelijk meerdere boringen nodig voor een goede plaatsing wat hogere kosten met zich mee brengt. Op basis van de schatting van lekdebieten blijkt dat er al snel een bolvormige beïnvloeding rond de put zal ontstaan. Alleen bij hoge regionale grondwatersnelheden lijkt er een pluim te ontstaan. Monitoring moet dus dicht bij de bron plaatsvinden. Dit komt ook ten goede aan een snelle detectie.

3.4 Innovatieve technieken voor continue monitoring over de diepte

De in de vorige paragraaf besproken monitoringsmethodes zijn ofwel niet goed toepasbaar op de huidige generatie geothermieputten, zijn ingrijpend voor de bedrijfsvoering en kostbaar en/of kennen forse beperkingen in de temporele en ruimtelijke discretisatie.

Het juist plaatsen van de meetpunten is een grote uitdaging bij monitoren van mogelijke lekkages met bodembedreigende stoffen. Ten opzichte van bijvoorbeeld stortplaatsen is het een voordeel dat bij een lekkage uit een geothermieput in een watervoerend pakket de x- en y-coördinaten van het lek min of meer a priori bekend zijn. De z-coördinaat, dus de positie van de lekkage in de diepte blijft echter de grote onbekende. Bij monitoring met waarnemingsfilters wordt hierop geanticipeerd door meerdere waarnemingsfilters te plaatsen en te kiezen voor relatief lange filterlengtes (bijvoorbeeld 5 meter lengte) (Vereniging van Afvalverwerkers, 1995). Bij doorboring van watervoerende pakketten met diktes van tientallen meters zou bovenstaande aanpak resulteren in een zeer groot aantal te bemonsteren waarnemingsfilters. De grote filterlengtes daarbij kunnen resulteren in ongewenste verdunning van het signaal, evenals mogelijk in kortsluitstroming. In de praktijk wordt dan ook wel gekozen voor het plaatsen van filters snijdend met een onderliggende scheidende laag (gericht op zwaardere vloeistoffen (brijn)) en het plaatsen van filters bovenin het watervoerende pakket (gericht op het bemonsteren van koolwaterstoffen en gassen). Een voorbeeld hiervan is het bij Illkirch-Graffenstaden gekozen ontwerp (Ravier et al., 2016). De beperkingen van de monitoringsfilters kunnen deels worden ondervangen door te kiezen voor waarnemingsputten met zogenaamde continuous multichannel tubing (CMT) (www.solinst.com). Deze monitoringsbuizen bestaan intern uit 7 verticale van elkaar gescheiden segmenten elk leidend naar een verschillende diepte. Per put kan hiermee op 7 dieptes worden bemonsterd. Ervaring met deze putten is in Nederland nog beperkt.

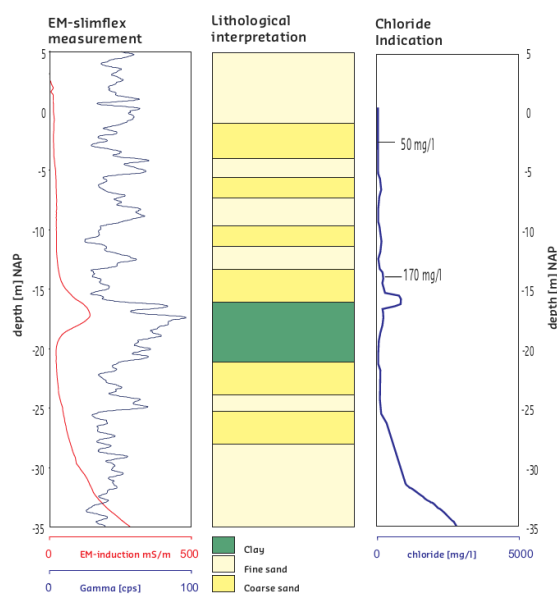
Idealiter wordt zowel ruimtelijk als temporeel continu gemonitord. Uiteraard zal dit in de praktijk nooit volledig mogelijk zijn, maar inmiddels zijn technieken beschikbaar waarmee we dit ideaalbeeld mogelijk kunnen benaderen. De focus ligt hierbij op het meten van temperatuur en het (schijnbare) elektrisch geleidingsvermogen (EC_a) van de bodem. In deze paragraaf gaan we in op de inzet van (1) geofysische metingen (Electromagnetic induction metingen en gamma logs) in een geplaatste waarnemingsbuis en (2) glasvezelkabels voor het continue meten van temperatuur en eventueel discreet meten van EC_a .

3.4.1 EM metingen

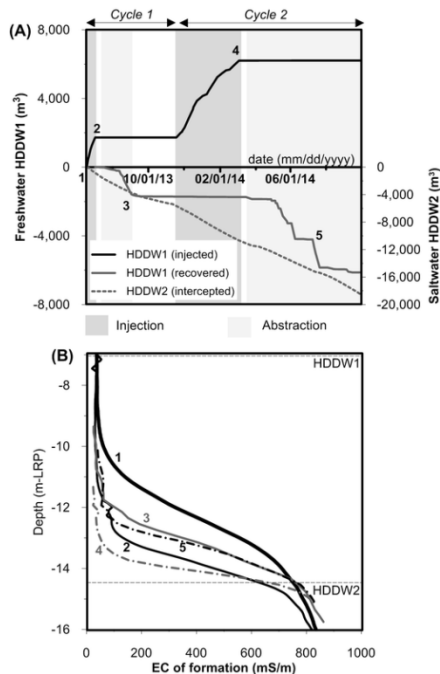
De eerste twee parameters waarop een monitoringssysteem bij geothermieputten zich logischerwijs zou moeten richten zijn de temperatuur en de (hoge) zoutconcentratie van de weglekkende vloeistof. De bodemtemperatuur is direct meetbaar, maar wordt beïnvloed door warmteuitstraling uit de put. Voor het zoutgehalte kan het elektrisch geleidingsvermogen als proxy worden gebruikt. Hierbij kan gekozen worden voor het meten van het geleidingsvermogen van het grondwater, waarvoor het plaatsen van een monitoringsfilter noodzakelijk is, of voor het meten van het zogenaamde bulk elektrische geleidingsvermogen (EC_{bulk}), waarbij ook de geleiding van de bodem zelf mee wordt gemeten. Voordeel van het meten van EC_{bulk} is dat er geen waarnemingsfilter noodzakelijk is. Een voorbeeld van het gebruik van EC_{bulk} om het zoutgehalte te monitoren is het netwerk van zoutwachters in Nederland. Bij zoutwachters wordt het EC_{bulk} gemeten op discrete afstanden in een diepteprofiel. Ervaringen met zoutwachters zijn echter wisselend. Bij Brabant water zijn de daar geïnstalleerde zoutwachters bijvoorbeeld niet meer operationeel door het grote aantal defecten en storingen. Daarnaast gaat het bij zoutwachters nog steeds om discrete metingen.

Een alternatieve methode is het uitvoeren van electromagnetische inductie (EM) metingen vanuit een blinde (kunststof) buis. Hiermee kan een ruimtelijk continu beeld worden verkregen van de EC_{bulk} over de gehele diepte van de geplaatste buis. De meting wordt hierbij niet beïnvloed door de watersamenstelling in de buis zelf. Door de meting te combineren met gamma metingen kan tegelijkertijd een beeld worden verkregen van doorboorde kleilaagjes. Door de metingen met een bepaald tijdsinterval te herhalen kunnen veranderingen in zoutgehalte efficiënt worden opgespoord. De geleidbaarheid van de formatie blijft immers meestal gelijk. Of en zo ja tot welke afstand de aanwezigheid van de stalen putcasing invloed kan hebben moet nader worden onderzocht.

Deze techniek heeft zich inmiddels bewezen voor het in kaart brengen van zoet-zout overgangen, monitoren van zoutwaterintrusie en de dynamiek van neerslaglenzen op brak en zout grondwater en het monitoren van de zoetwaterbel bij aquifer storage and recovery (ASR) systemen in brakke en zoute aquifers. Een voorbeeld van de resultaten van EM metingen (met de door Deltares ontwikkelde Slimflex) is weergegeven in Figuur 3-3 en Figuur 3-4.



FIGUUR 3-3 VOORBEELD VAN EEN EM-SLIMFLEX METING VAN ZOUTWATERINTRUSIE OVER EEN KLEILAAG OP EEN DIEPTE VAN 20 M. DE CHLORIDECONCENTRATIE KOMT GOED OVEREEN MET DE OP TWEE DIEPTES GEMETEN CONCENTRATIE (BRON: DELTARES ([HTTPS://PUBLICWIKI.DELTARES.NL/](https://publicwiki.deltares.nl/))).



FIGUUR 3-4 MET EM GEMETEN EC_{BULK} DIEPTEPROFIELEN BIJ HET ASR SYSTEEM OVERZANDE (ZUURBIER, ZAADNOORDIJK, & STUYFZAND, 2014)

Bij het uitvoeren van herhaalde metingen is het belangrijk dat de meting op vergelijkbare wijze wordt uitgevoerd. Liefst wordt voor de metingen dezelfde tool gebruikt. In ieder geval moeten de spoelafstanden overeenkomen. Op deze wijze kunnen de gemeten profielen goed vergeleken worden en afwijkingen eenduidig worden gedetecteerd. De gemeten bulk EC kan worden vertaald naar de EC van het grondwater (EC_w) via de wet van Archie:

$$\frac{EC_w}{F} = EC_{bulk}$$

Hierin is F een vooral van de porositeit afhankelijke formatiefactor die voor zandige sedimenten varieert tussen 2 en 6. Voor kleiige en venige sedimenten is deze vergelijking niet toepasbaar. EM-metingen zijn toepasbaar in kleine diameter peilbuizen (> 28 mm binnendiameter). Ook zijn de tools dusdanig flexibel dat kromme buizen geen obstakel vormen voor een meting. Voor het plaatsen van een voor EM geschikte buis zijn dan ook geen grote boordiameters noodzakelijk. De aanlegkosten kunnen hierdoor lager uitpakken dan een conventionele boring voor het plaatsen van monitoringsfilters.

Onder normale omstandigheden is de temperatuur van het grondwater constant op ca. 11 °C, daarbij elke 100 m ongeveer 1-3 °C oplopend (afhankelijk van infiltratie of kwel, en andere factoren). In de nabije omgeving van een geothermieput kan de grondwatertemperatuur

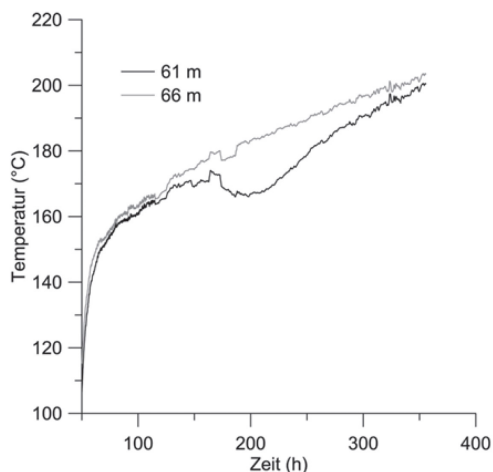
echter variëren afhankelijk van de productie en daarmee de warmteuitstraling. De invloed van deze temperatuurschommelingen op de EM metingen dient onderzocht te worden.

De kosten voor het uitvoeren van EM-metingen bedragen ongeveer 3 k€ per meting inclusief uitwerking. Bij herhaalde metingen kunnen de kosten wellicht verder omlaag. Diepere monitoringsputten (>100 m) zullen mogelijk meer tijd vragen in de uitvoering. De kosten voor deze putten zijn geschat op 5 k€ per meting inclusief uitwerking.

3.4.2 Glasvezeltechnieken

Door het installeren van glasvezelmeetkabels in de bodem kunnen op effectieve wijze quasi-continue temperatuurprofielen worden verkregen. Om de temperatuur te meten wordt een laserpuls door de glasvezelkabel gestuurd. De uitgezonden fotonen reflecteren op verschillende manieren op de binnenzijde van de kabel. Een deel van het licht komt terug met dezelfde frequentie en golflengte, bij het overige wordt of de frequentie lager en de golflengte groter (*Stokes-verstrooiing*), of de frequentie wordt juist hoger en de golflengte kleiner (*Anti-Stokes-verstrooiing*). De gereflecteerde lichtdeeltjes komen uiteindelijk aan bij een uiteinde van de kabel. Op basis van het verschil in aankomsttijd kan worden vastgesteld waarvandaan het licht afkomstig is. Vervolgens kan de temperatuur worden berekend op basis van het verschil in intensiteit tussen de Stokes- en Anti-Stokes-verstrooide deeltjes (<https://www.nemokennislink.nl/publicaties/meten-met-glasvezelkabels>).

