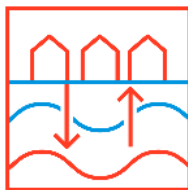
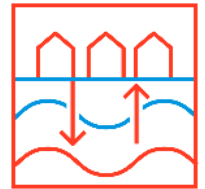


WINDOW *fase 1*



Verkenning HTO

Leeuwarden

door

Uitvoeringsteam WINDOW (IF Technology, TNO, Deltares, KWR)

21 december 2020

Verkenning HTO Leeuwarden



if

TNO

Deltares

KWR

Dit rapport is gezamenlijk opgesteld door het uitvoeringsteam van WINDOW.

| | IF Technology | TNO | Deltares | KWR |
|-------------------|--|--|---------------------------------|--|
| Bijdragen | Hoofdstuk 1 en 3 - 7 Projectleiding | Hoofdstuk 2 en 5 - 7 | Hoofdstuk 3, 4, 6 en 7 | Hoofdstuk 1 en 3 - 7 Coördinatie WINDOW |
| Coördinatie | Rob Kleinlugtenbelt | Frank van Bergen | Ivo Pothof | Marette Zwamborn |
| Auteurs | Peter Oerlemans Hette de Vlieger | Dorien Dinkelman Willem Jan Zaadnoordijk Mariëlle Koenen | Sofie Kooreman Johan Valstar | Stijn Beernink Gilian Schout |
| Kwaliteitsborging | Benno Drijver | Armin Menkovic Frank van Bergen | Ivo Pothof | Martin Bloemendal Niels Hartog |

21 december 2020

Dit project is mede gefinancierd door TKI-Energie en TKI-Watertechnologie uit de Toeslag voor TopConsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat.

WINDOW is een acroniem voor Warmtevoorziening In Nederland Duurzamer met Ondergrondse Warmteopslag. Doel van het WINDOW-programma is het wegnemen van technische, juridische en bedrijfseconomische belemmeringen en beter inzicht krijgen in de effecten voor het verantwoord toepassen van ondergrondse warmteopslag, zodat ondergrondse warmteopslag na 2025 als bewezen techniek kan worden toegepast en kan bijdragen aan kostenreductie van collectieve warmtesystemen op systeemniveau.

Projectnummer 402656 Rapportnummer KWR 2020.142

Keywords
Ondergrondse warmteopslag, HTO

Jaar van publicatie
2020

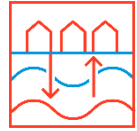
Meer informatie
Marette Zwamborn
E marette.zwamborn@kwrwater.nl

Rob Kleinlugtenbelt
E R.Kleinlugtenbelt@iftechnology.nl

December 2020 ©

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

Management samenvatting



| | |
|---|--|
| <p>WINDOW fase 1 Verkenning ondergrondse warmteopslag Leeuwarden</p> | <p>Beoordeling (zie toelichting)</p> |
| <p>Over deze verkenning (hoofdstuk 1)</p> <p>In het onderzoeksprogramma WINDOW zijn op zes locaties verkenningen uitgevoerd naar de haalbaarheid van ondergrondse warmteopslag (Hoge Temperatuur Opslag - HTO). De locatie Leeuwarden is één van de locaties waar een verkenning is uitgevoerd. Met deze verkenning is de potentie van seizoensopslag in het warmtenet van Ennatuurlijk onderzocht. Daarnaast dient deze verkenning ook als vergelijking met de andere verkenningen binnen WINDOW vanuit de gedachte 'learning-by-doing'.</p> <p>In de verkenningen zijn meerdere systeemconcepten beschouwd. Er is ten minste één systeemconcept per verkenning volledig uitgewerkt, tot en met de businesscase en evaluatie van effecten en risico's. Deze is weergegeven, als mogelijk alternatief hoe HTO op deze locatie kan worden ingepast. We merken daarbij op dat het uitgewerkte systeemconcept een schetsontwerp is: verdere optimalisatie valt buiten de scope van deze verkenningen.</p> | |
| <p>Geohydrologie (hoofdstuk 2)</p> <p>Meest geschikte bodemlaag: Formatie van Maassluis z4</p> <p>Diepte opslag: 325-350 m-mv</p> <p>Bodemtemperatuur opslagdiepte: 17,8°C</p> <p>Proefboring: aangeraden (onzekerheid ondergrond beoordeeld als bovengemiddeld hoog)</p> | <p>a</p> |
| <p>Uitgewerkt systeemconcept (hoofdstuk 3)</p> <p>Het systeemconcept is hier op schematische wijze weergegeven, ten behoeve van overzicht in één oogopslag en voor vergelijking van de verkenningen onderling. De detail opzet, nuanceringen en alternatieven staan beschreven in de verkenning.</p> <p>130 - 450 TJ</p> <p>90 °C 50 °C</p> <p>Zomer: laden 150 m³/h 400.000 m³ 9,0 MWt max 73 TJt laden</p> <p>Winter: leveren 120 m³/h 400.000 m³ 5,0 MWt max (HTO) 44 TJt leveren (HTO)</p> <p>4 bronnen 88 → 68°C 5 bronnen 52 → 36°C</p> | <p>1 2 b</p> |

| | | |
|--|--|----------------------------|
| Thermisch opslagrendement (hoofdstuk 4) | | |
| Systemefficiëntie | In jaar 2 | 41% = 30 TJ warmte uit HTO |
| | In jaar 10 | 60% = 44 TJ warmte uit HTO |
| | In jaar 50 | 70% = 51 TJ warmte uit HTO |
| Business case (hoofdstuk 4) | | |
| Investering | 5,2 M€ = 2,26 M€/MWt | |
| Investering bronnen | 3,1 M€ | 60% |
| Investering warmtepomp | 0,0 M€ | 0% |
| Investering overig | 2,1 M€ | 40% |
| Operationele kosten | 0,43 M€/jaar | |
| Kosten opgeslagen warmte | 0,00 M€ | 0% |
| Kosten elektriciteit | 0,02 M€ | 5% |
| Kosten overig | 0,41 M€ | 95% |
| Kostprijs geleverde warmte | 12,4 | €/GJ |
| Kostprijs geladen warmte | 0,0 | €/GJ |
| Referentie: kostprijs warmte gasketel 12 €/GJ | | |
| CO₂ emissie (hoofdstuk 4) | | |
| CO ₂ emissie in periode van 30 jaar | 18,3 | kg CO ₂ /GJ |
| CO ₂ emissie warmte laden | 13,2 | kg CO ₂ /GJ |
| CO ₂ emissie warmte leveren | 5,1 | kg CO ₂ /GJ |
| Referentie: in 2030 doelstelling warmtenetten | 18,9 | kg CO ₂ /GJ |
| Ter info: warmte geleverd met een gasketel | 62 | kg CO ₂ /GJ |
| Opmerking: er is gerekend met het huidige kental voor elektriciteit van 0,34 kg CO ₂ /kWh (bron NTA 8800) | | |
| Thermische effecten (hoofdstuk 5) | | |
| Thermische straal warmteopslag: | 89 meter | |
| Horizontale warmte uitstraling: | na 50 jaar ligt de 25°C contour op circa 200 meter | |
| Verticale warmte uitstraling: | vanaf de bron | |
| | na 50 jaar ligt de 25°C contour op circa 270 m-mv | |
| Juridische haalbaarheid (hoofdstuk 5) | | |
| Provinciaal beleid | toepassing HTO niet strijdig met beleid | 3 |
| Zoet of zout grondwater: | zout grondwater | |
| Stakeholders ondergrond: | op de beoogde diepte van de opslag zijn er beperkte aantal belangen in de omgeving | |
| Inpassing bronnen: | het beoogde gebied heeft een relatief lage stedelijkheid | |

| | | |
|--|---|--|
| Beoordeling: positieve aspecten, nadelen en risico analyse (hoofdstuk 6 en 7) | | |
| Positieve aspecten van deze locatie voor toepassing HTO: | | |
| 1 | Het warmtenet moet nog ontwikkeld worden, dit biedt kansen om lagere temperaturen te realiseren | |
| 2 | Q1/Q2 2021 is er een geplande geothermie boring. Dit geeft mogelijkheid tot aanvullend data-acquisitie t.b.v. de HTO. | |
| 3 | Juridische haalbaarheid wordt positief ingeschat, er is flexibiliteit om de geschikte locatie te kiezen langs de backbone bij een van de booster stations | |
| Nadelen van deze locatie voor toepassing HTO: | | |
| a | Grote onzekerheid over de opbouw ondergrond, dit heeft invloed op efficiëntie bronnen en businesscase. Kans daarbij is dat begin 2021 geboord wordt naar geothermie, mogelijkheid voor meer inzicht in de bodemgeschiktheid | |
| b | Het warmtenet en de bronnen zijn nog in ontwikkeling, risico dat de ontwikkeling trager gaat dan gepland | |
| Conclusie (hoofdstuk 7) | | |
| <p>Grootste onzekerheid in Leeuwarden is de opbouw van de ondergrond, door het ontbreken van diepere boringen in de omgeving. De geplande geothermie boring kan benut worden om beter inzicht te krijgen, door het ondiepe dele goed te loggen en eventueel metingen uit te voeren. Een proefboring kan op termijn verder uitsluitsel geven. Daarnaast zijn de warmtebron en het warmtenet nog in ontwikkeling.</p> <p>De toepassingsmogelijkheden van HTO op deze locatie wordt verder op basis van deze verkenning als relatief positief beoordeeld.</p> <p>Opmerking: het WINDOW programma heeft als doel om HTO verder te ontwikkelen tot een bewezen techniek. Op dit moment bestaan er nog technische, juridische en financiële onderzoeksvragen. De conclusie moet gezien worden binnen het kader van een techniek-in-ontwikkeling, met grotere risico's ten opzichte van bewezen techniek.</p> | | |
| Beschouwde varianten: | | |
| <p>In plaats van het booster station wordt een warmtepomp geplaatst met een vermogen van 3,0 of 8,4 MW, en een injectietemperatuur in de lauwe bron van 40 °C of 30 °C.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Variant 1 (boosterstation) heeft het laagste energieverbruik van de warmteopslag*, de laagste investeringskosten en de laagste kostprijs voor warmte. Deze variant is in deze management samenvatting opgenomen. • Variant 2 heeft de grootste warmtelevering van de warmteopslag+warmtepomp, het hoogste thermisch rendement en de minste warmte uitstraling in de ondergrond. • Variant 3 heeft het laagste energieverbruik van de warmteopslag+warmtepomp, en de hoogste CO₂ reductie. | | |

| | Variant | Hete bron | Warme bron | Geleverde warmte | Thermisch rendement | COP warmte levering | Investeringskosten | Kostprijs warmte |
|--|-------------------|-----------|------------|------------------|---------------------|---------------------|--------------------|------------------|
| 1 | Booster station | 88°C | 52°C | 44 TJ* | 60% | 50* | 5,2 M€* | 12,4 €/GJ* |
| 2 | Warmtepomp 8,4 MW | 88°C | 30°C | 98 TJ | 78% | 4,1 | 11,8 M€ | 17,9 €/GJ |
| 3 | Warmtepomp 3,0 MW | 88°C | 40°C | 73 TJ | 72% | 6,6 | 9,3 M€ | 16,8 €/GJ |
| <p>*Opmerking: het boosterstation is in variant 1 niet als onderdeel van de warmteopslag beschouwd en is niet meegenomen in de COP, investeringskosten en kostprijs warmtelevering. De geleverde warmte in variant 1 (44 TJ) heeft een lagere temperatuur dan de gevraagde aanvoertemperatuur van het warmtenet.</p> | | | | | | | | |

Inhoudsopgave

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Inleiding | 9 |
| 1.1 | Achtergrond | 9 |
| 1.2 | Doelstelling | 9 |
| 1.3 | Studiegebied | 10 |
| 2 | Geologische haalbaarheid | 11 |
| 2.1 | Hydrogeologische situatie | 11 |
| 3 | Uitgangspunten en ontwerp | 18 |
| 3.1 | Energetische uitgangspunten warmte aanbod en vraag | 18 |
| 3.2 | Uitvoeringsvarianten | 19 |
| 3.3 | Voorlopig putontwerp en realisatie | 24 |
| 4 | Analyse uitvoeringsvarianten | 27 |
| 4.1 | Thermische berekeningen | 27 |
| 4.1 | Financiële analyse | 31 |
| 4.3 | CO ₂ -besparing | 37 |
| 5 | Milieu hygiënische en juridische aspecten | 39 |
| 5.1 | Grondmechanica: zetting en opheffing | 39 |
| 5.2 | Thermische effecten | 40 |
| 5.3 | Reflectie op mogelijke thermische effect op de grondwaterkwaliteit op basis van bestaande data | 43 |
| 5.4 | Juridisch raamwerk | 50 |
| 5.5 | Omgevingsscan | 51 |
| 6 | Risico inventarisatie en plan van aanpak vervolgstappen | 54 |
| 6.1 | Introductie | 54 |
| 6.2 | Inschatting relevantie van de projectrisico's | 54 |
| 6.3 | Plan van aanpak voor het vervolg | 60 |
| 7 | Conclusie | 62 |
| | Referenties | 64 |

| | |
|---|-----------|
| Bijlagen | 65 |
| Bijlage I. Ontwerpnorm bronnen | 65 |
| Bijlage II. Brontechniek | 70 |
| Bijlage III. Beschrijving numerieke model SEAWATv4 | 73 |
| Bijlage IV. Grond mechanische processen | 76 |
| Bijlage V. Generieke risico-inventarisatie voor HTO | 79 |

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In Leeuwarden zijn twee kleine warmtenetten aanwezig. Ennatuurlijk en Shell werken gezamenlijk aan de verdere ontwikkeling van het warmtenet. Hierin worden bestaande warmtenetten aan elkaar gekoppeld en wordt het warmtenet verder uitgebreid. Een combinatie van duurzame bronnen gaat het warmtenet voeden, bestaande uit geothermie, restwarmte en biomassa.

De warmte in het warmtenet dient steeds verder te verduurzamen, met als einddoel een volledige duurzame warmtelevering. Dit betekent (o.a.) dat de piekvoorziening niet via gasketels ingevuld kan worden. Door gebruik te maken van seizoensopslag van warmte in de bodem kunnen bestaande duurzame bronnen het hele jaar door constant warmte produceren en kan in de winter (een deel van) de piekvraag worden ingevuld.

In het programma WINDOW zijn zes verkenningen uitgevoerd naar de haalbaarheid van HTO. De twee meest kansrijke verkenningen worden geselecteerd. In WarmingUP wordt voor de geselecteerde verkenningen een proefboring uitgevoerd en wordt een ontwerp gemaakt van de HTO. Voorzien wordt dat de ontworpen HTO's daarna gerealiseerd worden. Dit vervolg op WarmingUP dient nog nader vorm gegeven te worden.

Wat is HTO?

HTO is het opslaan van hoge temperatuurwarmte in een watervoerende laag in de ondergrond. Bij een opslagtemperatuur van circa 60 - 90°C wordt gesproken van hoge temperatuur opslag. HTO-systemen bestaan uit één of meerdere doubletten met één of meerdere hete en een lauwe bronnen. Daarnaast hebben ze twee bedrijfssituaties per jaar. In de zomerperiode is de warmtevraag veelal beperkt of geheel afwezig bij de afnemer. De aanbieder van warmte heeft echter wel warmte beschikbaar. Deze warmte wordt tijdelijk opgeslagen in de ondergrond. Hierbij wordt grondwater onttrokken uit de lauwe bron en, na opwarming, geïnfiltrerd in de hete bron. Gedurende de winterperiode is de pomprichting andersom: er wordt grondwater onttrokken uit de hete bron en, na warmtelevering, met een lagere temperatuur geïnfiltrerd via de lauwe bron. De aanbieder van warmte en de HTO voeden nu het warmtenet, omdat de vraag naar warmte in de winter relatief hoog is.

De opslag van warmte in de ondergrond gaat gepaard met warmteverliezen naar de omgeving. Om de warmteverliezen te beperken, is het van het belang dat het systeem zoveel mogelijk uren per jaar draait. Hoe groter het opgeslagen volume warm water is, hoe kleiner de relatieve warmteverliezen zijn. Gedurende het terugwinnen van de opgeslagen warmte (leveren/ontladen) zal de temperatuur van het grondwater dat wordt onttrokken uit de hete bron steeds verder afnemen. Om het mogelijk te maken om een constante gewenste temperatuur te leveren aan het warmtenet kan worden overwogen om een warmtepomp te installeren.

1.2 Doelstelling

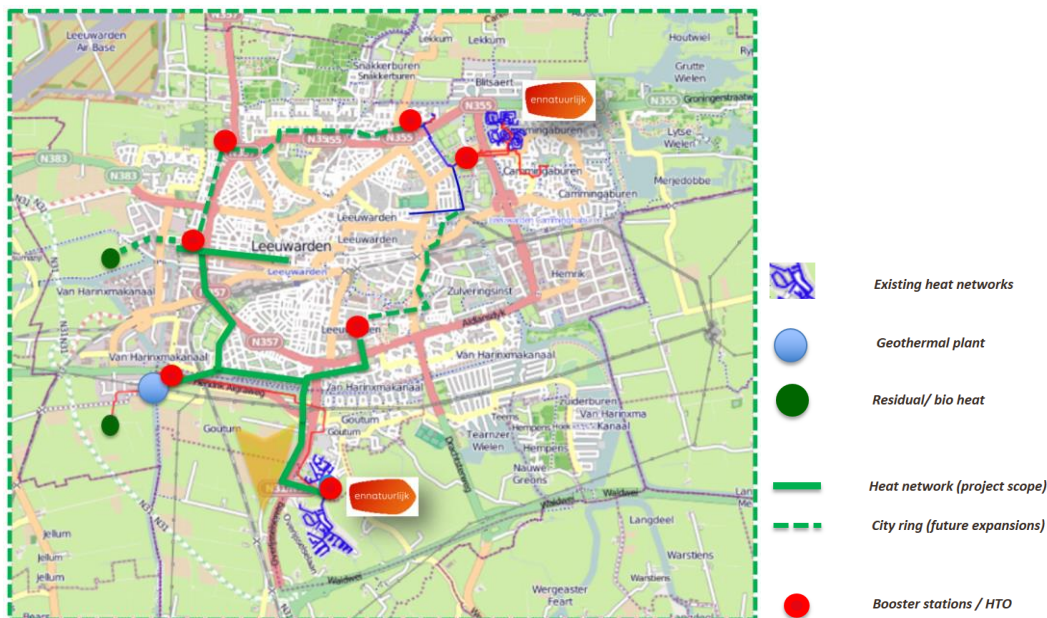
De doelstelling van deze verkenning is tweeledig. Ten eerste hebben Ennatuurlijk en Shell een doel met de inpassing van een HTO in het leveringsgebied rond Leeuwarden. Ten tweede speelt deze verkenning een rol in het WINDOW project.

Met het onderzoek wordt bepaald op welke wijze HTO ingepast kan worden in het warmtenet van Leeuwarden, en wordt de technische, juridische en financiële haalbaarheid hiervan in beeld gebracht.

Het doel vanuit het WINDOW project is om een reeks verkenningen parallel uit te voeren, en vanuit de gedachte 'learning-by-doing' te leren van de verschillende situaties en de kansrijkheid van HTO op verschillende locaties. De verkenningen worden zo ver uitgewerkt, dat de meest kansrijke HTO-locaties geselecteerd kunnen worden. De geselecteerde HTO-locaties worden verder voorbereid richting uitvoering in het WarmingUP-programma, thema 5. Doel is om te komen tot operationele HTO projecten, die laten zien dat HTO succesvol kan worden toegepast.

1.3 Studiegebied

Het studiegebied beslaat het hele gebied van het beoogde warmtenetwerk (zie Figuur 1-1). Waar HTO het beste toegepast kan worden, zal mede afhangen van de bodemgeschiktheid. De HTO dient wel in de buurt van een boosterstation te worden toegepast.



Figuur 1-1 - Mogelijke HTO locaties, op basis van bovengrond informatie. (Ennatuurlijk)

2 Geologische haalbaarheid

2.1 Hydrogeologische situatie

Voor de analyse van de geschiktheid van de ondergrond, is gebruikt gemaakt van de openbare modellen en datasets (DGM/REGIS II v2.2, NLOG, DINO, grondwatertools), aangevuld met boorbeschrijvingen van lokale boringen en/of informatie van open bodemenergiesystemen. TNO en IF Technology hebben deze informatie verzameld en geïnterpreteerd.

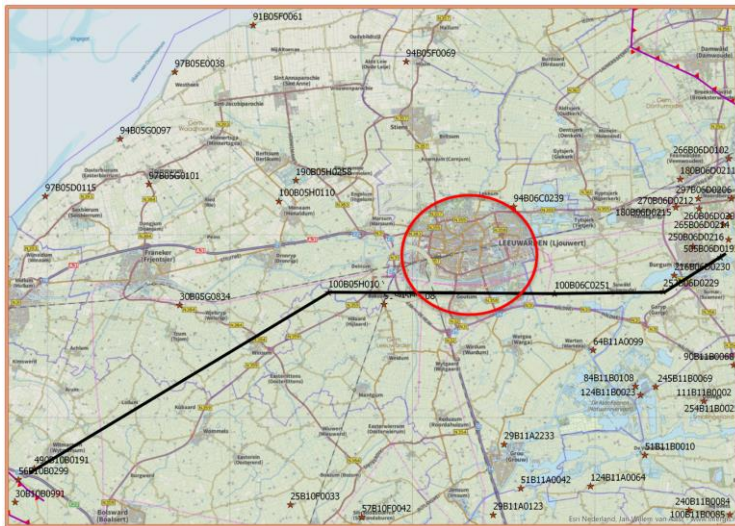
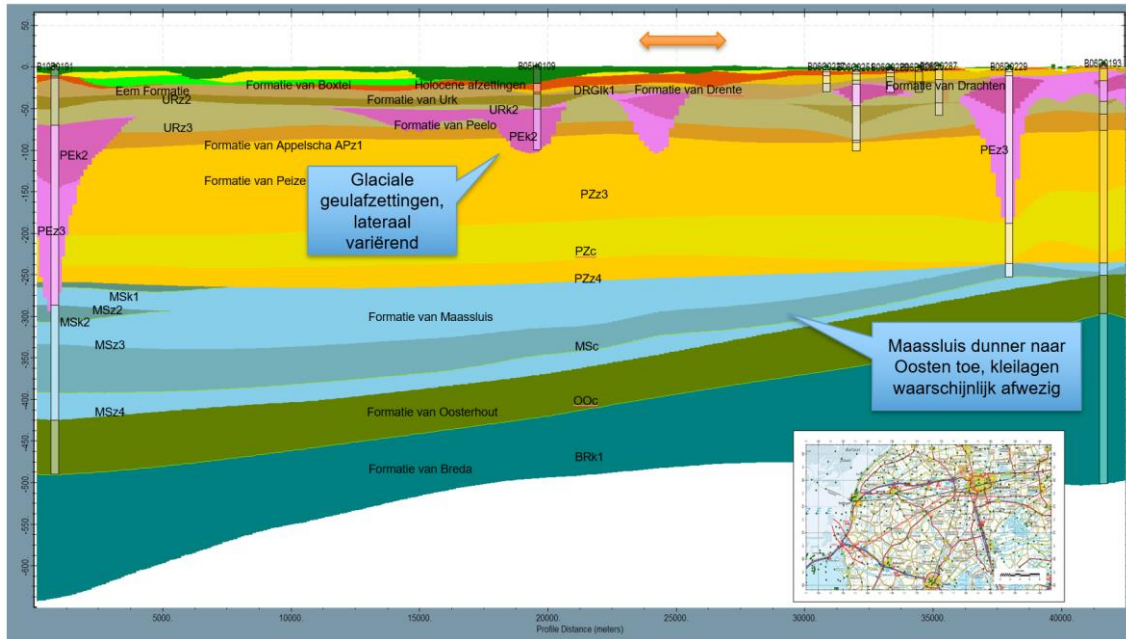
2.1.1 Beschrijving ondergrond

Wat betreft de bovengrond, zijn er een aantal mogelijke locaties voor HTO (Figuur 1-1), bij voorkeur zo dicht mogelijk bij de booster stations (rode stippen). De voorbeeld locatie voor de thermische berekeningen is een locatie nabij de beoogde geothermie installatie (blauwe stip), bij de bestaande Dairy Campus. Op deze locatie zijn de Formatie van Peelo, Peize, Maassluis, Oosterhout en Breda aanwezig.

De ondergrond in de omgeving van Leeuwarden bestaat uit een opeenvolging van verschillende formaties, die weer zijn opgesplitst in verschillende deellagen (hydrogeologische eenheden), zie doorsnede van het onderzoeksgebied in Figuur 2-1. Tabel 2-1 laat de opeenvolging van de verwachte hydrogeologische eenheden binnen deze formaties zien op basis van REGIS II v2.2. De verwachte geologische eenheden met mogelijk geschikte watervoerende lagen op een diepte tot ~500 m zijn; de Formatie van Peelo, de Formatie van Peize en de Formatie van Maassluis. De Formatie van Oosterhout wordt in dit gebied ongeschikt geacht.

De beoogde HTO locaties in Leeuwarden liggen niet in een grondwaterbeschermingsgebied (i.e. grondwaterbeschermingsgebied, boringsvrijzone, 100-jaarszone, waterwingebied drinkwater, Natura2000). Er zijn geen breuken aanwezig in de nabijheid van de locatie.

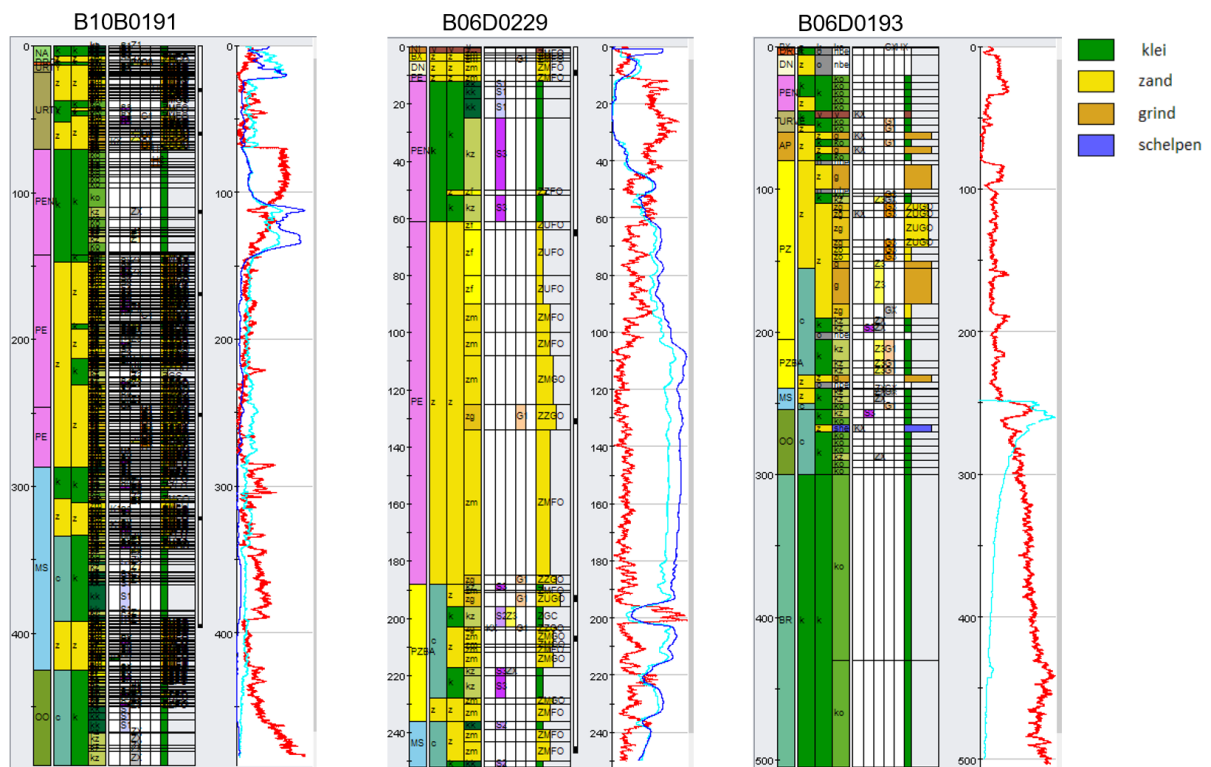
Voor meer gedetailleerd informatie over de ondergrond is gekeken naar boringen in de omgeving. In de DINO database zijn drie diepe boringen in de omgeving bekend (Figuur 2-2), deze liggen echter op relatief grote afstand (>10-25 km) van Leeuwarden. Door dit geringe aantal diepe boringen in de omgeving kent de ondergrond rondom Leeuwarden in het diepte interval sowieso veel onzekerheden. Daarnaast is in de doorsnede in Figuur 2-1 zichtbaar dat deze diepe boringen preferent geplaatst zijn in de geulafzettingen van de Formatie van Peelo. In Leeuwarden zelf is een ondiepere boring bekend, deze gaat tot ~100 m diepte en eindigt in de Formatie van Peelo. Er is derhalve zeer beperkte informatie aanwezig in de omgeving van Leeuwarden over de Formatie van Peize en de Formatie van Maassluis. Informatie over deze pakketten is gebaseerd op interpolatie over relatief grote afstanden. Hierdoor is er een grote onzekerheid over de opbouw en eigenschappen van deze laatstgenoemde pakketten in de omgeving. Ook de diepere olie- gas boringen zijn bekeken maar deze geven geen additoinale informatie. Een proefboring is nodig en wordt sterk geadviseerd om de ondergrond en met name de Formatie van Peize en de Formatie van Maassluis te onderzoeken en karakteriseren.



Figuur 2-1 - Doorsnede (REGIS II v2.2) door het gebied van de beoogde HTO locaties, van west naar oost. De rode cirkel op de plattegrond en de oranje pijl in de doorsnede geven het gebied van de mogelijke locaties in Leeuwarden aan.

Tabel 2-1 - Overzicht van de verwachte hydrogeologische eenheden voor de beoogde HTO locatie. Op basis van REGIS II v2.2.

| Hydrogeologische eenheid | Modeleenheid REGIS II v2.2 | Opmerking |
|---|----------------------------|---|
| Fm. van Peelo, 3 ^e zandige eenheid | PEz3 | Glaciale geul, waarschijnlijk zand met klei erboven, onzeker. |
| Fm. van Peize, 3 ^e zandige eenheid | PZz3 | Watervoerende laag |
| Fm. van Peize, complexe eenheid | PZc | Zowel watervoerende als scheidende lagen mogelijk |
| Fm. van Peize, 4 ^e zandige eenheid | PZWAz4 | Dunne watervoerende laag |
| Fm. van Maassluis, 2 ^e zandige eenheid | MSz2 | Watervoerende laag |
| Fm. van Maassluis, 3 ^e zandige eenheid | MSz3 | Watervoerende laag |
| Fm. van Maassluis, complexe eenheid | MSc | Zowel watervoerende als scheidende lagen mogelijk |
| Fm. van Maassluis, 4 ^e zandige eenheid | MSz4 | Watervoerende laag |
| Fm. van Oosterhout, complexe eenheid | OOc | Scheidende laag, kleilig ontwikkeld |



Figuur 2-2 - Boorgatmetingen en geohydrologische interpretatie van de drie boringen rondom Leeuwarden. De rode lijn is de gemeten gamma ray straling, een hoge gamma ray (rechts) duidt vaak op shale/klei of de aanwezigheid van glauconiet, een lagere gamma ray (links) geeft meer zandige sedimenten aan.

Uit het REGIS II v2.2 model en de boringen in de omgeving, komen de volgende hydrogeologische eenheden naar voren die mogelijk interessant kunnen zijn voor HTO. Hierbij is gekeken naar een zandige watervoerende laag met afsluitende kleilaag:

De Formatie van Peelo, deze ligt echter ondiep op de beoogde locatie en bevat waarschijnlijk erg fijn sediment, waardoor deze formatie lithologisch gezien minder geschikt lijkt. Ook wordt hier vaak drinkwater uit gewonnen.

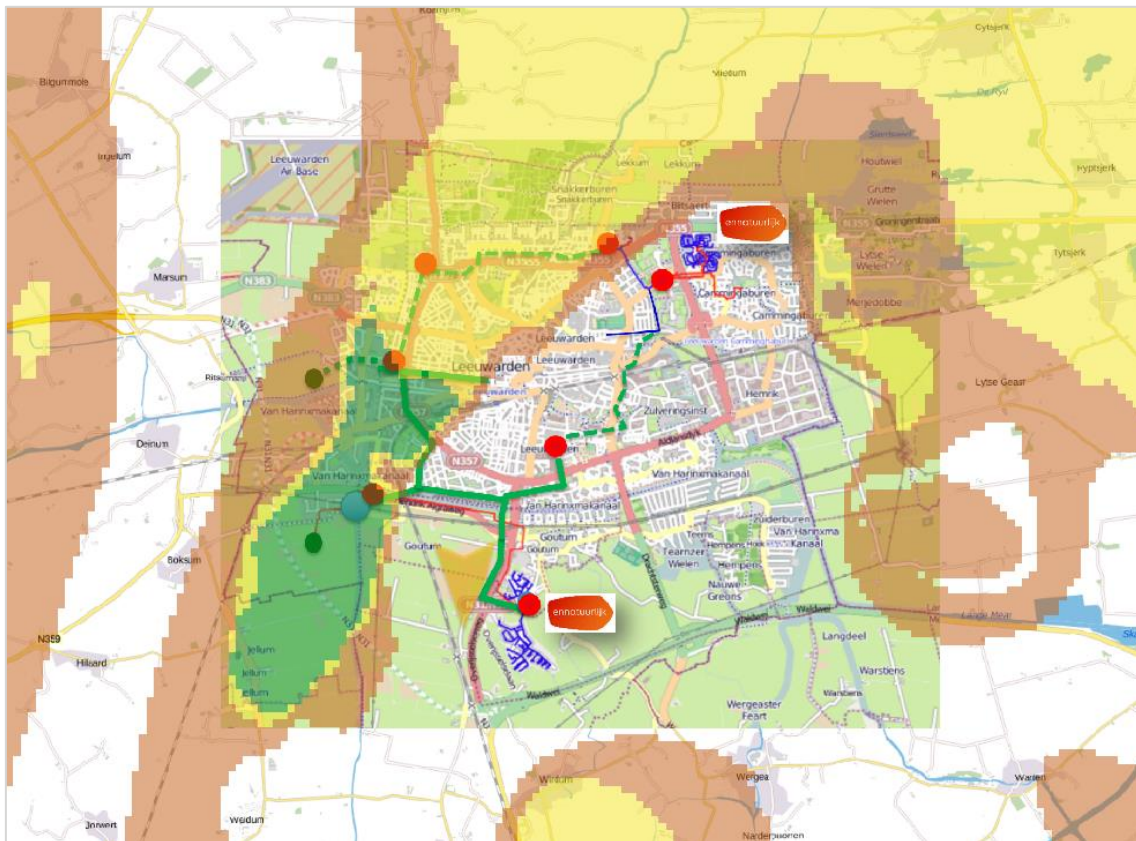
De complexe eenheid of de vierde zandige eenheid van de Fm. van Peize (PZc of PZz4), echter kan hier de zoet/zout grens voorkomen.

