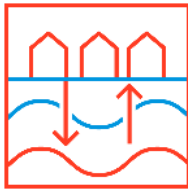


**WINDOW** *fase 1*



# Verkenning HTO

**Den Haag HAL**

**door**

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

21 december 2020

# Verkenning HTO Den Haag HAL



Den Haag



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	Jens Arntz Peter Oerlemans	Dorien Dinkelman Willem Jan Zaadnoordijk Mariëlle Koenen	Johan Valstar	Stijn Beernink Gilian Schout
Kwaliteitsborging	Rob Kleinlugtenbelt	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 2020.0139

Keywords  
Ondergrondse warmteopslag,

Jaar van publicatie  
2020

Meer informatie  
Marette Zwamborn  
E [marette.zwamborn@kwrwater.nl](mailto:marette.zwamborn@kwrwater.nl)

Rob Kleinlugtenbelt  
E [R.Kleinlugtenbelt@iftechnology.nl](mailto:R.Kleinlugtenbelt@iftechnology.nl)

December 2020 ©

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veelevoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevens bestand, 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><b>WINDOW fase 1</b> Verkenning ondergrondse warmteopslag Den Haag HAL</p>	Beoordeling (zie toelichting)																
<p><b>Over deze verkenning (hoofdstuk 1)</b> In het onderzoeksprogramma WINDOW zijn op zes locaties verkenningen uitgevoerd naar de haalbaarheid van ondergrondse warmteopslag (Hoge Temperatuur Opslag - HTO). De locatie Den Haag HAL is één van de locaties waar een verkenning is uitgevoerd. Met deze verkenning is de potentie van seizoensopslag in het warmtenet van Eneco onderzocht. Daarnaast dient deze verkenning ook als vergelijking met de andere verkenningen binnen WINDOW vanuit de gedachte 'learning-by-doing'. 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><b>Geohydrologie (hoofdstuk 2)</b></p> <table border="0"> <tr> <td>Geschikte bodemlaag:</td> <td>Formatie van Maassluis z2+3+4</td> <td>Oosterhout z2</td> <td style="background-color: #90EE90;">1</td> </tr> <tr> <td>Diepte opslag:</td> <td>120-242 m-mv</td> <td>330-348 m-mv</td> <td style="background-color: #FF0000;">a</td> </tr> <tr> <td>Bodemtemperatuur opslagdiepte:</td> <td>13 à 15°C</td> <td>17,5°C</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Proefboring:</td> <td colspan="3">Aangeraden (gemiddelde onzekerheid ondergrond)</td> </tr> </table>	Geschikte bodemlaag:	Formatie van Maassluis z2+3+4	Oosterhout z2	1	Diepte opslag:	120-242 m-mv	330-348 m-mv	a	Bodemtemperatuur opslagdiepte:	13 à 15°C	17,5°C		Proefboring:	Aangeraden (gemiddelde onzekerheid ondergrond)			
Geschikte bodemlaag:	Formatie van Maassluis z2+3+4	Oosterhout z2	1														
Diepte opslag:	120-242 m-mv	330-348 m-mv	a														
Bodemtemperatuur opslagdiepte:	13 à 15°C	17,5°C															
Proefboring:	Aangeraden (gemiddelde onzekerheid ondergrond)																
<p><b>Uitgewerkt systeemconcept (hoofdstuk 3)</b> Het systeemconcept is hier op schematische wijze weergegeven, ten behoeve van overzicht in één oogopslag en voor vergelijking van de verkenningen onderling. Hieronder staat 'variant 6' weergegeven. De detail opzet, nuanceringen en alternatieven staan beschreven in de verkenning.</p>	2 3 b c																