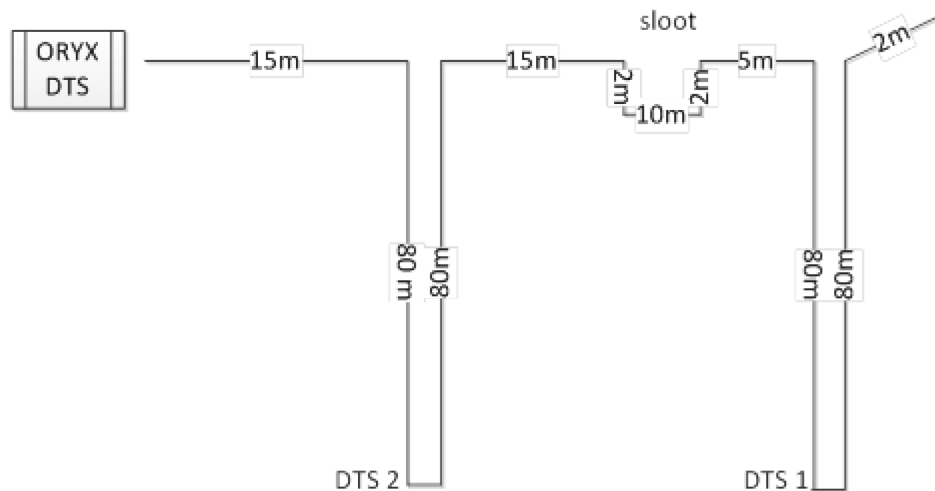
Glasvezelkabels worden al geruime tijd toegepast voor het meten van temperatuurprofielen in Geothermieputten (Sakaguchi & Matsushima, 1995). Meer recent zijn experimenten uitgevoerd met het plaatsen van een glasvezelkabel in de te cementeren annulus (Reinsch, 2012). Doel hiervan was het monitoren van de cementering en het detecteren van eventuele veranderingen bij het in productie nemen van een geothermieput in IJsland. Met de glasvezelkabel konden temperatuur anomalieën gedetecteerd worden die wezen op verdamping van poriewater door het ontstaan van scheurtjes in het cement (Figuur 3-5).



FIGUUR 3-5 TEMPERATUURANOMALIE OP 61 METER IN PUT TIJDENS EEN PRODUCTIETEST VAN PUT HE-53. DE DALING VAN DE TEMPERATUUR WIJST OP AAN SCHEURVORMING GERELATEERDE VERDAMPING VAN PORIEWATER UIT HET CEMENT (REINSCH, 2012)

Voor het plaatsen van glasvezelkabels kan gebruik worden gemaakt van roterend spuitboren. De aanlegkosten zijn hierdoor fors lager dan wanneer 'nettere' boortechnieken zoals pulsen of roterend zuigboren + luchtliften gebruikt moeten worden. De kosten voor het plaatsen van glasvezelkabels zoals in het voorbeeld in Figuur 3-6, bestaande uit twee

monitoringspunten tot 80 m-mv, bedragen 4 k€. Daarbij komen nog de kosten voor de kabel en kalibratie. Deze extra kosten bedragen in dit geval eveneens 4 k€. Voor het uitlezen van de kabels is een DTS apparaat nodig. Een dergelijk apparaat is bij KWR maar ook bij andere instituten beschikbaar. De operationele kosten worden dan ook vooral bepaald door het uitlezen van de kabels en de interpretatie van de data. Op basis van 1 dag meten en kosten voor uitwerking en rapportage worden de kosten geschat op 5 k€.



FIGUUR 3-6 VOORBEELD VAN EEN OPSTELLING MET TWEE BORINGEN MET GLASVEZELKABELS TOT 80 M-MV VOOR MONITORING VAN EEN HOGE TEMPERATUUR OPLAG-SYSTEEM.

3.5 Synthese

Monitoring bij een potentieel milieubedreigende activiteit is van groot belang voor het verkrijgen van vertrouwen in de genomen beschermende maatregelen. Daarnaast wordt door middel van monitoring informatie verzameld over het functioneren en eventueel falen van het systeem. Betrouwbare en relevante informatie is cruciaal voor het kunnen nemen van rationele management beslissingen.

Geothermieactiviteiten zijn gereguleerd middels de algemene mijnbouwwetgeving die ook wordt toegepast voor olie- en gasexploitatie. Geothermie neemt hierin een wat afwijkende positie in. Allereerst is het een jonge bedrijfstak waarbij nog veel in ontwikkeling is, gaat het winnen van energie gepaard met het oppompen en injecteren van corrosieve zeer zout formatiewater en is het putontwerp duidelijk anders dan bij olie- en gasputten. Zo zijn geothermieputten over lange trajecten enkelwandig uitgevoerd en staat het formatiewater direct in contact met deze casings (er wordt geen tubing gebruikt) en worden/kunnen geen annulaire drukken gemeten zoals gebruikelijk bij olie en gasputten. Daarnaast wordt bij elk systeem formatiewater onder hoge druk in de diepe ondergrond geïnjecteerd (geldt overigens ook voor waterinjecterende putten in de olie- en gassector).

Door het ontbreken van mogelijkheden om annulaire drukken te meten hangt de huidige monitoring op het monitoren van productievolumes, -drukken en temperaturen en het met regelmaat uitvoeren van integriteitsmetingen in de putten zelf. Deze laatste metingen vragen echter om het stil leggen van de productie en het uitbouwen van de putten, een kostbare operatie los van de kosten van de metingen zelf. In de praktijk worden deze metingen dan

ook om de 3 tot 6 jaar uitgevoerd of tegelijk met al ingepland onderhoud. Of hiermee tijdig lekkages worden opgespoord is echter de vraag, mede doordat de keuze en de ontwikkeling van het juiste type logs en de interpretatie hiervan nog niet eenduidig is voor de Nederlandse geothermieputten.

In de Nederlandse mijnbouwpraktijk worden normaliter geen monitoringsfilters in (semi-) afgesloten watervoerende pakketten bij mijnbouwputten geplaatst. Het ontbreken van monitoring in deze watervoerende pakketten wordt gemotiveerd door verwijzing naar het bestaan van meerdere barrières, i.e. meerdere gecementeerde verbuizingen in combinatie met drukmetingen en de analogie met bemeten dubbelwandige opslagsystemen. Hoewel men van mening kan verschillen over deze argumentatie, is die gezien het enkelwandige ontwerp waarschijnlijk niet van toepassing op de huidige generatie geothermieputten. Daarnaast is het uitgangspunt in deze studie dat impact op grondwater alleen in het grondwater gemeten kan worden. Grondwatermonitoring op diepte is ons inziens gezien de corrosiegevoeligheid en bodembedreigende vloeistoffen dan ook een minimale vereiste bij deze geothermie(injectie)putten. Dit is in Duitsland al gangbare praktijk. De daar toegepaste monitoringstrategie sluit nauw aan bij de in Nederland bekende IBC systematiek. In Duitsland wordt grondwatermonitoring ook uitgevoerd bij meerwandig uitgevoerde geothermieputten. Grondwatermonitoring doormiddel van bemonstering van peilfilters kent echter beperkingen en brengt kosten met zich mee, vooral bij de in Duitsland voorgeschreven grote analysepakketten. De belangrijkste indicatoren voor een lekkage zijn echter temperatuur en het zoutgehalte het geleidingsvermogen. Nieuwe technieken zoals EM metingen vanuit monitoringsbuizen en metingen met glasvezelkabels maken een efficiëntere en wellicht kosten effectievere grondwatermonitoring mogelijk.

4 Reguliere grondwatermonitoring

4.1 Monitoringsconcept reguliere monitoring

4.1.1 Uitgangspunt

Zoals in paragraaf 3.1 aangegeven richt reguliere monitoring zich op het verkrijgen en behouden van (publiek) vertrouwen in de grondwaterbeschermende voorziening. Daarnaast dient reguliere monitoring zich te richten op het verkrijgen van informatie waarop een goed geïnformeerde rationele beslissing genomen kan worden. Met andere woorden: het doel van monitoren is bewijzen dat er géén beïnvloeding van het grondwater plaatsvindt. Mocht onverhoopt toch een verontreiniging optreden, dan moet het systeem deze detecteren en snel voldoende aanknopingspunten leveren voor het nemen van beheersmaatregelen.

4.1.2 Analogie met stortplaatsen

Het in Duitsland gehanteerde monitoringsconcept bij Geothermiebronnen (zie paragraaf 3.3.4 en 3.3.5) blijkt goed aan te sluiten bij de Nederlandse ontwerpprocedure voor monitoring bij stortplaatsen. Deze ontwerpprocedure (Vereniging van Afvalverwerkers, 1995) is voorgeschreven in de Uitvoeringsregeling Stortbesluit bodembescherming.

Zowel bij stortplaatsen met een falende IBC voorziening als bij een falende put bij een geothermiesysteem zal een verontreinigingspluim ontstaan in het grondwater. Toch zijn er belangrijke verschillen:

- **Startpunt van een verontreinigingspluim¹.**
Bij een stortplaats is de x- en y-coördinaat van het startpunt van een verontreinigingspluim meestal niet goed bekend maar kan wel een schatting worden gemaakt van de diepte (de z-coördinaat) van de oorsprong van de verontreinigingspluim. Bij een falende geothermieput zijn de x- en y-coördinaat van een eventuele, significante lekkage goed bekend, die valt immers samen met de positie van de put. De z-coördinaat is daarentegen juist bij een falende geothermieput onduidelijk en kan zich ergens bevinden tussen maaiveld en de bovenkant van de afsluitende (klei)laag aan de onderzijde van het diepste relevante watervoerende pakket.
- **De flux van een lekkage in verhouding tot het langsstromende grondwater.**
Bij een lekkage door een bodemafdichting van een stortplaats is de flux van het verontreinigde water beperkt tot de hoeveelheid grondwateraanvulling op de stort. Deze wordt veelal beperkt door afdichtende voorzieningen aan de bovenzijde van de stort. De lokale grondwaterstroming zal dan ook niet snel beïnvloed worden door de lekstroom. Bij een lekkage uit een falende geothermie injectieput kan de flux dusdanig groot worden dat mogelijk de grondwaterstroming wel wordt beïnvloed.

4.1.3 Uitgangspunten bij het ontwerp

Bovenstaande aandachtspunten in gedachten houdend is de in de Uitvoeringsregeling Stortbesluit bodembescherming opgelegde methodiek bruikbaar als startpunt voor

¹ We spreken hier in het kader van de IBC-systematiek over “verontreinigingspluim”. In relatie tot lekkages vanuit geothermieputten hanteren we in dit document de term “gelekt volume”

gedachtenvorming over het vormgeven van grondwatermonitoring bij een geothermieput. Deze methodiek gaat uit van een brongericht monitoringssysteem met meetpunten op enige afstand. Hiervoor is gekozen omdat brongerichte grondwatermonitoring in de puurste vorm onbetaalbaar zal zijn en een volledig omgevingsgerichte aanpak niet aansluit bij het beleid voor IBC-stortplaatsen van geen beïnvloeding van de omgeving. Consequentie van deze keuze is dat enige verontreiniging van het grondwater zal optreden voorafgaand aan de detectie. De mate waarin deze verontreiniging mag plaatsvinden is een belangrijke ontwerpparameter in het monitoringssysteem. Uitgangspunt bij het ontwerp is verder een theoretische trefkans van 100%. Als gekozen wordt voor een lagere trefkans bestaat de kans dat een verontreiniging onopgemerkt blijft en onopgemerkt een grens overschrijdt waarna zij niet meer beheersbaar is. Vooralsnog wordt uitgegaan van monitoring op diepte bij de injector, omdat het in Nederland gebruikelijke hydrostatische drukverloop en de afpompings bij onttrekking lekkages uit de onttrekkingsput naar de omgeving onwaarschijnlijk maken. Deze overweging moet wellicht worden herzien als er in de toekomst wordt overgegaan op hydraulische fracturing van (ultradiepe) geothermieputten².

4.1.4 Layout van het systeem

Net als bij de Duitse en Franse monitoringsystemen bij geothermieputten bestaat de monitoringslayout conform de Vereniging van Afvalverwerkers (1995) uit twee hoofdonderdelen: één of meerdere referentiepunten bovenstrooms van de potentiële verontreinigingsbron en een aantal signaleringspunten op zekere afstand benedenstrooms van de potentiële bron. Het doel van de referentiepunten is het verkrijgen van informatie over fluctuaties in de achtergrondcondities. Het doel van de signaleringspunten is om ongewilde beïnvloeding van het grondwater door de geothermieput te signaleren. Het bovenstroomse netwerk dient hierbij als referentiekader voor de benedenstroomse metingen. Daarnaast geven de referentiepunten informatie over de bijdrage van mogelijke andere bovenstrooms gelegen verontreinigingsbronnen. Tenslotte kan met bovenstroomse meetpunten de geohydrologische situatie worden geverifieerd en kunnen reistijden berekend worden. Deze opzet richt zich op het ondervangen van de verspreiding in het horizontale vlak. Op de verspreiding over de diepte en de consequenties hiervan voor monitoring wordt later ingegaan.