De vierde zandige eenheid in de Fm. van Maassluis (MSz4), indien de complexe eenheid van de Fm. van Maassluis (MSc) een voldoende dikke kleilaag bevat, dit is echter onzeker. De kleilagen boven de tweede en derde eenheid van de Fm. van Maassluis (MSz2 en MSz3) lijken niet aanwezig op de locatie waardoor deze zanden niet/minder geschikt worden geacht voor HTO.

2.1.2 Nadere analyse potentieel geschikte hydrogeologische eenheden

Formatie van Peelo

De Formatie van Peelo bestaat uit glaciële geulafzettingen gevormd tijdens het Elsterien (Midden Pleistoceen). Zanden in de Fm. van Peelo kunnen uiterst fijn tot uiterst grof zijn, in de diepere delen van een geul zijn de zanden vaak grover en naar boven toe worden deze fijner, waarna een kleilaag bovenop is gevormd. Doordat de geulen van de Fm. van Peelo over het algemeen zoet water bevatten is hier veelal drinkwater uit gewonnen (de meeste boringen zitten hierdoor ook in de Fm. van Peelo), echter zijn een aantal installaties ook weer stopgezet doordat het zout/brakke water van de omliggende Formatie van Peize werd aangetrokken. Voor de ondiepe geul aan de westkant van Leeuwarden stad wordt geschat dat deze overwegend zeer fijn sediment bevat en hierdoor minder/ongeschikt is voor HTO.



Figuur 2-3 - Overzicht van mogelijke HTO locaties (rode stippen) met de potentieelkaart (uit WINDOW werkpakket B2) van de Peelo Formatie. Groen betekent hier 'geen barrières', echter is lithologie niet meegenomen in de kaart, maar wel een belangrijk criterium. Geel en oranje staan respectievelijk voor 'mogelijke barrières' en 'barrières'. Als voorbeeld locatie voor de thermische berekeningen is een locatie nabij de beoogde geothermie installatie gekozen (blauwe stip), bij de bestaande Dairy Campus. Op deze locatie is zowel de ondiepe geul (Peelo Formatie) aanwezig als de Peize en Maassluis Formaties.

Formatie van Peize

De Formatie van Peize ligt bij Leeuwarden op een diepte van 90-260 m-mv. Er is veel onzekerheid wat betreft de eigenschappen van deze formatie in de omgeving van Leeuwarden door afwezigheid van boorinformatie in deze laag, zoals hierboven besproken. Er zijn waarschijnlijk geen kleilagen

aanwezig in de Fm. van Peize, met uitzondering van een mogelijke kleilaag in de complexe laag (PZc). De zanden van de Fm. van Peize zijn naar verwachting zeer grof tot mogelijk grind. Uit boringen B06D0229 en B06D0193 (op aanzienlijke afstand) volgt dat een afsluitende kleilaag met een zandpakket van ~10-20 m aanwezig kan zijn in de complexe laag, wellicht kan ook de onderkant van de complexe laag dienen als afsluitende laag voor de vierde zandig laag (PZWAz4). In deze grove zanden kan de buoyancy stroming door injectie van een hoge temperatuur groot zijn en zorgen voor warmteverliezen. Het brak-zout grensvlak ligt erg ondiep op de locatie (< -25m NAP), richting het zuiden en oosten, van de beoogde HTO locatie, zakt deze snel en ligt daar in de Formatie van Peize.

Formatie van Maassluis

De Formatie van Maassluis bestaat uit fijn tot matig grof marine zanden afgewisseld met kleilagen. De Formatie van Maassluis ligt rond Leeuwarden tussen de 250-420 m-mv en varieert sterk in dikte, de formatie dunt uit naar het oosten, en bevat zout water. Er is veel onzekerheid over eigenschappen van deze formatie in de omgeving van Leeuwarden door afwezigheid van boorinformatie in deze laag, zoals hierboven al aangegeven. De boring B10B0191 in Figuur 2-2 laat zien dat de vierde zandige eenheid van de Fm. van Maassluis (MSz4) mogelijk als opslagpakket kan dienen, indien er voldoende dikke kleilaag aanwezig is in de complexe laag erboven. In boring B10B0191 lijkt er een ~30m dikke kleilaag in de MSc aanwezig te zijn. In boring B06D0193 lijkt de MSc ook kleilig ontwikkeld, maar is de MSz4 afwezig. De dikte van het opslagpakket en het voorkomen van kleilagen lateraal sterk variëren, de boring ligt namelijk op zo'n 20-25 km afstand van Leeuwarden dit maakt de inschatting van de ondergrond onzeker.

De horizontale doorlatendheden van de verschillende zandpakketten worden op basis van REGIS II v2.2 rond de 7 m/d geschat. Er zijn geen WKO boorstaten uit de omgeving met aanvullende informatie. Een proefboring is nodig om meer zekerheid te geven over de diepere lagen in de omgeving Leeuwarden.

Formatie van Oosterhout

De Formatie van Oosterhout bestaat rondom Leeuwarden enkel uit een complexe laag (OOC), welke voornamelijk bestaat uit klei. In boring B06D0193 is een heel dunne zandlaag gevonden (<10 m) met schelpen. Met de informatie uit deze boringen lijkt de Fm. van Oosterhout ongeschikt voor toepassing van HTO.

2.1.3 Conclusie meest geschikte opslagpakket

Tabel 2-2 geeft een overzicht van de formaties die onderzocht worden voor deze verkenning en de hydrogeologische parameters die gebruikt worden voor de modelsimulaties. Door geringe informatie over de ondergrond is een inschatting gemaakt van de hydrogeologische parameters, echter zit hier een grote onzekerheid in. De MSz4 komt naar voren als mogelijk opslag pakket, en is meegenomen in de thermische simulaties in Hoofdstuk 4. Er bestaat onzekerheid over de dikte, diepe van de watervoerende laag en aanwezigheid en dikte van de afsluitende kleilaag.

Tabel 2-2 Geohydrologische parameters gebruikt voor de simulaties. Deze informatie is laag specifiek en hier alleen gegeven voor de hydrogeologische eenheden die in aanmerking komen voor gebruik als opslagpakket. Het model gebruikt gedetailleerde informatie die gespecificeerd is voor alle lagen.

| Hydrogeologische parameter | Naam | Waarde | Eenheid |
|---|-----------|---------|------------------|
| Opslagpakket | Name_aq | MSz4 | - |
| Achtergrond temperatuur | T_amb | 17.8 | °C |
| Dikte opslagpakket | L_storage | 25 | m |
| Horizontale doorlatendheid (<i>incl. standaarddeviatie REGIS II v2.2 indien van toepassing</i>) | K_h | 5 (2.3) | m/d ¹ |
| Verticale doorlatendheid ² | K_v | 2.5 | m/d |

2.1.4 Onzekerheden ondergrond

Zoals in bovenstaande stukken al benoemd, bestaan er onzekerheden wat betreft de ondergrondparameters rondom de locatie Leeuwarden. De twee diepere boringen liggen op 10 en 25 km afstand van de beoogde HTO locatie, ook verschilt de ondergrond sterk, dit is te zien in beide boringen. De dikte en diepte van de Fm. van Maassluis en Fm. van Oosterhout zijn zeer variabel wat het lastig maakt een inschatting te maken van de ondergrond tussen deze twee boringen. De ondiepere boringen zitten vooral in de Fm. van Peelo, waardoor minder bekend is over de Fm. van Peize. Naast dieptes en diktes is hierdoor ook de doorlatendheid van de hydrogeologische eenheden lastig in te schatten. Voor de inschatting hiervan is uitgegaan van de geïnterpoleerde waarden uit REGIS II v2.2. Een proefboring kan deze onzekerheden wegnemen. Ook kan de geplande geothermieboring benut worden om meer inzicht te krijgen in de ondiepe ondergrond bij Leeuwarden. Door tijdens het boren van het ondiepe deel goed te loggen en metingen uit te voeren (gamma ray, neutron-density, sonic etc.) kan een beter regionaal beeld van de ondergrond worden gevormd en dit zal een groot deel van de onzekerheid voor een HTO boring wegnemen.

¹ Meter per dag. Doorlatendheid is de grootte voor het gemak waarmee water door een poreus medium stroomt.

² Voor de berekening van de kv-waarden is een anisotropie factor van 2 gebruikt, gebaseerd op Linden et al. (2002) uit Roelofs en Goorden (2008). Voor de thermische berekening in Hoofdstuk 4 is ook nog een simulatie gedaan met een anisotropie factor van 10.

3 Uitgangspunten en ontwerp

3.1 Energetische uitgangspunten warmte aanbod en vraag

Vraag

In Leeuwarden zijn momenteel twee afzonderlijke warmtenetten welke beide door Ennatuurlijk worden geëxploiteerd. In het noordoosten van de stad ligt het warmtenet dat gevoed wordt door de centrale Camminghaburen en ten zuiden van de stad ligt het warmtenet in de wijk de Zuidlanden waar de warmte wordt opgewekt door middel van biogas.

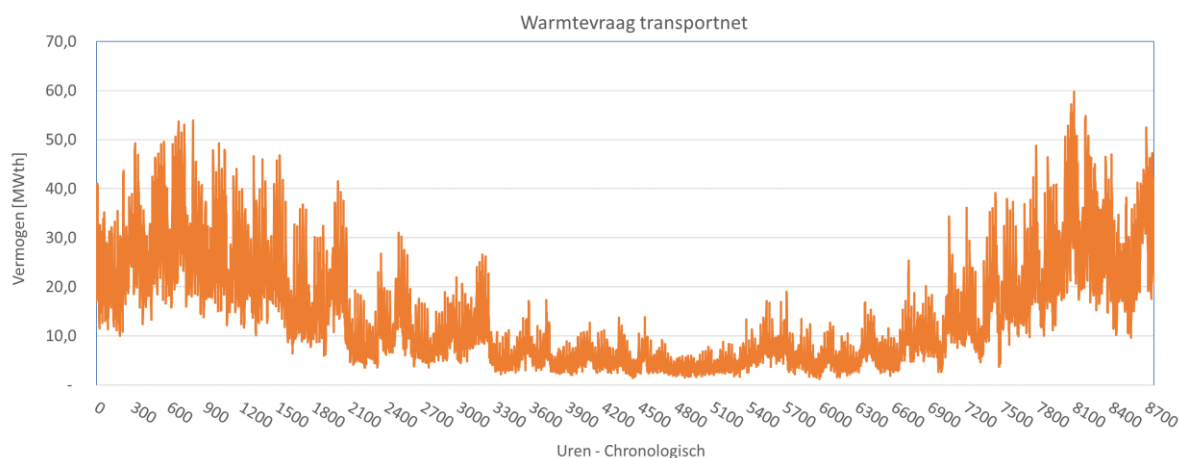
Deze twee warmtenetten worden via een nieuw te ontwikkelen net met elkaar gekoppeld. Het nieuwe net zal ook de totale afzet van warmte in Leeuwarden vergroten. De verwachte groei van de totale vraag is weergegeven in onderstaande tabel (Tabel 3-1).

Het transportnet dat de verschillende distributienetten verbindt en van warmte voorziet zal naar verwachting een aanvoer en retour-temperatuur van 90°C - 50°C hebben. Het is mogelijk dat er een stooklijn gebruikt wordt waardoor het temperatuurprofiel van de zomer afwijkt van dat van de winter, maar aangezien deze nog niet vast staat is 90°C - 50°C het uitgangspunt.

Tabel 3-2 Prognose warmtevraag van het warmtenet in Leeuwarden

| Jaar | Vraag [GJ] |
|------|------------|
| 1 | 130.000 |
| 2 | 194.000 |
| 3 | 258.000 |
| 4 | 322.000 |
| 5 | 386.000 |
| 6 | 450.000 |

Het profiel van de huidige dan wel toekomstige warmtevraag is gebaseerd op een genormaliseerd profiel welke door Ennatuurlijk is aangeleverd. Het vermogensprofiel kan eenvoudig worden geschaald met de totale warmtevraag van een jaar. In de onderstaande figuur (figuur 3-1) is het profiel weergegeven zoals wordt verwacht wanneer het totale net is gerealiseerd en er een warmtevraag van 450.000 GJ per jaar is.



Figuur 3-1: Ingeschat warmteprofiel bij een totale warmtevraag van 450.000 GJ per jaar

Aanbod

De huidige warmte voor de bestaande warmtenetten komt zoals vermeld vanuit de bestaande centrale Camminghaburen en de verbranding van biogas in een wijkcentrale. In 2016 is er reeds SDE aangevraagd voor warmteproductie middels een geothermie bron. De realisatie van de geothermiebron voorziet dan ook in de uitbreiding van de warmtevraag van het net. De geothermie kan direct aan het net leveren op 90°C met een vermogen van 14,2 MW (bij een injectietemperatuur van 35°C). Bij een injectietemperatuur van 52°C (2 graden hoger dan de retourtemperatuur in het net), kan de geothermiebron 10 MW leveren. In de zomer zal niet het gehele beschikbare vermogen van de geothermiebron nodig zijn om te voldoen aan de vraag, het surplus aan vermogen kan worden benut door de HTO te laden. Het ontladen van de HTO gedurende de winter kan het benodigde piekvermogen en energie opgewekt met conventionele bronnen verlagen.

HTO

Omdat de exacte locatie van de HTO nog onbekend is, is het uitgangspunt dat de HTO geladen wordt vanuit het transportnet met een temperatuur van 90°C. Door warmte te laden tijdens de zomer kan de energieproductie van de duurzame bronnen worden gemaximaliseerd. Gedurende de winter kan het er vanuit de opgeslagen duurzame warmte worden benut om de productie van conventionele bronnen te minimaliseren.

De hoeveelheid warmte die kan worden geleverd aan het net is afhankelijk van het gekozen systeemconcept. Om duurzaam de opgeslagen warmte te kunnen leveren zijn en de gewenste aanvoertemperatuur te behouden zijn er drie concepten geïdentificeerd:

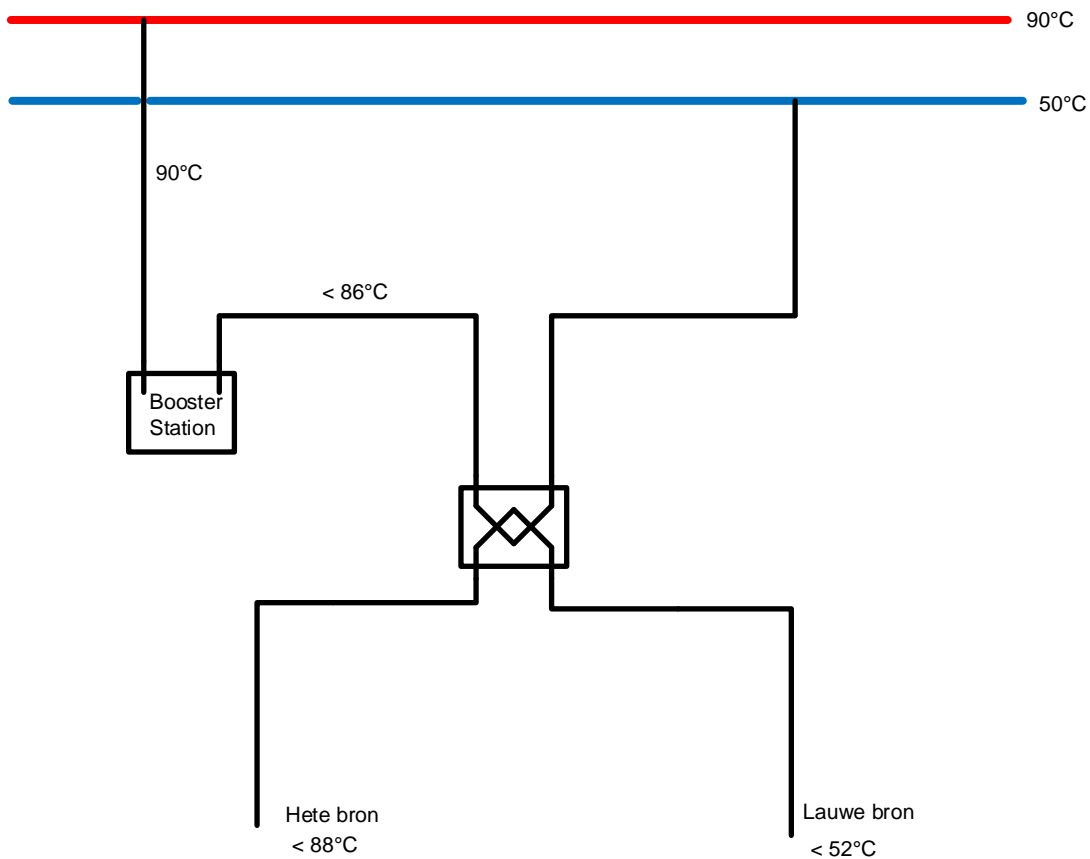
- HTO zonder warmtepomp
- HTO met warmtepomp en injectietemperatuur van 40°C in de lauwe bron
- HTO met warmtepomp en injectietemperatuur van 30°C in de lauwe bron

3.2 Uitvoeringsvarianten

3.2.1 HTO zonder warmtepomp

De HTO wordt vanuit het primaire net gevoed met een temperatuur van 90°C. De warmte wordt vanuit het net door middel van een warmtewisselaar overgedragen aan de brine van de HTO, hierbij wordt rekening gehouden met een temperatuurverschil over de warmtewisselaar van 2°C, resulterend in een injectietemperatuur van 88°C.

In de winter zal de opgeslagen warmte weer worden terug geleverd aan het net. Omdat de temperatuur van de HTO niet voldoet aan de aanvoertemperatuur van het net zal de geproduceerde temperatuur moeten worden opgehoogd. Omdat de HTO in de buurt van een boosterstation wordt geplaatst, kan dit met de faciliteiten die daar aanwezig zijn. Naverwarmen met het boosterstation is niet meegenomen in de verdere analyse. De wijze van naverwarmen zal invloed hebben op de prijs en duurzaamheid. Shell heeft aangegeven de impact hiervan voor verschillende naverwarm opties zelf te kunnen verwerken op basis van de resultaten van dit onderzoek.



Figuur 3-2: Inpassing HTO Leeuwarden met Biogasketel

Laden HTO

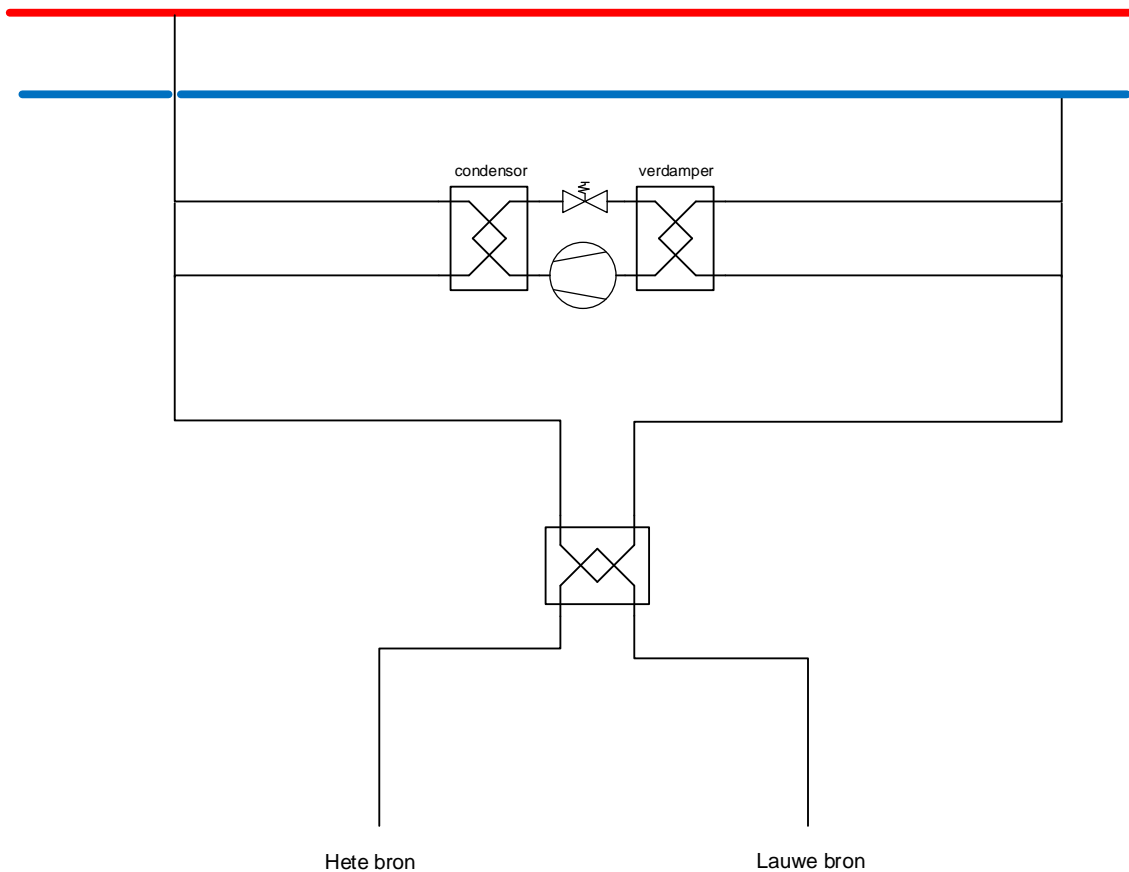
Figuur 3-2 geeft een schematische weergave van de inpassing van de HTO op het transport net. Gedurende de zomer wordt de HTO geladen vanuit de aanvoer en wordt het met een temperatuur van 88°C opgeslagen. De temperatuur van de lauwe bron zal langzaam dalen tot aan 36°C, het is daarom mogelijk om de retourtemperatuur van de HTO onder de 50 graden terug te leveren aan het transportnet.

Ontladen HTO

Bij het ontladen van de HTO wordt water uit de retour van het transportnet verwarmd tot maximaal 2°C kouder dan de temperatuur van de hete bron. Naarmate de HTO meer geleverd heeft zal de productietemperatuur inzakken en zal onder de gewenste aanvoertemperatuur van het warmtenet komen. Door het boosterstation in serie met de HTO kan de 90°C van de aanvoer worden gegarandeerd. Het boosterstation zal vanaf het begin van de productie van de HTO de temperatuur moeten ophogen omdat de hete bron altijd kouder zal zijn dan de aanvoertemperatuur van het transportnet.

3.2.2 HTO met warmtepomp

In de uitvoeringsvariant met warmtepomp wordt deze aan de warmtenet-zijde ingepast. Energetisch is het iets gunstiger om de verdampers HTO-zijdig aan te sluiten, maar dit voordeel (max 5% COP) weegt niet op tegen de meerprijs van het extra onderhoud en een dure Titanium warmtewisselaar in de verdampers van de warmtepomp in verband met de verwachte saliniteit van het grondwater. De uitvoeringsvariant is weergegeven in *Figuur 3-3*, inclusief de geothermiebron en de piekvoorziening.



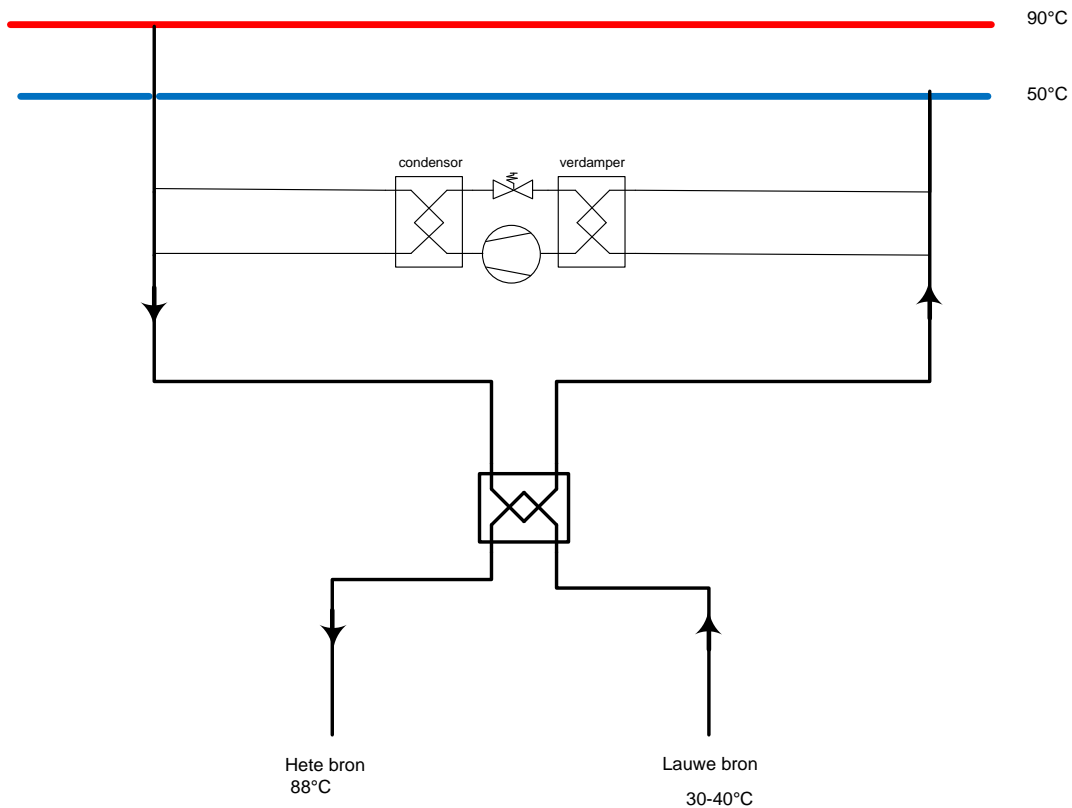
Figuur 3-3: Inpassing HTO Leeuwarden met warmtepomp

COP-warmtepomp

Er is gekeken naar een variant met een grondwaterinjectietemperatuur van 30°C en een grondwaterinjectietemperatuur van 40°C. Het retourwater dient afgekoeld te worden tot respectievelijk 28 of 38°C. Rekening houdend met een approach van 2,5°C in de verdamer en condensor, en een systeemrendement van 60% rendement (t.o.v. Carnot), bedraagt de COP 3,3 bij een grondwaterinjectietemperatuur van 30°C en 3,8 bij een grondwaterinjectietemperatuur van 40°C. Hieronder wordt het laden en ontladen beschreven. Dit wordt gedaan aan de hand van een lauwe brontemperatuur van 40°C.

Laden HTO

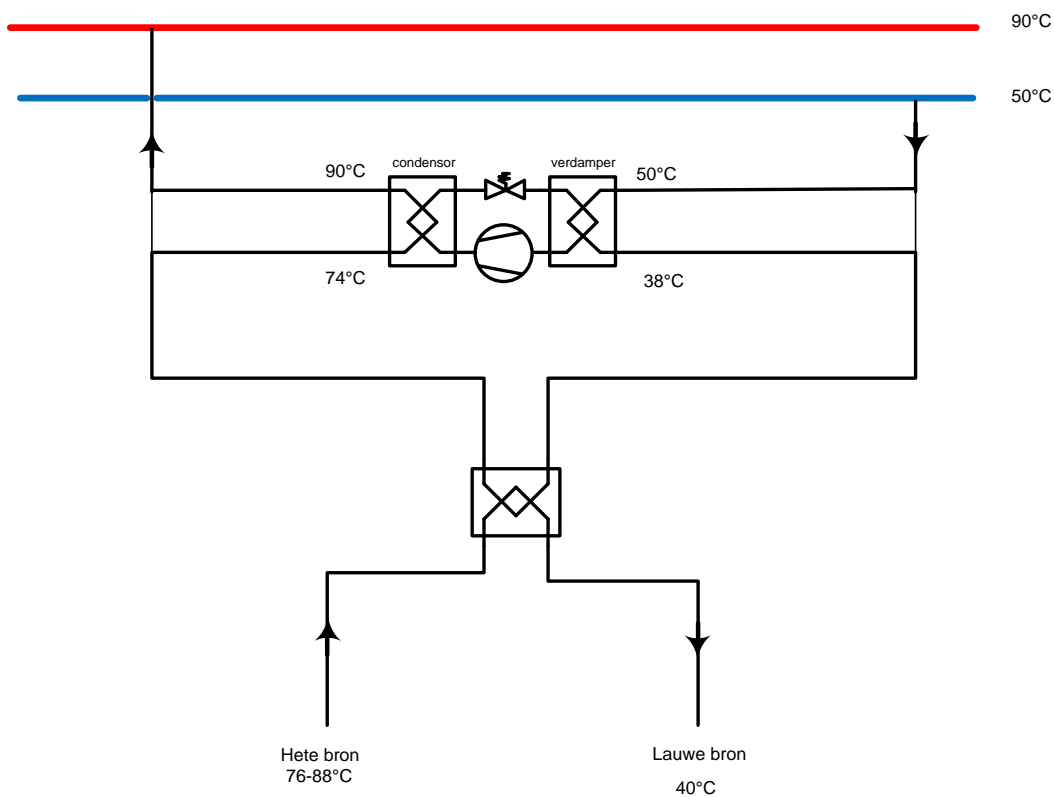
In de zomerperiode wordt de HTO geladen via het transportnet. Dit is schematisch weergegeven in *Figuur 3-4*. Primair levert de geothermiebron warmte aan het warmtenet. Wanneer er capaciteit over blijft, wordt ook de HTO geladen. Water uit de lauwe bron wordt onttrokken en opgewarmd met warmte uit de uit het transportnet, opgeweekt met de overcapaciteit van de geothermiebron. Het opgewarmde grondwater wordt geïnfiltrerd in de hete bron met een temperatuur van 88°C. De lauwe brontemperatuur ligt lager dan de retourtemperatuur van het warmtenet. Hoe lager de temperatuur in de lauwe bron is, hoe meer geothermische warmte opgeslagen kan worden.



Figuur 3-4: Laden HTO

Ontladen HTO

Tijdens het ontladen levert de geothermiebron in de winter zoveel mogelijk de basislast. Aanvullend op de geothermische warmte wordt warmte vanuit de HTO geleverd. Water uit de retourleiding wordt onttrokken. Het retourwater wordt in de verdamper afgekoeld tot 38°C dan wel 28°C. In de warmtewisselaar wordt warmte van de HTO overgedragen en het water uit de retourleiding. Het water wordt tot 74°C dan wel 58°C opgewarmd bij de injectietemperatuur van de lauwe bron van 40°C en 30°C respectievelijk. De reden voor deze specifieke temperatuur is dat al het water uit de verdamper ook door de condensor stroomt. De COP van de warmtepomp bepaalt daarmee de verhouding in het temperatuurverschil over de condensor en het temperatuurverschil over de verdamper. In de condensor wordt het water opgewarmd naar 90°C waarna het wordt ingevoerd op de aanvoerleiding. Mocht er nog een resterende warmtevraag zijn, dan wordt deze ingevuld door de andere bronnen aangesloten op het warmtenet.



Figuur 3-5: Ontladen HTO

3.2.3 Varianten

In Tabel 3-3 en Tabel 3-4 is voor de onderzochte varianten een overzicht gegeven van de hoeveelheid geleverde warmte per onderdeel en de waarden van een aantal belangrijke variabelen. Merk op dat de hoeveelheid die door de HTO en warmtepomp geleverd wordt, verschilt per jaar, doordat het opslagrendement (systeemrendement) steeds verder toeneemt. Gegeven waarden zijn voor het jaar 10.

Tabel 3-3: Hoeveelheid geleverde warmte per component

| Variant | Aandeel geothermie [GJt] | Aandeel HTO + WP [GJt] | Waarvan aandeel HTO [GJt] | Aandeel resterende bronnen [GJt] |
|------------------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| Var 1: HTO zonder WP | 248.400 | n.v.t. | 44.300 | 157.300 |
| Var 2: HTO met WP 30°C infiltratie | 248.400 | 98.100 | 74.200 | 103.500 |
| Var 3: HTO met WP 40°C infiltratie | 248.400 | 72.600 | 61.100 | 129.000 |

Noot: Hoeveelheid die door de HTO en warmtepomp geleverd wordt, verschilt per jaar, doordat het opslagrendement steeds verder toeneemt. Gegeven waarden zijn voor het jaar 10.

Tabel 3-4: Overzicht belangrijke variabelen verschillende varianten

| Variabele | Eenheid | Var 1: HTO zonder WP | Var 2: HTO met WP 30°C infiltratie | Var 3: HTO met WP 40°C infiltratie |
|----------------------------------|-------------------|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Opslag aquifer | - | Maassluis | Maassluis | Maassluis |
| Opslag temperatuur (hete bron) | °C | 88 | 88 | 88 |
| Opslag temperatuur (lauwe bron) | °C | 52 | 30 | 40 |
| Opslag volume HTO | m ³ | 400.000 | 400.000 | 400.000 |
| Draaiuren levering HTO | h | 3300 | 3300 | 3300 |
| Vollasturen warmtepomp | h | - | 2400 | 2100 |
| Maximaal benodigd debiet laden | m ³ /h | 150 | 150 | 150 |
| Maximaal benodigd debiet leveren | m ³ /h | 120 | 120 | 120 |
| Max. vermogen geothermie | MWt | 10 | 10 | 10 |
| Max. vermogen warmtepomp | MWt | - | 8,4 | 3,0 |
| Max. vermogen biogas | MWt | 5,2 | - | - |

3.3 Voorlopig putontwerp en realisatie

De geohydrologische eenheid met de meeste potentie is de vierde zandige eenheid van de Formatie van Maassluis (MSz4), omdat hier hoogstwaarschijnlijk een goede afsluitende laag boven zit. Totdat meer informatie beschikbaar is zal dus deze laag worden beschouwd voor de verschillende systeemconcepten. Dit resulteert in drie varianten (Tabel 3-5).