<b>Thermisch opslagrendement (hoofdstuk 4)</b>		
Systeemefficiëntie in jaar 2	47% (16 TJ warmte uit HTO)	
Systeemefficiëntie in jaar 10	64% (22 TJ warmte uit HTO)	
Systeemefficiëntie in jaar 50	74% (25 TJ warmte uit HTO)	
<b>Business case (hoofdstuk 4)</b>		
Investering	6,3 M€ = 3,9 M€/MW <sub>t</sub> (bij gemiddeld vermogen 1,6 MW <sub>t</sub> )	<b>c</b>
Investering bronnen	2,4 M€ 38%	
Investering warmtepomp	1,3 M€ 21%	
Investering overig	2,6 M€ 41%	
Operationele kosten	0,30 M€/jaar	
Kosten opgeslagen warmte	0,00 M€ 0%	
Kosten elektriciteit	0,09 M€ 30%	
Kosten overig	0,21 M€ 70%	
Kostprijs geleverde warmte	27,9 €/GJ	
Kostprijs geladen warmte	0,0 €/GJ	
Referentie: kostprijs warmte gasketel 12 €/GJ		
<b>CO<sub>2</sub> emissie (hoofdstuk 4)</b>		
CO <sub>2</sub> emissie in periode van 30 jaar	30,4 kg CO <sub>2</sub> /GJ	
CO <sub>2</sub> emissie warmte laden	13,9 kg CO <sub>2</sub> /GJ	
CO <sub>2</sub> emissie warmte leveren	16,5 kg CO <sub>2</sub> /GJ	
Referentie: emissie warmtelevering gasketel 62 kg CO <sub>2</sub> /GJ		
Referentie: in 2030 doelstelling warmtenetten 18,9 kg CO <sub>2</sub> /GJ		
Opmerking: gerekend met huidig kental voor elektriciteit 0,34 kg CO <sub>2</sub> /kWh (bron NTA 8800)		
<b>Thermische effecten (hoofdstuk 5)</b>		
Thermische straal warmteopslag:	74 meter	
Horizontale warmte uitstraling: (25°C contour vanaf de bron)	na 50 jaar op circa 125 of 150 meter vanaf de bron	
Verticale warmte uitstraling: (25°C contour diepte)	na 50 jaar op circa 80 m-mv of op circa 270 m-mv (bronnen in F. van Maassluis of F. van Oosterhout)	
<b>Juridische haalbaarheid (hoofdstuk 5)</b>		
Provinciaal beleid	toepassing HTO niet strijdig met beleid	<b>4</b>
Zoet of zout grondwater:	zout grondwater	
Stakeholders ondergrond:	in de omgeving van de opslag zijn er veel belangen in de omgeving	<b>d</b>
Inpassing bronnen:	het beoogde gebied heeft een hoge stedelijkheid, inpassing van de bronnen is complex	<b>d</b>

<b>Beoordeling: positieve aspecten, nadelen en risico analyse (hoofdstuk 6 en 7)</b>		
Positieve aspecten van deze locatie voor toepassing HTO:		
1	Formatie van Maassluis wordt geschikt geacht voor HTO, relatief kleine onzekerheid	
2	De geothermiebron is aanwezig, waardoor de beschikbaarheid van duurzame warmte zeker is.	
3	Het warmtenet draait op een relatief lage temperatuur (73°C). Dit is gunstig voor het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp.	
4	Risico's met betrekking tot de vergunbaarheid in het kader van de Waterwet worden klein ingeschat.	
Nadelen van deze locatie voor toepassing HTO:		
a	Formatie van Oosterhout heeft grote onzekerheid over de opbouw ondergrond. Hoewel toepassing in deze formatie waarschijnlijk gunstiger is dan Maassluis (vanwege hoge opslagrendement), is de onzekerheid over de efficiëntie bronnen en businesscase wel groter. Een proefboring kan uitsluitsel geven.	
b	Een groot deel van de beoogde warmtevraag is nog niet gerealiseerd. Dit verhoogt het risico op vertraging van het project.	
c	De omvang van het HTO-systeem is relatief klein. Hierdoor liggen de kosten voor warmte vanuit de HTO relatief hoog en is de prijs ook gevoelig voor een schommelingen in omvang.	
d	De locatie ligt in een zeer druk stedelijk gebied. Inpassing van de bronnen is complex vanwege nabijgelegen WKO systemen en een hoge bebouwingsdichtheid. Inpassing zal in het meest gunstige geval meer tijd kosten dan gemiddeld. Vanwege de hoge stedelijkheid weegt de onzekerheid over grond mechanische effecten op deze locatie zwaarder, in verband met hoger risico op schade aan infrastructuur.	
<b>Conclusie (hoofdstuk 7)</b>		
De toepassingsmogelijkheden van HTO op deze locatie kent specifieke beperkingen. De geringe omvang van het systeem resulteert in een hoge warmteprijs. De ligging in druk stedelijk gebied vormt een risico.		
Het WINDOW programma heeft als doel om HTO verder te ontwikkelen tot een bewezen techniek. Op dit moment bestaan er nog (algemene) technische, juridische en financiële onderzoeksvragen voor toepassing van HTO. De specifieke beperkingen op deze locatie zijn wellicht overkomelijk, maar vanwege deze nadelen is deze locatie minder geschikt om binnen het WINDOW programma HTO tot een bewezen techniek te brengen.		