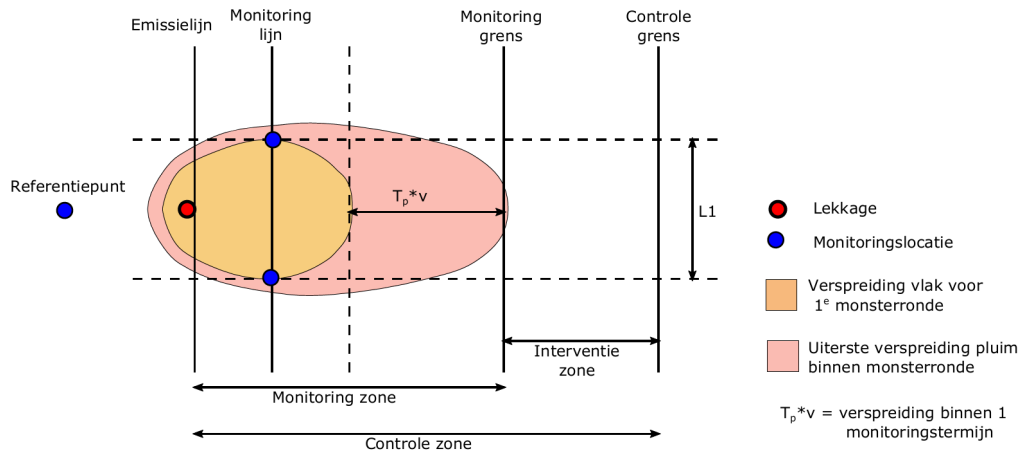
De dichtheid van het benedenstroomse netwerk is afhankelijk van de positie van de monitoringslijn en de oorsprong en afmetingen van de verontreinigingspluim. Binnen de door de Vereniging van Afvalverwerkers (1995) opgestelde systematiek worden de volgende onderdelen onderscheiden (zie Figuur 4-1):

- De **referentiepunten**: ter bepaling van fluctuaties in de achtergrondwaarden
- De **emissielijn** (of punt in het geval van een geothermiebron): Startpunt van een verontreinigingspluim / weggelekt volume.
- De **monitoringslijn**: op deze lijn bevinden zich de monitoringslocaties
- De **monitoringsgrens**: de uiterste grens tot waar een verontreiniging zich kan verspreiden alvorens te worden gedetecteerd
- De **controlegrens**: Uiterste grens van het monitoringsgebied
- De **monitoringzone**: zone tussen de bron en de monitoringsgrens
- De **interventiezone**: Uiterste grens tot waar een verontreiniging zich kan verplaatsen tot maatregelen na detectie actief zijn. Omdat de productie van een geothermieput op korte termijn kan worden gestopt wordt aanbevolen deze zone

² Met het ondertekenen van de Green Deal Ultra-diepe geothermie 19 juni 2017 is de verwachting dat rond 2020 de eerste pilotprojecten worden vormgegeven.

op 0 te zetten. Consequentie hiervan is dat er voor de gebruiker van de warmte een backup systeem aanwezig moet zijn.

- **De controlezone:** totale zone voor detectie en interventie bij een verontreiniging



FIGUUR 4-1 ZONERING EN BASEISELEMENTEN MONITORINGSCONCEPT CONFORM DE ONTWERPPROCEDURE GRONDWATERMONITORING STORTPLAATSEN (VERENIGING VAN AFVALVERWERKERS, 1995)

Uitgangspunt bij deze systematiek zijn stabiele verontreinigingspluimen en het instellen van een brede monitoringzone. De keuze van een brede monitoringzone leidt tot een trefzekerder systeem (de pluim wordt breder) en biedt mogelijkheden voor tijdige reactie en het instellen van een stabiele situatie. In de praktijk wordt bij stortplaatsen een breedte van de monitoringszone van 50-100 m gepropageerd (Boels, Groenendijk, & Hengeveld, 1993; Christensen, Kjeldsen, & Berg, 1991). Deze breedte sluit goed aan bij de maatvoering van bodembeschermende voorzieningen (tot enkele duizenden m² (Cirkel & Leunk, 2012)) en freatische monitoring bij mijnbouwlocaties. Of er werkelijk sprake zal zijn van een stabiele verontreinigingspluim is vooralsnog echter onduidelijk. Zoals aangegeven in paragraaf 2.6.2 zal de afstroming van de weglekkende volumes formatiewater uit een geothermieput zullen sterk beïnvloed worden door dichtheidseffecten door het zoutgehalte en de temperatuur.

4.1.5 Rekenregels voor het ontwerp conform IBC

Op basis van bovenstaande uitgangspunten is een aantal simpele rekenregels afgeleid voor het ontwerp van het monitorsysteem (Vereniging van Afvalverwerkers, 1995).

De controlezone (*C*) bestaat uit de monitoringzone (*M*) en de interventiezone (*I*). De breedte van de monitoringzone is dan: $M = C - I$. De omvang van de interventiezone wordt hierbij bepaald door de reactiesnelheid en de verspreidingssnelheid van de verontreiniging. Door de Vereniging van afvalverwerkers (1995) wordt voorgesteld om uit te gaan van een vaste breedte van de controlezone van bijvoorbeeld 50 m. Belangrijke volgende stap is het berekenen van locatiespecifieke pluimlengtes en breedtes. Uit berekeningen voor stortplaatsen kwam een globale verhouding tussen pluimlengte en pluimbreedte van 3.5:1 naar voren. Hoewel eerste verkennende berekeningen (paragraaf 2.6.2) lijken te wijzen op radiale verspreiding bij een lekkage, wordt aanbevolen dergelijke pluimberekeningen te herhalen voor lekkages uit geothermieputten rekening houdend met dichtheidseffecten.

Op basis van minimale exploitatiekosten en maximale trefkans als uitgangspunt zijn 2 vergelijkingen opgesteld (Vereniging van Afvalverwerkers, 1995), namelijk:

$$T_p = M / 2v$$

voor het bepalen van de monitoringsintervallen en

$$L_1 = k \cdot \frac{1}{2} \cdot M$$

voor het bepalen van de onderlinge afstand tussen meetlocaties. Met hierin:

T_p = periode tussen bemonsteringen (jaar)

v = verplaatsingssnelheid van het front van de verontreiniging

L_1 = de onderlinge afstand tussen de meetpunten, waarbij de afstand gelijk is aan de pluimbreedte na een periode gelijk aan de leeftijd van de pluim op de helft van de monitoringszone

k = constante bepaald door de verhouding tussen pluimlengte en pluimbreedte

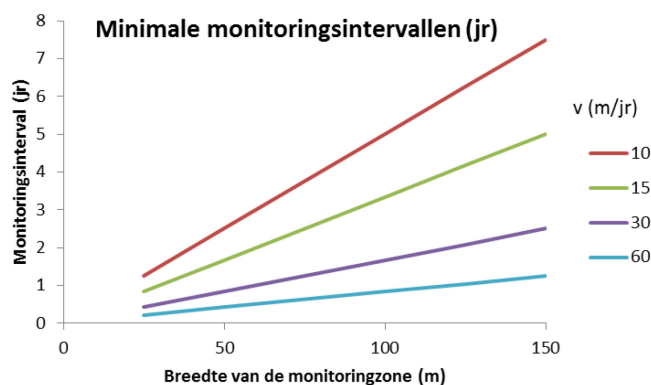
M = Monitoringszone

De ligging van de monitoringlijn wordt afhankelijk van de theoretische pluimvorm bepaald en ligt in de praktijk tussen $0.1M$ en $0.25M$.

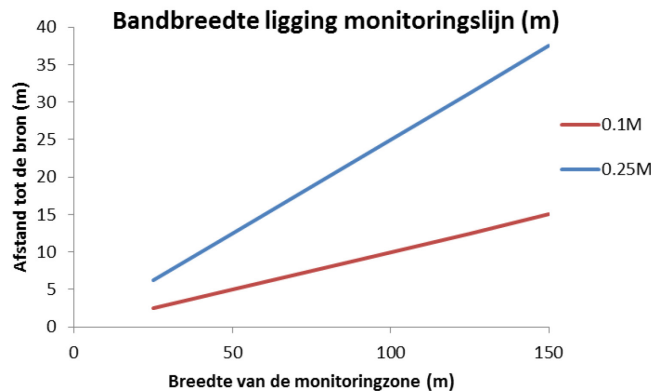
4.1.6 Voorbeeldberekening toegepast op een geothermie(injectie)put

Als bovenstaande rekenregels worden toegepast voor een monitoringszone van 50 meter als proxy voor de afstand van een put tot de rand van een wellpad, resulteert dit bijvoorbeeld in een periode tussen twee meetrondes van 5 jaar bij een verplaatsingssnelheid van het weggelekte formatiewater van 5 meter per jaar en 0.4 jaar bij een verplaatsingssnelheid van 60 meter per jaar (Figuur 4-2). Zoals al aangegeven in paragraaf 2.6.2 is het effect op het stromingsbeeld van de lekkage zelf waarschijnlijk dominant ten opzichte van de regionale grondwaterstroming. De omvang van een eventuele lekkage is hiermee bepalend voor de meetfrequentie. De positie van de monitoringlijn bevindt zich hierbij tussen 5 en 12.5 meter afstand van de potentiële verontreinigingsbron (Figuur 4-3). Uitgaande van een hypothetische verhouding tussen pluimlengte en pluimbreedte van 3.5:1 bedraagt de afstand tussen meetlocaties op de monitoringlijn dan 7.1 meter. Uit paragraaf 2.6.2 blijkt echter dat de het weglekkende volume zich waarschijnlijk radiaal rond de put zal verspreiden. De minimale onderlinge afstand is in dit scenario niet meer relevant en kan er worden volstaan met één monitoringslocatie.

Als gekozen wordt voor een bredere monitoringszone zullen de afstanden en monitoringsintervallen groter worden. De consequentie is dan wel dat een groter volume grondwater verontreinigd zal raken voorafgaand aan detectie van een lekkage.



FIGUUR 4-2 DE PERIODE TUSSEN TWEE MEETRONDES (JR) AFHANKELIJK VAN DE BREEDTE VAN DE MONITORINGZONE EN DE VERPLAATSINGSSNELHEID VAN HET VERONTREINIGINGSFRONT.



FIGUUR 4-3 LIGGING VAN DE MONITORINGSLIJN ALS FUNCTIE VAN DE BREEDTE VAN DE MONITORINGZONE

De berekende afstanden en monitoringsintervallen zijn in lijn met eerdere intuïtieve ideeën over monitoring bij olie- en gasputten (van Wezel & Cirkel, 2015) en lijken praktisch werkbaar. Belangrijke onbekende is voornamelijk het exacte gedrag van het weglekkende formatiewater bij een lekkende geothermieput en de consequenties hiervan voor de vorm van het volume weggelekt formatiewater in de bodem. De stroming van het weglekkende formatiewater is immers afhankelijk van de flux van de lekkage, de invloed van de begintemperatuur en de afkoeling tijdens transport op de dichtheid en de invloed van het zoutgehalte op de dichtheid. Daarnaast is mogelijk ook de warmteuitstraling uit de put van invloed op het verspreidingspatroon. Hoewel pluimvorming op basis van de eerste analytische overwegingen alleen bij sterke gradiënten in de regionale stijghoogte te verwachten is, kan dit beeld worden verstoord door dichtheidseffecten. Deze effecten zijn voornamelijk onvoldoende duidelijk. Meer inzicht kan verkregen worden door numerieke modelberekeningen. In deze berekeningen moeten zowel de dichtheidseffecten door temperatuurveranderingen als dichtheidseffecten als gevolg van verschillen in zoutconcentratie juist worden meegenomen. Bij de temperatuurseffecten speelt ook de invloed van warmteuitstraling uit de put een belangrijke rol. Hiervoor zijn eerder modelberekeningen uitgevoerd (de la Loma Gonzales & Hartog, 2016b), maar belangrijk is om deze gesimuleerde effecten te valideren met veldmetingen.

4.1.7 Alternatief: de conductor casing van de put inrichten voor monitoring?

Uit de analytische overwegingen in hoofdstuk 2 blijkt dat een eventuele lekkage zich in de meeste gevallen direct rondom de put zal manifesteren. Alleen bij (zeer) hoge waarden voor de achtergrondstroming lijkt een pluim te ontstaan. Daarnaast zijn er aanwijzingen dat het weglekkende formatiewater snel zal zakken door de hoge dichtheid. Dit biedt ruimte voor een alternatief monitoringsontwerp. In tegenstelling tot lekkages uit stortplaatsen (IBC systematiek) is immers de x- en y- coördinaat van de potentiële lekkage een bekende, onbekend is de z-coördinaat. Het monitoringssysteem kan dan ook direct rond de put worden aangebracht. Dit kan bijvoorbeeld door de conductorcasing te boren tot beneden de relevante (te beschermen) watervoerende pakketten. De annulus rond de conductorcasing kan dan worden afgewerkt met in de drinkwatersector gangbare omstorting en kleiafdichtingen van scheidende lagen. Net als gebruikelijk bij drinkwaterputten kunnen dan

in de doorboorde watervoerende pakketten monitoringsfilters worden geplaatst. Voordeel van deze aanpak is dat de annulus rond de conductorcasing op een volgens de standaarden van de drinkwatersector geldende wijze wordt afgedicht en dat er minder boorkosten hoeven te worden gemaakt voor monitoring. De conductorcasing moet immers toch al geboord of geheid worden. Wel stelt de verhoogde temperatuur eisen aan de gebruikte materialen voor het monitoringsysteem. PVC is bijvoorbeeld bij hoge temperaturen minder geschikt terwijl HDPE tot 90 °C kan worden toegepast. Ook is nog onvoldoende ervaring met de stabiliteit van de bentonietafichtingen bij hoge temperaturen. Belangrijker nog is de vraag of de temperatuur zo dicht op de put door de warmteuitstraling nog een goede indicator is voor lekkages en of EM metingen niet teveel door de stalen casing worden beïnvloed.