De dikte van de watervoerende pakketten, de horizontale hydraulische doorlatendheid, het benodigde opslag/onttrekkingsvolume en de verwachte onttrekkingstemperatuur bepalen tezamen hoeveel hete en warme bronnen er nodig zijn (meer info rapportage werkpakket C1 en C2), dit is vervolgens weer bepalend voor het 3D putontwerp. De (conservatieve) NVOE richtlijnen die gemaakt zijn voor WKO systemen worden in dit stadium toegepast (zie Bijlage I). Echter, er zijn

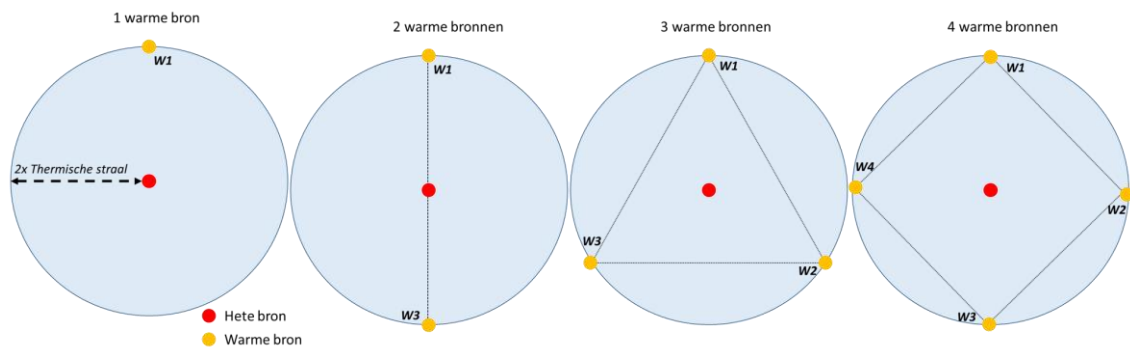
aanwijzingen dat ruimere normen mogelijk kunnen zijn voor warmteopslag, de onzekerheid om dit te kunnen toepassen is in dit stadium echter te groot. De wijze waarop de putten worden geboord is beschreven in Bijlage II.

Tabel 3-5 Gegevens simulaties varianten locatie Leeuwarden, de verschillende varianten voor het opslagpakket MSz4 eisen een verschillend aantal hete en warme bronnen.

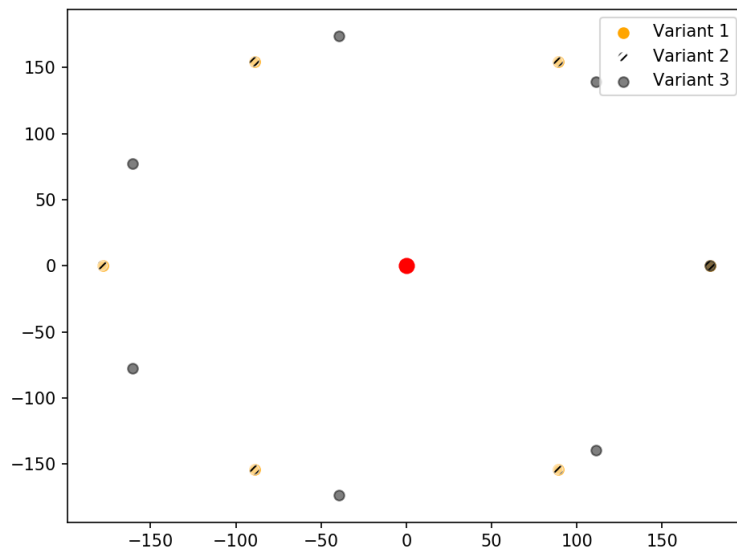
| | T _{heet} °C | T _{war} m °C | T _{cut-off} °C | V _{opslag} m ³ | Opslagpakket | L _{aq} | R _{th} Heet | T _{amb} | Bronnen heet | Bronnen _{war} m |
|-----------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------------|--------------|-----------------|----------------------|------------------|-----------------|-----------------------------|
| Variant 1 | 88 | 52 | 53 | 400,000 | MSz4 | 25 | 89.1 | 18 | 4 | 5 |
| Variant 2 | 88 | 30 | 30 | 400,000 | MSz4 | 25 | 89.1 | 18 | 4 | 6 |
| Variant 3 | 88 | 40 | 40 | 400,000 | MSz4 | 25 | 89.1 | 18 | 4 | 5 |

3.3.1 3D putontwerp

De 3D opstelling van de warme putten rondom de hete bronnen zal in alle gevallen worden gedaan volgens de generieke methode getoond in Figuur 3-6. Eerste onderzoeksresultaten laten zien dat een afstand van $2 \times$ thermische straal (R_{th}) de meest gunstige afstand is om de efficiëntie van het systeem als geheel te optimaliseren. Deze afstand wordt in eerste instantie dus gebruikt om een 3D ontwerp te maken voor de bronnen van het warmteopslag systeem. Indien er andere stakeholders in de buurt van het systeem zitten waar rekening mee gehouden moeten worden of omdat dit ontwerp niet mogelijk is door beperkte bovengrondse inpassing zal het ontwerp in een later stadium (WINDOW fase 2) aangepast worden voor de specifieke case.



Figuur 3-6 Basisontwerp 3D plaatsing bronnen. Afstand Hete bronnen en warme bronnen is $2x$ de thermische straal van de hete bron.



Figuur 3-7 De 3D plaatsing voor variant 1,2 en 3. Variant 1 en 2 zijn identiek (gelijk volume en aantal bronnen). Variant 3 heeft 1 extra warme bron (7 stuks) en de plaatsing verschilt daarom van variant 1 en 2. De hete bronnen (rood) worden hier gepresenteerd als 1 cirkel. In werkelijkheid zijn dit meerdere bronnen die relatief dicht bij elkaar zijn gesitueerd.

4 Analyse uitvoeringsvarianten

4.1 Thermische berekeningen

4.1.1 Model beschrijving

De numerieke simulaties worden uitgevoerd met het grondwatermodel SEAWATv4 (Langevin (2009)). Dit model is een koppeling tussen het grondwatermodel MODFLOW en het transport model MT3Ds (Harbough et al., 2000; Zheng & Wang, 1999). Een gedetailleerde beschrijving van de model opzet is gegeven in Bijlage III. SEAWATv4 heeft de capaciteit om dichtheidsstroming te simuleren bij verschillende temperaturen. Dit treedt op doordat viscositeit en dichtheid van het grondwater afhankelijk is van temperatuur. Een relatief lage dichtheid van het warme geïnjecteerd water leidt tot een dichtheid verschil met het omringede grondwater, het warmere water heeft dan de neiging op te drijven (van Lopik et al., 2016). De verliezen die hierdoor optreden, plus de verliezen die optreden door andere processen (e.g. conductie, dispersie), kunnen goed worden berekend met dit model.

Axisymmetrisch & 3D model

De simulaties worden gedaan met een axisymmetrisch model en een 3D model (Langevin, 2008). Met het axisymmetrische model wordt alleen de hete bron gesimuleerd, met het 3D model alle putten o.b.v. het putontwerp. Omdat het axisymmetrische model relatief weinig rekencapaciteit vergt, kan hierbij de gehele ondergrondse opbouw worden gemodelleerd (van maaiveld tot bijv. 500m diepte). Echter, de interactie tussen de verschillende bronnen en de ruimtelijke (x,y) invloed van het systeem kan dan niet inzichtelijk worden gemaakt. Nadat het axisymmetrisch model heeft bepaald welke laag/lagen de meeste potentie hebben, wordt daarom met een 3D model een verbeterde en meer realistische simulatie van het warmteopslag systeem gedaan. Om de rekencapaciteit te verlagen wordt er voor het 3D model alleen gekeken naar het opslagpakket en de daar boven en onderliggende laag.

Uitgangspunten model

Voor de modellen wordt een volume balans aangehouden. Dit houdt in dat het geïnjecteerde volume (V_{in}) tijdens laden gelijk is aan het onttrokken volume (V_{uit}) tijdens ontladen. Doordat er in de simulaties rekening wordt gehouden met een afkaptemperatuur kan het voorkomen dat tijdens ontladen de afkaptemperatuur wordt bereikt ($T_{bron} < T_{afkap}$), in dat geval kan $V_{uit} < V_{in}$ zijn. Er blijft dan dus volume (en dus energie) achter in de hete bron(nen).

4.1.2 Methode efficiëntie berekeningen

Bronrendement

De efficiëntie kan worden berekend voor een bron en voor het systeem als geheel.

Voor een bron wordt dit berekend als:

$$\eta_{bron} = \frac{V_{uit} \cdot \Delta T_{uit} \cdot c_w \cdot \rho_w}{V_{in} \cdot \Delta T_{in} \cdot c_w \cdot \rho_w}$$

$$\Delta T = \overline{T_{opslag}} - \overline{T_{ambient}}$$

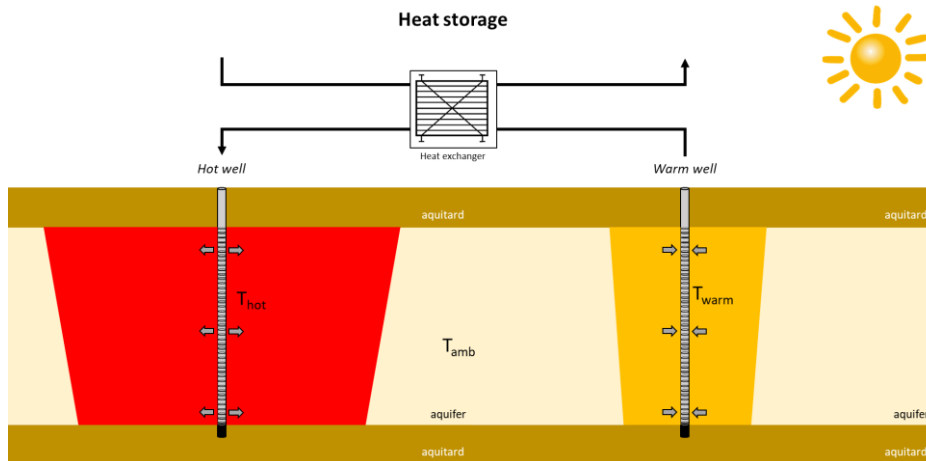
De ΔT is voor een bron berekend als het temperatuurverschil met de achtergrond temperatuur ($T_{ambient}$). Dit kan dus gedaan worden voor zowel de hete en de warme bron (Figuur 4-1).

Systeemrendement

Omdat er zowel energie verloren gaat tijdens opslag in de hete en de warme bron bepalen de efficiëntie van de hete bron(nen) en de warme bron(nen) samen de efficiëntie van het systeem. Het temporele (door de tijd heen) temperatuur verschil tussen de hete en warme bron bepaalt het systeemrendement:

$$\eta_{HTO} = \frac{V_{uit} \cdot \Delta T_{uit} \cdot c_w \cdot \rho_w}{V_{in} \cdot \Delta T_{in} \cdot c_w \cdot \rho_w}$$

$$\Delta T = \overline{T_{heet}} - \overline{T_{warm}}$$



Figuur 4-1 Schematische weergave van een HTO met de temperatuur van de hete bron (T_{hot}), warme bron (T_{warm}) en de achtergrond temperatuur (T_{amb}).

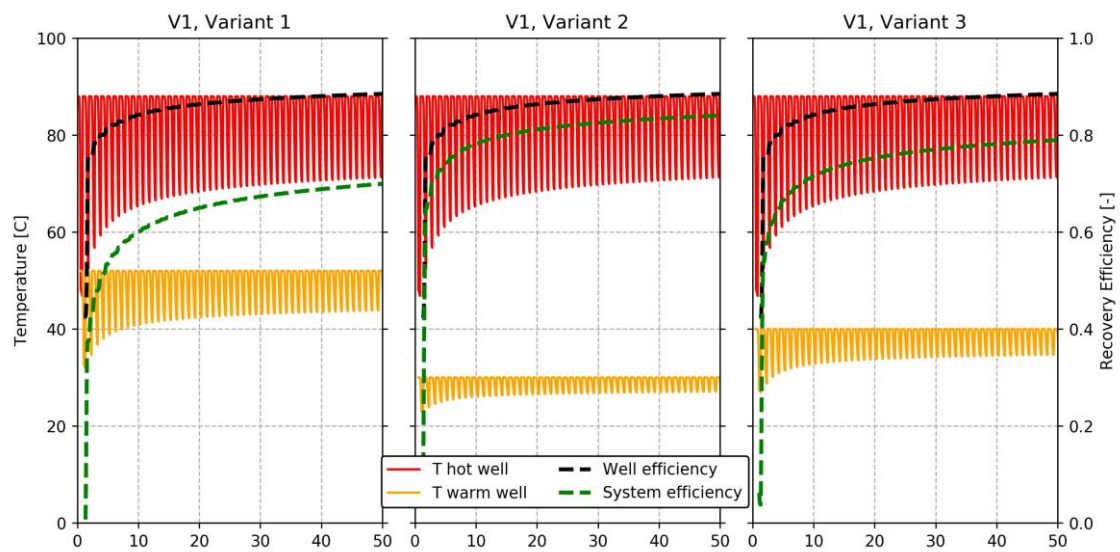
4.1.3 Resultaten simulaties

In dit hoofdstuk worden de temperatuur ontwikkeling en het thermische rendement voor de verschillende varianten gepresenteerd. Figuren van deze simulaties zijn weergegeven in hoofdstuk 5.2.

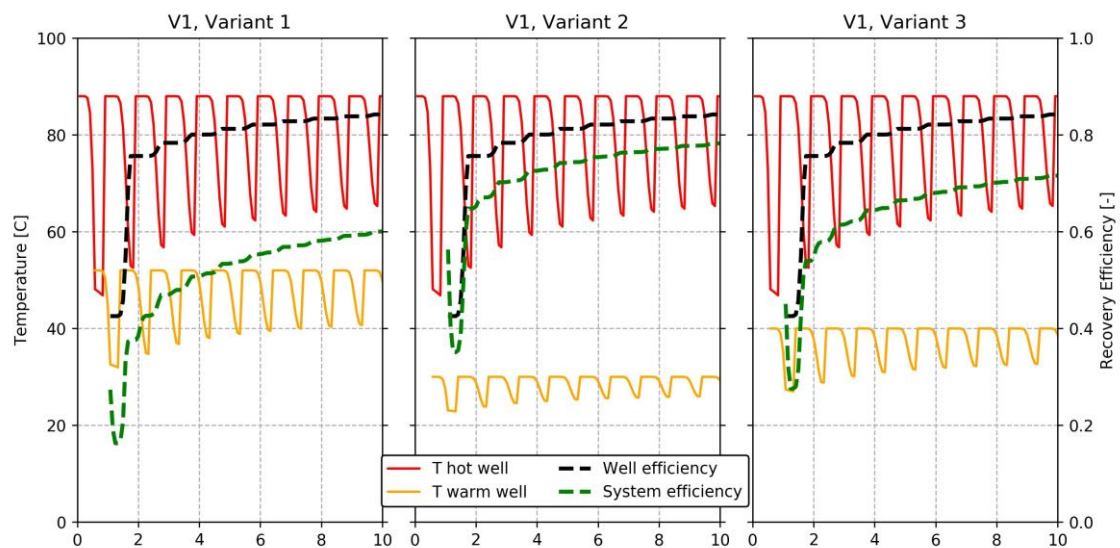
Axisymmetrisch 50 jaar

Variante 1, 2 en 3 zijn doorgerekend voor opslag in de vierde zandige eenheid van de Fm. van Maassluis (MSz4) met het axisymmetrisch model (Figuur 4-2). Omdat de afkap-temperaturen voor de drie varianten zeer laag zijn (53, 30, 40°C, respectievelijk) komt het niet voor dat dit een effect heeft op het volume dat kan worden onttrokken. Voor alle simulaties is het onttrokken volume ieder jaar gelijk aan het geïnjecteerde volume uit de hete en warme bronnen.

Een groot verschil in systeemrendement kan worden geobserveerd in Figuur 4-2 voor de drie verschillende varianten. Bij een lagere warme bron temperatuur, oftewel het grootste temperatuurverschil tussen de hete en warme bronnen is het systeemrendement het hoogst; variante 2 (Tabel 4.1).



Figuur 4-2 Gesimuleerde bron temperatuur en daaruit berekende Jaarlijkse rendement, 50 jaar.



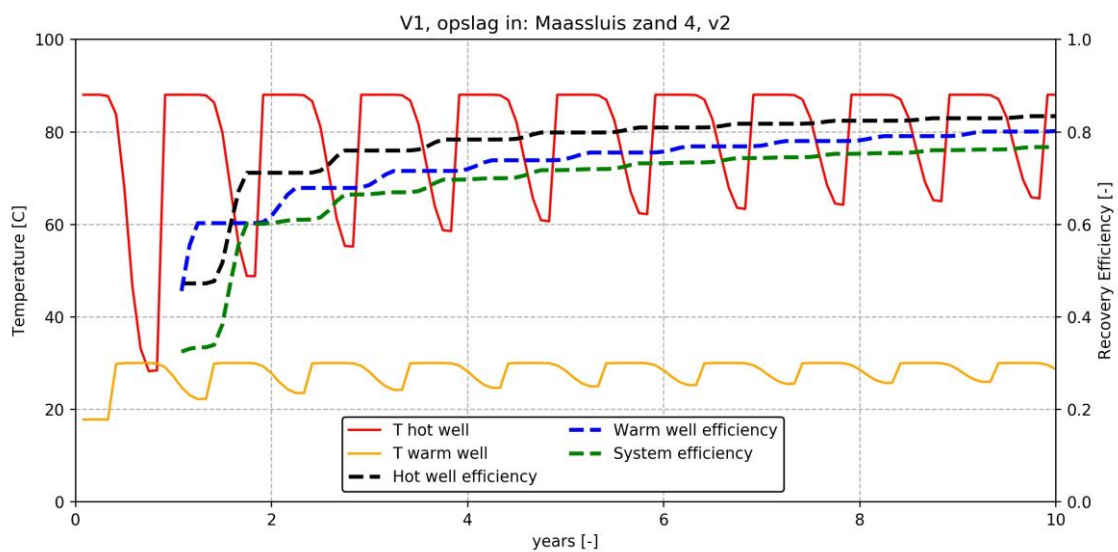
Figuur 4-3 Gesimuleerde bron temperatuur en daaruit berekende Jaarlijkse rendement voor de eerste 10 jaar.

Tabel 4-1 Resultaten modellering warmteopslag systeem voor opslag in formatie van Maassluis

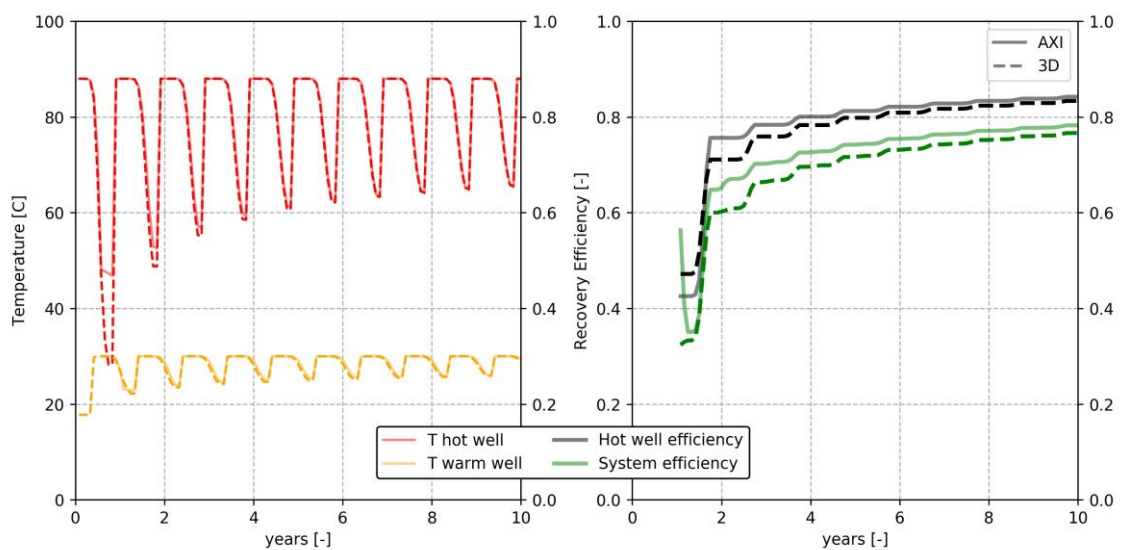
| Parameter | Variant 1 – Msz4 | Variant 2 – Msz4 | Variant 3 – Msz4 |
|--|------------------|------------------|------------------|
| Hete bron | | | |
| Efficiëntie (2 ^e jaar) | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| Efficiëntie (10 ^e jaar) | 0.84 | 0.84 | 0.84 |
| Efficiëntie (50 jaar) | 0.89 | 0.89 | 0.89 |
| Systeem | | | |
| Efficiëntie systeem (2 ^e jaar) | 0.41 | 0.66 | 0.57 |
| Efficiëntie systeem (10 ^e jaar) | 0.60 | 0.78 | 0.72 |
| Efficiëntie systeem (50 jaar) | 0.70 | 0.84 | 0.79 |

3D simulatie

Uit de axisymmetrische simulaties blijkt dat variant 2, met de laagste warme bron temperatuur het hoogste systeemrendement heeft. Er is dus voor gekozen om deze variant door te rekenen met een 3D model. Het systeem bestaat dus uit een hete bel (bestaande uit 4 hete bronnen) met daaromheen 5 warme bronnen. De warme bron efficiëntie blijft in de 1^e 10 jaar lager dan de hete bron efficiëntie (Figuur 4-4). Doordat het opslagvolume wordt verdeeld over de warme bronnen, is het thermisch volume per bron relatief klein, en zijn er dus relatief veel verliezen door conductie. Dit geeft dus aan dat de bronnen nog niet optimaal zijn geplaatst rondom de hete bron (positieve interactie met hete bron) of optimaal bij elkaar zijn geplaatst. Dit resulteert er dus in dat de efficiëntie volgens het 3D model iets lager is dan de efficiëntie op basis van het axisymmetrische model (Figuur 4-5). Al met al geven beide simulaties hetzelfde beeld, na 10 jaar gaat het systeemrendement richting de 80%.



Figuur 4-4 Resultaat voor het 3D model voor variant 2.



Figuur 4-5 Vergelijking tussen het axisymmetrische model en het 3D model.

4.1 Financiële analyse

Om de voor en nadelen van de 3 varianten goed tegen elkaar af te wegen zijn voor alle drie de varianten de business cases doorgerekend. Voornamelijk de warmtepomp zal een grote invloed hebben op de investeringskosten. De waarde van een warmtepomp moet ook kwalitatief worden meegenomen aangezien er direct aan het warmtenet geleverd kan worden. Voor de variant zonder warmtepomp zal er nog moeten worden naverwarmd om de gewenste aanvoertemperatuur van het warmtenet te bereiken.

4.2.1 Investeringskosten

De investeringskosten voor de drie varianten zijn op haalbaarheidsniveau geraamd. De geraamde kosten exclusief BTW zijn weergegeven Tabel 4-2. Een korte toelichting op een aantal onderdelen is gegeven na de tabel.

Tabel 4-2 Geraamde investeringskosten HTO varianten

| | | Variant 1 | Variant 2 | Variant 3 |
|-----------------------------------|------------|------------------|-------------------|------------------|
| Proefboring | [€] | 230.000 | 230.000 | 230.000 |
| HTO bronnen | [€] | 3.100.000 | 3.400.000 | 3.100.000 |
| Warmtepomp | [€] | - | 5.000.000 | 3.300.000 |
| WTB/CT/E overig | [€] | 830.000 | 840.000 | 830.000 |
| Onvoorzien (10%) | [€] | 420.000 | 950.000 | 750.000 |
| Ontwerp/advies/vergunningen (15%) | [€] | 600.000 | 1.420.000 | 1.120.000 |
| Totaal | [€] | 5.200.000 | 11.800.000 | 9.300.000 |

Proefboring

Om een goed ontwerp te kunnen maken van de HTO, wordt geadviseerd om een proefboring uit te voeren. Hiermee wordt de bodemsamenstelling onderzocht en kan door middel van een pompproef de capaciteit worden bepaald. De proefboring kan vervolgens worden afgewerkt als een monitoringsput. In het kader van de vergunning Waterwet zal de Provincie vermoedelijk eisen dat er een monitoringsput moet komen. Hierin worden temperaturen en waterkwaliteit gemeten. Geadviseerd wordt de monitoringsput te gebruiken als testboring en deze aan te leggen voordat er een definitief ontwerp wordt gemaakt.

HTO bronnen

In de post voor HTO omvat de hete en lauwe bronnen, putbehuizing, bronpompen, leidingwerk en bekabeling. Kosten voor het realiseren van de bronnen, zoals o.a. het boren, de stijgbuis, een wikkeldraadfilter en het afwerken zijn hierbij inbegrepen.

Warmtepomp

De investeringskosten voor een hoge temperatuur warmtepomp (geïnstalleerd) zijn ingeschat op 600€/kWt.

WTB/CT/E overig

Deze post omvat de overige componenten, welke grofweg bestaat uit leidingen/kleppen/appendages in de technische ruimte, warmtewisselaars, koppelend leidingwerk met het warmtenet, waterbehandeling, regeling en elektra.

Onvoorzien

Op de geraamde kosten is een opslag van 10% toegevoegd voor onvoorziene kosten.

Ontwerp/advies/vergunningen

De ontwerp-, advies- en vergunningskosten zijn ingeschat op 15% van de investeringskosten. De vergunningen omvatten de Vergunningen Waterwet (provincie) en vergunningen om te mogen lozen (Waterschap/gemeente) inclusief milieu-effectenrapportages en MER-beoordeling.

4.2.2 Operationele kosten

De operationele kosten voor de twee varianten zijn op haalbaarheidsniveau geraamd. De geraamde kosten exclusief BTW zijn weergegeven Tabel 4-3. Een korte toelichting op een aantal onderdelen is gegeven na de tabel.

Tabel 4-3 Geraamde operationele kosten HTO varianten

| | | Variant 1 | Variant 2 | Variant 3 |
|------------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| Opslag warmte | [€/jaar] | - | - | - |
| Elektriciteitsverbruik | [€/jaar] | 21.000 | 566.000 | 282.000 |
| Onderhoud en beheer | [€/jaar] | 173.000 | 285.000 | 239.000 |
| Waterbehandeling | [€/jaar] | 20.000 | 28.000 | 24.000 |
| Monitoring en BRL inspecties | [€/jaar] | 30.000 | 30.000 | 30.000 |
| Totaal | [€/jaar] | 429.000 | 728.000 | 515.000 |

Opslag warmte

In de zomerperiode wordt er warmte opgeslagen in de HTO vanuit het transportnet. Deze warmte komt uit diverse bronnen, het is dus lastig om te voorspellen welke warmte voor welke prijs geladen wordt. De kosten worden ingeschat tussen 0% en 70% TTF. In de businesscase wordt 0% gehanteerd.

Elektriciteitsverbruik

De warmtepomp, circulatiepompen en bronpompen verbruiken elektriciteit. Het totale elektriciteitsverbruik is ingeschat op basis van de SPF (Seasonal Performance Factor). De SPF voor het laden wordt ingeschat op 50, wat betekent dat voor elke energie-eenheid warmte (MWh) die wordt opgeslagen en geleverd uit de HTO, 20 kWh aan elektriciteit nodig is. De SPF voor het ontladen ligt in variant 2 en variant 3 door inzet van de warmtepomp lager. De COP van de warmtepomp is ingeschat op respectievelijk 3,3 en 3,8 (zie paragraaf 3.1). Warmtelevering gebeurt deels door op directe wijze en deels via de warmtepomp. De SPF voor warmtelevering als geheel is ingeschat op 4,1 en 6,6 voor variant 2 en 3 respectievelijk. Voor de kosten van elektriciteit is gerekend met een waarde van 75 €/MWh.

Onderhoud en beheer

Er wordt vanuit gegaan dat de bronnen elke vijf jaar worden geregenereerd door ze mechanisch en chemisch te reinigen. De kosten hiervoor liggen op 50 k€ per bron. Dit betekent 10 k€/jaar per bron. Voor onderhoud en beheer wordt er vanuit gegaan dat de pompen (ESP) elke 5 jaar worden vervangen. Voor de warmtepomp is gerekend met 2% van de investeringskosten. Voor de overige onderdelen is gerekend met 4% van de investeringskosten.

Waterbehandeling

Voor 90°C opslag wordt uitgegaan van waterbehandeling met zoutzuurdosering. Uitgaande van 5 ml/30% per kWh warmte (geologische situatie GeoMEC), is dit 5 l/MWh. Uitgaande van 200 euro/ton geleverd met een vrachtwagen op locatie, liggen de pure zoutzuur kosten op 1 € per opgeslagen MWh.

Monitoring en BRL inspecties

In deze post zijn de kosten opgenomen voor jaarlijkse monitoring, interpretatie en de jaarlijkse BRL check.

4.2.3 Business case

Aannames

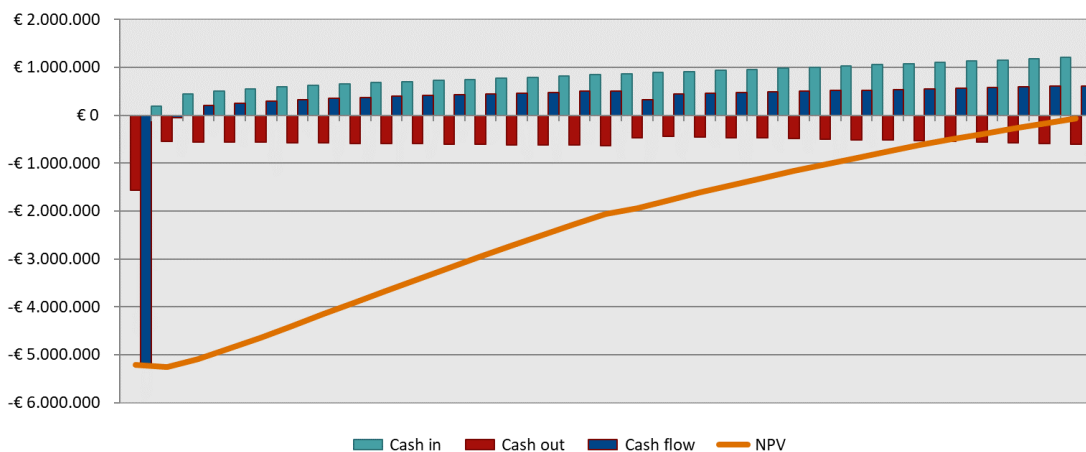
Aanvullend op de aannames voor de investeringskosten en operationele kosten zijn voor de business case de volgende aannames/uitgangspunten gehanteerd:

- Herinvesteringen: na 15 jaar is een herinvestering opgenomen voor de warmtepomp, stikstof- en waterbehandelingsinstallatie. Herinvesteringen voor bronpompen en andere onderdelen zijn verdisconteerd in de operationele kosten voor onderhoud en beheer.
- Projectrendement: deze dient 6% zijn over de looptijd. Voor de looptijd is 30 jaar aangehouden. Het benodigde rendement op eigen vermogen is gezet op 15%.
- Indexaties: alle toekomstige energieprijzen zijn geïndexeerd met 2% per jaar.
- Investering: 30% uit eigen vermogen, 70% vreemd vermogen uit een lening met een looptijd van 15 jaar en een rente van 3%.
- CO₂ besparing wordt gewaardeerd met een waarde van 24€ per ton vermeden CO₂.

In variant 1 zonder warmtepomp dient de geproduceerde temperatuur van de HTO nog te worden opgehoogd om de gewenste aanvoertemperatuur van het warmtenet te bereiken. De gewenste locatie voor deze temperatuur-lift zal waarschijnlijk bij een boosterstation zijn zodat installaties kunnen worden gekoppeld. Het boosterstation valt onder het beheer van de exploitant en is niet meegenomen in de onderstaande business case, welke puur de HTO behandelt. De additionele kosten voor het ophogen van de temperatuur middels een (bio-)gas ketel of een andere installatie dient door de exploitant zelf te worden ingeschat. Het voordeel van de lagere warmteprijs van variant 1 dient dan ook te worden gewogen door de exploitant met het nadeel van de lagere aanvoertemperatuur.

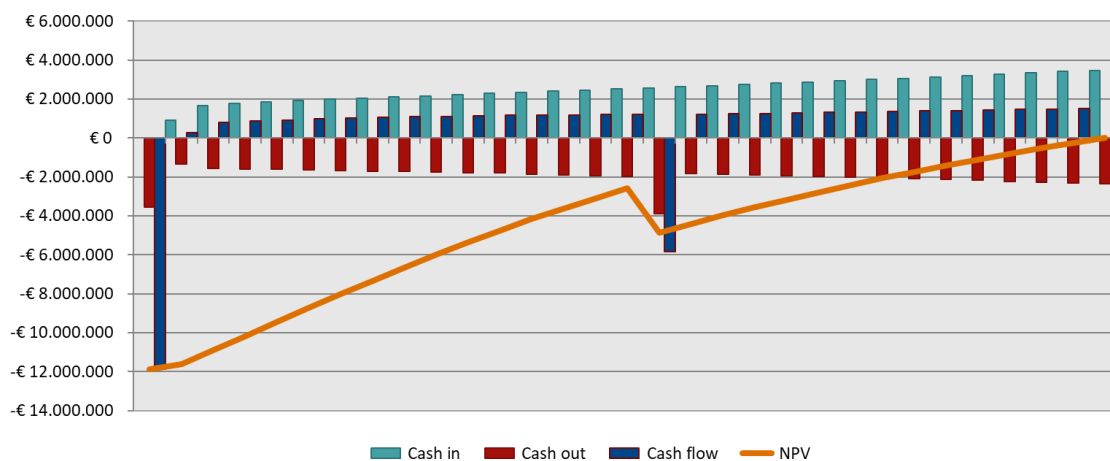
Business case varianten

De kasstromen over de projectperiode voor variant 1 zijn weergegeven in Figuur 4-6. In jaar 0 worden alle investeringen gedaan. Na 15 jaar vindt voor de warmtepomp een grote herinvestering plaats, dit is duidelijk te zien in de kasstromen van variant 2 en 3. De jaarlijkse operationele kosten stijgen jaarlijks als gevolg van de indexatie. De jaarlijkse inkomsten stijgen omdat ten eerste het opslagrendement steeds verder toeneemt. Hierdoor kan elk jaar meer warmte worden geleverd. Ten tweede stijgen de inkomsten doordat ook de prijs voor warmte jaarlijks wordt geïndexeerd. Om een projectrendement van 6% te halen over een looptijd van 30 jaar bedraagt voor variant 1 de prijs voor warmte 12,4 €/GJ.