**Beschouwde varianten:**

Voor de locatie HAL zijn zes varianten beschouwd, variant 6 staat in deze samenvatting.

Vergelijking van varianten 4 t/m 6:

- Varianten 4 en 5 leveren de grootste hoeveelheid warmte, hebben het hoogste thermische rendement, de minste effecten op de ondergrond en het laagste energieverbruik (en dus de hoogste CO2 reductie)
- Variant 6 heeft de laagste investeringskosten en de laagste kostprijs van warmte.

	Formatie HTO	TSA	Hete bron #	Warme bron #	Hete bron °C	Warme bron °C	Geleverde warmte TJ	Thermisch rendement in jaar 10	SPF warmte levering	Investeringskosten M€	Kostprijs warmte €/GJ
variant 1	Maassluis	Enkel	1	1	76	30	24	49%			
variant 2	Maassluis	Dubbel	1	1	74	30	23	48%	2,8	7,6	41,5
variant 3	Maassluis	Enkel	1	1	76	40	14	36%	6,4	3,9	32,9
variant 4	Oosterhout	Enkel	3	4	76	30	36	74%			
variant 5	Oosterhout	Dubbel	2	4	74	30	33	72%	2,9	9,9	37,0
variant 6	Oosterhout	Enkel	3	4	76	40	26	64%	6,6	6,3	27,9

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>9</b>
1.1	Achtergrond	9
1.2	Doelstelling	9
1.3	Studiegebied	10
<b>2</b>	<b>Geologische haalbaarheid</b>	<b>11</b>
2.1	Hydrogeologische analyse	11
<b>3</b>	<b>Uitgangspunten en ontwerp</b>	<b>16</b>
3.1	Energetische uitgangspunten warmte aanbod en vraag	16
3.2	Uitvoeringsvariant HTO	18
3.3	Basisontwerp van de HTO	22
<b>4</b>	<b>Analyse van uitvoeringsvarianten</b>	<b>25</b>
4.1	Thermische berekeningen: temperatuur en efficiëntie	25
4.2	Financiële analyse	27
4.3	CO <sub>2</sub> -besparing	35
<b>5</b>	<b>Milieu hygiënische en juridische aspecten</b>	<b>37</b>
5.1	Grondmechanica: zetting en opheffing	37
5.2	Thermisch effect: temperatuur verhoging ondergrond	37
5.3	Reflectie op mogelijke invloed op de grondwaterkwaliteit op basis van bestaande	41
5.4	Juridisch raamwerk	47
5.5	Omgevingsscan	48
<b>6</b>	<b>Risico inventarisatie en plan van aanpak vervolgstappen</b>	<b>51</b>
6.1	Introductie	51
6.2	Inschatting relevantie van de projectrisico's	51
6.3	Plan van aanpak vervolg	57
<b>7</b>	<b>Conclusies</b>	<b>59</b>
	<b>Referenties</b>	<b>61</b>

<b>Bijlagen</b>	<b>63</b>
Bijlage I. Ontwerpnorm bronnen	63
Bijlage II. Brontechniek	68
Bijlage III. Beschrijving numerieke model SEAWATv4	71
Bijlage IV. Grond mechanische processen	74
Bijlage V. Generieke risico-inventarisatie voor HTO	77



# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

HTO kan een belangrijke schakel zijn in de optimale koppeling van warmtevraag enerzijds en duurzame warmte anderzijds, zo ook voor het warmtenet in Den Haag. In de toekomst zal het net steeds verder verduurzaamd moeten worden. Door warmte van duurzame bronnen in de zomer op te slaan en deze in de winter weer te gebruiken, kunnen duurzame bronnen het hele jaar door zo optimaal mogelijk worden ingezet.