4.2 Omvang monitoringspakket

4.2.1 Betekenisvolle indicatoren

Het uitgangspunt bij reguliere monitoring is dat de grondwaterbeschermende voorziening zal functioneren. De verwachting is dan ook dat in de metingen geen afwijkingen worden aangetroffen. Het inzetten van uitgebreide analysepakketten op bemonsterd grondwater is dan ook alleen zinvol als er concrete aanwijzingen zijn voor een verontreiniging. Anders ligt het met de uit te voeren vastlegging van de beginsituatie (0-meting). In het kader van de bewijslast moet vooraf inzicht zijn in de concentratie en eventuele fluctuaties van een aantal relevante parameters. Om welke parameters het hierbij gaat, is afhankelijk van de samenstelling van het formatiewater, de op locatie te gebruiken hulpstoffen en de verwachting van eventuele externe verontreinigingen. Alleen zo kunnen discussies over de veroorzaker van een eventuele verontreiniging worden voorkomen.

Voor reguliere monitoring moet gezocht worden naar betekenisvolle indicatoren (Plenefisch et al., 2015). Een eerste beeld van kansrijke indicatoren kan worden verkregen door de concentraties van in het formatiewater aanwezige stoffen uit te zetten tegen een normconcentratie, bijvoorbeeld die uit het Drinkwaterbesluit (Figuur 2-2). Daarnaast moeten ook de transporteigenschappen van de stoffen in beschouwing worden genomen. In Figuur 2-2 komt lood (Pb) in hoge concentraties voor in het formatiewater (>100 keer boven de norm in het drinkwaterbesluit). Lood zal in de bodem sorberen en daardoor een sterk geretardeerde (op het verontreinigingsfront achterlopende) doorbraak laten zien. Hoe conservatiever (geen sorptie, geen afbraak) een stof zich in de bodem gedraagt des te geschikter deze is als tracer voor reguliere monitoring. De zoutconcentratie van Nederlands formatiewater is hoog (Figuur 2-1) en wijkt sterk af van wat aangetroffen wordt in voor drinkwaterproductie gebruikt grondwater. De chlorideconcentratie in het voorbeeld (Figuur 2-2) is bijvoorbeeld ca. 1000 keer hoger dan de norm in het Drinkwaterbesluit, ook de natriumconcentratie is vele malen hoger. Chloride verplaatst zich daarbij vrijwel conservatief door de bodem. Het is dan ook voor de hand liggend om de zoutconcentratie als eerste kansrijke indicator te beschouwen. Dit kan door direct de opgeloste zouten te meten door grondwater te bemonsteren en te analyseren, maar wellicht beter door indirect de geleidbaarheid van de bodem en/of het grondwater te meten.

Een tweede voor de hand liggende indicator is de temperatuur. De grondwatertemperatuur op de diepte van de Nederlandse drinkwaterwinningen ligt om en nabij 11-13 °C. In Nederland zijn in de bovenste 500 meter geen natuurlijke bronnen van warmte afgezien van de geothermische gradiënt; een sterke verhoging (of verlaging) van deze temperatuur heeft hierdoor altijd een antropogene oorzaak. Eén van de belangrijkste activiteiten die de grondwatertemperatuur beïnvloeden zijn WKO-systemen en in beperkte mate ook grondwaterwinningen (b.v. door het aantrekken van oppervlaktewater of het omkeren van grootschalige infiltratie in grootschalige (diepe) kwel). Ook bij geothermieputten kan

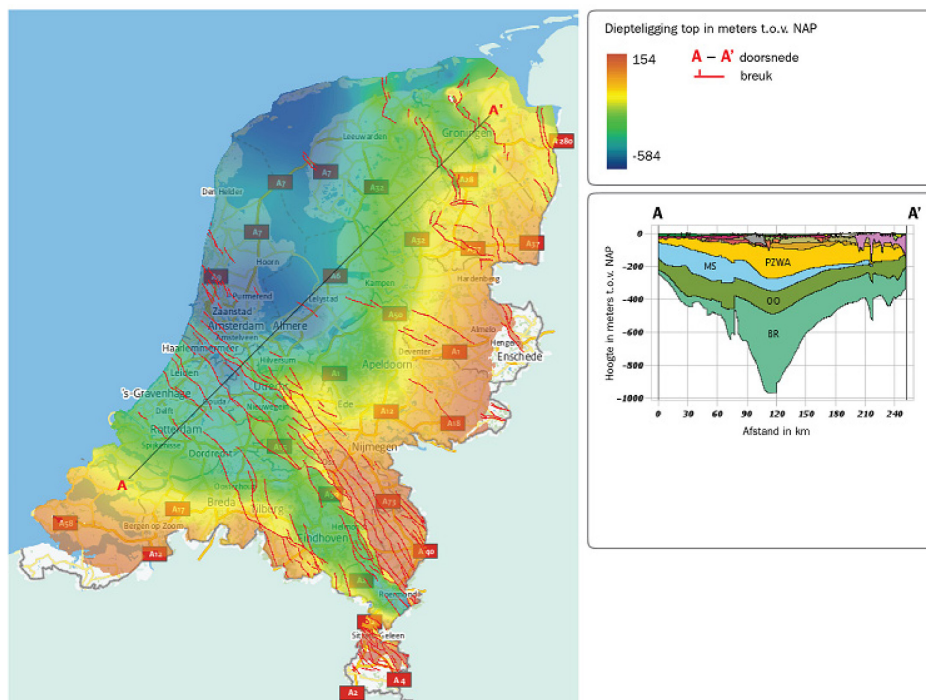
temperatuurmeting als kansrijke indicator worden gebruikt. Hierbij dient dan wel onderscheid gemaakt te kunnen worden tussen opwarming door warmteuitstraling en lekkage van (heet) formatiewater.

Aanbevolen wordt om deze indicatoren ($EC_{(bulk)}$ en T) in te zetten voor de reguliere monitoring, dus als indicatoren voor lekkage. Als op basis van deze indicatoren aanwijzingen zijn voor lekkage, dan moet het monitoringspakket uitgebreid worden met minimaal de volgende parameters: Anionen en Kationen (macro's en sporenelementen), BTEX, opgeloste gassen (C1-C10 + stabiele isotopen koolstof ^{13}C en deuterium (2H of D) in methaan en hogere alkanen) en eventuele toegepaste hulpstoffen (bijv. anti scalants). Gasmetingen worden bij voorkeur uitgevoerd op watermonster onttrokken vlak onder afsluitende kleilagen.

Ook voor de nul-meting worden deze parameters aanbevolen. Hierbij dienen het geleidingsvermogen en de temperatuur gedurende een periode voorafgaande aan de boringen gemeten te worden om een heldere baseline waarde te verkrijgen. De exacte invulling hiervan is locatiespecifiek en mede afhankelijk van bestaande kennis over de grondwatersamenstelling en fluctuaties daarin. Belangrijk hierbij is dat onverbuisd geboorde waarnemingsputten zoveel werkwater (en eventueel bentoniet) vergen, dat de geïnstalleerde waarnemingsfilters 0,5-1 jaar lang nog delen werkwater kunnen bevatten, en enkele jaren daarna nog verhoogde concentraties aan b.v. Ba en Mn (Stuyfzand, pers. meded.).

4.3 Monitoring over de diepte

Door het doorsnijden van soms dikke watervoerende pakketten is de z-coördinaat van een eventuele lekkage een belangrijke complicerende factor voor het monitoringsontwerp. In theorie kan over de gehele lengte van de put een lek ontstaan. Het gaat hierbij om veelal 2000-3000 meter. Een groot deel van dit dieptebereik is echter minder relevant voor functies aan maaiveld en in het bijzonder de drinkwatervoorziening. In Nederland wordt de top van slechtdoorlatende Tertiaire afzettingen (Formatie van Breda, Figuur 4-4) veelal gezien als de geohydrologische basis. Hoewel dit niet opgaat voor Zuid-Limburg willen we hier in deze studie bij aansluiten. Het dieptebereik van de relevante kwartaire afzettingen varieert dan nog van enkele (tientallen) meters in Oost Nederland (Twente en de Achterhoek) en Zeeuws Vlaanderen tot enkele honderden meters in de Centrale Slenk. In Zuid Limburg kan de diepte tot de afzettingen uit het carboon (Formatie van Epen) worden aangehouden. Als verdere inperking kan gekozen worden voor de diepte waarbij het grondwater te zout wordt voor drinkwaterproductie als maximale diepte (drinkwaternorm in het drinkwaterbesluit is 150 mg/l). Vooralsnog wordt enkel drinkwater gewonnen uit zoete watervoerende pakketten. De maximale diepte van zoete watervoerende pakketten bedraagt ca. 400 meter, met een uitschieter naar ca. 600 meter in de Centrale Slenk. Drinkwater wordt gewonnen tot een diepte van ca. 348 m-mv. Voor monitoring is dit nog steeds een fors dieptebereik.

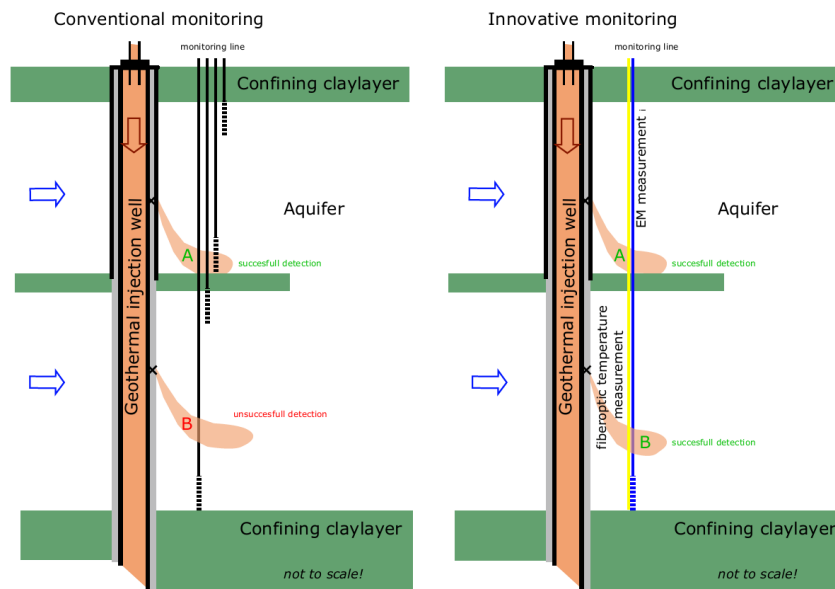


FIGUUR 4-4 DIEPTELIGGING TOP VAN DE FORMATIE VAN BREDA (BRON: DGM V2.2 WWW.DINOLOKET.NL)

Met een conventionele aanpak (zie paragraaf 3.3.4) is bij een dergelijk dieptebereik ofwel een zeer forse monitoringsinspanning noodzakelijk (groot aantal filters), of moet het missen of laat opmerken van een lekkage worden geaccepteerd. Hierbij geldt hoe groter de onderlinge afstand tussen de filters hoe kleiner de trefkans. Een tussenoplossing is de keuze voor grote filterlengtes (bijv. 5 m) zoals voorgesteld voor de IBC-systematiek (Vereniging van afvalverwerkers, 1995). Nadeel hiervan is echter een grotere verdunning en daardoor lagere detectiekans voor kleine lekkages, bij nog steeds een forse monitoringsinspanning. Anticiperend op de samenstelling van het weglekkende water wordt bij Duitse geothermieputten en ook bij IBC-stortplaatsen gekozen voor het snijdend plaatsen van monitoringsfilters met onderliggende slechtdoorlatende lagen en het plaatsen van filters bovenin watervoerende pakketten. De filters onderin de pakketten richten zich dan op zaklagen als gevolg van het zeer zoute formatiewater. De filters bovenin richten zich juist op de lichte componenten in het formatiewater zoals (edel)gassen en koolwaterstoffen. Het aantal filters kan sterk vergroot worden door MCW's (paragraaf 3.3.4) toe te passen. In deze filters is het echter niet mogelijk om geofysische metingen te doen. Ook zijn gezien de geringe diameter aangepaste EC- en temperatuursensoren nodig. Om de trefkans via bemonstering bij verspreide monitoringsfilters verder te vergroten kan een kleine bemaling op de filters worden toegepast. Een eventuele verontreiniging wordt dan naar de filters togetrokken.

Ten opzichte van de stand van de techniek in 1995, toen het monitoringsbeleid rond IBC-stortplaatsen is vormgegeven, is er echter technisch forse voortuitgang geboekt. Veelbelovend zijn de in paragraaf 3.4 besproken glasvezel en EM technieken. Deze technieken maken continue monitoring met de diepte mogelijk en vormen hiermee een oplossing voor bovengenoemde problemen (Figuur 4-5). Deze metingen vragen voorsnag wel om een aantal personele handelingen. Automatische (semi-)continue monitoring met de tijd is dan ook nog niet mogelijk. Op basis van de voor Figuur 4-1 met behulp van de IBC-systematiek afgeleide monitoringsintervallen is dit ook niet noodzakelijk. De EM-metingen en de glasvezel temperatuurmetingen dienen als "early warning". Als deze metingen een

indicatie geven voor lekkage kan nader onderzoek worden uitgevoerd door het bemonsteren en analyseren van grondwater uit bestaande of nieuw te plaatsen monitoringsfilters. Belangrijk hierbij is dat het “early warning”-systeem geen vals-positieve indicaties geeft door bijvoorbeeld warmte-uitstraling uit de put (zie paragraaf 5.1.1). De gevoeligheid van deze technieken bij geothermie toepassing moet dan ook in de praktijk worden onderzocht.