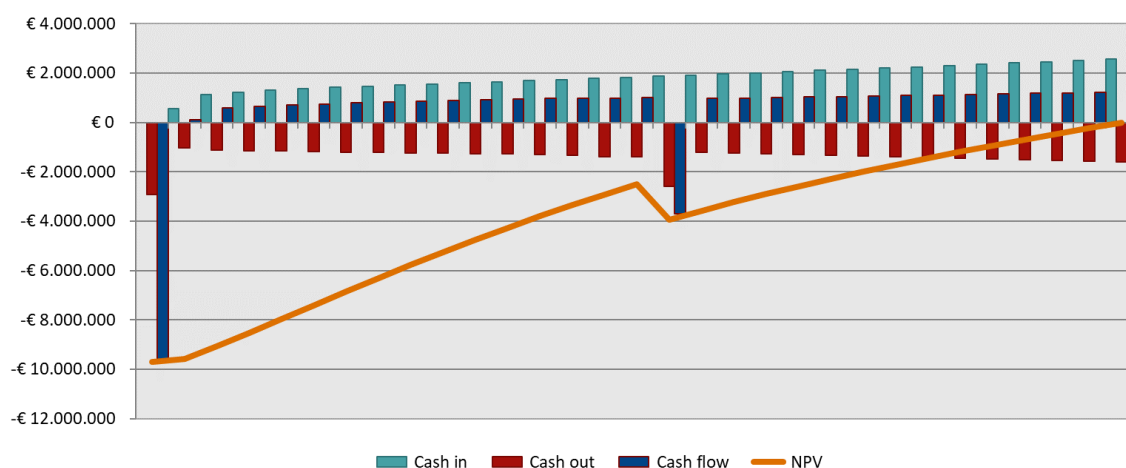
Figuur 4-6: Kasstromen variant 1

In variant twee zie je duidelijk de verhoogde investering als gevolg van de warmtepomp terugkomen. Er is echter ook een verhoogde omzet doordat er meer warmte geleverd kan worden doordat de retour wordt uitgekoeld. De Opex stijgt ook, voornamelijk door het elektraverbruik van de warmtepomp. Om een projectrendement van 6% te halen over een looptijd van 30 jaar bedraagt voor variant 2 de prijs voor warmte 17,9 €/GJ.



Figuur 4-7: Kasstromen variant 2

De kasstromen over de projectperiode voor variant 3 zijn weergegeven in Figuur 4-8. Er is hierbij een sterk verbeterde business case t.o.v. variant 2 waarbij de prijs voor de geleverde warmte 16,8€/GJ is om een project rendement 6% te bewerkstelligen. De Capex is aanzienlijk lager door de kleiner opgestelde warmtepomp, de omzet is echter ook lager doordat er minder warmte geleverd wordt in vergelijking tot variant 2 waarbij de retour tot 30 graden wordt uitgekoeld.



Figuur 4-8: Kasstromen variant 3

Een van de voordelen van warmte-opslag is dat minder piekvermogen opgesteld hoeft te worden, omdat de HTO een deel van de warmtelevering in de winter voor rekening neemt. Voor beide varianten zijn de specifieke investeringskosten berekend op basis van het thermisch geleverde

vermogen. Omdat het vermogen van de HTO langzaam afneemt, is gerekend met het gemiddelde vermogen. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 4-4

Tabel 4-4 Berekende specifieke investeringskosten warmte-opslag

| | | Variant 1 | Variant 2 | Variant 3 |
|--------------------------------------|---------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Investeringskosten | [€] | 5.200.000 | 11.800.000 | 9.300.000 |
| Gemiddeld geleverd vermogen | [MW _t] | 2,2 | 6,5 | 5,2 |
| Specifieke investeringskosten | [€/MW_t] | 2.260.000 | 1.810.000 | 1.790.000 |

4.2.4 Gevoeligheidsanalyse

Omdat er een zekere onzekerheid zit in de gehanteerde uitgangspunten is er gekeken naar de gevoeligheid van de businesscase op bepaalde uitgangspunten. Deze gevoeligheidsanalyse is enkel uitgevoerd voor variant 1 omdat deze financieel als meest preferabel uit de bovenstaande analyse naar voren kwam.

Investeringssubsidie

Door het innovatieve karakter van de HTO kan er eventueel aanspraak gemaakt worden op de DEI+ subsidie. Het project zou binnen de categorie 'Demonstratieprojecten' vallen, waarbij er investeringssteun wordt verleend aan de exploitant indien er milieuvoordeel met het project wordt behaald. Een HTO kan binnen het thema 'Hernieuwbare Energie' van de DEI+ vallen, met de redenering dat het de exploitatie van een hernieuwbare energie installatie kosten-effectiever maakt. Per project is er een maximale subsidie van €15 miljoen en voor het thema 'Hernieuwbare Energie' geldt een maximaal subsidiepercentage van 45% op de investeringskosten. Zoals in onderstaande tabel (Tabel 4-5) valt af te lezen zal de subsidie de warmteprijs sterk drukken.

Tabel 4-6: Gevoeligheidsanalyse investeringssubsidie

| | | Variant 1 | Investeringssubsidie |
|--------------|--------|-----------|----------------------|
| Subsidie | [€] | 0 | 2.340.000 |
| Prijs warmte | [€/GJ] | 12,4 | 9,7 |

Prijs opgeslagen warmte

Binnen de huidige SDE++-systematiek wordt subsidie verstrekt op warmte die door de duurzame bron geleverd wordt. Bij opslag zal een deel van de opgeslagen warmte verloren gaan. Dit is echter ook in de huidige situatie aan de orde, waar een deel van de warmte verloren gaat in het warmtenet. Een discussie omtrent hoe en of de SDE++-systematiek hiermee rekening dient te houden, valt buiten de scope van dit onderzoek. Duurzame energietechnieken hebben echter wel baat bij een haalbare business case zonder subsidie.

De gevoeligheid van de prijs van opgeslagen warmte is onderzocht met +/-4€/GJ. Als basis wordt 0€/GJ aangehouden. De resultaten staan in Tabel 4-7.

Tabel 4-7: Gevoeligheidsanalyse opslag prijs warmte

| | | Var 1 - Onderwaarde | Var 1 - Basis | Var 1 – Bovenwaarde |
|---------------------|---------------|------------------------|---------------|------------------------|
| Hete bronnen | [-] | 4 | 4 | 4 |
| Lauwe bronnen | [-] | 5 | 5 | 5 |
| Projectrendement | [%] | 6% | 6% | 6% |
| Prijs opslag warmte | [€/GJ] | -4 | 0 | 4 |
| Prijs warmte | [€/GJ] | 6,5 | 12,4 | 18,4 |

Projectrendement

De gewenste projectrendementen wordt door de exploiterende partij bepaald. Verschillende partijen zullen de risico's en baten van een HTO verschillend inschatten, vandaar dat de gevoeligheid van de warmteprijs als functie van het gewenste projectrendement is onderzocht. Zoals te zien in onderstaande tabel is de warmteprijs sterk afhankelijk van het gewenste projectrendement. De gevoeligheid op het projectrendement dient als input voor exploiterende partij, maar ook als input ter vergelijking van de verschillende HTO-studies met éénzelfde projectrendement. De resultaten staan in Tabel 4-8.

Tabel 4-8: Gevoeligheidsanalyse Projectrendement

| | | Onderwaarde | Variant 1 (basis) | Bovenwaarde |
|---------------------|---------------|-------------|-------------------|-------------|
| Hete bronnen | [-] | 4 | 4 | 4 |
| Lauwe bronnen | [-] | 5 | 5 | 5 |
| Projectrendement | [%] | 4% | 6% | 8% |
| Prijs opslag warmte | [€/GJ] | 0 | 0 | 0 |
| Prijs warmte | [€/GJ] | 10,4 | 12,4 | 14,7 |

Aangepaste onttrekkingsnorm

Voor de standaard casussen wordt de NVOE(onttrekkings- en infiltratienorm) aangehouden. Doordat de HTO's op een grotere diepte liggen dan een standaard WKO wordt er ook rekening gehouden met een hogere toelaatbare druk waarbij de zandwinning beperkt blijft en de stabiliteit van de laag niet wordt aangetast. Door het toepassen van deze norm op de bovenstaande varianten daalt het benodigd aantal bronnen om het gewenste debiet te leveren. Het zal dus met name effect hebben de investeringskosten en de ruimtelijke inpassing. Omdat de haalbare overschrijding van de norm nu nog onbekend worden het aantal bronnen geoptimaliseerd naar het gewenste rendement met een warmteprijs van 12€/GJ.

Tabel 4-9 geeft de gevoeligheid van het aantal bronnen weer. Indien de 3 hete en 4 lauwe bronnen als toelaatbaar wordt geacht kan er met 10,5€/GJ het gewenste projectrendement behaald worden. In bijlage I is meer informatie te vinden over de kansen die er liggen om de bestaande NVOE normen te verhogen. Hier is echter nog geen langdurige ervaring mee en dit brengt risico's met zich mee. In het vervolg van WINDOW binnen WarmingUP zal moeten worden onderzocht in hoeverre verhoogde normen van toepassing kunnen zijn voor een optimaal functionerend warmteopslag systeem. Verder is er ook een onzekerheid m.b.t. de bodem waardoor het toelaatbaar debiet in de praktijk gunstig kan uitvallen.

Tabel 4-9: Gevoeligheidsanalyse aantal doubletten

| | | Variant 1 verruimde norm | Variant 1 Basis |
|---------------------|---------------|-----------------------------|--------------------|
| Hete bronnen | [-] | 3 | 4 |
| Lauwe bronnen | [-] | 4 | 5 |
| Projectrendement | [%] | 6% | 6% |
| Prijs opslag warmte | [€/GJ] | 0 | 0 |
| Prijs warmte | [€/GJ] | 10,5 | 12,4 |

4.2.5 Samenvatting

Om een projectrendement van 6% te halen is komt de warmteprijs van variant 1,2 en 3 uit op 12,4; 17,9 en 16,8 €/GJ respectievelijk. Variant 1 is hierin duidelijk het meest gunstig, er moet echter rekening mee worden gehouden dat de geproduceerde warmte nog een temperatuurlift nodig heeft om op de juiste aanvoertemperatuur van het transportnet te komen.

In de gevoeligheidsanalyse valt op dat de variatie in de prijs van de opgeslagen warmte effect heeft op de variatie in warmteprijs van de geproduceerde warmte met een factor 1,5. Dit komt doordat een deel van de opgeslagen warmte verloren gaat en er minder warmte wordt verkocht dan opgeslagen.

De variatie in bronnen toont aan dat met een relatief kleine marge op de huidig gehanteerde onttrekkingsnorm een aantrekkelijke prijs voor warmte kan worden bewerkstelligt. De variaties in projectrendement en een mogelijke investeringssubsidie biedt voor de exploitant inzicht in de business case en laat een eventuele spreiding zien aan de hand van de gehanteerde uitgangspunten.

4.3 CO₂-besparing

De CO₂-besparing wordt berekend door de CO₂ uitstoot van de geleverde warmte te vergelijken met de CO₂ uitstoot van de referentie.

De CO₂-uitstoot wordt bepaald door twee termen: de uitstoot voor productie en transport van de opgeslagen warmte en de hulpenergie voor de levering van de HTO-warmte.

In deze paragraaf is variant 1 doorgerekend. Voor productie en transport van de opgeslagen warmte is uitgegaan van levering door de geothermie bron. De hulpenergie voor levering van de warmte bestaat in variant 1 uit elektriciteitsgebruik van de opslag. Het gasgebruik van het booster station is niet in de emissie-berekening meegenomen, omdat dit station wordt gezien als onderdeel van het warmtenet en door Shell/Ennatuurlijk verder wordt uitgewerkt.

De varianten 2 en 3 zijn niet beschouwd in deze paragraaf. Vanwege het elektriciteitsgebruik van de warmtepomp zal de CO₂-uitstoot groter zijn dan hier berekend voor variant 1. Voor een goede vergelijking tussen de varianten moet in variant 1 het gasgebruik van het booster station wel worden meegenomen.

Voor de omzetting van elektriciteit naar CO₂-uitstoot wordt gebruik gemaakt van een vaste uitstoot volgens NTA 8800 (0,34 kg/kWh).

Van de warmteopslag daalt de temperatuur bij warmtelevering gedurende het jaar en tevens neemt per jaar het opslagrendement van de opslag toe. Hierdoor zullen elk jaar zowel de absolute CO₂-uitstoot als ook de relatieve CO₂ uitstoot per geleverde GJ warmte verschillen. In Tabel 4-9 is de afleiding geven van de CO₂-uitstoot. Dit is gedaan voor zowel jaar 30, als over de totale looptijd van 30 jaar.

Tabel 4-10 Afleiding CO₂-uitstoot warmteopslag

| | | Variant 1 |
|--|--|------------------|
| Jaar 30 | | |
| Opgeslagen warmte | [GJ _i] | 73.000 |
| Elektriciteitsverbruik warmteopslag ¹ | [MWh _e] | 400 |
| Geleverde warmte | [GJ _i] | 49.400 |
| Elektriciteitsverbruik warmtelevering ² | [MWh _e] | 270 |
| CO ₂ -uitstoot opgeslagen warmte ³ | [ton CO ₂] | 600 |
| CO ₂ -uitstoot elektriciteit ⁴ | [ton CO ₂] | 230 |
| CO ₂ -uitstoot totaal | [ton CO ₂] | 800 |
| Specifieke CO ₂ -uitstoot | [kg CO ₂ /GJ _t] | 16,6 |
| Periode van 30 jaar | | |
| Opgeslagen warmte | [GJ _i] | 2.200.000 |
| Elektriciteitsverbruik warmteopslag | [MWh _e] | 12.000 |
| Geleverde warmte | [GJ _i] | 1.330.000 |
| Elektriciteitsverbruik warmtelevering | [MWh _e] | 7.400 |
| CO ₂ -uitstoot opgeslagen warmte | [ton CO ₂] | 18.000 |
| CO ₂ -uitstoot elektriciteit | [ton CO ₂] | 6.700 |
| CO ₂ -uitstoot totaal | [ton CO ₂] | 24.300 |
| Specifieke CO ₂ -uitstoot | [kg CO ₂ /GJ _t] | 18,3 |

1) Aangenomen COP van 50 voor de HTO

2) Gemiddelde COP systeem (HTO, pompen) ingeschat op 50

3) CO₂-uitstoot warmte ingeschat op 8 kg/GJ_t (SPF warmtenet 55 en SPF geothermie 15)

4) 0,34 kg/kWh, bron NTA 8800

De CO₂-uitstoot van de HTO wordt vergeleken met de CO₂-uitstoot van een gasketel. Warmte geleverd met een gasketel heeft een CO₂-uitstoot van 62 kg/GJ_t (bij een rendement van de gasketel van 90% op de bovenwaarde). Dit betekent dat met HTO (i.c.m. een warmtepomp) een CO₂-reductie van circa 70% kan worden gerealiseerd.

De uitstoot van 18,3 kg/GJ wordt bepaald door de uitstoot van de geothermie productie t.g.v. het elektriciteitsverbruik voor de geothermie-pomp (13,2 kg/GJ geleverde warmte). Deze uitstoot is gebaseerd op de huidige energiemix en zal de komende decennia nog aanzienlijk dalen. De werkelijke uitstoot zal dus lager uitvallen dan deze 18,3 kg/GJ, afhankelijk van de toekomstige elektriciteitsmix.

5 Milieu hygiënische en juridische aspecten

5.1 Grondmechanica: zetting en opheffing

5.1.1 Grond mechanische effecten

De grondmechanische risico's van een HTO-systeem zijn vergelijkbaar met die van de gangbare open bodemenergiesystemen (waarbij ook geen netto wateronttrekking plaatsvindt en de putten een seizoencyclus van injectie en onttrekking hebben. Eventuele verschillen worden veroorzaakt door de van effecten de hogere temperatuur.

In vergelijking met (drinkwater)onttrekkingen zijn de effecten kleiner doordat de onttrekking per put een beperkte duur heeft en wordt afgewisseld met injectie.

De grondmechanica wordt beïnvloedt door stijghoogteveranderingen en temperatuurveranderingen. In bijlage 4 is de invloed van deze veranderingen op de grond mechanische processen verder beschreven. Daarbij is een algemene beschrijving gegeven van grond mechanische processen bij HTO systemen. Een specifieke beschouwing per locatie is in deze verkenningen niet gemaakt.

5.1.2 Samenvatting grond mechanische risico's

Voor onttrekkingen is veel kennis beschikbaar over voorspellingen van zettingen en over daadwerkelijk opgetreden zettingen. Voor WKO's zijn er ook richtlijnen voor de geotechnische risico's. Dit kan ook gebruikt worden voor HTO. De risico's zullen minder zijn naar gelang de HTO dieper aangelegd. De consequenties van de hogere temperatuur zijn naar verwachting beperkt, maar hier is weinig informatie over beschikbaar zodat het is aan te bevelen om gerichte monitoring uit te voeren.

5.1.3 Aanbeveling

Op basis van deze kwalitatieve beschouwing kan geen belangrijk onderscheid gemaakt worden tussen de geselecteerde locaties wat betreft grondmechanische risico's. Na selectie van locaties voor verdere evaluatie dienen locatie specifieke berekeningen een inschatting geven van de verwachte effecten aan het maaiveld. Daarna kan in combinatie met een omgevingsscan het effect worden ingeschat waarbij mogelijk een ondiepere laag afvalt als optie voor HTO. Hiertoe dienen de mogelijke effecten van hogere temperaturen beter in beeld te worden gebracht, eventueel ondersteunt door experimentele observaties en gecombineerde modellen die grondmechanische, hydraulische, thermische en geochemische processen simuleren.

5.2 Thermische effecten

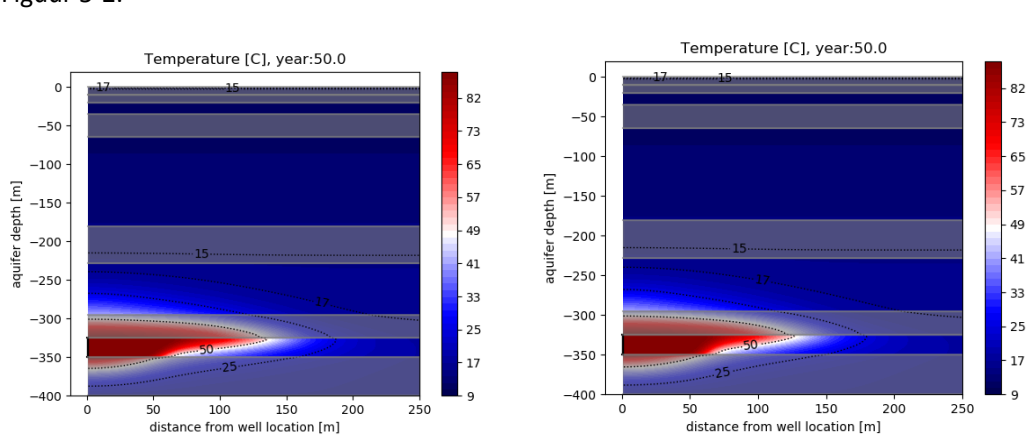
De grootste thermische effecten vinden plaats in de opslag-aquifer en de daaromheen liggende lagen. Daarnaast is er warmte-uitstraling vanuit de put naar de ondergrond rondom. De mate waarin thermische effecten door dit warmteverlies optreden, hangt voornamelijk af van de isolerende werking van de putconstructie. Op basis van eerder onderzoek kan worden ingeschat dat deze thermische verliezen relatief klein zijn t.o.v. de thermische verliezen vanuit de opslag. Nader onderzoek moet bepalen wat de exacte effecten zijn. Dat is in dit stadium nog niet bepaald. In het vervolg van dit hoofdstuk worden alleen de thermische effecten beschouwd die optreden door de opslag van de thermische energie in de aquifer. In deze verkenningen is nog geen rekening gehouden met de natuurlijke grondwaterstroming.

Formatie van Maassluis, axisymmetrisch model 50 jaar

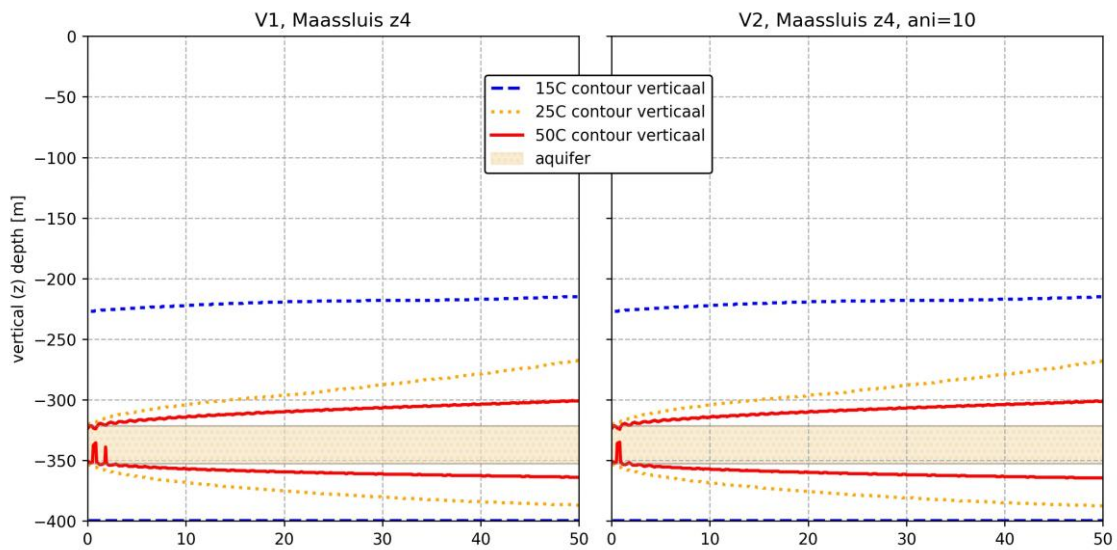
Omdat de geohydrologische condities voor de ondergrond van Leeuwarden nog vrij onzeker zijn, zijn er twee varianten doorgerekend waarbij de verhouding tussen de horizontale en de verticale doorlatendheid variabel is. In principe is een grotere anisotropie factor gunstig de thermische effecten omdat verliezen door opdrijving kleiner worden:

1. De standaard anisotropie (factor =2)
2. Hogere anisotropie factor (10)

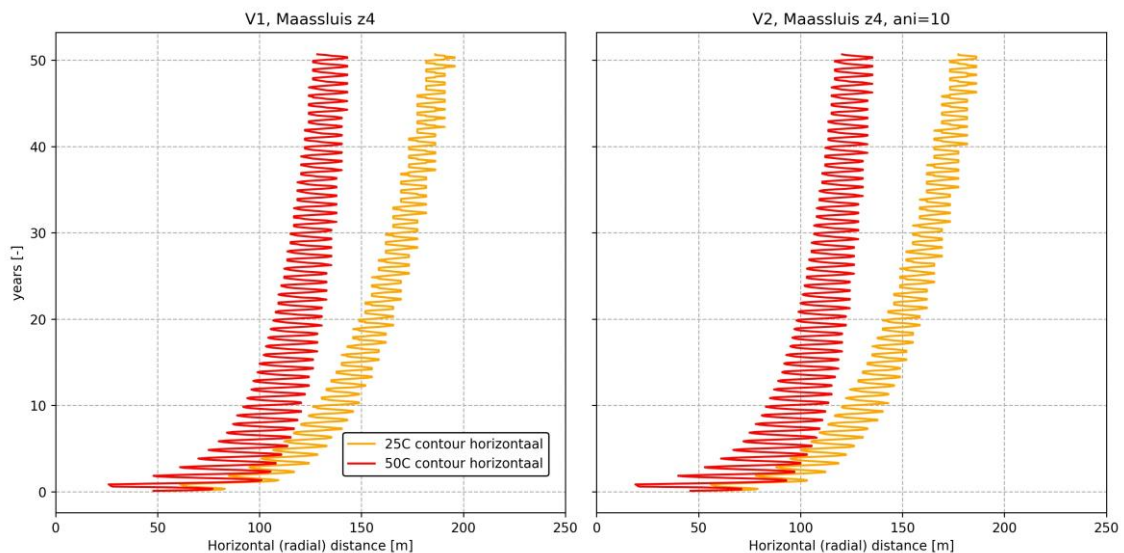
In Figuur 5-1 is te zien dat de opdrijving minder is in de variant met de hogere anisotropie (kanteling van warme front is kleiner). Qua warmteverspreiding is er echter slechts een klein verschil. Omdat de Formatie van Maassluis wordt afgedekt met een kleilaag van voldoende dikte duurt het relatief lang voordat er een thermisch effect merkbaar is in de bovenliggende aquifer, Figuur 5-2.



Figuur 5-1 Thermische verspreiding van de warmte in de Maassluis zand 4 formatie na 50 jaar. Links anisotropie =2, Rechts anisotropie =10.



Figuur 5-2 Verticale verspreiding van de warmte weergegeven d.m.v. verschillende temperatuur contouren voor 50 jaar.

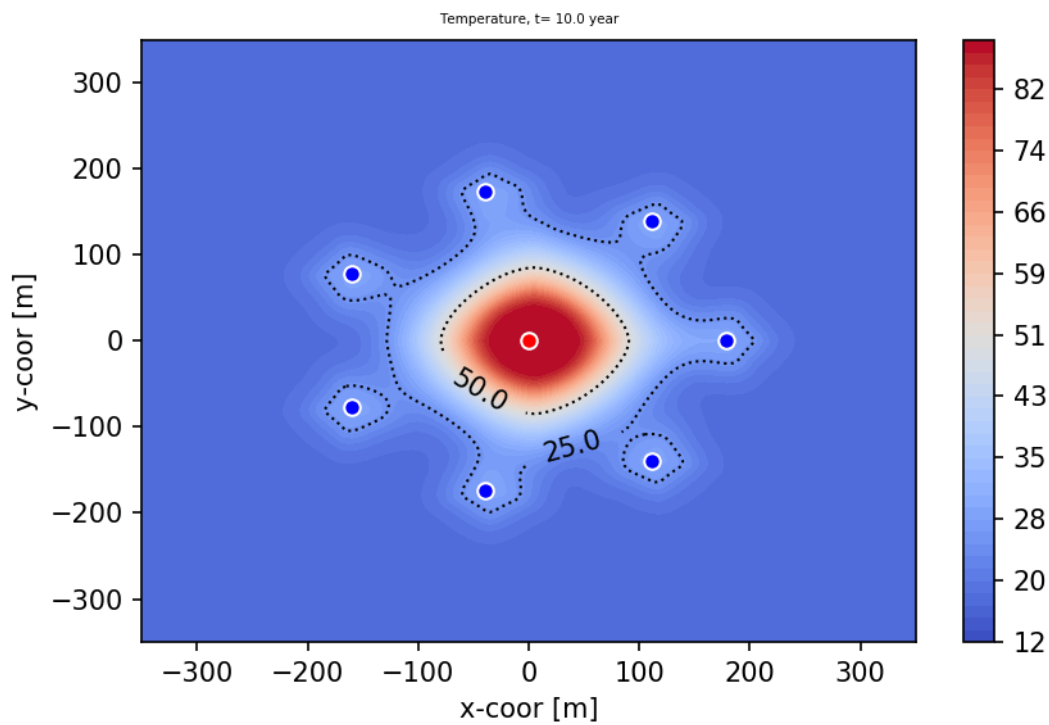


Figuur 5-3 Horizontale (radiale) verspreiding van de warmte weergegeven d.m.v. verschillende temperatuur contouren voor 50 jaar.

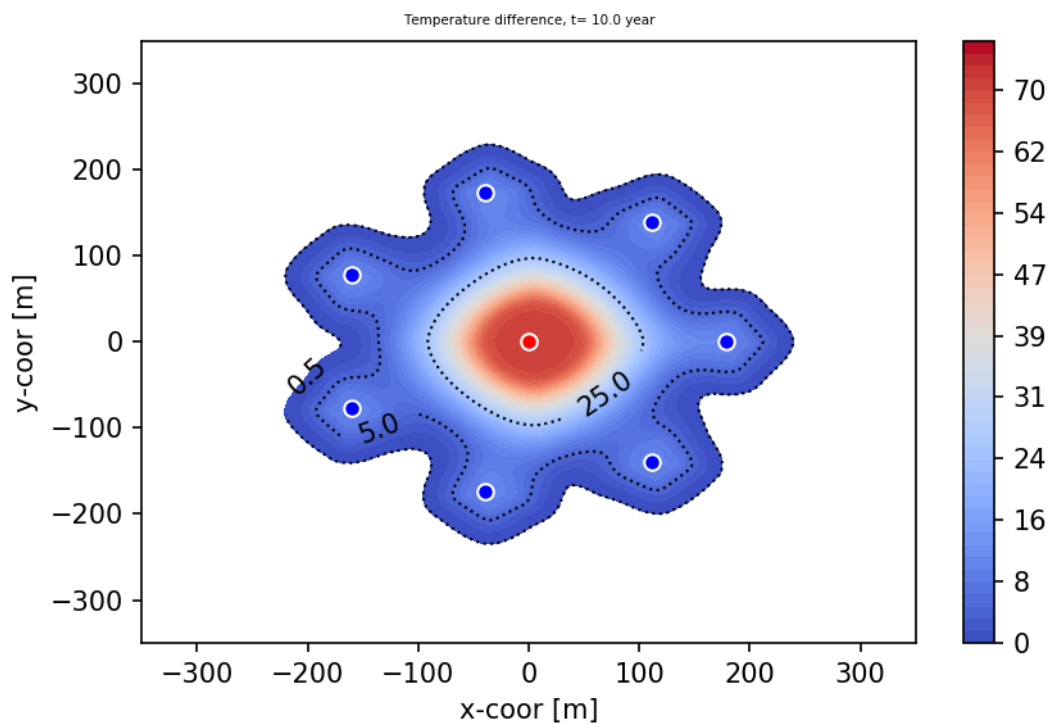
3D simulatie in Maassluis zand 4, 10 jaar (variant 2)

Variant 2 is doorgerekend met het 3D model om een inzicht te verkrijgen in het rendement en het thermisch effect van de HTO³ (Figuur 5-4). De opslagtemperatuur in de warme bron is 30 °C, deze temperatuur heeft ook het grootste effect in de horizontale verspreiding van de warmte, aangezien de hogere temperatuur van de hete bron niet buiten het domein van de warme bronnen komt. Dit is goed zichtbaar als we kijken naar het Figuur 5-5, waar de temperatuurverhoging die is ontstaan door de HTO is gepresenteerd. Het thermisch oppervlak dat meer dan 0.5 °C is opgewarmd is ongeveer een cirkel met een straal van 200m.

³ Het gepresenteerde 3D model heeft 7 warme bronnen, dit is o.b.v. eerdere uitgangspunten dan zijn gebruikt voor de BuCa (5 warme bronnen). Dit heeft echter weinig effect op de hier gepresenteerde resultaten van het 3D model.

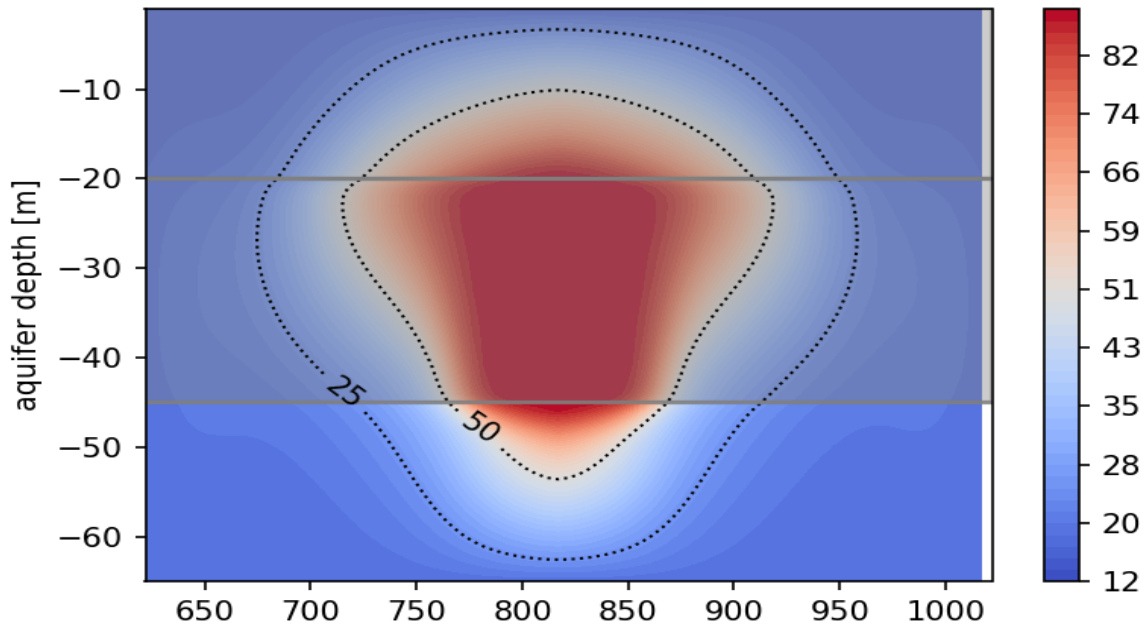


Figuur 5-4 Temperatuur in het opslag pakket na 10 jaar gebruik van de HTO (3D model, variant 2). Hier is een systeem met 7 warme bronnen gesimuleerd



Figuur 5-5 Temperatuurverandering ($T_{\text{ongrond}} - T_{\text{natuurlijk}}$) na 10 jaar gebruik van de HTO (3D model, variant 2). Hier is een systeem met 7 warme bronnen gesimuleerd

De doorsnede van het 3D model laat zien dat opdriving een rol speelt in de thermische verliezen die optreden in het warmteopslag systeem (ophoping warmte boven in de aquifer, Figuur 5-6). De grootste horizontale effecten zijn dus boven in de aquifer.



Figuur 5-6 Doorsnede van de ondergrond na 10 jaar gebruik van de HTO (3D model, variant 2). Let op de verschillende schaal op de y en x as.

5.3 Reflectie op mogelijke thermische effect op de grondwaterkwaliteit op basis van bestaande data

Op basis van de beschikbare data in Dinoloket over de samenstelling van grondwater nabij de verkenningslocaties is een eerste algemene interpretatie gemaakt van de geohydrochemie in de voor opslag beschouwde lagen ter plekke van de 5 verkenningslocaties. Hiervoor is alle beschikbare grondwaterkwaliteitsdata binnen een radius van 5 kilometer van deze locaties geanalyseerd. Omdat grondwaterkwaliteit alleen slechts een indicatie kan geven van mogelijk relevante effecten tijdens HTO, is er naast deze algemene beschouwing specifiek gekeken naar een aantal aspecten waarvoor uit de literatuur is gebleken dat ze bij HTO mogelijk een waterkwaliteitsrisico vormen. Voor zover de databeschikbaarheid het toeliet is dit gedaan vanuit zowel operationeel als grondwaterbeschermingsperspectief.