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 de bodem. Bij een opslagtemperatuur van circa 60 - 90°C wordt gesproken van hoge temperatuur. HTO-systemen bestaan uit één of meerdere doubletten met een hete en een lauwe bron. Daarnaast hebben ze twee operatietypes 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 wordt dat tijdelijk opgeslagen in de bodem. Gedurende de winterperiode draait deze operatie om. De aanbieder van warmte en de HTO voeden nu het warmtenet, doordat 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 Eneco, Hydreco Geomec en de gemeente Den Haag een doel met de inpassing van een HTO. Ten tweede speelt deze verkenning een rol in het WINDOW project.

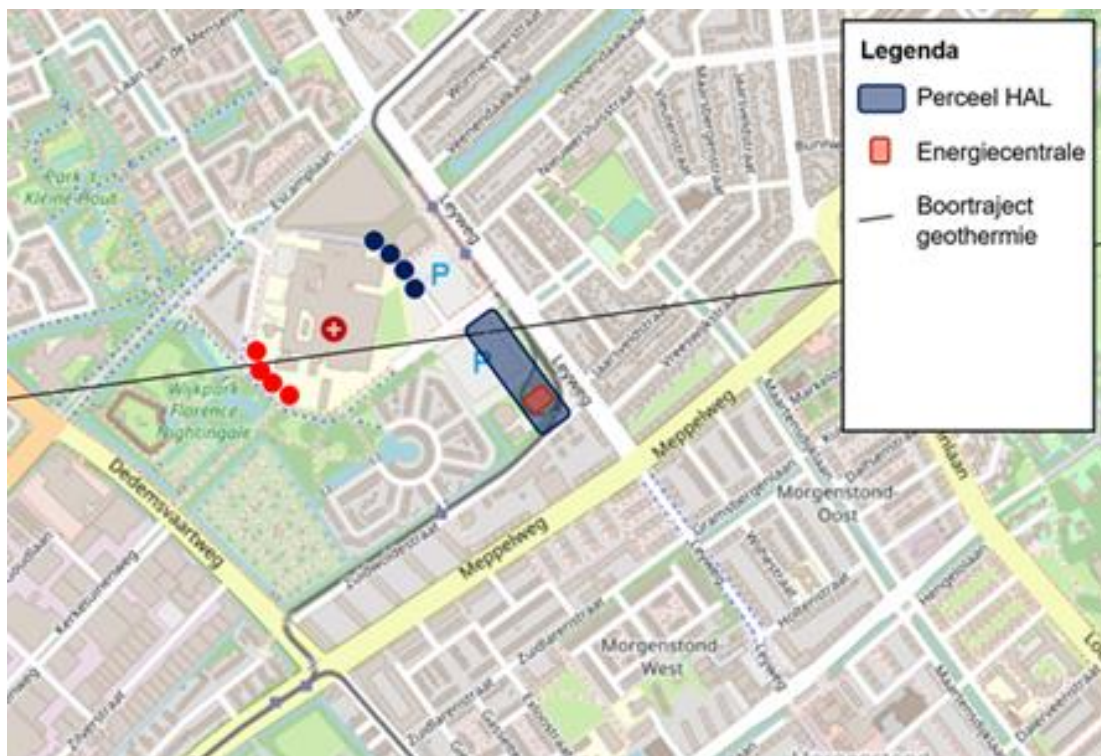
Het primaire doel van een HTO in het leveringsgebied is om de geothermiebron van HAL zo efficiënt mogelijk in te kunnen zetten. Daartoe dient de geothermiebron elk jaar zoveel mogelijk warmte te kunnen leveren. HTO kan hierbij aan bijdragen.

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

Een overzicht van het studiegebied is gegeven in Figuur 1-1. HAL bezit een stuk grond aan de Leyweg ten zuidoosten van het Haga Ziekenhuis. De energiecentrale ligt op het zuidelijk deel van het perceel. HAL heeft één geothermisch doublet, welke geboord zijn vanaf het noordelijk deel van het perceel. Het Haga ziekenhuis heeft een WKO systeem. Hiermee dient rekening te worden gehouden bij het ontwerp van de HTO.