FIGUUR 4-5 BENEDENSTROOMSE EERSTE DETECTIE VAN LEKKAGES (A & B) UIT EEN INJECTOR, MET (LINKS) CONVENTIONELE MONITORING MET WAARNEMINGSFILTERS EN (RECHTS) INNOVATIEVE DETECTIE MET GLASVEZEL TEMPERATUURMETINGEN EN EM METINGEN (EVENTUEEL REFERENTIEMEETPUNT BOVENSTROOMS NIET WEERGEGEVEN).

4.4 Schatting kosten reguliere monitoring

4.4.1 Eerste aanzet voor een monitoringsontwerp

In deze paragraaf werken we een voorbeeld ontwerp voor grondwatermonitoring uit. Het gaat hierbij nadrukkelijk om een voorlopig ontwerp. Doel van dit ontwerp is het verkrijgen van inzicht in de benodigde acties en materialen en gevoel voor de orde van grootte van kosten voor aanleg en beheer en onderhoud. De kosten voor reguliere monitoring zoals voorgesteld zijn sterk afhankelijk van het aantal monitoringslocaties. Uitgaande van het monitoringsconcept gebaseerd op de IBC systematiek zoals weergegeven in Figuur 4-1 gaat het om drie monitoringslocaties, waarvan één referentiemeetpunt en twee meetpunten voor effectmonitoring. Echter zoals in paragraaf 2.6.2 beschreven is de invloed van een eventuele lekkage al snel groot ten opzichte van de regionale grondwaterstroming. Als dicht (bijv. 5 a 10 m afstand) op de geothermieput wordt gemonitord is de plaatsing in het x-y vlak minder van belang en kan worden volstaan met één meetpunt voor effectmonitoring en één referentiemeetpunt. Vervolgens van belang is de diepte van het monitoringsinterval en het aantal watervoerende pakketten en scheidende kleilagen.

We werken hiervoor twee voor Nederland representatieve gevallen uit:

1. Diepe watervoerende pakketten
Monitoringsinterval 250 m, freatisch pakket van 10m en drie watervoerende pakketten van 50 meter. Scheidende kleilagen van 20, 40 en 30 meter dikte
2. Ondiep freatisch pakket op hydrologische basis
Monitoringsinterval 40 m, geen scheidende lagen

Voor casus 1 worden uitgaande van het ontwerp in Figuur 4-1 twee boringen tot 250 meter diepte geplaatst. Deze worden uitgevoerd met monitoringsfilters boven en onderin het freatische pakket, en drie monitoringsfilters per watervoerend pakket (onderin, bovenin en halverwege). De buis van het diepste monitoringsfilter heeft een voldoende grote diameter voor het uitvoeren van EM-metingen. De benedenstroomse diepe boring wordt uitgevoerd met een glasvezelkabel. In alle monitoringsfilters van de diepe boringen wordt een druk, geleidbaarheid en temperatuursensor geplaatst. Daarnaast worden vier ondiepe freatische monitoringsbuizen geplaatst. Deze monitoring is standaard voorgeschreven vanuit de BARMM als het terrein buiten de putkelders niet voldoet aan de eisen van bodemrisicocategorie A, maar aan die van A*. De buizen dienen zodanig te zijn geplaatst dat bodemverontreiniging door (hulp)stoffen die bij het uitvoeren van boringen en onderhoud worden gebruikt, kunnen worden gesignaleerd.

Voor casus 2 worden uitgaande van het ontwerp twee boringen tot 40 meter geplaatst. Deze worden uitgevoerd met 1 monitoringsfilter bovenin het freatische pakket, één halverwege en één onderin het watervoerende pakket. Daarnaast worden weer de vier ondiepe freatische peilbuizen geplaatst. De benedenstroomse diepe boring wordt uitgevoerd met een glasvezelkabel. In alle monitoringsfilters van de diepe boringen wordt een druk, geleidbaarheid en temperatuursensor geplaatst.

TABEL 4-1 GESCHATTE KOSTEN VOOR REALISATIE (CAPEX) VAN REGULIER MONITORING SYSTEEM

	aantal	p.e.	Totale kosten
Casus 1 Diepe watervoerende pakketten			
• Boren en inbouwen diepe monitoring filters (incl. boorbeschrijving, boorgatmeting en afwerking) ¹⁾	2	65.0 k€	130 k€
• Extra kosten vloeistofdichte doorvoeringen (schatting)	1	2.5 k€	2.5 k€
• Plaatsen en kalibreren glasvezelkabels tot einddiepte	2	5.0 k€	10 k€
• Boren en inbouwen ondiepe monitoringfilters (BARMM)	4	0.125 k€	0.5 k€
• Sensoren druk, geleidbaarheid en temperatuur ²⁾	22	2 k€	44 k€
• Extra kosten elektrotechniek (schatting)	2	2 k€	4 k€
Som aanlegkosten Casus 1 (CAPEX)			191 k€
Casus 2 Freatisch pakket op hydrologische basis			
• Boren en inbouwen diepe peilfilters (incl. boorbeschrijving, boorgatmeting en afwerking)*	2	10.4 k€	21 k€
• Extra kosten vloeistofdichte doorvoeringen (schatting)	1	2.5 k€	2.5 k€
• Plaatsen en kalibreren glasvezelkabels tot einddiepte	2	5.0 k€	10 k€
• Boren en inbouwen ondiepe monitoringfilters (BARMM)	4	0.125 k€	0.5 k€
• Sensoren druk, geleidbaarheid en temperatuur	3	2 k€	6 k€
• Extra kosten elektrotechniek (schatting)	2	1 k€	2 k€
Som aanlegkosten Casus 2 (CAPEX)			42 k€
¹⁾ exclusief begeleiding, rijplaten, aanpassing hekwerk etc.			
²⁾ als na een aantal projecten voldoende vertrouwen is in de EM- en glasvezel-metingen kan het aantal geleidbaarheidssensoren worden teruggebracht.			

De operationele kosten voor het monitoringssysteem worden bepaald door de meetfrequentie tijdens reguliere monitoring en de kosten voor het vaststellen van de nul-situatie. Vooralsnog gaan we uit van één bemonsteringsronde voor de nul-situatie en alleen

verdere monsternamen als daar vanuit temperatuur en geleidbaarheidsmetingen aanleiding toe is. De EM metingen worden in de operationele fase alleen uitgevoerd op de monitoringspunten. Bij detectie van een afwijking volgt een evaluatie en eventueel vervolgonderzoek. Onderdeel hiervan is het bemonsteren van de referentiebuizen om externe invloeden uit te sluiten. De extra kosten voor diepe monitoringssysteem zijn hiermee gedurende de operationele fase beperkt. Monitoring op de ondiepe monitoringsfilters buiten de bodembeschermende voorziening volgt de standaardsystematiek zoals beschreven in het BARMM en zijn hier niet verder uitgewerkt. De meetfrequentie is locatiespecifiek en kan gedurende de levenscyclus van een geothermie-systeem variëren. Voor het voorbeeld is uitgegaan van een meetfrequentie van 1 keer per jaar.

TABEL 4-2 GESCHATTE JAARLIJKSE KOSTEN (OPEX) VOOR REGULIERE MONITORING OP HET DIEPE MONITORINGSSYSTEEM UITGAANDE VAN EEN JAARLIJKSE MEETRONDE.

	aantal	p.e.	Jaarlijkse kosten
Casus 1 Diepe watervoerende pakketten			
• EM-meting en uitwerking	2	5.0 k€	10.0 k€
• Uitlezen glasvezelkabels en uitwerking	1	5.0 k€	5.0 k€
• Onderhoud monitoringssysteem	1	1.0 k€	1.0 k€
Som monitoringskosten Casus 1 (OPEX)*			16.0 k€
Casus 2 Freatisch pakket op hydrologische basis			
• EM-meting en uitwerking	2	3.0 k€	6.0 k€
• Uitlezen glasvezelkabels en uitwerking	1	5.0 k€	5.0 k€
• Onderhoud monitoringssysteem	1	1.0 k€	1.0 k€
Som monitoringskosten Casus 2 (OPEX)*			12.0 k€
*exclusief rapportage aan toezichthouder. De uitlezing van de sensoren voor druk, geleidbaarheid en temperatuur is geïntegreerd in het operationele systeem. Hiervoor zijn geen extra operationele kosten opgenomen			

Voordat gestart wordt met het in bedrijf nemen van de put moet een nulmeting worden uitgevoerd. Deze nul-meting bestaat uit de in Tabel 4-1 beschreven EM- en glasvezelmetingen, aangevuld met grondwatermonsternamen uit de monitoringsfilters en analyse in het lab. Het analysepakket bestaat uit minimaal de volgende parameters: Anionen en Kationen (macro's en sporenelementen), BTEX, opgeloste gassen (C1-C10 + stabiele isotopen koolstof 13 (^{13}C) en deuterium (^2H of D) in methaan en hogere alkanen) en eventuele toegepaste hulpstoffen (bijv. anti scalants). Afhankelijk van de te analyseren parameters variëren de analysekosten tussen ca. 450€ en 600 € per monster (afhankelijk van laboratoriumkeuze kunnen prijzen hiervan afwijken), waarbij de kosten vooral bepaald worden door de gassamenstelling en isotopenanalyse van de gassen. Uitgaande van uitvoering van de nul-meting op één van de monitoringslocaties bedragen de monsternamen- en analysekosten voor de nulmeting voor casus 1 ca. 6 k€ en voor casus 2 ca. 2.5 k€.

4.5 Synthese

De in een aantal deelstaten in Duitsland inmiddels gangbare monitoringspraktijk bij geothermiesystemen vertoont conceptuele overeenkomsten met de systematiek zoals in Nederland gehanteerd bij stortplaatsen. Toepassing van deze systematiek en inzichten zoals beschreven in hoofdstuk 2 over samenstelling en verspreiding van eventueel weglekkend formatiewater geven de volgende inzichten:

- Effectieve grondwatermonitoring rond geothermieputten is praktisch haalbaar
- Het monitoringsinterval zal zich onder Nederlandse condities bevinden tussen enkele maanden en enkele jaren uitgaande van een monitoringszone (maximale afstand waarover een verontreiniging zich mag uitbreiden vanaf de put) van 50 meter.
- Monitoringpunten dienen zo dicht mogelijk op de geothermieput(ten) worden geplaatst. Een indicatieve afstand hierbij is 5 a 10 meter vanaf de put.
- Temperatuur en zoutgehalte (elektrisch geleidingsvermogen, EGV) zijn sterke indicatoren voor eventuele lekkage. Pas als hierin afwijkingen worden geconstateerd wordt aanbevolen een uitgebreidere bemonstering en analyse uit te voeren.
- Temperatuur en zoutgehalte kunnen continue over de diepte worden gemeten door inzet van nieuwe technieken zoals glasvezelsensoren en EM-metingen. De kans op het missen van een lekkage over de diepte wordt hiermee zeer klein.
- Voor referentiemetingen en periodieke aanvullende metingen aan bijvoorbeeld opgeloste gassen blijven monitoringsfilters noodzakelijk. Ook kunnen hieruit na detectie van een afwijking snel watermonsters worden genomen voor aanvullende analyse.
- De kosten zijn sterk afhankelijk van het beoogde dieptebereik. Hiervoor zijn twee voorbeelden uitgewerkt. De CAPEX voor een monitoringssysteem met een dieptebereik van 250 meter bedraagt bijna 200 k€, de CAPEX van een systeem met een dieptebereik van 40 meter bedraagt iets meer dan 40 k€.
- Omdat wordt gewerkt met temperatuur en zoutgehalte als eerste indicatoren is de OPEX onder normale omstandigheden beperkt tot 16 k€ voor de diepe situatie en 12 k€ voor de ondiepe situatie. Pas als een afwijking wordt gedetecteerd wordt op meer parameters bemonsterd en geanalyseerd.
- Meer inzicht is nodig in het effect van warmteuitstraling op de temperatuurfluctuaties rond geothermieputten.
- Meer inzicht in dichtheidseffecten op de vorm en afstroming van een bel weggelekt formatiewater is nodig.
- Praktijkervaring met toepassing van glasvezel en EM technieken bij monitoring van geothermie systemen moet nog verkregen worden.