Een belangrijke eerste conclusie van deze voorverkenning is dat de huidig beschikbare data voor de verkenningslocaties niet toereikend is voor een uitgebreide analyse van mogelijke effecten op grondwaterkwaliteit. Dit omdat de hoeveelheid van geanalyseerde parameters zeer beperkt is, of analyses zelfs geheel afwezig voor de formaties waarin de lagen zich bevinden die worden verkend voor HTO (Tabel 5-1). Voor de Fm. van Oosterhout bij Heerhugowaard, de Fm. van Maassluis bij Leeuwarden, en de Fm. van Oosterhout bij Rotterdam is bijvoorbeeld geen data. Daarnaast is de data bij Rotterdam voor de Maassluis wel uit dezelfde formatie, maar zo'n 100 m minder diep gelegen dan de laag die verkend wordt voor HTO.

Tabel 5-1. Gemiddelde concentraties van belangrijke waterkwaliteitsparameters bij iedere verkenninglocatie in de formaties waarin de voor HTO verkende lagen zich bevinden. *Monsters wel uit Formatie van Maassluis maar ruim 100 m ondieper dan de voor HTO verkende laag.

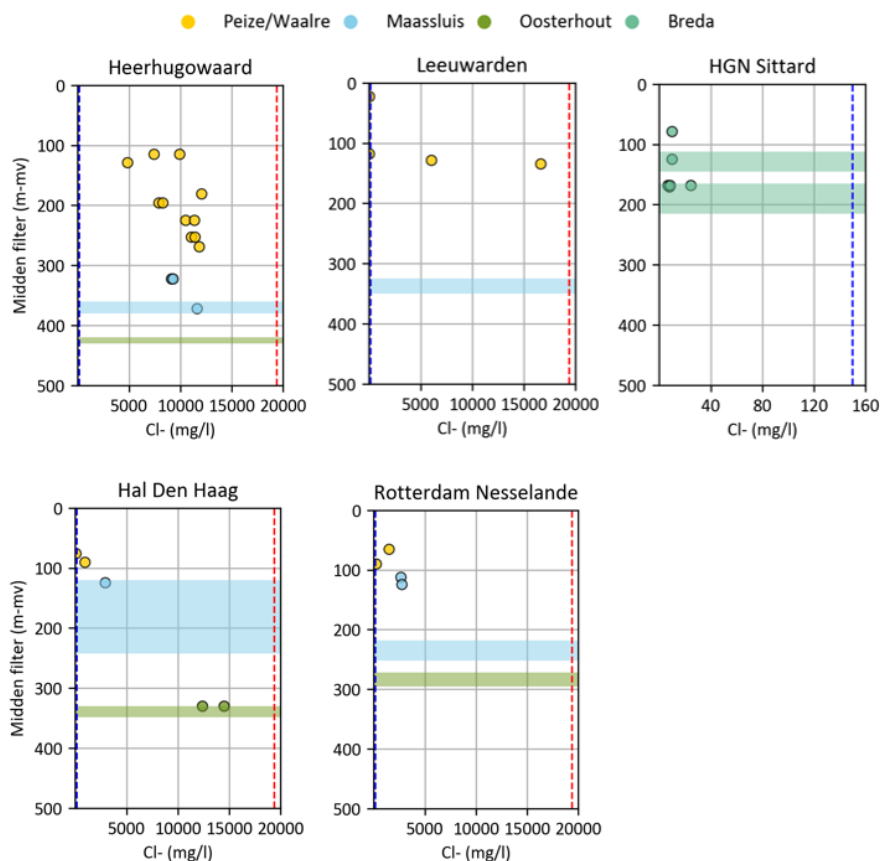
| Locatie | Formatie | Aantal monsters | As (ug/l) | Ca (mg/l) | Cl- (mg/l) | Fe (mg/l) | HCO ₃ (mg/l) | K (mg/l) | Mg (mg/l) | Mn (mg/l) | NH ₄ (mg/l) | NO ₃ (mg/l) | Na (mg/l) | SO ₄ (mg/l) | SiO ₂ (mg/l) | T-PO ₄ (mg/l) | pH (-) |
|---------------|------------|-----------------|-----------|-----------|------------|-----------|-------------------------|----------|-----------|-----------|------------------------|------------------------|-----------|------------------------|-------------------------|--------------------------|--------|
| Heerhugowaard | Maassluis | 3 | | 340 | 10018 | 5.4 | 353 | 116 | 642 | 0.8 | 43 | 0 | 5521 | 496 | 17 | 0.1 | 7.8 |
| Heerhugowaard | Oosterhout | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Leeuwarden | Maassluis | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sittard | Breda | 6 | 0.8 | 59 | 11 | 0.6 | 206 | 9 | 9 | 0.2 | 1 | 22 | 15 | 26 | 14 | 0.6 | 7.2 |
| Den Haag | Maassluis | 1 | | | 2930 | | 281 | | | | | | | | | | |
| Den Haag | Oosterhout | 2 | | 601 | 13444 | 1.5 | 168 | 118 | 337 | | 46 | 0 | 7327 | 24 | 32 | 0.0 | |
| Rotterdam | Maassluis* | 2 | | 521 | 2707 | 8.3 | 575 | | 134 | 0.1 | 6 | 0 | 1106 | 0 | 48 | | |
| Rotterdam | Oosterhout | 0 | | | | | | | | | | | | | | | |

Naast deze ruimtelijke beperking is er ook een beperking in termen van de waterkwaliteitsparameters die zijn geanalyseerd in de monsters. Zo is er helaas slechts 1 monster waarvan sporenelementen geanalyseerd zijn zoals bijvoorbeeld arseen, en is geen microbiologische data voorhanden. Uit de literatuur volgt dat de mobilisatie van arseen één van de belangrijkste processen is die kan optreden bij toepassing van HTO. De waterkwaliteitsaspecten waartoe we ons op basis van de data op hebben gericht zijn het risico op menging van zoet en zout grondwater met verschillende kwaliteit door het rondpompen, de impact op de kalkchemie en mogelijke carbonaatneerslag, en de redoxchemie.

5.3.1 Algemene interpretatie en risico op vermenging van watertypen

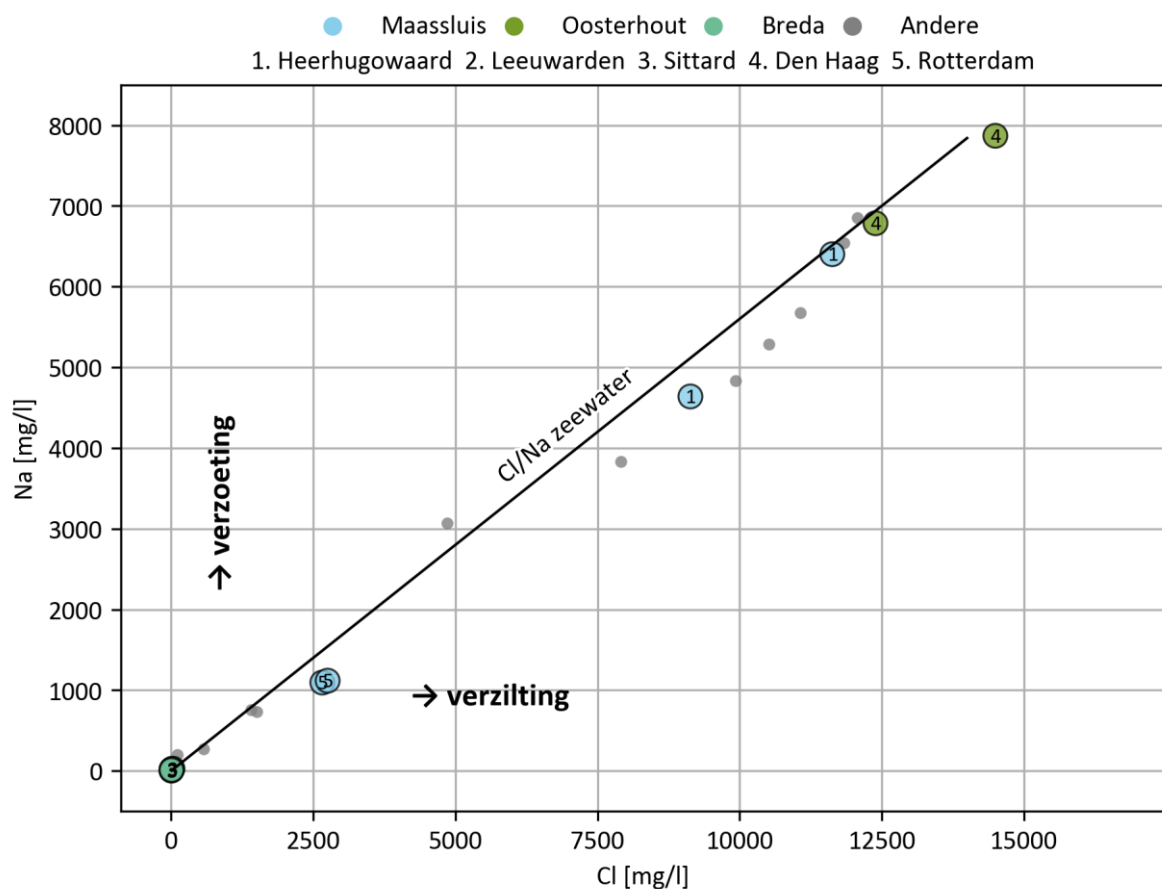
Een van de grondwaterkwaliteitsaspecten waarop de toepassing van HTO in een bepaalde laag beschouwd kan worden is het zoutgehalte van het grondwater, omdat dat mede de geschiktheid bepaald voor waterproductie. Alleen voor de locatie in Sittard bevindt zich zoet water in de voor HTO verkende lagen, met een gemiddeld chloride gehalte van slechts 11 mg/l. Op deze locatie wordt de samenstelling van de in het grondwater opgeloste ionen dus grotendeels bepaald door de concentratie calcium en bicarbonaat (HCO₃). Op de andere locaties is het grondwater zout, met chloride gehalten die variëren van zoon 3.000 tot 13.500 mg/l (Tabel 5-1). Hier wordt de samenstelling van het grondwater dus bepaald door met name de chloride en natrium concentraties.

Voor zowel Leeuwarden en Rotterdam, waar geen data voor de beschouwde lagen beschikbaar is, is in Figuur 5-7 te zien dat de chloride gehalten in de monsters uit de meest diep gelegen filters hierboven wel 10 tot 100 keer hoger zijn dan zoet grondwater. In Leeuwarden nadert de waarneming van ~16.600 mg/l zelfs dat van zeewater (~19.400 mg/l). Het feit dat er zich ver boven de beschouwde lagen nog zout grondwater bevindt geeft aan dat het risico op verzilting van bovenliggend zoet grondwater veroorzaakt door een mogelijk HTO systeem gering is.



Figuur 5-8. Diepte-profiel van chlorideconcentraties op basis van alle beschikbare waterkwaliteitsdata (DINOLOKET) in nabijheid van de 5 pilot locaties. Doorzichtig ingekleurde zones geven de diepte en het deel van de betreffende formatie weer welke voor iedere locatie verkend worden. De verticale gestreepte lijnen geven de grens tussen zoet en brakwater weer (150 mg/l Cl) en brak en zoutwater (19.400 mg/l)

In Figuur 5-8 zijn de chloride en natrium gehalte in de watermonsters tegen elkaar uit gezet. Voor alle monsters geldt dat de Na/Cl verhouding rond die van zeewater ligt. Dit toont aan dat de grondwaters zoals verwacht uit verschillende verhoudingen tussen zeewater en zoet grondwater bestaan, maar bovenal geeft het enige mate van vertrouwen in de kwaliteit van de data, ondanks dat deze in sommige gevallen al bijna 100 jaar oud is (oudste monster is uit 1925, zie Tabel 5-2). Te zien is verder dat de monsters in de Formatie van Maassluis en Oosterhout enigszins afwijken van de op basis van menging met zeewater te verwachte lijn, met lagere Na/Cl ratio's. Dit is een indicator voor het optreden van verzilting van het grondwater: bij verdringing van zoet grondwater met zout water wisselt het in het zoute zeewater dominante kation natrium namelijk uit met het aan het sediment geadsorbeerde calcium. Voor de monsters waarvoor naast natrium concentraties ook magnesium en kalium data beschikbaar was is ook de Base Exchange Index (BEX) berekend (volgens Stuyfzand, 1993, zie Tabel 5-2). Een negatieve BEX is een duidelijk bewijs voor verzilting. Behalve voor de locatie Sittard was de BEX dan ook inderdaad negatief, wat aangeeft dat er sprake is van verzilting. In Sittard zijn de BEX waarden licht positief, wat mogelijk juist nog een spoor van verzoeting aangeeft.



Figuur 5-9. Chloride versus natrium concentraties. Grijs punten zijn monsters uit de verzamelde putten maar uit bovenliggende formaties. Doorgetrokken streep geeft de chloride/natrium verhouding weer in zeewater.

De aanwezigheid van een redox gradiënt binnen de opslagformatie kan een operationeel risico zijn, als bijvoorbeeld door de HTO nitraatrijk en ijzerhoudend grondwater wordt samengebracht. Neerslag van ijzeroxiden kan dan tot putverstopping leiden. Gezien de grote diepte van de verkende lagen mag echter worden aangenomen dat het grondwater volledig anoxisch is. In 1 van de 2 putten in de Formatie van Breda bij Sittard lijkt echter wel nitraat aanwezig te zijn in 2 monsters uit het jaar 2000, en is het grondwater dus mogelijk niet volledig anoxisch. In een eerder monster uit dezelfde put uit 1975 zat geen nitraat. Dit betekent dat er ofwel sprake is van diep doorgedrongen antropogene verontreiniging, of er is mogelijk sprake van fouten bij monsternamen. Een wat afwijkende ionenbalansen in deze monsters zijn een indicatie voor het laatste.

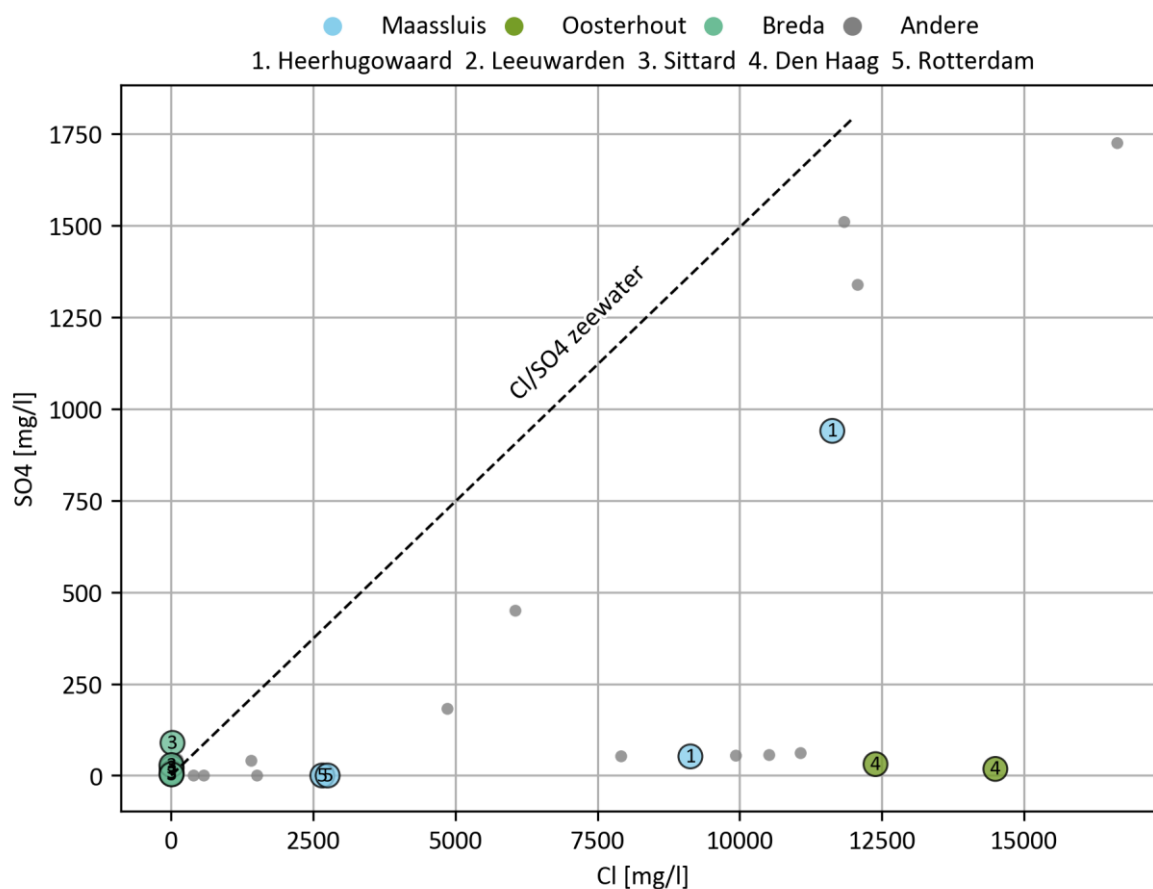
5.3.2 Verwachte invloed temperatuur op redox chemie en microbiologie

De verhoging van de temperatuur bij HTO kan ook leiden tot mineralisatie en mobilisatie van sedimentair organisch materiaal (SOM), en verandering van de redoxstaat en de daaraan samenhangende biochemie van het grondwater (Bonte et al., 2013; Brons et al., 1991). Mobilisatie van SOM kan leiden tot oplossing van organisch materiaal (DOC) dat bovendien als substraat kan dienen voor biologische reacties. In de data is echter slechts voor 1 beschouwde laag data beschikbaar over de hoeveelheid aanwezig organisch materiaal (de Formatie van Maassluis bij Heerhugowaard). De concentraties van 12-13 (mg/l) zijn niet ongebruikelijk, maar een verhoging valt bij hogere temperaturen te verwachten.

Tabel 5-2. Volledige waterkwaliteitsdataset gebruikt voor de voorverkenning

| Loc | Nr | Formatie | Target | NITG nr | Mid filter (m-mv) | Analyse datum | pH (-) | Ca (mg/l) | Cl- (mg/l) | Fe (mg/l) | HCO3 (mg/l) | K (mg/l) | Mg (mg/l) | Mn (mg/l) | NH4 (mg/l) | NO3 (mg/l) | Na (mg/l) | SO4 (mg/l) | T-PO4 (mg/l) | TOC (mg/l) | BEX |
|-----|----|--------------|--------|----------|-------------------|---------------|--------|-----------|------------|-----------|-------------|----------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|------------|--------------|------------|-------|
| 1 | 1 | | Nee | B14D0062 | 16.5 | 1978 | 8.4 | | 59 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | | Nee | B14D0062 | 16.5 | 1979 | 7.5 | 103 | 61 | 2.4 | 557 | 20 | 33 | 1 | 3.46 | 0 | 59 | 4 | 0.951 | 9.8 | 3.9 |
| 1 | 1 | | Nee | B14D0062 | 37.5 | 1978 | 7.3 | | 60 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | | Nee | B14D0062 | 37.5 | 1979 | 7.7 | 71 | 87 | 4 | 601 | 24 | 42 | 1.26 | 7.17 | 0 | 117 | 8 | 0.276 | 10.4 | 6.5 |
| 1 | 1 | | Nee | B14D0062 | 81 | 1978 | 7.8 | | 1566 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | | Nee | B14D0062 | 81 | 1979 | 7.6 | 166 | 1410 | 14.4 | 821 | 42 | 122 | 3.73 | 8.256 | 0 | 754 | 41 | 0.061 | 12.5 | 1.3 |
| 1 | 1 | Peize/Waalre | Nee | B14D0062 | 115 | 1979 | 7.3 | 476 | 9932 | 12.2 | 863 | 176 | 731 | 3.32 | 25.28 | 0 | 4834 | 55 | 0 | 12 | -25.3 |
| 1 | 1 | Peize/Waalre | Nee | B14D0062 | 115 | 1978 | 7.7 | | 7439 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | Peize/Waalre | Nee | B14D0062 | 196 | 1979 | 7.4 | 438 | 7910 | 1.5 | 622 | 134 | 550 | 0.4 | 11.09 | 0 | 3831 | 53 | 0.061 | 13.5 | -23.7 |
| 1 | 1 | Peize/Waalre | Nee | B14D0062 | 196 | 1978 | 7.9 | | 8293 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | Peize/Waalre | Nee | B14D0062 | 225 | 1979 | 7.5 | 297 | 10517 | 1.8 | 819 | 191 | 752 | 0.59 | 25.8 | 0 | 5289 | 56 | 0.46 | 13.2 | -21.0 |
| 1 | 1 | Peize/Waalre | Nee | B14D0062 | 225 | 1978 | 7.9 | | 11372 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | Peize/Waalre | Nee | B14D0062 | 253 | 1979 | 7.5 | 310 | 11067 | 1.9 | 819 | 216 | 777 | 0.34 | 22.06 | 0 | 5674 | 62 | 0 | 10 | -18.2 |
| 1 | 1 | Peize/Waalre | Nee | B14D0062 | 253 | 1978 | 7.9 | | 11425 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | Maassluis | Ja | B14D0062 | 322.5 | 1979 | 7.6 | 372 | 9134 | 2.1 | 341 | 93 | 601 | 0.8 | 22.83 | 0 | 4639 | 52 | 0 | 13 | -22.4 |
| 1 | 1 | Maassluis | Ja | B14D0062 | 322.5 | 1978 | 7.9 | | 9290 | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | | Nee | B19E0101 | 46 | 1979 | 7.4 | 102 | 62 | 3.1 | 755 | 23.7 | 57.6 | 1.41 | 6.8 | | 111 | 17 | 0.55 | 14 | 8.3 |
| 1 | 1 | | Nee | B19E0101 | 67 | 1979 | 7.5 | 66 | 114 | 0.6 | 683 | 22.7 | 41.4 | 0.76 | 7.2 | | 201 | 44.5 | 0.68 | 19 | 9.3 |
| 1 | 1 | Peize/Waalre | Nee | B19E0101 | 129 | 1979 | 7.7 | 201 | 4860 | 3.8 | 1575 | 78.9 | 294 | 1.26 | 20 | | 3070 | 182 | 2.18 | 25 | 12.9 |
| 1 | 1 | Peize/Waalre | Nee | B19E0101 | 181 | 1979 | 7.6 | 371 | 12070 | 2.7 | 808 | 210 | 1009 | 1.42 | 16.4 | | 6850 | 1340 | 0.3 | 18 | 21.6 |
| 1 | 1 | Peize/Waalre | Nee | B19E0101 | 269 | 1979 | 7.7 | 351 | 11840 | 1.3 | 362 | 199 | 800.3 | 3.09 | 13.1 | | 6540 | 1510 | 0.03 | 10 | -2.4 |
| 1 | 1 | Maassluis | Ja | B19E0101 | 372 | 1979 | 7.9 | 307 | 11630 | 8.7 | 365 | 138 | 682 | 0.78 | 63 | | 6402 | 940 | 0.24 | 12 | -13.4 |
| 2 | 2 | | Nee | B11B0023 | 57.81 | 1980 | 6.75 | 103.2 | 31 | 15.2 | 388 | 2.4 | 11.9 | 1.3 | 0.84 | 0 | 19.2 | 0 | 1 | 6.19 | 0.9 |
| 2 | 2 | | Nee | B11B0023 | 74.03 | 1980 | 6.9 | 116.4 | 33 | 11 | 427 | 2.2 | 10.1 | 1.1 | 0.7 | 0 | 21 | 0 | 0.98 | 6.7 | 0.8 |
| 2 | 2 | Peize/Waalre | Nee | B11B0023 | 117.99 | 1980 | 6.8 | 119.2 | 25 | 13.1 | 453 | 2.2 | 12.8 | 0.93 | 1.12 | 0 | 17.5 | 0 | 1.14 | 7.06 | 1.1 |
| 2 | 2 | Peize/Waalre | Nee | B11B0023 | 22.78 | 1980 | 6.6 | 53.2 | 35 | 29.8 | 293 | 3.1 | 29.5 | 1.8 | 2.8 | 0 | 20.4 | 0 | 1.12 | 5.15 | 2.3 |
| 2 | 2 | Peize/Waalre | Nee | B05H0004 | 134.6 | 1952 | 7.5 | 454 | 16637 | 5.2 | 936 | 241 | 1073 | | 50 | | 9050 | 1726 | 6.5 | | -14.7 |
| 2 | 2 | Peize/Waalre | Nee | B10F0041 | 128.645 | 1969 | | 610.5 | 6050 | 9.6 | 566.7 | | 359.7 | | 10 | | | 450.8 | | | |
| 3 | 3 | Breda | Ja | B60C0781 | 78.8 | 1970 | 7.6 | 63 | 10 | 1.7 | 262 | | 12 | 0 | 0.22 | 0 | 19 | 20.8 | 0.06 | | 1.5 |
| 3 | 3 | Breda | Ja | B60C0781 | 124.8 | 1970 | 7.58 | 29.5 | 10 | 0.42 | 159 | | 7.8 | 0.08 | 0.23 | 0 | 20 | 8.4 | 0.58 | | 1.2 |
| 3 | 3 | Breda | Ja | B60C0781 | 170.8 | 1970 | 6.92 | 26.5 | 8 | 0.82 | 122 | | 6.3 | 0 | 0.48 | 0 | 10 | 4.3 | 0.62 | | 0.7 |
| 3 | 3 | Breda | Ja | B60C0796 | 168.3 | 2000 | 7.02 | 140.69 | 24.6 | 0 | 377 | 10.43 | 19.58 | 0.7 | 0.37 | 27.8 | 27.14 | 89 | | | 2.3 |
| 3 | 3 | Breda | Ja | B60C0796 | 168.3 | 2000 | 6.59 | 54.41 | 6.81 | 0 | 185.44 | 7.13 | 6.78 | | 6.45 | 103.8 | 3.49 | 28.34 | 1.38 | | 0.7 |
| 3 | 3 | Breda | Ja | B60C0796 | 168.3 | 1975 | 7.2 | 37.5 | 8.5 | 0.88 | 130 | | 3.07 | 0.01 | 0.13 | 0.5 | 12.19 | 3 | 0.39 | | 0.5 |
| 4 | 4 | | Nee | B30G0500 | 19 | | | | 190 | | 204 | | | | | | | | | | |
| 4 | 4 | | Nee | B30G0500 | 44 | | | | 193 | | 207 | | | | | | | | | | |
| 4 | 4 | Peize/Waalre | Nee | B30G0500 | 76 | | | | 78 | | 436 | | | | | | | | | | |
| 4 | 4 | Peize/Waalre | Nee | B30G0500 | 90.5 | | | | 955 | | 476 | | | | | | | | | | |
| 4 | 4 | Maassluis | Ja | B30G0500 | 124.5 | | | | 2930 | | 281 | | | | | | | | | | |
| 4 | 4 | Oosterhout | Ja | B30D0064 | 330 | 1938 | | 611 | 14498 | 0.1 | 159 | 123 | 399 | | 49.9 | 0 | 7869 | 17.9 | 0 | | -59.9 |
| 4 | 4 | Oosterhout | Ja | B30D0064 | 330 | 1938 | | 591 | 12390 | 2.8 | 177.56 | 112 | 274 | | 41.5 | 0 | 6785 | 30.9 | 0 | | -53.9 |
| 5 | 5 | Peize/Waalre | Nee | B37H0129 | 90.14 | 1939 | | | 248.5 | 0.7 | 441.17 | | | | 0 | | | | | | |
| 5 | 5 | | Nee | B37F0104 | 19.75 | 1925 | | 162.6 | 388 | 29.4 | | | 59.9 | 0.78 | 25 | 0 | | 0 | | | |
| 5 | 5 | | Nee | B37F0104 | 28.5 | 1935 | | 228 | 576 | 25.6 | 873.19 | | 59.9 | 1.01 | 25 | 0 | 273.8 | 0 | | | -0.3 |
| 5 | 5 | | Nee | B37F0104 | 40 | 1925 | | | 812 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 5 | Peize/Waalre | Nee | B37F0104 | 65.5 | 1925 | | 357.1 | 1505 | 5.84 | 835.97 | | 73 | 0.37 | 6.24 | 0 | 730.1 | 0 | | | -6.9 |
| 5 | 5 | Maassluis | Ja | B37F0104 | 112.37 | 1925 | | 539.6 | 2660 | 8.1 | 602.26 | | 118.7 | 0.14 | 5.4 | 0 | 1095 | 0 | | | -21.6 |
| 5 | 5 | Maassluis | Ja | B37F0104 | 124.5 | 1925 | | 502.5 | 2754 | 8.4 | 547.34 | | 150 | 0.14 | 5.8 | 0 | 1118 | 0 | | | -20.8 |

In experimentele studies is verder aangetoond dat bij een verhoging van de temperatuur een verschuiving in redox condities te verwachten valt: van initieel oxidisch of ijzerverrederend grondwater naar methanogeen bij zo'n 25°C en naar sulfaatreducerend bij nog hogere temperaturen (Bonte et al., 2013; Jesuřek et al., 2013). De data van de locaties laat zien dat er weinig of geen sulfaat in het grondwater aanwezig is in de voor HTO beschouwde lagen, met SO₄/Cl verhoudingen ver onder dat van zeewater (Figuur 5-10). Dit toont aan dat het natuurlijke milieu dus waarschijnlijk al sulfaat reducerend is, of dat het aanwezige sulfaat reeds is weg gereduceerd. Bij toepassing van HTO mag dus worden verwacht het nog aanwezige sulfaat relatief snel weg reduceert. Bij sulfaat reductie komt H₂S vrij, wat niet wenselijk is vanwege corrosieve en verstoppingsreacties, bijvoorbeeld door neerslag met ijzer en het vormen van pyriet. Tegelijk kunnen bij deze neerslag sporenelementen als arseen worden opgenomen, waardoor eventuele mobilisatie hiervan beperkt kan blijven (Van Breukelen & Bonte, 2016).



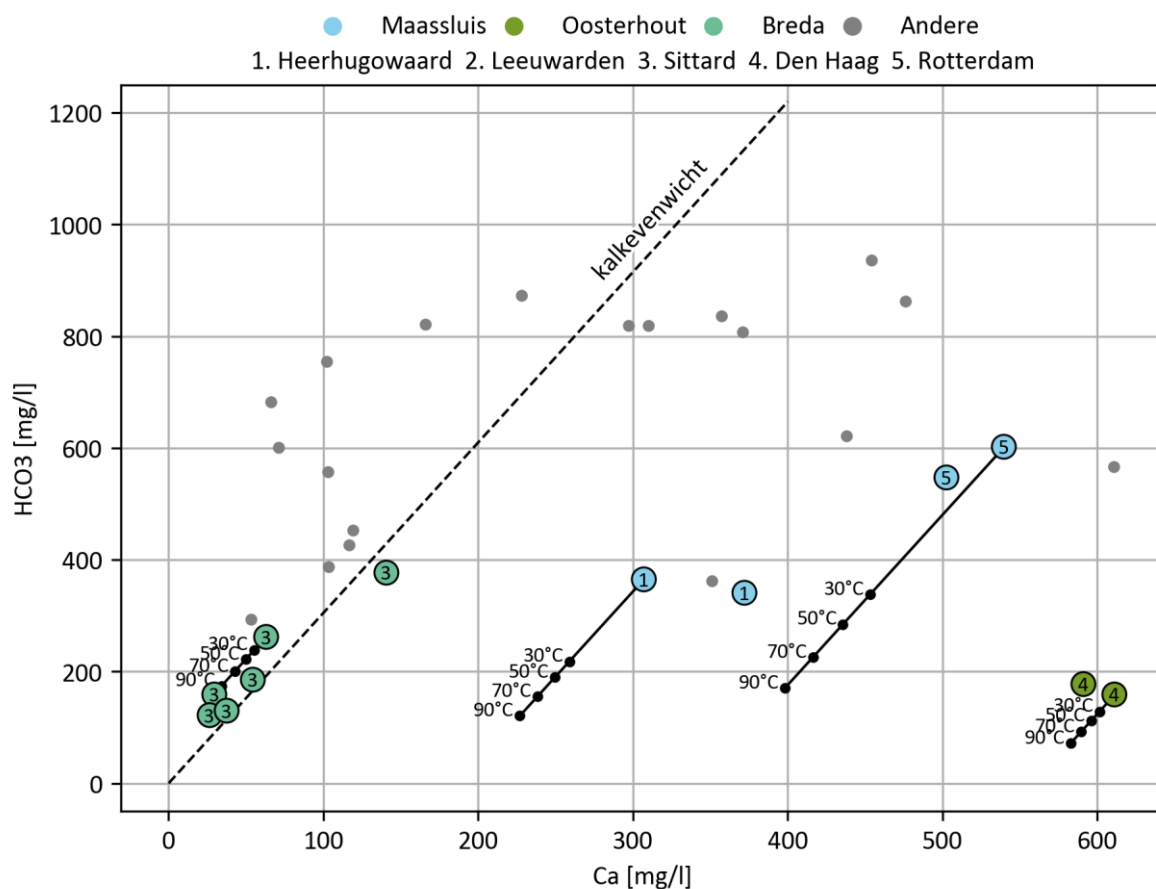
Figuur 5-10. Chloride versus sulfaat concentraties. Grijs punten zijn monsters uit de verzamelde putten maar uit bovenliggende formaties. Gestreepte lijn geeft de chloride/sulfaat verhouding in zee water weer.

5.3.3 Verwachte invloed op kalkchemie en carbonaatneerslag

In Figuur 5-11 zijn de concentraties aan calcium en bicarbonaat (HCO_3) weergegeven. Voor de Formatie van Breda in Sittard is te zien dat de verhouding tussen deze twee goed te verklaren valt door kalkevenwicht puur op basis van de CO_2 spanning. Voor de andere locaties geldt dat de calcium concentraties verhoogd zijn – wat goed te verklaren valt door de waargenomen verzilting, waarbij Ca vrijkomt en de Ca/HCO_3 verhouding verschuift.

Een belangrijk risico bij HTO is dat de temperatuurverhoging neerslag van kalk veroorzaakt, met putverstopping tot gevolg. Om het risico hierop ondanks de beperkte databeschikbaarheid enigszins in te schatten is met behulp van het geochemisch modelleer programma PHREEQC voor de combinatie pH, Ca en HCO_3 van vier representatieve grondwatermonsters berekend wat het effect zou zijn een verhoging van temperatuur van 15 graden naar achtereenvolgens 30, 50, 70 en 90 graden (Figuur 5-11). De berekeningen laten best grote verschillen in potentiële neerslag zien, zoals geïllustreerd wordt door de mate waarin Ca en HCO_3 concentraties afnemen. Vooral voor de omstandigheden in de Formatie van Maassluis bij zowel Heerhugowaard als in Rotterdam is een aanzienlijke verlaging ten gevolge van kalkneerslag te zien.