Figuur 1-1 Studiegebied

## 2 Geologische haalbaarheid

### 2.1 Hydrogeologische analyse

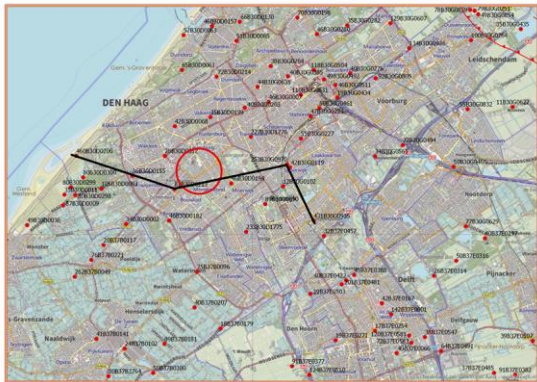
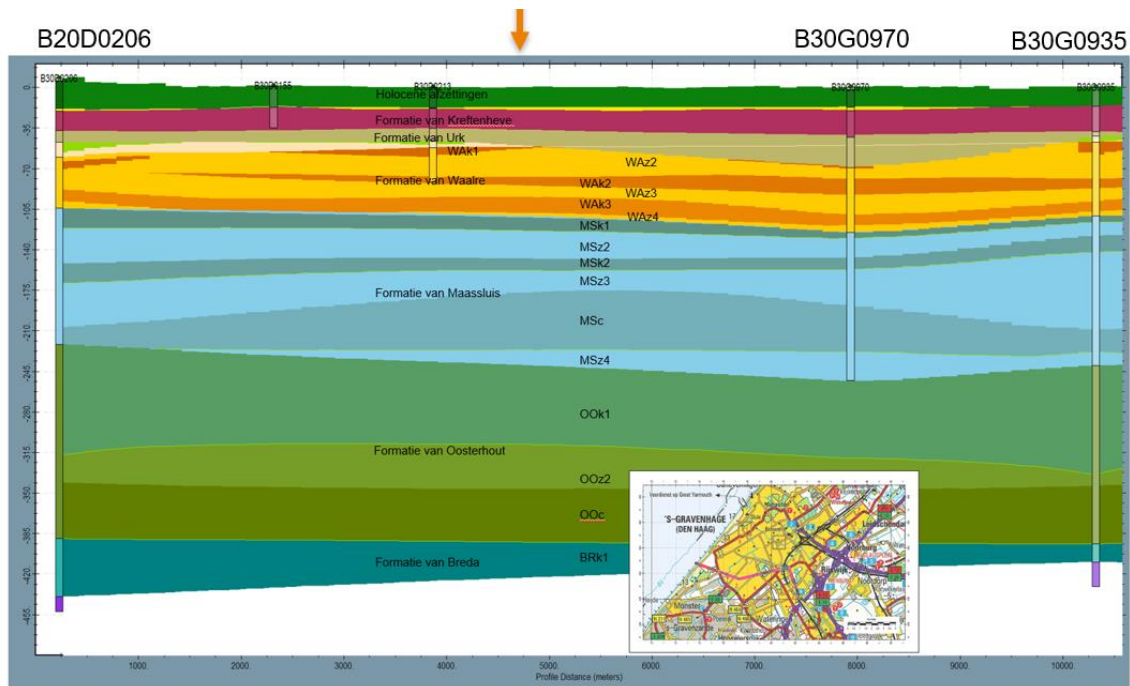
Voor de analyse van de geschiktheid van de ondergrond, is gebruikt gemaakt van de openbare modellen en datasets (DGM/REGIS II v2.2, NLOG, DINO, grondwatertools), aangevuld met boorbeschrijvingen van lokale boringen en/of informatie van open bodemenergiesystemen. TNO en IF Technology hebben deze informatie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

#### 2.1.1 Beschrijving ondergrond

De ondergrond in de omgeving van Den Haag 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. De verwachte geologische eenheden met mogelijk geschikte watervoerende lagen op een diepte tot ~500 m zijn; de Formatie van Waalre, de Formatie van Maassluis en de Formatie van Oosterhout. Tabel 2-1 laat een overzicht van de verwachte hydrogeologische eenheden zien.