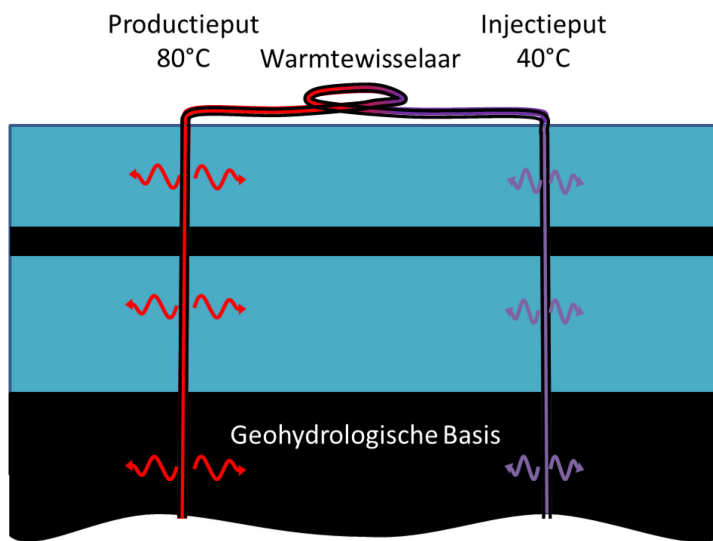
5 Kennisontwikkeling Grondwatermonitoring

In het voorgaande hoofdstuk is beschreven hoe de reguliere grondwatermonitoring tijdens de bedrijfsvoering van geothermie zou kunnen worden ingericht. Hierbij zijn echter nog allerlei vragen doordat de invulling van grondwatermonitoring bij geothermiesystemen in Nederland nog in de kinderschoenen staat. Gericht onderzoek naar de aspecten die het meest van invloed zijn op de gewenste inrichting van de grondwatermonitoring kan daarom bijdragen aan het zowel effectief als kosten-efficiënt maken van deze monitoring. Voor twee belangrijke voor geothermie belangrijke aspecten in die monitoring, wordt in dit hoofdstuk een uitwerking gegeven van de bijbehorende onderzoeksvragen en mogelijke onderzoeksanpak: 1) De effecten van warmteuitstraling vanuit een geothermieput op het omringende grondwater en 2) de verspreiding van zout formatiewater in omringend grondwater als gevolg van een lek in een geothermische injectieput en 3) kennisontwikkeling op het gebied van techniek en plaatsing van EM en glasvezeltechnieken voor monitoring bij geothermieputten.

5.1 Effecten van warmteuitstraling van geothermieput op omringend grondwater

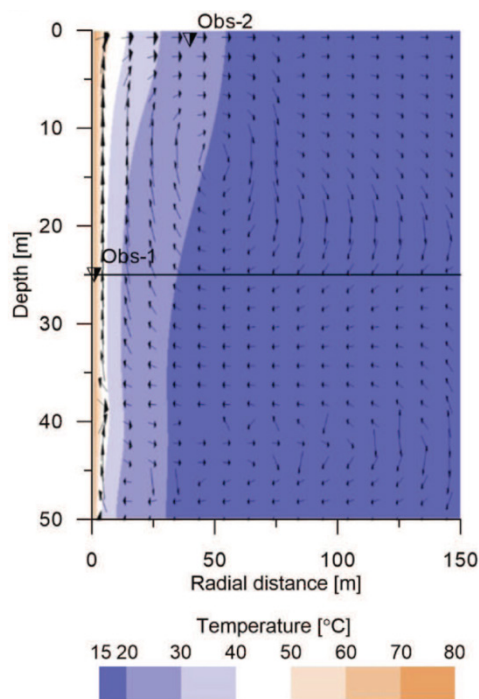
5.1.1 Huidige stand van kennis

Vanwege het grote temperatuurverschil tussen het geproduceerde formatiewater en het omringende grondwater vindt er uitstraling van warmte plaats. De effecten hiervan op grondwaterstroming en -kwaliteit zijn een aandachtspunt voor de grondwatermonitoring bij geothermie (paragraaf 2.3). Hoewel het optreden van warmteuitstraling vanuit mijnbouwputten een bekend fenomeen is, bijvoorbeeld vanwege de destabiliserende effecten in permafrostgebieden, zijn de effecten ervan op omringend grondwater alleen nog modelmatig beschouwd (de la Loma Gonzales & Hartog, 2016b; Hartog, 2016; van Lopik et al., 2015).

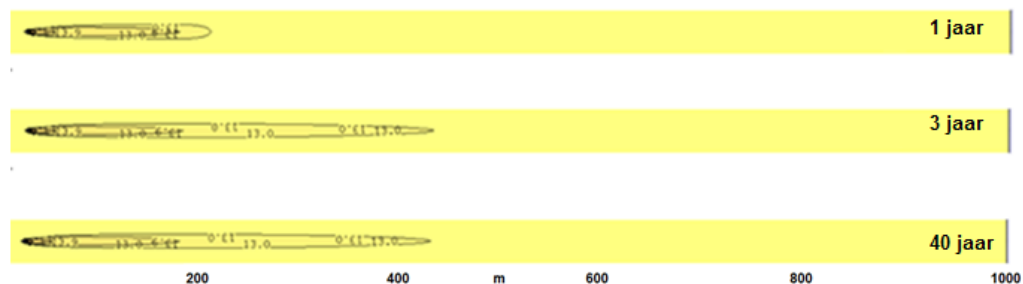


FIGUUR 5-1: SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE WARMTEUITSTRALING NAAR OMLIGGENDE PAKKETTEN VANUIT DE WARME PRODUCTIEPUT EN DE MINDER WARME INJECTIEPUT (HARTOG, 2016).

Deze modelonderzoeken tot nu toe hebben laten zien dat de warmteuitstraling kan leiden tot grondwaterstroming en -menging doordat het buiten de put opgewarmde grondwater opdrijft door de lagere dichtheid bij hogere temperaturen (Figuur 5-2). Tevens is aangetoond dat de mate waarin deze opdriving plaatsvindt onder meer af hangt van de mate waarin er sprake is van achtergrondstroming in het grondwater (Hartog, 2016, de la Loma Gonzalez en Hartog, 2015). Ook geven deze studies aan dat de achtergrondsnelheid waarmee het grondwater dwars op de geothermische put stroomt ook mede bepaalt hoe ver en hoe snel stroomafwaarts bepaalde isothermen zich stabiliseren (Figuur 5-3).



FIGUUR 5-2: GEMODELLEERDE TEMPERATUURVERDELING NA 30 JAAR ROND EEN PUT VAN 80°C IN GRONDWATER MET EEN ACHTERGRONDTEMPERatuur VAN 15°C (VAN LOPIK ET AL., 2015). DE PIJLEN GEVEN DE RELATIEVE STERKTE EN RICHTING VAN DE DOOR DE WARMTE-UITSTRALING VAN DE PUT GEÏNDUCEERDE GRONDWATERSTROMING AAN. SITUATIE ZONDER ACHTERGRONDSTROMING.



FIGUUR 5-3: GEMODELEERDE VERSPREIDING (DE LA LOMA GONZALES & HARTOG, 2016B) VAN WARMTE IN DE RICHTING VAN GRONDWATERSTROMING (VAN LINKS NAAR RECHTS) MET EEN SNELHEID VAN 32CM/DAG (117M/JAAR, SITUATIE NABIJ EEN GRONDWATERONTTREKING) 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.

Behalve dat warmteuitstraling uit putten zorgt voor opwarming van omringend grondwater en tot menging kan leiden, kunnen de temperatuurverhogingen ook de grondwaterkwaliteit beïnvloeden. Als voorbeeld van een mogelijk gevolg door warmteuitstraling uit putten is in eerder modelonderzoek de desorptie van arseen genomen (De la Loma Gonzales & Hartog, 2016a; Hartog, 2016). Uit eerder veld- en laboratorium onderzoek in andere context (thermische energie opslag) zijn de effecten van opwarming ook aangetoond (bijvoorbeeld Bonte (2015)). Uit deze laatste studies komt ook naar voren dat de aard en de mate van bepaalde waterkwaliteitseffecten sterk locatiespecifiek zijn.

5.1.2 Kennisbehoefte ten behoeve van reguliere grondwatermonitoring

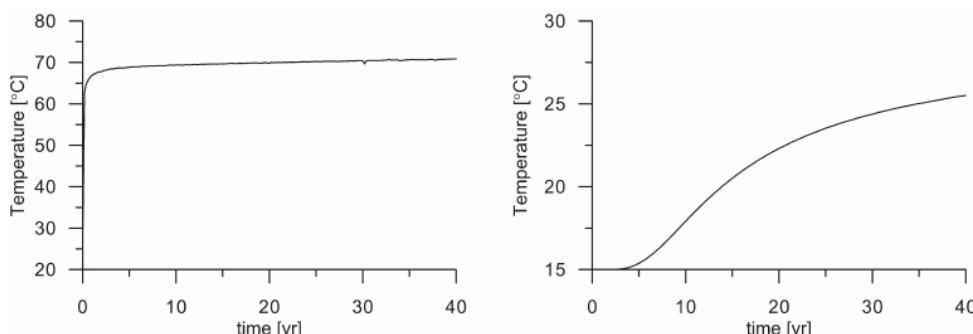
Vanwege het temperatuurverschil tussen het geproduceerde formatiewater en het omringende grondwater treedt warmteuitstraling vanuit geothermieputten altijd op. Voor de mate waarin dat in het veld gebeurt en welke gevolgen dat heeft voor grondwaterstroming, -menging en kwaliteit geven vooralsnog alleen modelsimulaties een indicatie. Het is echter nog onbekend hoe accuraat de tot nu toe gebruikte modellen de effecten in het veld kunnen beschrijven. Daarbij komt dat de fysische effecten (stroming, temperatuur) en des te meer de optredende kwaliteitsveranderingen sterk af zullen hangen van locatie-specifieke hydrogeologische en hydrogeochemische condities. Het beter begrijpen van de effecten op grondwater door warmteuitstraling die optreden als gevolg van bepaalde condities is van belang voor de reguliere grondwatermonitoring om een aantal redenen:

1. Het maakt het mogelijk de reguliere monitoring zo in te richten dat de effecten van warmteuitstraling te meten zijn, als blijkt dat de effecten daarom vragen
2. Het maakt onderscheid mogelijk tussen de veranderingen in grondwater die optreden als gevolg van warmteuitstraling (treedt sowieso op) en andere effecten zoals lekkages
3. Het maakt het mogelijk de bestaande warmteuitstralingsmodellen te verbeteren en hun beschrijvende en voorspellende waarde te vergroten.

5.1.3 Verkenning benodigd onderzoek

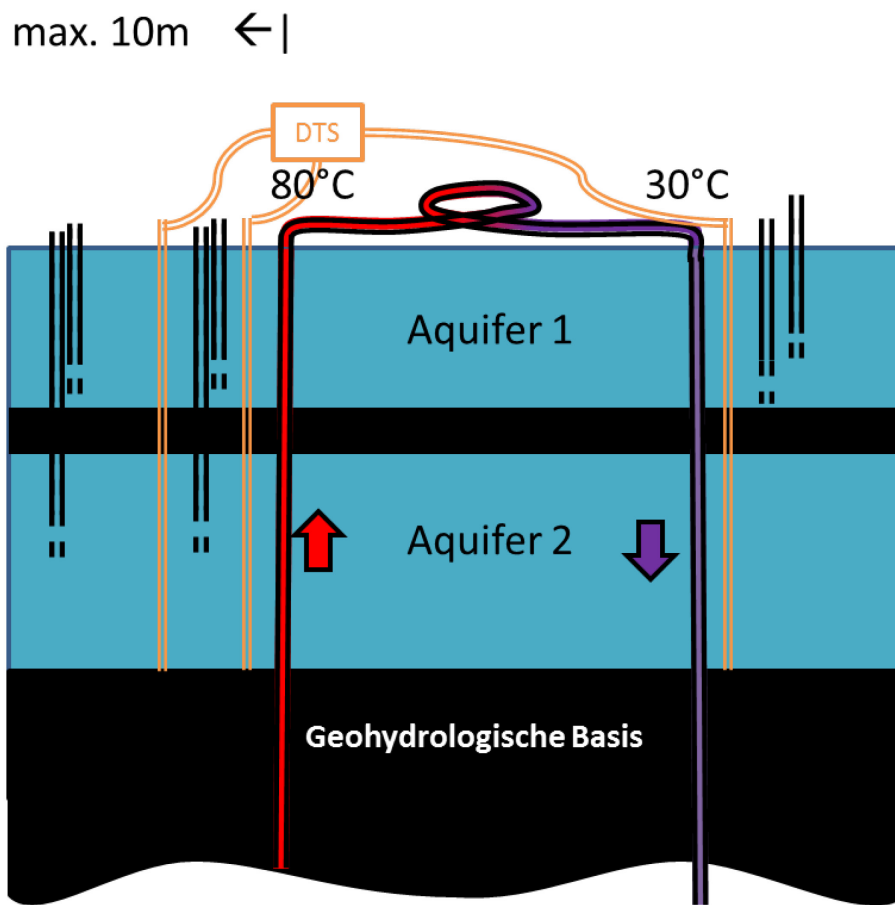
Om inzicht te krijgen in de daadwerkelijke effecten van warmteuitstraling uit geothermieputten op grondwater is veldonderzoek nodig. Idealiter vindt dit veldonderzoek plaats voor de putten van een geothermiesysteem, in plaats van het creëren van een kunstmatig analogon. Zo wordt er praktische ervaring opgedaan bij het creëren van een monitoringsnetwerk bij een geothermiesysteem. Tevens kan zo de gerealiseerde monitoringscapaciteit ten behoeve van het onderzoek benut worden voor de reguliere monitoring van het geothermiesysteem.

Om de benodigde doorlooptijd van het onderzoek beperkt te houden, is het van belang dat de effecten van warmteuitstraling voldoende snel worden waargenomen. Warmteuitstraling is een relatief langzaam proces waarvan de snelheid afneemt met toenemende afstand van de put. De simulaties geven aan dat over een periode van 30 jaar de opwarming van grondwater enkele tientallen meters ver komt (Figuur 5-2, zonder achtergrondstroming). Hierbij begint op 40 meter afstand van de put na 4 jaar de temperatuur toe te nemen (Figuur 5-4), terwijl dit op 0.75m afstand na een week gebeurt.