Hierbij moet worden aangetekend dat het verstoppingsrisico niet alleen afhangt van de potentie om kalk neer te slaan maar zeker ook van de snelheid waarmee dat gebeurt. Die snelheid is mede afhankelijk van verhouding Ca/HCO_3 . De berekende CO_2 druk als gevolg van de verschuiving (bij 90°C) varieerden van 0.1 tot 0.5 atm, en de resulterende pH's daalde als gevolg hiervan tot 5.9 – 6.8. Naast de temperatuur verhoging kan ook CO_2 ontgassing veroorzaakt door de drukverlaging bij onttrekking kalkverstopping veroorzaken (Hartog, 2015).



Figuur 5-11. Calcium en bicarbonaat concentraties in grondwatermonsters. Gestreepte zwarte lijn geeft de theoretische Ca/HCO_3 verhouding weer bij kalkevenwicht, puur als functie van CO_2 spanning. De vier doorgetrokken zwarte lijnen geven de met PHREEQC berekende verschuiving weer in de concentraties als gevolg van een temperatuurstijging in 4 stappen naar 90°C , berekend voor de pH, Ca, en HCO_3 van één grondwatermonster uit elk van de 4 'clusters' aan datapunten in de figuur. Zie de Appendix bij dit hoofdstuk voor de exacte chemische samenstelling van deze monsters.

5.3.4 Conclusies

De belangrijkste conclusie is dat de data beschikbaarheid beperkt is. Hierdoor kon er slechts in beperkte mate op verschillende aspecten van mogelijke grondwaterkwaliteitsveranderingen gereflecteerd worden. Naast aanvullende monsternamen en uitgebreidere analyses in de lagen die verkend worden voor HTO, is voor een gedegen analyse van de waarschijnlijke effecten op grondwater ook niet alleen meer grondwaterdata nodig, maar, zeker voor de inschatting van de te verwachten temperatuur effecten ook (experimentele) karakterisatie van het sediment uit die lagen nodig.

Wel lijkt dat het risico op verzilting door vermenging over een chloride gradiënt verwaarloosbaar is, omdat de beoogde formaties zich in een dieptetraject vinden waar het grondwater ofwel volledig zout is of volledig zoet. Voor de locatie in Sittard is er een indicatie dat vermenging over een redox gradiënt een mogelijk risico op verstopping zou kunnen zijn, al is niet zeker of de aanwezigheid van nitraat hier berust op een meetfout of dat het echt zo is. Evenwel is het gebrek van data voor andere locaties natuurlijk geen indicatie dat daar geen redoxvermenging op kan treden. Middels PHREEQC berekeningen is inzicht verkregen in de potentie tot carbonaatneerslag door verschuiving van het kalkevenwicht. De neerslagpotentie lijkt op basis van de beschikbare data het hoogst in de Formatie van Maassluis bij Rotterdam en Heerhugowaard. Bij een verdere

beschouwing van verstoppingsrisico's zal dit risico verder geadresseerd moeten worden, samen met de noodzaak voor mitigerende maatregelen, zoals zoutzuur of CO₂ dosering.

5.4 Juridisch raamwerk

Wettelijk kader

Het wettelijke kader voor HTO tot 500 m-mv is vastgelegd in de Waterwet en het Wijzigingsbesluit Bodemenergie (AMvB Bodemenergie uit 2013). Vanaf 500 m-mv is de Mijnbouwwet van toepassing. In principe beperkt deze verkenning zich tot een diepte van 500 m-mv en daarom is hier de wet- en regelgeving in relatie tot de Waterwet weergegeven.

Waterwet en bevoegd gezag

WKO en HTO vallen onder de term 'open bodemenergiesystemen': systemen waarbij koude of warmte aan de bodem wordt onttrokken en waarbij grondwater wordt verplaatst. Het onttrekken en infiltreren van grondwater ten behoeve van een bodemenergiesysteem is vergunningplichtig in het kader van de Waterwet. Gedeputeerde staten van de provincie zijn hiervoor bevoegd gezag (artikel 6.4 van de Waterwet).

Wijzigingsbesluit Bodemenergie

Het Wijzigingsbesluit Bodemenergiesystemen (AMvB Bodemenergie) is sinds 1 juli 2013 van kracht. In artikel 6.11 van dit besluit wordt geregeld dat de infiltratietemperatuur bij open systemen maximaal 25 °C mag zijn en dat er geen lange termijn warmteoverschot mag zijn. Voor beide voorwaarden zijn uitzonderingen mogelijk indien het belang van de bescherming van de bodem zich daartegen niet verzet. Op basis daarvan kan HTO onder voorwaarden worden toegestaan. Hoe die afweging gemaakt moet worden is verder in de AMvB niet beschreven en zal door het bevoegd gezag gedaan moeten worden (maatwerk).

Richtlijnen voor vergunningverlening: de BUM

Om de provincies te helpen bij de vergunningverlening rond open bodemsystemen is een zogenaamde BUM (Besluitvorming Uitvoerings Methode) ontwikkeld (SIKB, 2015). Hierin zijn standaardvoorschriften opgesteld voor open bodemenergiesystemen met een infiltratietemperatuur tot 25 °C en een energiebalans in de ondergrond ('gangbare' WKO-systemen). Daarmee heeft de BUM de uniformiteit van beoordeling en vergunningverlening van vergunningaanvragen voor open bodemenergiesystemen door provincies bevordert. HTO voldoet niet aan deze standaardvoorschriften die zijn opgesteld in de BUM, vanwege de infiltratietemperatuur (>25°C) en het warmteoverschot in de bodem. De BUM geeft als richtlijn dat af kan worden geweken van de standaardvoorschriften mits het gaat om onderzoeksprojecten, en vermeldt expliciet dat HTO hier voorlopig ook onder valt. Bij het aanhouden van de BUM als richtlijn voor vergunningverlening wordt HTO dus vergund mits het een onderzoeksproject betreft en er geen andere belangen worden geschaad.

Vergunningsprocedure voor HTO in Friesland - de Waterwet

Voor een HTO in Leeuwarden dient een vergunning Waterwet aangevraagd te worden. Hiervoor dienen de effecten van het bodemenergiesysteem in een effectenstudie te worden gekwantificeerd. Het bevoegd gezag voor deze vergunning is de provincie Friesland. De proceduretijd voor het aanvragen van de vergunning Waterwet bedraagt circa 8 weken. In het geval van complexe omgevingsbelangen kan de provincie hiervan afwijken en de uitgebreide procedure (6 maanden) van toepassing verklaren.

In de praktijk is het wenselijk om de vergunningsprocedure met het bevoegd gezag af te stemmen voordat de officiële juridische procedure voor het verkrijgen van de vergunning Waterwet wordt opgestart.

Het toepassen van bodemenergie op de projectlocatie is niet tegenstrijdig met het huidige beleid, dus de verwachting is dat er geen specifieke goedkeuring (en bijbehorende proces) van de Gedeputeerde Staten nodig is.

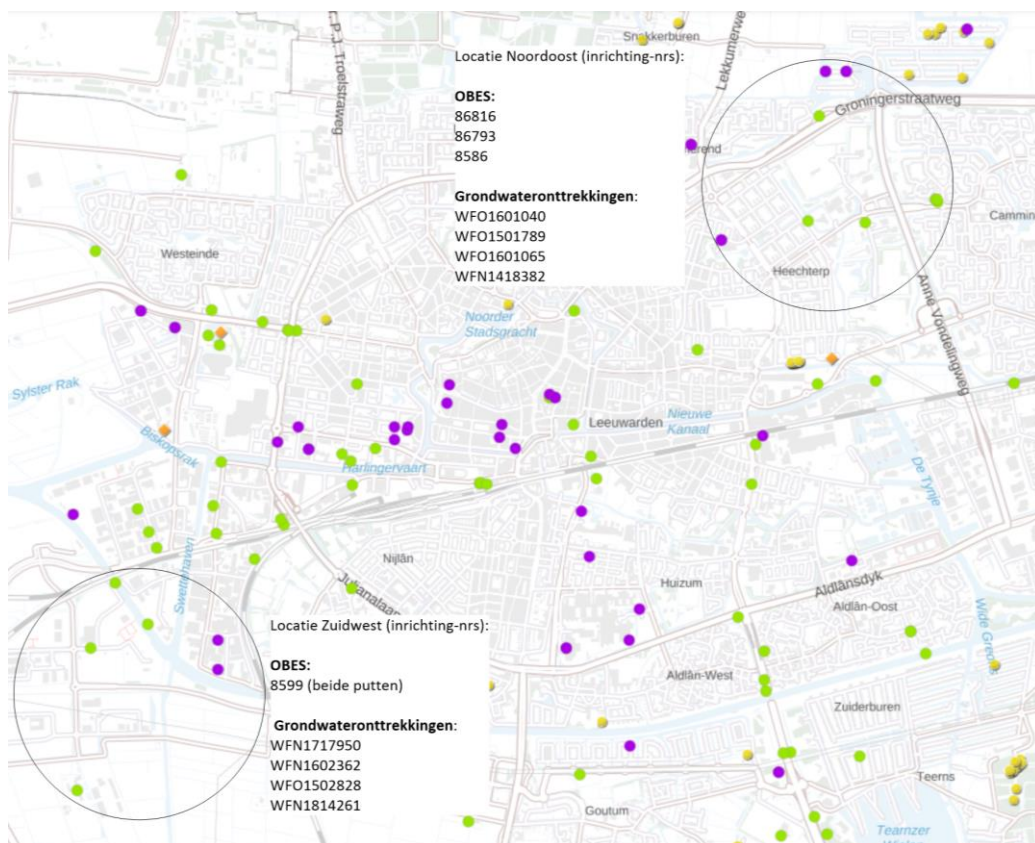
5.5 Omgevingsscan

5.5.1 Stakeholder analyse ondergrond

Op dit moment worden twee mogelijke locaties voor de HTO voorzien:

1. nabij het boosterstation dat gelegen is naast de 'Geothermal Plant' ten Zuidwesten van Leeuwarden (Figuur 1-1).
2. nabij het meest oostelijk gelegen boosterstation, in noordoost Leeuwarden (Figuur 1-1).

Om een beeld te krijgen van de stakeholders die aanwezig zijn in de ondergrond is gebruik gemaakt van de WKO-tool (<https://wkotool.nl/>). Hieronder is een kaart van de WKO-tool opgenomen (Figuur 5-12). Daarin zijn de twee zoekgebieden weergegeven, alsook de aanwezige OBES (Open Bodemenergiesystemen (paars)), GBES (Gesloten BodemEnergieSystemen (geel)) en grondwateronttrekkingen (groen).



Figuur 5-12 Overzicht met stakeholders in de ondergrond in Leeuwarden. Open en gesloten Bodemenergiesystemen zijn weergegeven in respectievelijk paars en geel. Grondwateronttrekking en in groen.

Met betrekking tot de grondwateronttrekkingen in beide zoeklocaties geldt dat er geen specifieke informatie op de WKO-tool beschikbaar is (diepte bronfilters, verpompte watervolumes etc.). Uit

nader contact met de provincie en raadpleging van interne informatiebronnen binnen IF Technology is meer specifieke informatie (zie hieronder) naar voren gekomen. Bij het Waterschap Friesland is nadere informatie opgevraagd over de verschillende onttrekkingen, maar daaruit komen de filterdieptes van de bestaande onttrekkingen nog niet naar voren. Het advies is om nadere informatie op te vragen over de verschillende grondwateronttrekkingen in de WKO-tool, wanneer de precieze locatie bekend is. Omdat de opslagpakketten voor HTO relatief diep gelegen zijn, valt het binnen de verwachting dat ondiepere grondwaterputten geen of beperkte invloed zullen ondervinden van het warmteopslagsysteem.

Specifieke informatie voor de zuidwestelijke zoeklocatie:

- De OBES (paars) zijn niet meer in gebruik (email provincie Fryslan, 23 september 2020). Dit levert dus geen belemmering voor HTO op de locatie

Specifieke informatie voor het noordoostelijke zoekgebied:

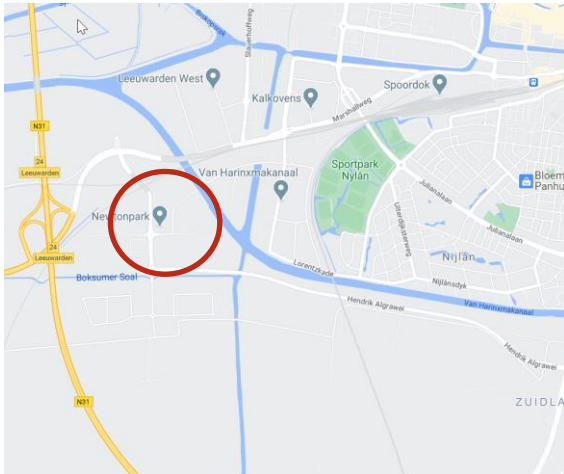
- De noordelijke twee OBES in het noorden van het zoekgebied (paars) zijn zeer kleine systemen. Op basis van de afstand en de orde grootte van het thermische invloedsgebied wordt geen thermische interferentie verwacht wanneer HTO op dezelfde diepte wordt gerealiseerd. Dit uiteraard wel afhankelijk van de definitieve locatie van de HTO-bronnen.
- Het OBES in het westen van het zoekgebied is een WKO-systeem dat per jaar maximaal 135.000 m³ grondwater mag verpompen. De vergunde diepte voor bronfilters is maximaal 150 m-mv, terwijl het beoogde opslagpakket voor de HTO dieper ligt. Vanwege de verticale en horizontale afstand zal het bestaande systeem geen showstopper zijn voor HTO op deze locatie.

Op basis van de gegevens in de WKO-tool lijken de omgevingsbelangen in de ondergrond geen showstopper te zijn voor HTO, wanneer de HTO wordt geplaatst in de diepere opslagpakketten (> 150 m-mv). Wanneer de HTO ondieper dan 150 m-mv geplaatst wordt op de noordoostelijke of zuidwestelijke locatie, dient er bij het bevoegd gezag specifiekere informatie over de nabijgelegen (vermoedelijk ondiep gelegen) OBES en grondwateronttrekkingen te worden opgevraagd dan op dit moment verstrekt is.

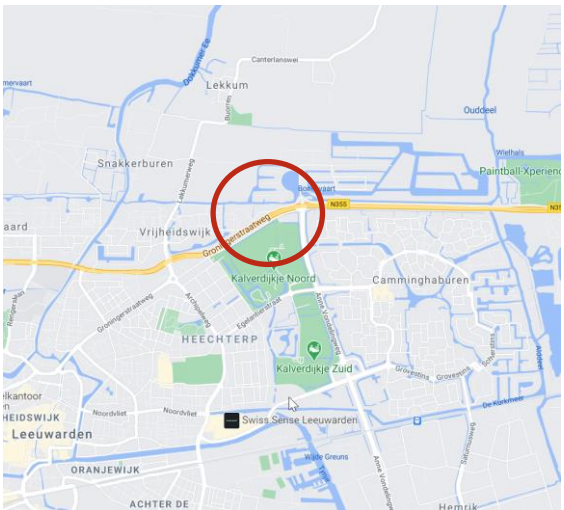
5.5.2 Scan bovengrond

Om het beoogde HTO systeem in te passen, in op basis van de beschikbare gegevens ingeschat dat er vier hete bronnen en 5 lauwe bronnen nodig zijn (zie Tabel 3-5). De hete bronnen worden bij elkaar geplaatst, en de lauwe bronnen worden in een cirkel met een diameter van circa 300 meter om de hete bronnen geplaatst (zie Figuur 3-7).

In onderstaande figuren zijn twee mogelijke HTO locaties weergegeven (Noordoost en Zuidwest). De locatie Zuidwest heeft een lage stedelijkheid en er is veel vrije ruimte aanwezig in de vorm van weilanden. Naar verwachting is het goed mogelijk om hier de benodigde bronnen in te passen. De locatie Noordoost heeft een hogere stedelijkheid en ook minder beschikbare ruimte. Net ten noorden van deze locatie is wel veel vrije ruimte beschikbaar in de vorm van weilanden, maar dat vergt wel extra leidingwerk om de HTO te koppelen aan het warmtenet. Bronnen plaatsen in stedelijk gebied is ook mogelijk, maar dit zal meer tijd (overleg) vergen om geschikte locaties te vinden. Ook is het dan van groot belang om de zettingen vast te stellen en te bepalen of dit acceptabel is. Momenteel is gekeken naar twee mogelijke locaties, maar de HTO kan in principe bij elk boosterstation worden ingepast. Dat maakt de inpassing van 1 of meerdere HTO-systemen flexibel.



Figuur 5-13: Locatie Zuidwest



Figuur 5-14: Locatie Noordoost

6 Risico inventarisatie en plan van aanpak vervolgstappen

6.1 Introductie

De belangrijkste risico's gerelateerd aan HTO projecten zijn geïnventariseerd op basis van projecten in het verleden (bijv. TNO, 2016; TNO & IF Technology, 2016, 2019) en op basis van studies zoals het WINDOW project. De indeling en beschrijving van de risico's zijn grotendeels gebaseerd op TNO & IF Technology (2019). In het algemeen zijn de geïdentificeerde risico's generiek voor elk HTO project, maar de specifieke risico's kunnen wel meer of minder relevant zijn voor de individuele projecten. Er is daarom gekozen voor een algemeen overzicht van de geïdentificeerde risico's, dat gelijk is in alle verkenningen, gevolgd door een locatie-specifiek overzicht waarin voor elk van de individuele verkenningen de relevantie is aangegeven. Voor die risico's die relevant worden geacht wordt per locatie een toelichting gegeven.

Risico's zijn onder te verdelen in:

- Risico's voor de business case (commercieel/economisch)
- Juridische haalbaarheid en draagvlak
- Technische en geohydrologische risico's
- Milieu- en veiligheidsrisico's
- Organisatorische risico's (inclusief commitment stakeholder)

Deze worden per categorie verder toegelicht in bijlage 5.

6.2 Inschatting relevantie van de projectrisico's

Een inschatting van de belangrijkste projectrisico's is weergegeven in Tabel 6-1. Hieruit komt naar voren welke risico's als belangrijkste projectrisico's worden gezien. De kans en het gevolg van projectspecifieke risico's zijn relatief ten opzichte van de andere uitgevoerde verkenningen bepaald. Voor de projectrisico's kunnen één of meer beheersmaatregelen worden vastgesteld en zijn daardoor lager ingeschaald. Het reduceren van projectrisico's zal het meest effectief zijn door een dialoog op te zetten met bevoegd gezag en belanghebbenden om het vergunning traject succesvol te laten verlopen, het laten uitvoeren van een proefboring en het opstellen van een robuuste strategie voor de operationele inpassing van de HTO. Naast het betrekken van het bevoegd gezag (de Provincie) kan het van belang zijn om ook andere belanghebbende partijen (zoals bijv. waterbedrijven) in het vervolgtraject te betrekken.

Tabel 6-1 Overzicht projectrisico's (kans en gevolg relatief ingeschat t.o.v. andere verkenningen)

| Algemene risico omschrijving | | | | Locatie specifieke beoordeling (relatief t.o.v. andere verkenningen) | | |
|--|---|--|--|--|-----------|--|
| Nr. | Risico | Gevolg | Beheersmaatregel | Kans | Gevolg | Opmerkingen |
| Business case (commercieel/economisch) | | | | | | |
| | Hogere investeringskosten door marktdruk boorbedrijven | Overschrijding CAPEX | Aanbesteding tijdens crisis Voldoende ruimte inbouwen in planning om te kunnen boren op gunstig moment. | Groot | Groot | Kans hang af van de diepte van de bronnen. Hoe dieper de bronnen, hoe minder partijen in de markt in staat zijn dit technisch te boren. Gevolg op CAPEX van de bronnen. |
| | Hogere investeringskosten of operationele kosten vanwege onvoldoende bewezen techniek | Hogere CAPEX/OPEX | Zoveel mogelijk aanhaken bij onderzoeksprojecten waarbij subsidie/leergeld beschikbaar is. | Groot | Klein | Met name risico hoger uitvallen opex door beperkte ervaring HTO. Door project Wieringermeer capex al beter inzichtelijk. Hoe hoger de opslagtemperatuur, hoe hoger de kans is ingeschat. |
| | Aanbodzijde duurzame energie blijft achter op verwachting of wordt niet gerealiseerd. | In toekomst onvoldoende duurzame warmte beschikbaar om te laden. | Tijdig inzetten op verschillende duurzame bronnen in aanbodportfolio | Gemiddeld | Gemiddeld | Kans bepaald op basis van huidige aanbod en gewenste aanbod in eindsituatie. Gevolg afhankelijk van opslagvolume Kleiner opslagvolumes reageren gevoeliger dan grotere opslagvolumes. |
| | Warmteafzet/ontwikkeling warmtenet blijft achter/ zachte winters | Lagere opbrengsten dan verwacht. | Robuuste operationele strategie voor verschillende stookseizoenen opstellen. Gefaseerd aanleggen bronnen Monitoren performance HTO | Groot | Klein | Kans bepaald op basis van huidige vraag en gewenste vraag in eindsituatie. Gevolg afhankelijk van opslagvolume Kleiner opslagvolumes reageren gevoeliger dan grotere opslagvolumes. |
| | Warmteverlies in de ondergrond groter dan verwacht, opslagrendement lager dan verwacht. | Lager vermogen en temperaturniveau aan het einde van het stookseizoen Lagere inkomsten en/of hogere operationele kosten | Proefboring om met grotere zekerheid de opbouw en eigenschappen van de ondergrond te bepalen | Groot | Groot | Omdat er een grote onzekerheid is in de ondergrondgegevens is de onzekerheid groot. Zaken die hier belangrijk zijn, zijn |

| | | | | | | |
|--------------------------------------|--|--|--|-------|----------------|--|
| | | Grotere thermische effecten (en daaraan gekoppelde effecten op de grondwaterkwaliteit) | Optimalisatie van het ontwerp om het opslagrendement te maximaliseren (b.v. verlagen afkaptemperatuur of aanpassen putconfiguratie) Putafwerking met isolerend materiaal en/of dikkere omstorting | | | p.a. laagdikte en de doorlatendheid (dit kan echter ook positief uitpakken). |
| | Te hoge retourtemperatuur | Bijdrage directe warmtelevering kleiner, lagere inkomsten | Afnemers stimuleren tot lagere retourtemperaturen Voldoende aandacht bij ontwerp/uitrol warmtenet Duurdere warmtepomp installeren. Hogere temperatuur lauwe bron toelaten | Klein | Groot | Huidige schatting van 50°C is reëel. Warmtenet moet nog grotendeels ontwikkeld worden. Daarmee zijn er voldoende kansen om tot lagere retourtemperaturen te komen. Opgesteld WP-vermogen is gevoelig voor temperatuurverschil tussen retour en lauwe bron; zie hst 3. |
| | Bij toepassing warmtepomp: Aanvoertemperatuur warmtenet hoger dan beoogd | Slechtere COP warmtepomp of naverwarming noodzakelijk vanuit warmtenet of piekvoorziening. Hogere operationele kosten. | Voldoende aandacht bij ontwerp/uitrol warmtenet. Duurdere warmtepomp installieren | Klein | Groot | Huidige schatting van 90°C is conservatief. WP kosten nemen sterk toe bij hogere productietemperatuur. |
| Juridische haalbaarheid en draagvlak | | | | | | |
| | HTO niet vergunbaar (in het kader van de Waterwet) | Vergunning wordt niet verleend. | Vroegtijdig betrekken en informeren van het bevoegd gezag | Klein | Generiek groot | Kans is klein vanwege de naar verwachting beperkte impact op omgevingsbelangen op de beoogde opslagdiepte. Kanttekening daarbij is dat de locatie nog niet vast ligt en dat er relatief grote onzekerheid is over de bodemopbouw (en dus over effecten en impact). Een proefboring levert de benodigde informatie om de impact op omgevingsbelangen op voldoende detailniveau in te schatten. Wanneer vergunning niet wordt verleend heeft dat |

| | | | | | | |
|------------------------------|--|---|---|---|-------------------|---|
| | | | | | | grote gevolgen, want zonder vergunning geen warmteopslag. |
| | Maatschappelijk draagvlak ontbreekt | Vergunning wordt niet (tijdig) verleend | Voldoende tijdige communicatie richting stakeholders | Klein | Gemiddeld - groot | Kans ingeschat n.a.v. gevoerde gesprekken consortiumleden en op basis van stedelijkheid omgeving. Gevolg voor alle verkenningen gelijk aan algemeen gevolg. |
| Technisch en geohydrologisch | | | | | | |
| | Onzekere ondergrond (<i>risico dat de ondergrond dusdanig afwijkt van de verwachting, zodat dit negatief uitpakt voor de businesscase</i>) | Debiet per bron lager, lagere opbrengst met negatief effect op businesscase. Overschrijding CAPEX en OPEX | Proefboring Aanpassen ontwerp: Aantal bronnen vergroten om vermogen te verhogen (grote invloed op investeringen) | Groot (kleiner na geothermiebooring) | Gemiddeld-groot | Huidige onzekerheid is groot door aanwezigheid van Peelo geulen en data bias. Als er goed gemeten wordt in het ondiepe deel van de geplande geothermieput, wordt de onzekerheid veel kleiner. Echter bestaat nog steeds de kans dat de ondergrond ongunstig is. Locatie specifieke beheersmaatregel: loggen in ondiepe deel geplande geothermieput |
| | Verstopping van warmtewisselaar en bronnen door scaling | Daling vermogen door lager debiet en slechtere warmteoverdracht. Hogere operationele kosten | Proefboring om geo-chemische eigenschappen van grondwater en doelpakket te analyseren en ontwerp daarop afstemmen (materialen en waterbehandeling) Gebruik waterbehandeling aanpassen Systeem reinigen gedurende operatie | Gemiddeld | Gemiddeld | De locatie-specifieke geochemische eigenschappen zijn nog niet beschouwd/bekend in deze fase van de studie. De proefboring biedt de mogelijkheid voor evaluatie van dit risico. |
| | Bij toepassing warmtepomp: Storing(en) hoge temperatuur warmtepomp | Hoger stroomverbruik Hogere kosten onderhoud Gewenste temperatuur wordt niet gehaald | Ontwerpen op zo laag mogelijke temperatuur | n.v.t. | n.v.t. | Voorkeursvariant zonder warmtepomp |
| Milieu en veiligheid | | | | | | |

| | | | | | | |
|--|---|--|---|-----------|-------------------|--|
| | Onvoorziene impact op andere belangen | Vergunning wordt ingetrokken tijdens looptijd | -Zorgvuldige effectbeoordeling in ontwerpfase - Proefboring voor zekerheid bodemopbouw | Klein | Groot | Op de aangehouden locatie bevinden zich op de beoogde opslagdiepte naar verwachting weinig omgevingsbelangen en dus een beperkte kans op negatieve impact daarop. Als er meer duidelijkheid ontstaat over de exacte locatie van de HTO en de bodemopbouw op die locatie (proefboring), kan een meer nauwkeurige inschatting van de impact worden gemaakt. Vanwege hogere temperatuur wordt bij HTO extra aandacht besteed aan temperatuur-gerelateerde processen en effecten daarvan op omgevingsbelangen. |
| | Verstoring bodemmilieu en integriteit in opslagpakket | Productie, mobilisatie en verspreiding verontreinigingen | Monitoringsprogramma | Gemiddeld | Gemiddeld - klein | In opslagpakket zal microbiologie en chemie aanzienlijk beïnvloed worden door HTO, maar effect zal vooral optreden in de bel van het geïnjecteerde water. Grondwater dat uit deze bel "ontsnapt" door natuurlijke stroming zal weer meer op de natuurlijke situatie lijken door redoxprocessen, neerslag van sulfide. Uitzondering is het effect van de dosering van HCl, wat zal leiden tot een hogere chlorideconcentratie en lokaal een lagere pH. Vermoedelijk is verhoging van de chlorideconcentratie klein ten opzichte van de natuurlijke chlorideconcentratie, maar dit dient |

| | | | | | | |
|--|--|--|---|---|-------|---|
| | | | | | | verder gekwantificeerd te worden in fase 2. |
| | Verstoring bodemmilieu en integriteit in bovenliggende pakketten | Mogelijke operationele consequenties: verlagen debiet, verlagen temperatuur | Risicomanagement Systeem Monitoringsprogramma BRL gecertificeerde partijen | Klein (variant 2,4); Groot (variant 6) | Klein | Kans ingeschat op basis van diepte boringen en aantal putten. Een gedegen en robuust ontwerp put en monitoringsstrategie zodat de kans op lekkage klein is en snel wordt gedetecteerd tijdens of voor optreden verkleint de kans. Gevolg is groot ingeschat door operationele consequenties; maar is kleiner bij systemen met meerdere hete putten. |
| | Organisatorisch / commitment stakeholder | | | | | |
| | Onvoldoende vertrouwen en/of commitment | Stop zetten project | Regelmatig BuCa updaten en bespreken Voldoende aandacht voor zo optimaal mogelijke inpassing Duidelijke afspraken maken (zwart op wit) met betrokken partijen | Klein | Groot | Kans ingeschat op basis van gevoerde gesprekken met relevante consortiumleden. |
| | Inpassing ruimtebeslag lastig door grote aantal bronnen | Vertraging bij vindengeschikte bronlocaties, mogelijk verder weg. Tijdvertraging en kostenverhogend. Geen geschikte locatie kunnen vinden. Stop zetten project. | Aantal bronnen minimaliseren door goed ruimte verhogen NVOE-normen te onderzoeken. Tijdig grondpositie nemen of in overleg gaan met grondeigenaren/gemeente | Gemiddeld | Groot | Kans ingeschat op basis van benodigd aantal bronnen in relatie tot stedelijkheid. |

6.3 Plan van aanpak voor het vervolg

In deze paragraaf zijn een aantal mogelijke vervolgstappen beschreven. Grotendeels zijn de vervolgstappen generiek. Daar waar mogelijk zijn ook een aantal project specifieke vervolgstappen beschreven.

- **Go/No Go:** besluit, door de relevante stakeholders, op basis van resultaten WINDOW Fase 1 om al dan niet verder te gaan met de ontwikkeling van HTO. Welke projecten doorgaan in WINDOW fase 2 onder het programma WarmingUP wordt door het consortium als geheel bepaald, waarbij het schrijfteam in overleg met de adviescommissie een voorstel voorbereiden. Wanneer de HTO niet binnen WarmingUP wordt uitgewerkt, maar er is vanuit de stakeholders wel de intentie om HTO verder te ontwikkelen, dan kunnen de stappen ook buiten WarmingUP worden uitgevoerd.
- Opstellen plan van aanpak: in overleg met de stakeholders van de locatie wordt een plan van aanpak opgesteld, waarin in ieder geval de volgende onderdelen aan bod komen:
 - Bespreken rolverdeling en verantwoordelijkheden
 - Bepalen operationele volgorde vervolgstappen
 - Planning
 - Kosten- en risicoverdeling
- Omgevingsplannen: Voor de aanleg van een HTO systeem zijn verschillende vergunningen nodig, zoals een vergunning in het kader van de Waterwet, lozingsvergunning, WABO en omgevingsvergunning. Binnen WarmingUP worden voorbereidende studies uitgevoerd, met name gericht op de vergunning Waterwet: een effectenstudie en een merbeoordelingsnotitie worden opgesteld en afgestemd met het bevoegd gezag. De operator/opdrachtgever dient zelf de vergunning aan te vragen. Om de totale doorlooptijd zo kort mogelijk te houden, kan deze stap parallel worden uitgevoerd met de proefboring en het voorontwerp. In dat geval worden de voorbereidende studies gebaseerd op een zo goed mogelijke inschatting van de omvang van het beoogde HTO-systeem. Mogelijk moet na het definitief ontwerp een wijziging worden ingediend.
- Data acquisitie via boring geothermieput
In Leeuwarden wordt begin 2021 een eerste geothermieput geboord. Dit geeft de mogelijkheid om data te verzamelen over de formatie van Maassluis en formatie van Oosterhout. De stakeholders hebben aangegeven dat hiervoor ruimte is. De volgende stappen worden uitgevoerd:
 - Opstellen data acquisitieplan: welke informatie hebben we nodig en welke technieken gebruiken we daarvoor.
 - Data-acquisitie.
 - Interpretatie van de geacquireerde data.
- **Go/No Go:** Het schrijfteam maakt op basis van geïnterpreteerde data een inschatting van het maximaal haalbare debiet. Op basis hiervan nemen de stakeholders van de locatie een besluit om al dan niet verder te gaan met het ontwerp.
- Ontwerp
Op basis van geïnterpreteerde data zal een ontwerp gemaakt worden van het HTO-systeem. Een aantal onderdelen die daarbij naar voren komen zijn:
 - Voorontwerp en definitief ontwerp, waarin o.a. gekeken wordt naar:
 - Keuze formatie voor opslag (indien relevant)
 - Keuze te hanteren onttrekkingsnormen

- Putontwerp (configuratie), bronontwerp en materiaalkeuze
 - Bepalen benodigde waterbehandeling
 - Optimale systeemintegratie
- Opstellen monitoringsplan
- Update risico-analyse
- Update Business case
- Opstellen aanbestedingsdocument
- **Go/No Go:** Op basis van de resultaten uit de ontwerpfase nemen de stakeholders van de locatie een besluit om al dan niet verder te gaan naar de realisatiefase.
- Realisatie (WINDOW fase 3, niet in WarmingUP)
Nadat de vergunning is verleend, kan verder worden gegaan met de realisatie van het HTO-systeem. Grofweg worden hierin de volgende stappen uitgevoerd:
 - Aanbesteding
 - Realisatie
 - Commissioning
 - Exploitatie
 - Periodieke evaluatie

7 Conclusie

- Er zijn op dit moment grote onzekerheden wat betreft de ondergrond in Leeuwarden door het ontbreken van diepere boringen in de omgeving van de beoogde HTO locatie. De diepte, dikte en doorlatendheid van de mogelijk potentiële opslagpakketten in de Fm. van Maassluis en Oosterhout zijn onzeker, evenals de aanwezigheid van een goede afsluitende laag. Een proefboring kan hier uitsluitsel over geven, ook kan de geplande geothermieboring benut worden om beter inzicht te krijgen in de ondergrond door het ondiepe deel goed te loggen en evt. metingen uit te voeren.
- De wijze van inpassing van de HTO die wordt voorzien is een koppeling aan het transportnet, gescheiden door een warmtewisselaar, direct bij een boosterstation. Warmte uit (o.a.) de toekomstige geothermiebron wordt in de zomer via het transportnet opgeslagen in de HTO op 88°C.
- De temperatuur van de HTO zakt gedurende warmtelevering. De temperatuurdaling hangt af van het jaar van operatie en de variant, maar ligt na een aantal jaren tussen de 60 en 70°C.
- Mogelijke oplossingen om de temperatuur op te waarden naar de gewenste 90°C is door na te verwarmen met een boosterstation of door een hoge temperatuur warmtepomp toe te passen. De warmtepomp wordt gezien als onderdeel van de HTO. Het boosterstation wordt gezien als een onderdeel van het warmtenet en is niet meegenomen in de verdere analyse.
- De variant waarbij warmte wordt naverwarmd met een boosterstation heeft warmte uit de HTO de laagste prijs (variant 1). De kostprijs van geleverde warmte uit de HTO is ingeschat op 12,4€/GJ. Dit is iets hoger dan wanneer dezelfde warmte met een gasketel zou worden geleverd (10 – 12 €/GJ).
- Het systeemrendement van de HTO na 10 jaar is ingeschat op 60% en na 50 jaar op 70%.
- Warmte geleverd door de HTO reduceert de CO₂ uitstoot met circa 70% ten opzichte van warmte geleverd door een gasketel.
- Begin 2021 wordt een geothermieboring uitgevoerd. Deze kan gebruikt worden voor data acquisitie ten behoeve van de HTO. Hierdoor is een proefboring in de beginfase niet nodig. Mogelijk is een proefboring later wel aan te bevelen om zodoende via een pompproef de capaciteit goed in te kunnen schatten. De kosten voor een eventuele proefboring zijn ingeschat op € 230.000,-. Dit is € 50.000,- meer dan voorzien is in het onderzoeksplan van WarmingUP.
- Risico's zijn relatief ten opzichte van andere verkenningen ingeschat. De volgende punten hebben een lager risicoprofiel dan gemiddeld:
 - Het warmtenet moet nog ontwikkeld worden. Dit biedt flexibiliteit om geschikte ondergrondlocatie te kiezen langs de backbone.
 - Deze uitbreidingen van het warmtenet bieden ook kansen om lagere aanvoer- en retourtemperaturen te realiseren, waarmee de businesscase sterk verbetert.
 - De verstoring van het bodemmilieu en integriteit in opslagpakket door eventuele toediening van HCl heeft relatief minder effect door het hoge chloridegehalte in het opslagpakket.
 - In Q1/Q2 van 2021 wordt een geothermieboring uitgevoerd. Bij deze boring kan data geacquireerd worden om de bodemgeschiktheid voor HTO beter in te schatten.