De beoogde HTO locatie in Den Haag ligt niet in een grondwaterbeschermingsgebied (i.e. grondwaterbeschermingsgebied, boringsvrijzone, 100-jaarszone, waterwingebied drinkwater, Natura2000). En er zijn geen breuken aanwezig in de nabijheid van de locatie. Rondom Den Haag ligt de brak-zout grens relatief ondiep (~50-80 m NAP).

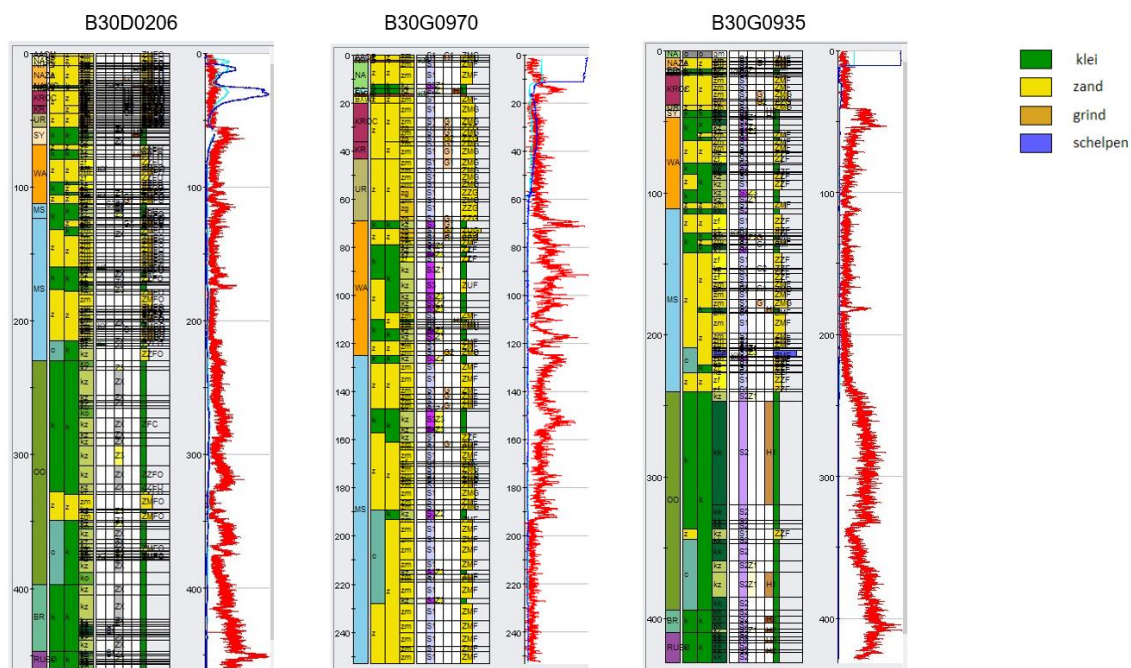
Voor meer gedetailleerd informatie over de ondergrond is gekeken naar boringen in de omgeving. In de DINO database zijn drie diepere boringen in de omgeving bekend (Figuur 2-2). Daarnaast zijn boorstaten van het WKO systeem bij het HagaZiekenhuis aan de Leyweg gebruikt, deze liggen op 100-200 meter van de beoogde HTO locatie en gaan tot max. 250 m diepte, en kunnen hierdoor worden gebruikt voor een inschatting van de eigenschappen van de Formatie van Maassluis. De logs van de geothermie put van HAL (HAG-GT-01 en 02) beginnen op een diepte van ~250 m en bevatten aanvullende informatie over de Formatie van Oosterhout. De logs van de geothermie put van HAL (HAG-GT-02) beginnen op een diepte van ~250 m en bevatten aanvullende informatie over de Formatie van Oosterhout.