FIGUUR 5-4: GEMODELLEERDE ONTWIKKELING VAN TEMPERATUUR OP 0,75M AFSTAND (LINKS, OBS-1 IN FIGUUR 5-2) EN OP 40M AFSTAND (RECHTS, OBS-2 IN FIGUUR 5-2) VAN EEN GEOTHERMIEPUT VAN 80°C IN GRONDWATER MET EEN ACHTERGRONDTEMPERATUUR VAN 15°C (VAN LOPIK ET AL., 2015).

Op basis van deze inzichten, zal veldonderzoek naar de effecten van warmteuitstraling zich binnen een afstand tot 10m van de put moeten richten (Figuur 5-5) voor een onderzoek van maximaal een paar jaar. Door de combinatie van glasvezelmonitoring (DTS, paragraaf 3.4.2) en conventionele monitoringsfilters uitgerust met divers kan de ontwikkeling van temperatuur en geleidbaarheid met de tijd nauwgezet gevolgd worden. Door middel van grondwaterbemonstering kan op gezette tijden de ontwikkeling van de grondwaterkwaliteit als gevolg van de warmteuitstraling gevolgd worden. Door op locatie de monitoring in meerdere van de ter plaatse aanwezige aquifers uit te voeren (Figuur 5-5) kunnen de effecten van verschillen in de hydrogeologische en hydrogeochemische condities meegenomen worden. In principe richt de onderzoeksmonitoring zich op de effecten bij de productieput, omdat daar het temperatuurverschil en dus de warmteuitstraling het grootst is, maar aanvullend maakt monitoring bij de injectieput het mogelijk om de effecten door uitstraling bij lagere temperatuur te bepalen (Figuur 5-6). Punt van aandacht hierbij is de onderlinge afstand tussen de productie- en injectieput en de ligging ten opzichte van de regionale grondwaterstroming. Op termijn zal overigens naar verwachting de temperatuuruitstraling vanuit de productieput die vanuit de injectieput gaan overheersen. Tot slot kan, na het vaststellen van de warmteuitstralingscondities onder de heersende grondwaterstromingscondities, door middel van onttrekking geïnduceerde grondwaterstroming, het effect van verschillende grondwaterstromingscondities op de warmteuitstraling onderzocht worden.

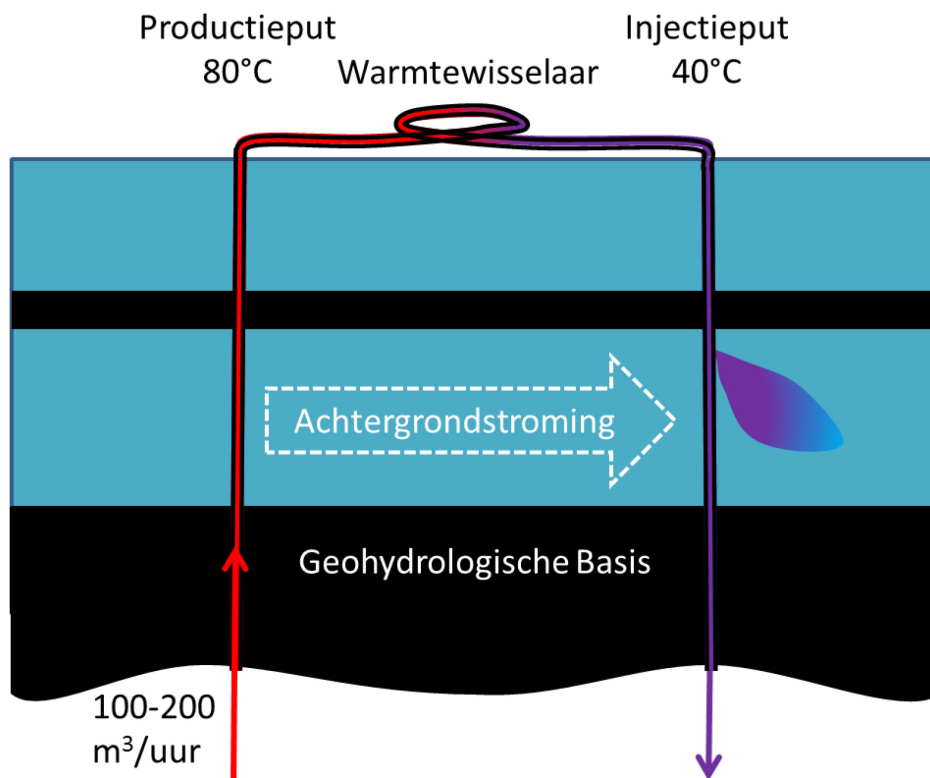


FIGUUR 5-5: SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN INVULLING VELDONDERZOEK NAAR EFFECTEN VAN WARMTEUITSTRALING

5.2 Verspreiding van zout formatiewater door putlekkage in omringend grondwater

5.2.1 Huidige stand van kennis

Dat lekkage van formatiewater vanuit injectieputten naar omringend grondwater (Figuur 5-6) een reëel risico vormt, is bekend (paragraaf 2.4.2), al is het inzicht in de wijze en mate van optreden ervan zeer beperkt. Gedegen studies over hoe bij lekkage uit een put het gelekte volume zich verspreidt en mengt met het omringende grondwater ontbreken, naar ons weten, zelfs volledig. In paragraaf 2.6 hebben wij op basis van een aantal grove vingeroefeningen een beeld proberen te vormen van mate waarin lekkage zou kunnen optreden en de factoren die daarbij van invloed zijn op de verspreiding van gelekt formatiewater naar het grondwater. Door het grote aantal factoren dat van invloed blijkt op de verspreiding (drukverschil, lekgrootte, temperatuur en dichtheid van het formatiewater, achtergrondstroming etc), is de te verwachten verspreiding op deze wijze echter niet eenduidig vast te stellen.



FIGUUR 5-6 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.

5.2.2 Kennisbehoefte ten behoeve van reguliere monitoring

Lekkage van formatiewater vanuit een injectieput naar grondwater kan optreden als het putontwerp, de gebruikte materialen of de wijze van realisatie onvoldoende is. Bij het nemen van voldoende voorzorgsmaatregelen kan de kans op lekkage sterk worden verkleind. De reguliere grondwatermonitoring fungeert daarmee vooral om aan te tonen dat er géén putlekkage van formatiewater plaatsvindt. Om dit overtuigend te kunnen aantonen, moet de reguliere grondwatermonitoring zo worden ingericht dat, bij het onvoorziens toch optreden van putlekkage, deze lekkage met een grote mate van zekerheid op tijd zal worden aangetoond. Om de reguliere grondwatermonitoring op deze wijze te kunnen inrichten is inzicht nodig in hoe onder een range van verschillende condities gelekt formatiewater zich vanuit de put in het grondwater zou kunnen verspreiden. Dit is van belang om voor de inrichting van de reguliere monitoring om een aantal redenen:

1. Het maakt duidelijk hoe verschillende factoren van invloed zijn op de verspreiding van gelekt volume en maakt inzichtelijk in welke mate onder bepaalde condities een aangepaste monitoringsinrichting gewenst is.
2. Het maakt duidelijk op welke wijze reguliere grondwatermonitoring zowel effectief als zo kosten-efficiënt mogelijk kan worden ingericht om de onvoorziene lekkage van formatiewater met grote mate van zekerheid te kunnen detecteren
3. Inzicht in de verspreiding van gelekt volume door putlekkage, maakt het mogelijk om na detectie in de reguliere monitoring, ook optimale mitigatiemaatregelen te kunnen nemen

5.2.3 Verkenning benodigd onderzoek

Om inzicht te krijgen in de wijze van verspreiding van uit een put gelekt formatiewater is onderzoek bij een operationeel geothermiesysteem niet zinnig. De kans is immers heel klein dat binnen een bepaalde onderzoeksperiode of überhaupt bij dat systeem ooit putlekkage zal plaatsvinden. Ook veldonderzoek waarbij een lekkage wordt nagebootst is, vanwege de impact op grondwater, bijkomende vergunningsvereisten en de beperkte range aan condities waarop in het veld getest kan worden, onaantrekkelijk. In plaats daarvan, kan door middel van modelonderzoek onder een grote range aan realistische condities bepaald worden welke mate en wijze van verspreiding te verwachten valt. Eerder onderzoek (Zuurbier, 2016) heeft al aangetoond dat modelsimulaties van ondergrondse zoet/zout interactie in hoge mate overeenstemmen met veldobservaties. In het onderzoek door van Lopik et al. (2015) is het effect van de warmteuitraling onderzocht, maar zijn nog geen simulaties met lekkages uitgevoerd. Aanvullend modelonderzoek is dus gewenst. Parameters die in dit modelonderzoek gevarieerd worden zouden in ieder geval de volgende moeten omvatten:

- Lekkage debiet (afhankelijk van lekgrootte)
- Temperatuur en zoutgehalte van het formatiewater
- Mate van achtergrondstroming en oriëntatie ten opzichte van lekpositie op de put
- Positie van het lek ten opzichte van scheidende lagen en dikte van aquifer waarnaar de lekkage optreedt

Daarnaast kunnen modelsimulaties inzicht geven in de wijze waarop er efficiënte en effectieve mitigatiemaatregelen bij lekkage naar grondwater kunnen worden gerealiseerd. Onderzocht kan worden in hoeverre de inrichting van de reguliere monitoring daarvoor kan worden ingezet.

6 Synthese en conclusies

Een potentieel risicovolle activiteit voor de grondwaterkwaliteit:

Het aanleggen en exploiteren van een geothermiesysteem is een potentieel bodem- en grondwater bedreigende activiteit. Enerzijds gaat het hierbij om indirecte effecten. Een geothermieput zal het grondwater rond de put opwarmen, wat de kwaliteit van het grondwater mogelijk negatief kan beïnvloeden. Daarnaast is er een risico op onbedoelde migratie van verontreinigende stoffen door versmering van al aanwezige verontreinigingen tijdens boren of door kortsluitstroming bij onverhoopt onvoldoende goede afdichting van beschermende kleilagen. Een voorbeeld hiervan is indringing van brak of zoutwater via een onvoldoende gecementeerde kleilaag. Anderzijds vormt het verpompen en tijdelijk opslaan van het onder andere zeer zoute formatiewater zelf een risico. Het kan hierbij gaan om falen van opslag voorzieningen zoals foliebassins door technische of operationele fouten, maar ook om lekkages uit leidingen en uit de putten zelf. Dit laatste is niet hypothetisch zoals blijkt uit een aantal recente lekkages en integriteitsproblemen in Nederland en Duitsland.

Onverhoopte lekkage op diepte uit geothermieputten relevant

Door het hydrostatische drukverschil in de Nederlandse ondergrond vormt hierbij vooral het falen van de injectieput een risico. Uit verkennende berekeningen blijkt dat een onopgemerkte lekkage uit injectieput al bij een zeer klein gaatje kan resulteren in lekkage van honderden kubieke meters zeer zout formatiewater in zoete watervoerende pakketten. Deze lekkage is beduidend groter dan bijvoorbeeld de te verwachten kortsluitstroming bij een onvoldoende afdichting van de annulus bij een kleilaag. Bij dit laatste gaat het enkele tot hooguit enkele tientallen m³/jr. De verwachting is dat een lekkage uit een injectieput een bel zal vormen rond de put. Op basis van grove analytische overwegingen lijkt een pluim alleen aannemelijk bij zeer hoge grondwatersnelheden in de directe nabijheid van een grondwateronttrekking. Wel zal dit water door het forse dichtheidsverschil waarschijnlijk uitzakken naar de onderkant van het betreffende watervoerende pakket.

Grondwatermonitoring op diepte noodzakelijk

Monitoring bij een voor het grondwater potentieel bedreigende activiteit is van groot belang voor bevestigen van de werking van beschermende voorzieningen. Dit is cruciaal voor het verkrijgen en behouden van vertrouwen bij publieke en private belanghebbenden (overheden, waterleidingbedrijven, burgers). Daarnaast wordt door middel van monitoring informatie verzameld over het functioneren en eventueel falen van het systeem. Hiermee wordt een kennisbasis opgebouwd voor toekomstige beslissingen. Bij de huidige generatie geothermieputten zijn de mogelijkheden voor integriteitsmonitoring beperkt door de volledige cementeringen, het veelal grotendeels enkelwandige ontwerp en het ontbreken van tubing. Doordat hierdoor bijvoorbeeld annulaire drukmetingen niet mogelijk zijn, leunt de monitoring van de beschermende voorzieningen sterk op het periodiek uitvoeren van integriteitsmetingen in de putten zelf. Deze laatste metingen vragen echter om het stil leggen van de productie en het uitbouwen van de putten, een kostbare operatie los van de kosten van de metingen zelf. In de praktijk worden deze metingen dan ook om de 3 tot 6 jaar uitgevoerd of tegelijk met al ingepland onderhoud. Of hiermee tijdig lekkages worden opgespoord is nog onduidelijk, mede doordat de keuze en de ontwikkeling van voor geothermieputten geschikte type logs en de interpretatie hiervan nog niet eenduidig is. Monitoring van de grondwaterkwaliteit rond de put is gezien de corrosiegevoeligheid en

bodembedreigende vloeistoffen hierdoor nodig. Ook omdat een eventuele impact op het grondwater alleen in het grondwater kan worden vastgesteld. De grondwatermonitoring heeft daarbij primair het doel om vast te kunnen stellen dat de beschermende voorzieningen functioneren en er geen impact is.