De volgende punten hebben een hoger risicoprofiel dan gemiddeld:

- Het warmtenet is nog grotendeels in ontwikkeling. Zowel de bronnen als de vraagkant dienen grotendeels nog ontwikkeld te worden. Een risico is dat de ontwikkeling van een warmtenet trager gaat dan gepland.
- Er is een relatief grote onzekerheid over de opbouw van de ondergrond. De (onzekerheid van) opslagcondities heeft een grote invloed op de mogelijke efficiëntie van de bronnen en dus het systeem. Momenteel wordt het rendement 'relatief positief' ingeschat, de onzekerheid is echter groot. Een voordeel is echter dat begin 2021 geboord wordt naar geothermie, waarbij meer inzicht kan worden verkregen in de bodemgeschiktheid.
- Bij opslag in de Fm. Van Maassluis geven de diepte van en het aantal bronnen een kleiner risico op verstoring van het bodemmilieu in de bovenliggende pakketten door zowel uitstraling van warmte vanuit de put als door de kans op lekkage. De volgende punten hebben een hoger risicoprofiel:
 - Onzekerheden ondergrond. Bij opslag in de FM van Oosterhout geven de diepte van en het aantal bronnen een groter risico op verstoring van het bodemmilieu in de bovenliggende pakketten door zowel uitstraling van warmte vanuit de put als door de kans op lekkage.
- Het risico op scaling (verstopping van de bronnen en/of de warmtewisselaar door anorganische neerslag) is afhankelijk van de locatie-specifieke geochemische condities.
- De geochemische gegevens van de beoogde aquifer(s) zijn echter nog niet beschouwd/bekend in deze fase van de verkenning/ontwikkeling van de HTO. Het risico op scaling kan daardoor nog niet nader worden beschouwd.
- In algemene zin is het belangrijk om rekening te houden met kalkneerslag aan de warme kant van het HTO systeem en eventuele neerslag van andere anorganische componenten.
- De proefboring biedt de mogelijkheid om de condities in de aquifer te analyseren, het risico op verstopping te evalueren en het design van het HTO op af te stemmen (bijvoorbeeld door waterbehandeling toe te passen om kalkneerslag te beperken/voorkomen en een monitoringsysteem te ontwerpen).
- De volgende analyses dienen te worden uitgevoerd: water compositie, gas compositie en partiele drukken en eventueel de mineralogische samenstelling van de aquifer.

De juridische haalbaarheid wordt positief ingeschat vanwege het beperkte aantal omgevingsbelangen op de beoogde opslagdiepte. Belangrijke kanttekening daarbij is de onzekerheid met betrekking tot de bodemopbouw. Ten behoeve van een doelmatig gebruik van de ondergrond is de aanwezigheid van een geschikt opslagpakket een belangrijke randvoorwaarde.

Referenties

Fleuchaus, P., Schüppler, S., Bloemendal, M., Guglielmetti, L., Opel, O., & Blum, P. (2020). Risk analysis of High-Temperature Aquifer Thermal Energy Storage (HT-ATES). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 110153.

TNO, IF Technology, 2019. Haalbaarheidsstudie ondergrondse hoge temperatuur opslag (HTO) voor tuinbouwgebied NEXTgarden

TNO, 2016. Feasibility study of a High Temperature Aquifer Thermal Energy Storage at AVR Duiven. Utrecht.

TNO, IF Technology, 2016. Analyse effecten van Hoge Temperatuur Opslag op voorraad zoet grondwater. Utrecht

Harbough, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C., & McDonald, M. G. (2000). Modflow-2000, the U.S. Geological Survey modular groundwater model - User guide to modularization concepts and the Groundwater Flow Process. (Open-File Report 00-92).

Langevin, C. (2009). SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Variable-Density Groundwater Flow and Multi-Species Solute and Heat Transport (2009-3047).

Langevin, C. D. (2008). Modeling Axisymmetric Flow and Transport. *Ground water*, 46(4), 579-590. doi:10.1111/j.1745-6584.2008.00445.x

Sharqawy, M. H., Lienhard, J. H., & Zubair, S. M. (2012). Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. *Desalination and Water Treatment*, 16(1-3), 354-380. doi:10.5004/dwt.2010.1079

van Lopik, J. H., Hartog, N., & Zaadnoordijk, W. J. (2016). The use of salinity contrast for density difference compensation to improve the thermal recovery efficiency in high-temperature aquifer thermal energy storage systems. *Hydrogeology Journal*, 24(5), 1255-1271. doi:10.1007/s10040-016-1366-2

Zheng, C., & Wang, P. (1999). MT3DMS v5.3. A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems. Documentation and User's Guide.

Bijlagen

Bijlage I. Ontwerpnorm bronnen

NVOE norm WKO

De bronnen voor het warmteopslag systeem worden ontworpen aan de hand van de geldende NVOE normen, ontworpen voor WKO systemen. De onttrekkingsnorm of de infiltratienorm zijn, afhankelijk van de geldende situatie, de limiterende factor voor het debiet dat kan worden gehaald.

Onttrekkingsnorm

De onttrekkingsnorm is bedoeld om zandlevering te voorkomen. Hieruit volgt een maximale Darcy snelheid in de aquifer. Voor WKO-bronnen wordt een minder conservatieve onttrekkingsnorm gehanteerd dan voor winputten ten behoeve van drinkwater. Bij de NVOE-onttrekkingsnorm (2006) hangt de maximale Darcy snelheid in de formatie af van de doorlatendheid:

$$v_b = \frac{K}{12} \quad (I.1)$$

Waarin v_b de ontwerpsnelheid op de boorgatwand is (in m/uur) en K de gemiddelde doorlatendheid in m/d. Deze formule laat een veel hogere snelheid op de boorgatwand toe dan de conservatieve formule van Huisman die wordt gebruikt voor conventionele winputten ten behoeve van grondwateronttrekking. Met name in grovere zandpakketten met een doorlatendheid K van meer dan 40 m/d kan er significant meer onttrokken worden met deze infiltratienorm.

infiltratienorm

De infiltratienorm is bedoeld om de verstopping van de infiltratieput te beperken. Hieruit volgt de maximaal toelaatbare Darcy snelheid op de boorgatwand en daarmee ook het maximale debiet bij infiltratie. De maximaal toelaatbare Darcy snelheid op de boorgatwand bij infiltratie (NVOE, 2006) is niet alleen afhankelijk van de doorlatendheid (k-waarde), maar ook van de mate waarin het infiltratiewater een verstoppende werking heeft (uitgedrukt in de MFI-waarde), de hoeveelheid grondwater die geïnfiltrerd wordt (uitgedrukt in het aantal equivalente vollasturen) en hoe snel de bron mag verstopen (uitgedrukt in de specifieke verstoppingsnelheid).

$$v_{max} = 1000 \left(\frac{k}{150} \right)^{0,6} \cdot \sqrt{\frac{v_v}{2 \cdot MFI \cdot U_{eq}}} \quad (I.2)$$

| | | |
|-----------|---|---|
| v_{max} | = | ontwerpsnelheid op de boorgatwand bij infiltratie [m/uur] |
| k | = | doorlatendheid van het watervoerende pakket [m/d] |
| v_v | = | specifieke verstoppingsnelheid [m/jaar] |
| MFI | = | MFI [s/l^2] |
| U_{eq} | = | aantal equivalente vollasturen per jaar [uur] |

De afleiding van deze ontwerpnorm is beschreven in IF Technology (2001). Als geen MFI bekend is kan voor energieopslag (waarbij grondwater wordt geïnfiltrerd, en geen oppervlaktewater) uitgegaan worden van een MFI van 2. In de meeste gevallen is de MFI van grondwater dat onttrokken wordt aan goed schoon gepompte bronnen lager dan 2. Incidenteel worden hogere MFI-waarden gemeten (3 tot 4). In dat geval zou iets vaker onderhoud plaats moeten vinden.

Voorgesteld wordt om als standaard toegelaten verstoppingsnelheid een waarde van 0,1 m/jaar aan te nemen. Indien gewenst kunnen hogere of lagere verstoppingsnelheden worden aangehouden, dit vertaalt zich dan in een infiltratiebron met een kleinere respectievelijk grotere diameter (als wordt uitgegaan van hetzelfde debiet en dezelfde filterlengte).

De NVOE normen kunnen worden beschouwd als een conservatieve manier om het debiet per meter filterlengte uit te rekenen. In eerste instantie worden deze normen gehanteerd om het aantal bronnen te bepalen. Deze conservatieve methode resulteert voor een warmteopslag vaak tot een groot aantal bronnen, wat leidt tot hoge investeringskosten. Echter, er zijn verschillende aanwijzingen die erop duiden dat deze normen bij opslag met hogere temperaturen verhoogd kunnen worden.

Kans voor ruimere normen

1. Hogere hydrologische conductiviteit

Voor hoge temperatuuropslag is het van belang, dat de doorlatendheid van de aquifer geen constante waarde heeft, maar afhankelijk is van de temperatuur. Dat komt doordat de doorlatendheid niet allen wordt bepaald door de eigenschappen van het poreuze medium (de intrinsieke permeabiliteit), maar ook door de eigenschappen van de vloeistof. De eigenschappen van de vloeistof (dichtheid en viscositeit) zijn afhankelijk van de temperatuur (en in geringe mate ook van het zoutgehalte en de druk).

$$k = \frac{\rho_f \cdot g}{\mu} \cdot K_i \quad (1.3)$$

| | |
|------------|---|
| k = | doorlatendheid [m/s] |
| ρ_f = | dichtheid van de vloeistof [kg/m ³] |
| g = | de valversnelling [9,8 m/s ²] |
| μ = | dynamische viscositeit van de vloeistof [Pa*s] |
| K_i = | de intrinsieke permeabiliteit [m ²] |

Bij hoge temperatuuropslagssystemen hebben het zoutgehalte en de druk geen grote invloed op de viscositeit en dichtheid. De viscositeit van water neemt echter sterk af bij hogere temperaturen. Bij het dimensioneren van bronnen voor hoge temperatuur opslag is het dus noodzakelijk om rekening te houden met de invloed van de temperatuur op de doorlatendheid. De doorlatendheid in de reeds bestaande normen dient hiertoe vervangen te worden door de intrinsieke permeabiliteit. Verder dient de dichtheid en de viscositeit van het water bij de temperatuur van het onttrokken en geïnfiltreerde te worden meegenomen. Zowel voor de onttrekkingsnorm als de infiltratienorm zal de ontwerpsnelheid bij een hogere temperatuur hoger zijn.

Als de invloed van de temperatuur op de doorlatendheid meegenomen wordt, ziet de onttrekkingsnorm er als volgt uit (IF Technology, 2012):

$$v_b = 7200 * \frac{\rho_f \cdot g}{\mu} \cdot K_i \quad (1.4)$$

v_b = ontwerpsnelheid op de boorgatwand bij onttrekking [m/uur]

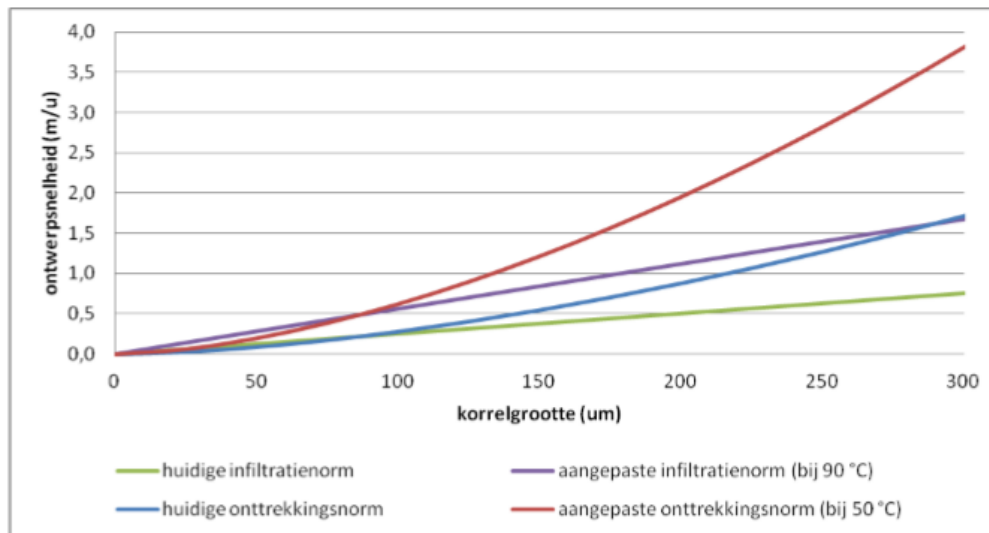
Als de invloed van de temperatuur op de doorlatendheid meegenomen wordt, ziet de infiltratienorm er als volgt uit (IF Technology, 2012):

$$v_{max} = 1000 \left(576 * \frac{\rho_f \cdot g}{\mu} \cdot K_i \right)^{0,6} \cdot \sqrt{\frac{v_v}{2 \cdot MFI \cdot U_{eq}}} \quad (1.5)$$

- v_{max} = ontwerpnelheid op de boorgatwand bij infiltratie [m/uur]
- ρ_f = dichtheid van de vloeistof [kg/m³]
- g = de valversnelling [9,8 m/s²]
- μ = dynamische viscositeit van de vloeistof [Pa*s]
- K_i = de intrinsieke permeabiliteit [m²]
- v_v = specifieke verstoppingsnelheid [m/jaar]
- MFI = MFI [s/l²]
- U_{eq} = aantal equivalente vollasturen per jaar [uur]

In fijnzandige aquifers is de norm voor infiltratie minder kritisch dan de norm voor onttrekking. Verder kan de infiltratienorm positief worden beïnvloed door het te infiltreren water bovengronds te filteren voorafgaande aan de infiltratie (verlagen van de MFI waarde).

In onderstaande figuur is de huidige onttrekkings- en infiltratienorm vergeleken met de aangepaste normen. De weergegeven norm is gebaseerd op de warme bron van de case in Gorinchem. Hierin bedraagt de onttrekkingstemperatuur uit de warme bron 50°C en de infiltratietemperatuur 90°C. Uit de vergelijking blijkt dat door het integreren van de temperatuur in de ontwerpnormen in deze case de ontwerpnelheid ruim twee keer zo groot mag zijn in vergelijking met de huidige ontwerpnormen.



Figuur I.1: Vergelijking tussen de ontwerpnormen voor WKO-systemen, en de ontwerpnormen voor HTO-systemen (met afhankelijkheid van viscositeit) (IF Technology, 2012)

2. Praktijkervaringen met betrekking tot de onttrekkings- en infiltratie norm

Van enkele bronnen is bekend dat er zandlevering optreedt. De oorzaak van deze zandlevering hoeft niet direct te liggen bij het overschrijden van de ontwerpnormen. Mogelijke oorzaken kunnen ook zijn een verkeerde keuze van filtergrind en -spleten, grote variatie in korrelgrootte, filters in kalksteen en scheve debietverdeling over het filtertraject of een combinatie van deze oorzaken. Een directe relatie tussen het overschrijden van de norm en zandlevering is (nog) niet gevonden (IF Technology en Universiteit Utrecht, 2012).

Volgens onderzoek naar de ontwerpnormen voor putten bij ondiepe geothermie projecten (IF Technology, 2019), mede gebaseerd op ervaringen in de olie- en gasindustrie, kunnen op grotere dieptes hogere snelheden worden toegepast zonder dat daarbij (onacceptabele) zandlevering optreedt. De spanningen in de ongeconsolideerde lagen in de ondiepe ondergrond worden hoofdzakelijk bepaald door het gewicht van de bovenliggende lagen en de zwaartekracht. Daardoor nemen de spanningen in de ondergrond steeds verder toe met toenemende diepte. Hoe groter de krachten op de korrels, hoe moeilijker de korrels te mobiliseren zijn. Hieruit volgt dat op grotere dieptes hogere debieten mogelijk zijn dan in ondiepere aquifers (als wordt aangenomen dat de eigenschappen van de gebruikte bodemlaag gelijk blijven).

Met dit aspect wordt in de bestaande onttrekkingsnorm voor open bodemenergiesystemen geen rekening gehouden. De onttrekkingsnorm voor open bodemenergiesystemen is op grote schaal toegepast voor het ontwerp van deze systemen (>> 1.000 systemen) en het aantal projecten met zandlevering is zeer gering. De bronsystemen voor open bodemenergiesystemen staan bekend als robuust en onderhoudsarm. Dit geeft enerzijds aan dat de ontwerpnormen veilig zijn en anderzijds dat er wellicht ruimte is om hogere snelheden toe te staan.

Praktijktesten ECW (Wieringermeer)

Het overgrote deel van de open bodemenergiesystemen maakt gebruik van zandlagen in het dieptebereik van 20 tot 250 meter. Bij ECW in de Wieringermeer polder is een hoge temperatuur opslag project beoogd in een watervoerende zandlaag tussen 360 en 383 m diepte. Aangezien bij ECW gebruik wordt gemaakt van een aquifer op aanzienlijk grotere diepte dan gebruikelijk, is de verwachting dat aanmerkelijk hogere debieten mogelijk zijn. Om dit nader te onderzoeken zijn testen uitgevoerd in het bronfilter van de proefboring die ten behoeve van het project is gerealiseerd. Bij deze testen is het onttrekkingsdebiet in een aantal stappen verhoogd tot ruim boven de huidige onttrekkingsnorm. Uit de praktijktesten blijkt, dat de zandlevering minimaal is bij snelheden op de boorgatwand tot 2,44 maal de huidige onttrekkingsnorm. Hogere snelheden konden vanwege praktische beperkingen niet worden getest (IF Technology, 2020). Deze ervaringen suggereren dat er, met name op grotere dieptes, hogere debieten kunnen worden gerealiseerd dan wat de huidige ontwerpnormen aangeven. Het is echter nog te vroeg om bij andere projecten op grotere dieptes “zomaar” hogere snelheden toe te passen. Bij het HTO project van ECW is de keuze voor een hoger debiet gebaseerd op een combinatie tussen theorie en (kortdurende) praktijktesten. Die resultaten zijn positief, maar geven nog geen zekerheid. Een punt van aandacht is bijvoorbeeld nog het functioneren van de putten op de lange termijn.

Bij eventuele andere projecten op grotere dieptes wordt aanbevolen om vergelijkbare testen uit te voeren om de haalbaarheid van sterk verhoogde debieten voor de betreffende formatie op die locatie te onderzoeken. Als de haalbaarheid van verhoogde debieten op meerdere locaties middels praktijktesten is aangetoond en de praktijkervaring met de betreffende putten tijdens bedrijfsvoering op de langere termijn ook positief is, dan kan dit aanleiding zijn voor een aanpassing van de ontwerpnormen. Mogelijk ontstaat daarmee dan ook ruimte om in ondiepere aquifers hogere debieten toe te staan.

Door de relatief hoge stroomsnelheden in de directe omgeving van de onttrekkingsput worden deeltjes in de aquifer gemobiliseerd en meegevoerd met het grondwater dat in de richting van de put stroomt. Bij hoge stroomsnelheden (hoger dan waar tot op heden ervaring mee is bij open bodemenergiesystemen), ontstaan hogere sleepkrachten en is de verwachting dat er meer deeltjes gemobiliseerd gaan worden. Bovendien wordt het gebied waarbinnen een bepaalde stroomsnelheid optreedt groter. Dit leidt naar verwachting ook tot een toename van de concentratie aan deeltjes in het toestromende water. Bij hogere concentraties aan deeltjes en hogere stroomsnelheden neemt de kans op de brugvorming toe (deeltjes lopen vast als ze tegelijkertijd door dezelfde poriehal willen: de deeltjes vormen bruggetjes die een verstoppend effecten hebben). Dit fenomeen is bekend uit onderzoek dat is uitgevoerd in de drinkwatersector (zie b.v. Timmer et al., 2000 en 2003; De Zwart, 2007 en Van Beek et al., 2009).

In de metingen van de tot nu toe uitgevoerde putproeven zijn geen aanwijzingen gevonden voor het optreden van putverstopping: de verlaging in de proefboring neemt niet of nauwelijks toe ten opzichte van de verlaging die wordt berekend aan de hand van de eigenschappen van het watervoerende pakket die zijn afgeleid uit stopproeven. De testen waren echter van relatief korte duur (6 uur). Hiermee is dus nog niet duidelijk in hoeverre er op de langere termijn wellicht toch merkbare effecten van putverstopping door brugvorming verwacht mogen worden.

In het vervolg van WINDOW binnen WarmingUP zal moeten worden onderzocht in hoeverre verhoogde normen van toepassing kunnen zijn voor een optimaal functionerend warmteopslag systeem.

Bijlage II. Brontechniek

De bronnen worden gemaakt met de zogenaamde zuigboortechniek. Dit type boring is op duizenden plaatsen de afgelopen twintig jaar uitgevoerd; van zeer drukke binnensteden, natuurgebieden tot bedrijventerreinen. Geluidsoverlast is beperkt zodat in de directe omgeving van eventuele bebouwing kan worden geboord (mogelijk alleen overdag boren).

De benodigde ruimte voor het boren bedraagt 300 tot 400 m² (zie figuur II-1 voor opstellingsruimte). Het gehele boorproces inclusief het schoonmaken van de bron kost circa 1 maand.



Figuur II-1: Boorstelling zuigboren

De bronnen worden geboord met een diameter van 800 mm. De warme bronnen krijgen een GVK stijgbuis en RVS wikkeldraad filter; de temperatuur in de lauwe bronnen blijft onder de 60 °C vandaar dat stijgbuis en filter in PVC kunnen worden uitgevoerd. Hierbij moeten er beveiligingen worden ingebouwd om te voorkomen dat er ooit water van meer dan 60°C in de koude bronnen komt. De lauwe bronnen worden aan maaiveld afgewerkt met een half bovengrondse putbehuizing (2x2 m, zie figuur II-2). De warme bronnen dienen volledig bovengronds te worden afgewerkt. Dit is een kleine constructie die past binnen een ruimte van 2x1,5x1,5 m. Deze bovengrondse afwerking is nodig omdat al het leidingwerk heet is en de ruimte in een half bovengrondse put te klein is om er veilig te kunnen werken. Daarnaast dient er naast de bovengrondse put voldoende ruimte beschikbaar te zijn voor vrachtwagens en hijskranen. Positionering naast een parkeerplaats o.i.d. heeft dan ook de voorkeur.



Figuur II-2 Afwerking bron met half-bovengrondse putbehuizing

Waterbehandeling

Specifiek voor hoge temperatuur is de neerslag van carbonaten. Dit effect is bekend vanuit de dagelijkse praktijk: ketelsteen in de fluitketel en kalkaanslag bij het verwarmingselement van de wasmachine. Het risico op carbonaatneerslag is afhankelijk van de kalkverzadigingsgraad van het oorspronkelijke grondwater, de mate waarin de temperatuur wordt verhoogd en de aanwezigheid en concentraties van stoffen die de neerslagreacties vertragen. Aangezien de aanwezigheid van kalkverzadigd grondwater in de te gebruiken bodemlaag aannemelijk is en sprake is van opslag met 90 °C, is carbonaatneerslag waarschijnlijk als geen tegenmaatregelen worden genomen. Om carbonaatneerslag te voorkomen kan waterbehandeling worden toegepast.

De sterke en zwakke punten en de kansen en bedreigingen van de verschillende technieken zijn opgesomd in tabel II-1.

Tabel II-1 Afweging waterbehandelingstechnieken

| | ionenwisseling | (zout)zuurdosering | inhibitors |
|---------------|---|--|--|
| sterke punten | invloed op de grondwaterkwaliteit relatief klein | werkt goed goed beheersbaar invloed op de grondwaterkwaliteit relatief klein | relatief goedkope oplossing |
| zwakke punten | waterbehandeling vergt veel aandacht aanvoer veel zout nodig in de praktijk putverstopping opgetreden relatief hoge kosten | veiligheidsmaatregelen i.v.m. zuur zoutzuur nodig, veel transport bewegingen. | nog geen praktijkervaring |
| alternatief | | CO ₂ -dosering | |
| bedreigingen | risico op kleizwelling bij overbehandeling niet verkrijgen toestemming zoutlozing | kwetsbare sturing/beveiliging Publieke opinie | risico neerslag na adsorptie aan de bodem effect grondwaterkwaliteit onduidelijk Publieke opinie |

Omdat ionenwisseling te duur is en de toepassing van inhibitoren onzeker is door gebrek aan praktijk ervaring, is zuurdosering de beste optie voor de waterbehandeling van de HTO van Heerhugowaard.

Er zijn verschillende opties voor het type zuur dat kan worden gebruikt. Vooral nog wordt gekozen voor de toepassing van zoutzuurdosering, met name omdat deze techniek zich in de praktijk heeft bewezen (HTO Zwammerdam) en de grondwaterkwaliteitseffecten relatief klein zijn. Deze waterbehandelingstechniek is beproefd en goed beheersbaar. Nadeel zijn de grote hoeveelheden zoutzuur die nodig zijn en de extra zorg voor opslag en gebruik. Op basis van de HTO Zwammerdam en het ontwerp van de HTO bij GEOMEDEV (Brielle) wordt verwacht dat een zoutzuurdosering van 0,3 l/m³ (30 % HCl) nodig is (exacte dosering wordt bepaald aan de hand van de grondwaterkwaliteit gemeten tijdens de proefboring). Zoutzuurdosering hoeft alleen plaats te vinden tijdens het laden van de ondergrondse opslag. Naast zoutzuur kan er ook worden gekozen voor 99,9% pure CO₂, dit wordt toegepast op de HTO te Middenmeer. Tests moeten uitwijzen of deze vorm van dosering zoutzuur kan vervangen.

Transportleiding en technische ruimte

De bronnen worden via ondergrondse transportleidingen (min 0,6 m-mv) met de warmtewisselaar in de technische ruimte verbonden. De transportleiding is van geïsoleerd glasvezel versterkt kunststof (GVK). In de technische ruimte staan de warmtewisselaars, regelkasten, filterinstallatie en waterbehandeling van het grondwatersysteem. De leidingen zijn van GVK. Dit neemt meer inbouwruimte in beslag dan RVS leidingen. De warmtewisselaars zijn van titanium. Hiermee wordt voorkomen dat de warmtewisselaars binnen korte tijd door corrosie defect raken.

De technische ruimte wordt opgenomen in een warmte-overdrachtsstation (WOS). Vanwege het gebruik van chemicaliën bij de waterbehandeling en de hoge temperaturen, zal de technische ruimte aan strikte veiligheidseisen moeten voldoen.

Bijlage III. Beschrijving numerieke model SEAWATv4

De numerieke simulaties worden uitgevoerd met het grondwatermodel SEAWATv4 Langevin (2009). Dit model is een koppeling tussen het grondwatermodel MODFLOW en het transport model MT3Ds (Harbough et al., 2000; Zheng & Wang, 1999). Een nog gedetailleerde beschrijving van de model opzet is beschreven in de rapportage van werkpakket C2- geohydrologisch ontwerp. SEAWATv4 heeft de capaciteit om dichtheidsstroming te simuleren bij verschillende temperaturen. Dit treedt op doordat viscositeit en dichtheid afhankelijk zijn van temperatuur, Figuur III-. Een relatief lage dichtheid van het warme geïnjecteerd water leidt tot een dichtheid verschil met het omringede grondwater, het warmere water heeft dus de neiging op te drijven (van Lopik et al., 2016). Doordat de viscositeit ook sterk afneemt met hogere temperatuur kan water makkelijker door de ondergrond stromen waardoor het opdrijf effect versterkt wordt. Dit wordt in SEAWATv4 berekent d.m.v. de volgende vergelijkingen.

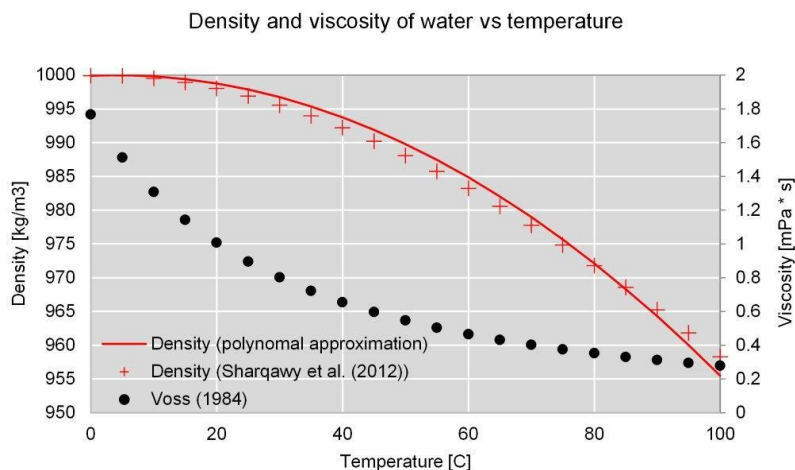
Viscositeit is berekend volgens is (Langevin, 2009):

$$\mu(C, T) = 2.494 \cdot 10^{-5} \cdot (10^{\frac{248.37}{T+133.15}}) + 1.92 \cdot 10^{-6} (C - C_0)$$

De dichtheidsverandering van water bij oplopende temperaturen is berekend volgens:

$$\rho(T) = \rho_f - \frac{(T - 4)^2}{207}$$

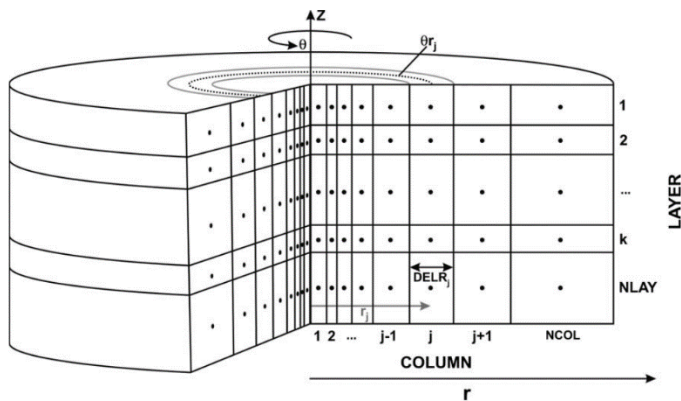
Dit is een benadering van de vergelijking opgesteld door Sharqawy et al. (2012) waarbij ook verschil in zoutconcentratie wordt meegenomen. Bij deze simulaties wordt er vanuit gegaan dat er geen water wordt gemengd van verschillende kwaliteiten (e.g. uit verschillende grondwaterpakketten). Daardoor is alleen een verschil in temperatuur van invloed op de berekende dichtheid.



Figuur III-1 Afhankelijkheid van viscositeit en dichtheid van water bij oplopende temperatuur.

Axisymmetrisch model

De simulaties worden op twee manieren uitgevoerd, axisymmetrisch en in 3D. Axisymmetrische simulaties hebben als voordeel dat rekentijden relatief klein zijn vergeleken met een simulatie in 3D. Met axisymmetrische simulaties is het dus mogelijk om een hoge verticale resolutie te gebruiken zonder dat de rekentijden te omvangrijk worden. Echter, een nadeel bij axisymmetrische simulaties is dat slechts 1 put gesimuleerd kan worden en het niet mogelijk is om ruimtelijke verschillen te implementeren zoals grondwaterstroming en horizontale heterogeniteit.



Figuur III-2 Schematische weergave van een axisymmetrisch grid. De gemodelleerde put bevindt zich in het midden. De cellen in de radiale richting (r) worden groter naar buiten toe. Van (Langevin, 2008)

Discretisatie en randvoorwaarden

Voor zowel het axisymmetrisch model als het 3D model is een vaste discretisatie gebruikt voor de simulaties, Tabel III.1. Het grid bestaat rondom de putten uit cellen met dezelfde grootte (Min horizontaal), vanaf een bepaalde afstand (min afstand linear) vanaf de putten worden de cellen logaritmsch groter tot de grootste celgrootte (max horizontaal) is bereikt. Het totale grid moet een minimaal afstand van 1000m vanaf de dichtstbijzijnde put hebben. Dit resulteert in een gemiddelde model grootte van 2,5x2,5 km.

Tabel III.1 Discretisatie Axisymmetrische- en 3D-modellen

| | Axisymmetrisch | 3D |
|---|----------------|------------------|
| Min horizontaal | 1 m (r) | 2.5 m (x,y) |
| Max horizontaal | 25 m (r) | 25 m (x,y) |
| Min afstand linear | 150 m (r) | 150 m (x,y) |
| Verticaal | 0.5 m (z) | 0.5 m (z) |
| Buitenste rand | 1000 m (r) | 1000 m (x,y) |
| Minimaal aantal cellen (linear -> logaritmsch) | 50 | 50 |

Geohydrologische & thermische model parameters

De thermische eigenschappen van de aquifers en de aquitards in de ondergrond zullen gekozen en berekend worden gebaseerd op het materiaal en de porositeit van de specifieke laag, tabel III-2.

We variëren hier alleen tussen zandig (aquifer) en kleilig materiaal (aquitard). De volgende aannames worden gedaan:

- Homogene aquifers en aquitards
- Constante thermische conductiviteit (niet beïnvloed door druk of temperatuur)
- Anisotropie tussen horizontale en verticale conductiviteit is constant (zand=2, klei=3)

Tabel III-2: geohydrologische parameters SEAWATv4 model

| Parameter | symbol | Value | Bron |
|--|------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Laterale dispersie | - | 0.5 m | Bloemendal & Hartog (2018) |
| Transversale dispersie | - | 0.05 m | Bloemendal & Hartog (2018) |
| Dichtheid water (0°C) | ρ_{H2O} | 1000 kg/m ³ | |
| Dichtheid vast materiaal | ρ_{solids} | 2640 kg/m ³ | |
| Specifieke warmte capaciteit zand | c_{zand} | 710 J/kg °C | www.engineeringtoolbox.com |
| Specifieke warmte capaciteit klei | c_{klei} | 1381 J/kg °C | www.engineeringtoolbox.com |
| Specifieke warmte capaciteit water | c_{H2O} | 4183 J/kg °C | www.engineeringtoolbox.com |
| Thermische geleidbaarheid zand | λ_{zand} | 1.9 W/m °C | Dalla Santa et al. (2020) |
| Thermische geleidbaarheid klei | λ_{klei} | 1.1 W/m °C | Dalla Santa et al. (2020) |
| Thermische geleidbaarheid water | λ_{H2O} | 0.58 W/m °C | Dalla Santa et al. (2020) |
| Bulk thermal diffusivity* | D_{m_temp} | 0.05 – 0.08 m ² /d | # relatief lage waarde |
| Porositeit zand (-z=0) | ϕ_{zand} | 0.41 | Hantschel & Kauerauf (2009) |
| Porositeit klei (-z=0) | ϕ_{klei} | 0.6 | Hantschel & Kauerauf (2009) & |
| Horizontale hydraulische conductiviteit* | K_h | . m/d | |
| Verticale hydraulische conductiviteit* | K_v | . m/d | |

* Dit is specifiek voor iedere laag in het model

Bijlage IV. Grond mechanische processen

Algemeen

De grondmechanische risico's van een HTO-systeem zijn vergelijkbaar met die van de gangbare open bodemenergiesystemen (waarbij ook geen netto wateronttrekking plaatsvindt en de putten een seizoencyclus van injectie en onttrekking hebben. Eventuele verschillen worden veroorzaakt door de effecten van de hogere temperatuur.

In vergelijking met (drinkwater)onttrekkingen zijn de effecten kleiner doordat de onttrekking per put een beperkte duur heeft en wordt afgewisseld met injectie.

Grond mechanische processen: invloed grondwaterstijghoogteverandering

De verlaging van de grondwaterstijghoogte bij onttrekking zorgt voor verlaging van de waterdruk en toename van de korrelspanning, waardoor de korrels dichter naar elkaar toegedrukt worden en water uitgedreven wordt wat gepaard gaat met zetting. Deze zetting is grotendeels permanent. Dat betekent dat de opheffing veel kleiner is dan de zetting als vervolgens de stijghoogte toeneemt door stoppen van de onttrekking en ook als deze vervolgens groter wordt dan de oorspronkelijke waarde door injectie.

In zandlagen treedt weinig relatief zetting op in vergelijking met kleilagen.

In ondiepe veenlagen kan nog meer zetting optreden, maar speelt ook een tweede proces waardoor de bodem daalt, namelijk de afbraak van veen. Dat laatste zorgt bij veen aan het oppervlak vaak voor meer bodemdaling dan de zetting. Basisveen en in sterkere mate bruinkoollagen zijn minder zettingsgevoelig door stijghoogteverlaging omdat deze lagen al sterk gecompacteerd zijn. Verhoging van de stijghoogte leidt tot een uitzetting die veel kleiner is dan de zetting bij verlaging en die bovendien reversibel is.

De duur van de stijghoogteverlaging speelt ook een rol. Het water kan slechts langzaam uit dikke kleilagen geperst worden, waardoor het zettingsproces geremd wordt. Dit wordt vaak uitgedrukt in de hydrodynamische periode: de tijd die het duurt voordat een evenwichtssituatie bereikt is waarbij praktisch alle potentiële zetting bij de gegeven stijghoogteverlaging opgetreden is. Voor een kleilaag van bijvoorbeeld 10 meter dikte kan de hydrodynamische periode in de orde van jaren liggen, wat veel langer is dan het seizoen van een HTO en daardoor de zetting veel kleiner is dan de potentiële zetting bij de optredende verlaging in het watervoerend pakket waaruit de HTO onttrekt.

HTO-systemen combineren onttrekking en injectie waardoor er netto geen water onttrokken wordt aan de ondergrond. Hierdoor treden stijghoogteverlagingen op in een beperkt deel van de ondergrond (zowel lateraal als verticaal). Bij de volumes die genoemd worden en onttrekking onder een kleilaag met grote weerstand zijn de verlagingen rond een put die onttrekt wel groot in de gepompte laag (meer dan 10 meter), maar deze nemen snel af naar buiten en in verticale richting (maximaal in de orde van decimeters in de boven- en onderliggende watervoerende pakketten).

De kleilaag direct boven het gepompte pakket zal daarbij de meeste zetting opleveren. In ondiepere lagen is de verlaging veel minder en diepere lagen hebben meer bovenbelasting waardoor de stijghoogtedaling minder relatieve korrelspanningstoename oplevert. Bovendien neemt de stijfheid van kleilagen in het algemeen toe met de diepte door geologische bovenbelasting en opgetreden lagere stijghoogten. Naast de duur van de onttrekkingsfase, wordt de zetting beperkt door de driedimensionale samenhang in de bodem. De zettingen vlakbij de put

bij deze diepere kleilaag werken naar boven toe door over een groter gebied (waarbij de verticale verplaatsing minder wordt).

In generieke zin kan gesteld worden dat zettingen kleiner worden in de diepte. Enerzijds door de grotere bovenbelasting (waardoor de relatieve toename van de korrelspanning kleiner is) en anderzijds doordat de lagen stijver zijn doordat er meer compactie heeft plaatsgevonden. De zetting in een kleilaag op 200 m diepte is in het algemeen dus minder dan eenzelfde soort laag op 20m diepte. De eigenschappen zullen ook verschillen per soort klei, maar hier is geen systematische informatie beschikbaar over en er kan geen verschil aangegeven worden tussen kleien per formatie.

Grond mechanische processen: invloed temperatuur

Over de invloed van injectie en productie van hoge temperatuur water ($> 25^{\circ}\text{C}$) op de grondmechanica in ongeconsolideerd materiaal is relatief weinig bekend. De directe invloed van de temperatuur op de grondmechanica is naar verwachting beperkt. Het belangrijkste effect is dat door de lagere viscositeit van water, zettingen sneller optreden en een grotere fractie van de potentiële eindzetting bereikt wordt in een onttrekkingsseizoen. Dit zal vooral plaatsvinden in het eerste onttrekkingsseizoen omdat de zetting grotendeels irreversibel is. Ook de opheffing in het injectieseizoen kan sneller optreden, deze is naar verwachting ongeveer even groot als het reversibele deel van de zetting. De potentiële eindzetting zelf hangt niet direct van de temperatuur af.

Een verhoging van de temperatuur veroorzaakt ook thermische uitzetting van het ondergrondmateriaal en het water. De hier aan gerelateerde bodembeweging van een ondergrond die wordt opgewarmd en afgekoeld, bestaat uit twee componenten (van Dalfsen, 1984):

1. Een gedurige bodembeweging, door toenemende opwarming van het sediment/gesteente.
2. Een op en neer gaande bodembeweging, als gevolg van de opslag en winning van warmte.

De thermische uitzetting treedt op in de opslagaquifer voor HTO, en de aangrenzende lagen die opwarmen op door geleiding. Vooral voor klei zijn de thermische uitzettingscoëfficiënten afhankelijk van de samenstelling (soort klei en hoeveelheid bijmenging van bijvoorbeeld silt of zand).

De volumetrische uitzettingscoëfficiënt van kleimineralen heeft een ordegrootte van $0.0034 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ (Ghabezloo, 2010). De volumetrische uitzettingscoëfficiënt van kwarts (hoofdbestandsdeel van zand) kan variëren van ongeveer 0.0024 tot $0.0033 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ (Ghabezloo, 2010).

Indirecte effecten van de temperatuur kunnen zijn extra afbraak van ondiep veen en verandering van mechanische eigenschappen door geochemische veranderingen. Oxidatie van organische stof (met name veen) boven de grondwaterspiegel en microbiologische afbraak er onder worden gestimuleerd door hogere temperaturen (Brons e.a., 1991). Vanaf een graad of zestig wordt de microbiologische afbraak echter weer geremd zodat dit vooral in de perifere zone van de warmteopslag zal spelen. Geochemische veranderingen kunnen de structuur van klei veranderen wat de grondmechanische eigenschappen beïnvloedt. Ook kunnen hoge temperaturen een effect hebben op glauconiet (korrelige kleimineralen ontstaan in een ondiep marien afzettingmilieu), waar echter nog weinig over bekend is. In de Formatie van Oosterhout en de Formatie van Breda komt vaak glauconiet voor. Deze glauconiethoudende zanden bevatten 10-40% glauconiet. In ondiepe lagen is glauconiet vaak instabiel en heeft het een hoge verbrijzelbaarheid, wat kan zorgen

voor zetting in een pakket. Meer onderzoek is nodig naar de effecten van hoge temperaturen op glauconiet.

Bij hogere temperatuur verlaagt de oplosbaarheid van gassen. Ontstaan van gasbelletjes beïnvloedt de doorlatendheid en ontgassing van CO₂ leidt tot kalkneerslag dat bovendien tot putverstopping kan leiden.

Monitoring van vervorming van de put kan hierbij misschien meer inzicht verschaffen, bijvoorbeeld met rekstrookjes op de buis. Daarnaast kunnen grondwaterstijghoogten gemeten worden met automatische drukopnemers; voor kleilagen zonder peilbuis, maar direct in de klei geplaatst. Misschien dat het meten van geochemische parameters via minifilters in de omstorting extra informatie kan verschaffen naast analyseren van de chemische verandering in het onttrokken en geïnjecteerde water. Het is goed ook de maaiveldhoogte regelmatig te meten om de totale bodembeweging te kunnen bepalen.

Samenvatting

Voor onttrekkingen is veel kennis beschikbaar over voorspellingen van zettingen en over daadwerkelijk opgetreden zettingen. Voor WKO's zijn er ook richtlijnen voor de geotechnische risico's. Dit kan ook gebruikt worden voor HTO. De risico's zullen minder zijn naar gelang de HTO dieper aangelegd. De consequenties van de hogere temperatuur zijn naar verwachting beperkt, maar hier is weinig informatie over beschikbaar zodat het is aan te bevelen om gerichte monitoring uit te voeren.

Aanbeveling

Op basis van deze kwalitatieve beschouwing kan geen belangrijk onderscheid gemaakt worden tussen de geselecteerde locaties wat betreft grondmechanische risico's. Na selectie van locaties voor verdere evaluatie dienen locatie specifieke berekeningen een inschatting geven van de verwachte effecten aan het maaiveld. Daarna kan in combinatie met een omgevingsscan het effect worden ingeschat waarbij mogelijk een ondiepere laag afvalt als optie voor HTO. Hiertoe dienen de mogelijke effecten van hogere temperaturen beter in beeld te worden gebracht, eventueel ondersteunt door experimentele observaties en gecombineerde modellen die grondmechanische, hydraulische, thermische en geochemische processen simuleren.

Bijlage V. Generieke risico-inventarisatie voor HTO

Introductie

De belangrijkste risico's gerelateerd aan HTO projecten zijn geïnventariseerd op basis van projecten in het verleden (bijv. TNO, 2016; TNO & IF Technology, 2016, 2019) en op basis van studies zoals het WINDOW project. De indeling en beschrijving van de risico's zijn grotendeels gebaseerd op TNO & IF Technology (2019). In het algemeen zijn de geïdentificeerde risico's generiek voor elk HTO project, maar de specifieke risico's kunnen wel meer of minder relevant zijn voor de individuele projecten. Er is daarom gekozen voor een algemeen overzicht van de geïdentificeerde risico's, dat gelijk is in alle verkenningen, gevolgd door een locatie-specifiek overzicht waarin voor elk van de individuele verkenningen de relevantie is aangegeven. Voor die risico's die relevant worden geacht wordt per locatie een toelichting gegeven.

Risico's zijn onder te verdelen in:

- Risico's voor de business case (commercieel/economisch)
- Juridische haalbaarheid en draagvlak
- Technische en geohydrologische risico's
- Milieu- en veiligheidsrisico's
- Organisatorische risico's (inclusief commitment stakeholder)

Deze worden per categorie hieronder toegelicht.

Commerciële en economische risico's

De belangrijkste commerciële en economische projectrisico's zijn:

- A) Volume en prijsrisico's
- B) Hoge onvoorziene kosten
- C) Rendement en kwaliteit van de geproduceerde warmte
- D) Inpassing in het warmtenet

Ad A) Een van de belangrijkste risico's zijn volume- en prijsrisico's van de warmtelevering. In de praktijk is het lastig om bij nieuwbouw en geplande ontwikkelingen de warmtevraag nauwkeurig in te schatten. De vraag is sterk afhankelijk van gedrag en projecten kunnen om allerlei renden vertraging oplopen. Bij bestaande warmtenetten bestaat het risico dat een deel van de warmtevraag wegvalt, bijvoorbeeld door faillissement van zakelijke gebruikers die op het warmtenet zijn aangesloten. Daarnaast zal ook de klimaatverandering een impact hebben op de toekomstige warmtevraag.

Kosten voor exploitatie kunnen in de toekomst sterk fluctueren door allerlei invloeden. Wanneer de kosten voor elektriciteit toenemen, heeft dit een direct gevolg op het financiële resultaat, omdat dit een belangrijke kostenpost is. Ook kan veranderende regelgeving en subsidie-beleid van invloed zijn op de kosten en baten. Dit kan zowel effect hebben op de eigen kosten en baten, als ook op concurrerende energiebronnen.

Volume en prijsrisico's dienen zoveel mogelijk afgedekt te worden, bijvoorbeeld door regelmatig en voldoende aandacht te hebben voor een optimaal en robuust ontwerp op basis van de ingeschatte warmtevraag en aanbod. Prijsrisico's kunnen worden afgedekt door warmte-afnameovereenkomsten.

Ad B) De techniek HTO staat sinds de jaren 80 van de vorige eeuw in de belangstelling. Tot op heden zijn slechts een paar HTO-systemen gerealiseerd in Nederland. De kostenschattingen in het

WINDOW project zijn gemaakt op basis van kennis uit gerealiseerde projecten en recent uitgevoerde ontwerpen. Echter, de kostenschattting voor de investeringen en exploitatie kunnen in realiteit afwijken (zeker +/- 25%). Na het doen van de proefboring en de terrein-inventarisatie kunnen de investeringskosten veel nauwkeuriger (+/- 10 %) worden ingeschat. Het risico is dat de kosten te hoog uitvallen waardoor deze niet volgens verwachting kunnen worden terugverdiend.

Ad C) De marginale kosten van de HTO wordt voor een groot deel bepaald door het rendement van HTO-systeem en de inpasbaarheid in het warmtenet (risicogroep D). Het risico is dat het rendement van het HTO-systeem lager is (dus het warmteverlies groter) dan verwacht. Het opslagrendement is de verhouding tussen de opgeslagen warmte en de nuttig geleverde warmte. Warm water heeft een lagere dichtheid dan koud water. Hierdoor ontstaan dichtheidsstromingen, waarbij warm water naar boven stroomt en koud water in het onderste deel van het opslagpakket wordt aangetrokken. Een deel van de opgeslagen warmte gaat verloren. Dit uit zich als niet teruggewonnen warmte en temperatuurdaling van teruggewonnen warmte. Het rendement van de HTO kan tegenvallen door tegenvallers in de ondergrond, door een hogere retourtemperatuur in het warmtenet, door een hogere benodigde aanvoertemperatuur, door suboptimale inzet of extreme seizoensvariaties tussen verschillende jaren. De verhouding tussen geïnjecteerde warmte en teruggewonnen warmte moet goed worden afgestemd (geen jaarlijkse over-injectie of onderproductie van warmte). De afkaptemperatuur dient ook zo laag mogelijk te zijn, zodat ook productie van lagere kwaliteit warmte aan het einde van het stookseizoen nog nuttig kan worden ingezet. Dit kan door het combineren van de HTO met een (industriële) warmtepomp of (hulp)warmtebron.

Ad D) De retourtemperatuur en benodigde productietemperatuur ter plaatse van de HTO zijn mede bepalend voor de investeringen in de warmtepomp, als deze in het systeemconcept zit. In het voorontwerp kunnen deze conservatief ingeschat worden; d.w.z. hoge retour- en productietemperatuur. Dan zijn de gevolgen bij optreden van dit risico beperkt. Als de retourtemperatuur en productietemperatuur optimistisch ingeschat worden, dan zijn de gevolgen van het optreden van hogere retour- en productietemperaturen groot. Een hogere productietemperatuur kan met een piekvoorziening opgevangen worden of door het bijmengen met heet water uit het warmtenet. Een hogere retourtemperatuur kan in het detail-ontwerp gemitigeerd worden door een duurder warmtepomp of door een hogere temperatuur in de lauwe bron toe te laten met meer verliezen in de ondergrond tot gevolg.

Juridische haalbaarheid en draagvlak

Voor HTO-systemen tot een diepte van 500 m beneden maaiveld is een vergunning Waterwet nodig. De gedeputeerde staten van de Provincie is het bevoegd gezag en daarmee de vergunningsverstrekker (zie artikel 6.4 Waterwet). Volgens de het wijzigingsbesluit Bodemenergiesystemen (Schultz-van Hagen, 2013) is de infiltratie van water boven de 25 °C toegestaan, onder de voorwaarde dat het belang van de bescherming van de bodem zich daartegen niet verzet. In de vergunningprocedure kan het bevoegd gebruik maken van standaardvoorschriften uit de Besluitvorming Uitvoeringsmethode (BUM). Echter, HTO kan niet voldoen aan twee van deze standaardvoorschriften. Afwijken van de standaardvoorschriften is toegestaan in het kader van een onderzoeksproject, en in de BUM is opgenomen dat HTO daar voorlopig ook onder valt. Het bevoegd gezag kan eisen aan onderzoek en monitoring stellen om mogelijk nadelige effecten van hogere injectietemperatuur en het warmteoverschot beter in kaart te brengen en, indien noodzakelijk, te mitigeren.

De aandachtspunten vanuit vergunningverlening voor HTO-systemen tot 500 m diepte zijn:

- A) De aanwezigheid van omgevingsbelangen in de ondergrond nabij de HTO.
- B) De (onzekerheid over) effecten die optreden in de ondergrond door toepassing van HTO.
- C) Er kunnen strenge voorschriften in de vergunning worden opgenomen, die onzekerheid en/of hoge (monitorings)kosten kunnen meebrengen voor de gebruiker van het systeem.
- D) Het verwachte en gerealiseerde energierendement;
- E) Draagvlak onder omgeving/gebruikers

Ad A) De effecten die de HTO heeft op de ondergrond, en de mogelijke gevolgen die dit heeft voor omgevingsbelangen dienen door het bevoegd gezag te worden afgewogen. Daarbij is de bescherming van drinkwaterproductiesystemen het hoogste belang.

Ad B) De hogere infiltratietemperatuur, het warmteoverschot in de ondergrond en de effecten die dit meebrengt voor de grondwaterkwaliteit zijn belangrijke risico's die de provincie beoordeeld wil zien, voor een vergunning Waterwet verleend kan worden. Echter, sommige effecten, zoals de geochemische effecten op het grondwater, zijn locatie-afhankelijk en niet altijd op voorhand in te schatten wanneer er weinig bodeminformatie beschikbaar is. Net als bij alle open bodemenergiesystemen is het van belang dat er geen/beperkte nadelige gevolgen optreden voor andere belangen en/of voor de intrinsieke waarde van de ondergrond door toepassing van HTO.

Ad C) Wanneer het bevoegd gezag strenge voorschriften opneemt voor de monitoring van het systeem, brengt dat hoge kosten met zich mee voor de gebruiker. Het is wenselijk om duidelijke monitoringsdoelen te stellen en te bespreken op welke manier hier redelijkerwijs aan kan worden voldaan. Wanneer vergunningen voor bepaalde tijd worden verleend, of wanneer er in de vergunning wordt opgenomen dat het bevoegd gezag het systeem te allen tijde kan beëindigen, kan dit leiden tot financiële risico's die voor een initiatiefnemer onacceptabel zijn. Tijdens het vooroverleg kan besproken worden onder welke voorwaarden tegelijkertijd aan de wensen van vergunningverlener en -aanvrager kan worden voldaan.

Ad D) De regels stellen dat er doelmatig gebruik wordt gemaakt van de ondergrond. Gerelateerd daaraan kan een eis worden gesteld m.b.t. het warmteoverschot in de ondergrond, dat direct afhangt van het terugwinrendement van het systeem ('system efficiency' in Hoofdstuk 4). Als een warmteopslag een te laag terugwinrendement heeft, kan het bevoegd gezag oordelen dat er geen doelmatig gebruik wordt gemaakt van de ondergrond.

Ad E) Het maatschappelijk draagvlak bij omwonenden en andere belanghebbenden kan zowel een kans als risico betekenen voor het project. Het is van belang om in een vroeg stadium een volledige stakeholderanalyse uit te voeren, zodat duidelijk is welke partijen belanghebbende kunnen zijn tijdens het realiseren, vergunnen en exploiteren van een HTO-project. Wanneer de verwachte effecten daar reden toe geven, kan er een communicatie- en participatieplan worden opgesteld, zodat in een vroeg stadium mogelijke bezwaren kunnen worden weggenomen. Dit kan de benodigde basis bieden aan het bevoegd gezag om de vergunning (al dan niet) te verlenen, omdat zij de toepassing van warmteopslag (en de bijkomende effecten daarvan) af moet wegen tegen de aanwezige belangen.

Technische en geohydrologische risico's

De belangrijkste risico's van technische aard zijn:

- A) Onzekerheid eigenschappen doelpakket en bovenliggende lagen
- B) Operationele prestaties en integriteit van componenten, met name bronmaterialen en pompen
- C) Integriteit van bronnen

Ad A) Een onzekere factor is de doorlaatbaarheid van het beoogde opslagpakket, leidend tot het risico dat deze te laag is. De doorlatendheid is zeer belangrijk voor de prestatie van het HTO project. Een lage verticale en horizontale doorlatendheid is gunstig voor het thermische rendement (dichtheidsstroming wordt sterk geremd). Een lage doorlatendheid kan er echter ook toe leiden dat het meer kracht kost om het grondwater te onttrekken en te infiltreren. Als de injectiedruk (kracht) te groot wordt kan dit leiden tot onacceptabele gronddrukken. Verder kan een te grote benodigde kracht om te onttrekken leiden tot het extra produceren van zanddeeltjes waardoor het systeem sneller slijt en de injectiebron verstopt. De ontwerpnormen voor WKO-systemen zijn bedoeld om deze nadelige effecten te voorkomen, maar hebben tot gevolg dat bij een lage doorlatendheid het debiet dat kan worden behaald per put ook lager is. Vanwege economische redenen mag de doorlatendheid daarom ook weer niet te laag zijn.

Om de bovengenoemde onzekerheden te ondervangen zijn de volgende oplossingen mogelijk:

- Het aanpassen van de bronconfiguratie- Het dichter bij elkaar plaatsen van de warme en koude bron. Hierdoor worden de drukken verder uitgevlakt. Te dicht bij elkaar plaatsen kan echter leiden tot thermische kortsluiting en verlaging van rendement.
- Het verlagen van het maximale debiet.

De doorlaatbaarheid is afgeleid van informatie van nabijgelegen putten of van regionale informatie. Gezien de natuurlijke variatie blijft er daarom sprake van onzekerheid in de inschatting van deze essentiële informatie.

Datzelfde geldt voor de inschatting van de dikte van de bovenliggende kleilagen wat ook van groot belang is voor elke beoogde locatie. Deze kleilagen hebben namelijk sterk invloed op de verwachte temperatuurstijging in bovenliggende lagen. Het risico hier is dat de kleilagen te dun zijn waardoor er a) meer warmteverlies is, dus een lager rendement wordt gehaald, en b) hogere temperaturen worden bereikt in de overliggende pakketten.

De belangrijkste mitigatiemaatregel is het uitvoeren van een proefboring en capaciteitstest. Hiermee kunnen de eigenschappen van het doelpakket en die van bovenliggende lagen beter worden gekarakteriseerd, zodat de performance van de HTO en de mogelijke effecten op bovenliggende lagen in meer detail kunnen worden berekend.

Ad B en C) Een proces dat de operationele prestaties van de HTO kan beïnvloeden is scaling (met name carbonaatneerslag) en/of kleizwelling leidend tot de verstopping van de bron. Het risico is dat hierdoor de productie/injectie van water lager is dan verwacht. De geochemie van het doelpakket en de temperaturen in de operationele fase van de HTO zijn belangrijke parameters die de scaling en verstopping kunnen voorspellen. Afhankelijk van de gekozen opslagtemperatuur en de watersamenstelling in het gebruikte watervoerende pakket kan waterbehandeling nodig zijn, in combinatie met een goed monitoringssysteem. Materiaalkeuze is hier ook een belangrijke mitigatiemaatregel om problemen met scaling en kleizwelling te voorkomen.

Een algemeen risico is dat een verkeerde materiaalkeuze leidt tot een suboptimale operatie van de HTO. Hier zal dan ook uitgebreid aandacht aan moeten worden besteed in de ontwerpfase. Ook

hier is het temperatuurniveau van de opgeslagen een belangrijke randvoorwaarde. Bij lage opslagtemperaturen (45 °C) kan nog gewerkt worden met standaard materialen die gebruikelijk zijn bij “lage temperatuur WKO-systemen”. Als de opslagtemperaturen verder oplopen, moet worden overgeschakeld op andere materialen, die bestand zijn tegen de hogere temperaturen. Belangrijke componenten in het ontwerp van de HTO zijn de pompen. Ook voor de keuze van de pompen geldt dat een verkeerde keuze kan leiden tot een suboptimale operatie. De meest waarschijnlijke keuze voor een pompsysteem is een submersible pump (ESP). Het ontwerp en configuratie voor de pompinstallatie is van groot belang voor de continuïteit van de operatie van de HTO en verdient dus extra aandacht in de ontwerpfase. Het vervangen van een pomp tijdens operationele fase is een kostbare en tijdrovende situatie. Redundantie in het ontwerp (bijvoorbeeld door capaciteit middels meerdere injectie en productiebronnen), O&M planning en monitoring van de pompen tijdens operationele fase zijn belangrijke mitigatiemaatregelen.

Het optreden van erosie en corrosie zijn belangrijke faalfactoren voor geothermische systemen, zo mogelijk ook voor HTO. Het risico is dat deze processen leiden tot beschadigde of falende apparatuur in het totale systeem waardoor de productie/injectie stil komt te liggen of de gezondheid, veiligheid, of milieu in gevaar brengt. In de geothermie zijn er verhoogde corrosierisico's door de combinatie van het gebruik van koolstofstalen casings met zout water. Bij de HTO projecten uit het verleden is voor de casings gebruik gemaakt van Glasvezelversterkt Kunststof en is daardoor geen sprake van een risico op corrosie van de casings. Wel is er in het ontwerp aandacht nodig voor corrosierisico's voor andere componenten in het systeem. De hoge temperaturen en het toevoegen van zuur ten behoeve van de waterbehandeling zijn hierbij risico verhogende factoren.

Een kwalitatieve analyse van de mogelijke risico's van bronfalen (verlies bronintegriteit) is reeds onderzocht in eerdere haalbaarheidsstudies (TNO, 2016) en omvat de belangrijkste faalscenario's voor de bronnen in de HTO: interne en externe corrosie; materiaalstress; en productiefouten van de bron(materialen). Deze scenario's kunnen in theorie lekkage van formatiewater uit de reservoirs in bovenliggende watervoerende pakketten als gevolg hebben. Dit kan vervolgens thermische, chemische en microbiologische effecten hebben. Er zijn beproefde methoden beschikbaar om bovenstaande faalscenario's en hun mogelijke effecten nauwkeurig te identificeren en monitoren. Tenslotte zijn de effecten te corrigeren doormiddel van technische en operationele maatregelen. Tijdens detail engineering van een HTO-project zullen de risico's in meer detail worden uitgewerkt in een HAZID/HAZOP proces (TNO, IF Technology, 2016). Ervaringen en “Lessons Learned” uit de WKO, geothermie en olie en gassector zullen worden toegepast in dit proces.

Samenvattend, de belangrijkste mitigatiemaatregelen voor de genoemde technische risico's zullen zijn:

- Proefboring om in detail eigenschappen van de ondergrond in kaart te brengen
- Toepassing laatste inzichten omtrent materialen, ontwerp en componentenkeuze opgedaan in onderzoeksprogramma's voor (hoge temperatuur) geothermie projecten en olie- en gasprojecten.
- Een HAZID/HAZOP proces is integraal onderdeel van het project om samen met stakeholders de belangrijkste risico's voor milieu, techniek en mensen te identificeren, karakteriseren en mitigeren.
- Specifiek monitoringprogramma

Milieu- en veiligheidsrisico's

HTO-systemen kunnen effecten hebben op de milieuhygiënische toestand van de ondergrondse omgeving waarbinnen ze geïmplementeerd zijn. De hoge temperaturen van een HTO systeem kunnen tot gevolg hebben dat de effecten op de chemie en de microbiologie van het grondwater duidelijk groter zijn dan bij "lage temperatuur" WKO.

De belangrijkste aandachtspunten in de vergunningverlening zijn:

- A) Fysische/chemische eigenschappen van het grondwater
- B) Microbiologie
- C) Grond mechanische effecten
- D) Effecten waterbehandeling op waterkwaliteit
- E) Warmteverlies van de put naar ondiepe lagen
- F) Lekkage van boorvloeistoffen of radioactieve vloeistoffen voor loggingsdoeleinden
- G) Lekkage van reservoir water naar ondiepe lagen

Ad A) De toename in temperatuur van de ondergrond, die komt kijken bij opslag van warmte in de ondergrond op hoge temperatuur, kan tot verandering in de samenstelling van het grondwater leiden. Wanneer er andere grondwatergebruikers binnen het invloedsgebied van de warmteopslag gelegen zijn, kunnen deze nadelig beïnvloed worden. Op basis van mogelijke nadelige beïnvloeding van andere grondwatersystemen kan het bevoegd gezag weigeren om een vergunning Waterwet af te geven voor het warmteopslagsysteem.

Ad B) Ook de samenstelling van de microbiologische populatie in de ondergrond is temperatuurgevoelig. Vanuit milieutechnische hoek is het van belang om het grondwater, dat van nature anaeroob (zuurstofloos) is, ook anaeroob te houden, zodat pathogene microben geen kans krijgen. Een technisch risico m.b.t. microbiologie is de kans op productie van waterstofsulfidegas, dat door sulfaatreducerende bacteriën kan worden geproduceerd wanneer er voldoende voedingsstoffen en sulfaat aanwezig zijn in het grondwater.

Ad C) Grondmechanische effecten treden op door de stijghoogteveranderingen van een open bodemenergiesysteem. Bij een warmteopslag komt daar een aanvullend effect van de opwarming van de ondergrond bij.

Ad D) Voor opslag van warmte met een temperatuur hoger dan 45 °C is vermoedelijk zuurdosering nodig om verstopping van de putten door kalkneerslag te voorkomen. Wanneer waterstofchloride (HCl) wordt gedoseerd, kan lokaal de chlorideconcentratie toenemen.

Ad E) De stijgbuis van de warmteopslag warmt op wanneer er warm water doorheen stroomt. Naar verwachting treedt er enige opwarming van de directe omgeving van de stijgbuis op.

Ad F), G) Een eerder uitgevoerde haalbaarheidsstudie voor een HTO-project liet een kwalitatieve analyse van de mogelijke risico's van putfalen zien. Deze omvatte de belangrijkste faalscenario's voor de bronnen in de HTO: Interne en externe corrosie; materiaalstress; en productiefouten. Deze scenario's kunnen lekkage van formatiewater in bovenliggende watervoerende pakketten als gevolg hebben. Dit kan vervolgens thermische, chemische en microbiologische effecten hebben. Er zijn beproefde methoden beschikbaar om bovenstaande faalscenario's en hun mogelijke effecten te monitoren. Tenslotte zijn de effecten te corrigeren doormiddel van technische en operationele maatregelen. Mochten er milieueffecten optreden dan lijken deze niet onomkeerbaar.

Organisatorische risico's

A. Ontbreken of onvoldoende commitment stakeholders

B. Inpassing systeem lastig of niet mogelijk

Ad A) HTO is een techniek die nog in een ontwikkelfase zit. Dit zorgt voor onzekerheid over hoe het systeem in de praktijk gaat functioneren, terwijl er wel een forse investering gedaan moet worden om het systeem te realiseren. Wanneer stakeholders onvoldoende vertrouwen hebben in een succesvol project, bestaat het risico dat het project voortijdig wordt stop gezet. Het is van belang om regelmatig een update uit te voeren van zowel de business case als risico-analyse, zodat in een zo vroeg mogelijk stadium bijgestuurd kan worden op een positief resultaat.

Ad B) In veel gevallen zullen bronnen en leidingwerk niet op het eigen terrein geplaatst kunnen worden. In dat geval moet gekeken worden of bronnen op grond van derden gerealiseerd kan worden, of dat grond aangekocht kan worden. Vanuit de WKO-markt is de ervaring dat dit in veel gevallen wel mogelijk is, maar dat dit het project welk kan vertragen. HTO systemen hebben een grotere omvang nodig dan een gemiddeld WKO-systeem, en hebben daardoor vaak meer bronnen, waardoor de complexiteit van het vinden van geschikte boorlocaties verder toeneemt. Reeds in een vroeg stadium van het onderzoek dient gezocht te worden naar de meest optimale locatie voor de HTO. Dit is een samenspel van bestaande infrastructuur, ligging van bronnen en bovengrondse situatie.

**Eindredactie van dit
deelrapport door KWR**

Adres
Groningenhaven 7

Postadres
Postbus 1072
3430 BB Nieuwegein