Reguliere grondwatermonitoring kan efficiënt en effectief

In Duitsland is grondwatermonitoring van alle relevante watervoerende pakketten inmiddels (ook bij meerwandig uitgevoerde putten) staande praktijk in verschillende deelstaten. De daar toegepaste monitoringstrategie sluit nauw aan bij de in Nederland bekende IBC systematiek voor grondwatermonitoring bij stortplaatsen. Grondwatermonitoring doormiddel van bemonstering van peilfilters kent echter beperkingen en brengt kosten met zich mee. De belangrijkste indicatoren voor een lekkage zijn in Nederland echter (de hoge) temperatuur en het (extreem hoge) zoutgehalte. Nieuwe technieken zoals EM metingen vanuit monitoringsbuizen en metingen met glasvezelkabels maken een efficiëntere en kosten effectievere grondwatermonitoring mogelijk. Grondwatermonitoring moet dan wel dicht op de putten worden uitgevoerd (indicatieve afstand 5-10 m). De kosten voor grondwatermonitoring zijn sterk afhankelijk van het beoogde dieptebereik. In deze studie zijn twee voorbeelden uitgewerkt. De CAPEX voor een monitoringssysteem met een dieptebereik van 250 meter bedraagt bijna 200 k€, de CAPEX van een systeem met een dieptebereik van 40 meter bedraagt iets meer dan 40 k€. Omdat wordt gewerkt met temperatuur en zoutgehalte als eerste indicatoren is de OPEX onder normale omstandigheden beperkt tot 16 k€ voor de diepe situatie en 12 k€ voor de ondiepe situatie.

Kennisvragen en vervolgonderzoek met betrekking tot warmteuitstraling

Vanwege het temperatuurverschil tussen het geproduceerde formatiewater en het omringende grondwater treedt warmteuitstraling vanuit geothermieputten altijd op. Voor de mate waarin dat in het veld gebeurt en welke gevolgen dat heeft voor grondwaterstroming, -menging en kwaliteit geven vooralsnog alleen modelsimulaties een indicatie. Om inzicht te krijgen in de daadwerkelijke effecten van warmteuitstraling uit geothermieputten op grondwater is veldonderzoek nodig. Middels dit veldonderzoek wordt inzicht verkregen in de werkelijk optredende effecten, dit inzicht maakt onderscheid mogelijk tussen warmte effecten van uitstraling en van andere processen zoals lekkage en maakt het mogelijk om bestaande modellen te verifiëren en eventueel te verbeteren.

Kennisvragen en vervolgonderzoek met betrekking tot lekkage, verspreiding in het grondwater en detectie

Lekkage van formatiewater vanuit injectieputten naar omringend grondwater vormt een reëel risico. Inzicht in de wijze en mate van optreden ervan is echter nog zeer beperkt. Gedegen studies over hoe bij lekkage uit een put het gelekte volume zich verspreidt en mengt met het omringende grondwater ontbreken, naar ons weten, zelfs volledig. In deze studie hebben we op basis van een aantal analytische overwegingen een beeld proberen te schetsen van de manier van verspreiding van gelekt formatiewater naar het grondwater. Door het grote aantal factoren dat van invloed blijkt op de verspreiding (drukverschil, lekgrootte, temperatuur en dichtheid van het formatiewater, warmteuitstraling van de put, achtergrondstroming etc.), is de te verwachten verspreiding op deze wijze echter niet eenduidig vast te stellen.

Om inzicht te krijgen in de wijze van verspreiding van uit een put gelekt formatiewater is onderzoek bij een operationeel geothermiesysteem niet zinnig. De kans is immers heel klein dat binnen een bepaalde onderzoeksperiode of überhaupt bij dat systeem ooit putlekkage zal plaatsvinden. Ook het nabootsen van een lekkage is qua milieu impact en de beperkte range aan condities waarop in het veld getest kan worden onaantrekkelijk. We bevelen dan

ook aan om door middel van modelonderzoek een grote range aan realistische condities te definiëren en door te rekenen gericht op verspreiding en detecteerbaarheid bij een lekkage. Te variëren modelparameters zijn minimaal: het lekkage debiet (afhankelijk van lekgrootte), de temperatuur en het zoutgehalte van het formatiewater, de mate van achtergrondstroming en oriëntatie ten opzichte van lekpositie op de put en de positie van het lek ten opzichte van scheidende lagen en dikte van aquifer waarnaar de lekkage optreedt.

Daarnaast kunnen de modelsimulaties worden gebruikt om inzicht te krijgen in de wijze waarop er efficiënte en effectieve mitigatiemaatregelen bij lekkage naar grondwater kunnen worden gerealiseerd.

7 Referenties

- Agemar, T., Weber, J., & Schulz, R. 2014. Deep geothermal energy production in Germany. *Energies*, 7(7): 4397-4416.
- Armienta, M. A., Rodríguez, R., Cenicerros, N., Cruz, O., Aguayo, A., Morales, P., & Cienfuegos, E. 2014. Groundwater quality and geothermal energy. The case of Cerro Prieto geothermal field, México. *Renewable Energy*, 63: 236-254.
- Baticci, F., Genter, A., Huttenloch, P., & Zorn, R. 2010. *Corrosion and scaling detection in the Soultz EGS power plant, Upper Rhine Graben, France*. Paper presented at the Proceeding World Geothermal Congress.
- Boels, D., Groenendijk, P., & Hengeveld, A. 1993. Verspreiding van stoffen uit afvalstortterreinen in relatie tot de kwaliteit van afdichtingen: DLO-Staring Centrum.
- Bonte, M. 2015. *Impacts of shallow geothermal energy on groundwater quality*: Iwa Publishing.
- Bonte, M., Röling, W. F., Zaura, E., van der Wielen, P. W., Stuyfzand, P. J., & van Breukelen, B. M. 2013a. Impacts of shallow geothermal energy production on redox processes and microbial communities. *Environmental Science & Technology*, 47(24): 14476-14484.
- Bonte, M., Stuyfzand, P. J., van den Berg, G. A., & Hijnen, W. A. 2011. Effects of aquifer thermal energy storage on groundwater quality and the consequences for drinking water production: a case study from The Netherlands. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 63(9): 1922-1931.
- Bonte, M., van Breukelen, B. M., & Stuyfzand, P. J. 2013b. Temperature-induced impacts on groundwater quality and arsenic mobility in anoxic aquifer sediments used for both drinking water and shallow geothermal energy production. *Water Research*, 47(14): 5088-5100.
- Ceric, A., & Haitjema, H. 2005. On using simple time - of - travel capture zone delineation methods. *Groundwater*, 43(3): 408-412.
- Christensen, T. H., Kjeldsen, P., & Berg, P. L. 1991. *Monitoring of groundwater at sanitary landfills*. Paper presented at the Sardinia conference, Cagliari, .
- Cirkel, D. G., & Leunk, I. 2012. Quicksan risico's verschillende boor- en winningstechnieken: 88. Nieuwegein: KWR.
- Cooley, H., & Donnelly, C. 2011. Hydraulic Fracturing and Water Resources: Separating the Frack from the Fiction. Oakland California: Pacific Institute.
- DAGO. 2015. Logmethodes in de geothermie.
- De la Loma Gonzales, B., & Hartog, N. 2016a. Impact of heat loss from geothermal wells on shallow groundwater quality: 71: KWR Watercycle Research Institute.
- de la Loma Gonzales, B., & Hartog, N. 2016b. Impact of heat loss from geothermal wells on shallow groundwater quality; modelling approach, development and testing: 71. Nieuwegein: KWR.
- Deutsche Erwärme, & Geothermal Engineering. 2017. Grundwasserschutz.
- Geothermal Engineering. 2017. Grundwasserschutz im Zusammenhang mit Geothermieprojekten im Oberrheingraben.
- Hartog, N. 2015. Geochemical Assessment of Injectivity Problems in Geothermal Wells - A Case Study for several Greenhouse Geothermal Systems in The Netherlands: 27: KWR Watercycle Research Institute.
- Hartog, N. 2016. Risico's van Geothermie voor Grondwater: 55. Nieuwegein: KWR.
- Hartog, N., & Cirkel, D. G. 2015. Geothermie en HTO: Evaluatie van de risico's voor grondwaterkwaliteit. Nieuwegein, NL: KWR Watercycle Research Institute.
- Hayden, R., Russell, C., Vereide, A., Babasick, P., Shaposhnikov, P., & May, D. 2011. *Case studies in evaluation of cement with wireline logs in a deep water environment*. Paper presented at the SPWLA 52nd Annual Logging Symposium.

- Hunt, T. M. 2001. Five lectures on environmental effects of geothermal utilization: The United Nations University, Geothermal training program, Reports 2000, no 1.
- Ikenwilo, O. 2016. Geothermal Well Integrity Study. Chester UK: Wood Group Intetech.
- Leunk, I., & Raat, K. 2011. Risico's van kortsluitstroming bij oude pompputten: 49. Nieuwegein: KWR.
- Maas, K. 2010. HatsikD, vuistregels in de hydrologie: Lekkende peilbuizen en slecht afgedichte boorgaten. *Stromingen*, 16(2&3): 79-83.
- Meiners, H. G. 2012. 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.
- NOGEPA. 2016. Industry Standard No. 41, Well Engineering and Construction Process. Version: 26-04-2016.
- Plenefisch, T., Brückner, L., Ceranna, L., Gestermann, N., Houben, G., Tischner, T., Wegler, U., Wellbrink, M., & Bönnemann, C. 2015. Tiefe Geothermie - mögliche Umweltauswirkungen infolge hydraulischer und chemischer Stimulationen: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Ravier, G., Baujard, C., Dalmais, E., Maurer, V., & Cuenot, N. 2016. *Towards a comprehensive environmental monitoring of a geothermal power plant in the Rhine graben*. Paper presented at the European Geothermal Congress.
- Reinsch, T. 2012. *Structural integrity monitoring in a hot geothermal well using fibre optic distributed temperature sensing*. PhD Thesis, Clausthal-Zellerfeld: Universitätsbibliothek Clausthal, 219 p. URN: urn:nbn:de:gbv:104-1111221.
- Royal HaskoningDHV. 2015. Hoofdrapport en bijlage - Geohydrologische risico inschatting bij niet volledig gecementeerde putten. Projectnummer 9X2019-100-100.
- Rybach, L. 2003. Geothermal energy: sustainability and the environment. *Geothermics*, 32(4): 463-470.
- Sakaguchi, K., & Matsushima, N. 1995. Temperature profile monitoring in geothermal wells by distributed temperature sensing technique: Geothermal Resources Council, Davis, CA (United States).
- Schlumberger. 2007. Cement Bond Logging Tools.
- Seibt, P., Kabus, F., Wolfgramm, M., Bartels, J., & Seibt, A. 2010. Monitoring of hydrogeothermal plants in Germany-an Overview. *Proceedings WGC*: 25-29.24.
- SodM. 2010. Veiligheid van booractiviteiten in Nederland. brief aan de minister van economische zaken.
- SODM. 2016. Toelichting op toezichtontwikkelingen inzake geothermie. In M. v. E. Zaken (Ed.).
- SodM. 2017. Staat van de sector Geothermie: Staatstoezicht op de Mijnen, Ministerie van Economische zaken.
- SodM, & TNO-AGE. 2013. Protocol bepaling maximale injectiedrukken bij aardwarmtewinning - versie 2.
- Ungemach, P. 2001. Handling of corrosion and scaling shortcomings in low enthalpy geothermal environments. *European Summer School on Geothermal Energy Applications*: 113-127.
- Ungemach, P., Ventre, A. V., Nicolaon, S., & GPC, G. C. 2002. *Tracer Leak Off Tests as Means of Checking Well Integrity. Application to Paris Basin Geothermal Production Wells*. Paper presented at the Proceedings.
- van Lopik, J. H., Hartog, N., Zaadnoordijk, W. J., Cirkel, D. G., & Raoof, A. 2015. Salinization in a stratified aquifer induced by heat transfer from well casings. *Advances in Water Resources*, 86: 32-45.
- van Wezel, A., & Cirkel, D. G. 2015. Schaliegas & Drinkwater: Betrouwbaarheid: 81. Nieuwegein: KWR.
- Veldkamp, J. G., Goldberg, T. V., Bressers, P. M. M. C., & Wilschut, F. 2016. Corrosion in Dutch geothermal systems.

- Vereniging van Afvalverwerkers. 1995. Ontwerpprocedure grondwatermonitoring stortplaatsen. Utrecht: VVAV95060S.R.
- Verweij, J. M. 2003. *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.
- Ward, J. D., Simmons, C. T., & Dillon, P. J. 2007. A theoretical analysis of mixed convection in aquifer storage and recovery: How important are density effects? *Journal of Hydrology*, 343(3): 169-186.
- Zuurbier, K. 2016. *Increasing freshwater recovery upon aquifer storage. A field and modelling study of dedicated aquifer storage and recovery configurations in brackish-saline aquifers*. Technische Universiteit Delft, Delft.
- Zuurbier, K., Zaadnoordijk, W. J., & Stuyfzand, P. 2014. The Freshmaker - An innovative tool for freshwater storage and abstraction in salinized areas using sophisticated horizontal directional drilled wells (HDDWs): 18. Nieuwegein: KWR.

Bijlage I Putopbouw

Verskil tussen een typische gasput en de huidige generatie geothermieputten