Figuur 2-1 Doorsnede (REGIS II v2.2) door het gebied van de beoogde HTO locatie in Den Haag, van west naar oost, incl. locaties van de drie diepere boringen. De rode cirkel op de plattegrond en de oranje pijl in de doorsnede geven de mogelijke HTO locatie 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 Waalre, 2 <sup>e</sup> zandige eenheid	PZWaz2	Watervoerende laag
Fm. van Waalre, 2 <sup>e</sup> kleiige eenheid	WAK2	Scheidende laag
Fm. van Waalre, 3 <sup>e</sup> zandige eenheid	PZWaz3	Watervoerende laag
Fm. van Waalre, 3 <sup>e</sup> kleiige eenheid	WAK3	Scheidende laag
Fm. van Waalre, 4 <sup>e</sup> zandige eenheid	PZWaz4	Dunne watervoerende laag
Fm. van Maassluis, 1 <sup>e</sup> kleiige eenheid	MSk1	Scheidende laag
Fm. van Maassluis, 2 <sup>e</sup> zandige eenheid	MSz2	Watervoerende laag
Fm. van Maassluis, 2 <sup>e</sup> kleiige eenheid	MSk2	Scheidende laag
Fm. van Maassluis, 3 <sup>e</sup> zandige eenheid	MSz3	Watervoerende laag
Fm. van Maassluis, complexe eenheid	MSc	Zowel watervoerende als scheidende lagen mogelijk
Fm. van Maassluis, 4 <sup>e</sup> zandige eenheid	MSz4	Watervoerende laag
Fm. van Oosterhout, 1 <sup>e</sup> kleiige eenheid	OOK1	Scheidende laag
Fm. van Oosterhout, 2 <sup>e</sup> zandige eenheid	OOz2	Watervoerende laag
Fm. van Oosterhout, complexe eenheid	OOc	Zowel watervoerende als scheidende lagen mogelijk



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

Uit de het REGIS II v2.2 model, de drie boringen in de omgeving, de boorstaten van de WKO en de geothermie boring, komen de volgende geologische eenheden naar voren die interessant kunnen zijn voor HTO. Hierbij is gekeken naar een zandige aquifer met afsluitende kleilaag:

- De derde zandige eenheid van de Fm. van Waalre (PZWaz3).
- Drie mogelijk geschikte zandige eenheden (MSz2, MSz3, MSc) in de Formatie van Maassluis, met boven elk zandpakket een afsluitende kleilaag.
- Mogelijk geschikte zandige eenheid (OOz2) in de Formatie van Oosterhout, dikte varieert lateraal sterk, een voldoende dikke kleilaag wordt aanwezig geschat.

### 2.1.2 Nadere analyse potentieel geschikte hydrogeologische eenheden

#### *Formatie van Waalre*

De Formatie van Waalre ligt rondom Den Haag op een diepte van 50-120 m-mv. Er zijn twee tot drie kleilagen aanwezig in de Formatie van Waalre. De tussenliggende zandlagen zijn over het algemeen matig fijn tot zeer grof. De kleilagen zijn vaak sterk zandig tot zwak siltig. De derde zandige eenheid van de Fm. van Waalre (PZWaz3) zou een mogelijk opslagpakket kunnen zijn met een afsluitende kleilaag van voldoende dikte. Wel kan in de grove zanden de buoyancy stroming door injectie van een hoge temperatuur erg groot zijn en zorgen voor warmteverliezen. De brak-zout grens kan op de locatie in het bovenste deel (PZWaz2) van de Fm. van Waalre liggen, waardoor de onderste twee zandige eenheden (PZWaz3 en PZWaz4) geschikter worden geacht dan de bovenste.

#### *Formatie van Maassluis*

De Formatie van Maassluis bestaat uit fijn tot matig grof marine zanden afgewisseld met aaneengesloten kleilagen en de lithologie van de zanden wordt geschikt geacht. De Formatie van Maassluis ligt in Zuid-Holland rond de 100-230 m-mv. Uit de REGIS II v2.2 doorsnede komt naar voren dat de Maassluis zanden lateraal sterk kunnen variëren in dikte en diepte. In de complexe laag van de Formatie van Maassluis

bevindt zich, aan de gamma ray (Figuur 2-2) te zien, ook een mogelijk geschikt zandpakket. In de boring ten oosten van de locatie (B30G0935) zijn schelpen gevonden in de complexe laag, dit lijkt enkel lokaal voor te komen. In het opslag pakket bevindt zich zout water.

De horizontale doorlatendheid van de verschillende zandpakketten wordt op basis van REGIS II v2.2 rond de 5 m/d geschat, echter is bij de WKO boringen bij het HagaZiekenhuis 18 m/d gemeten voor de bovenste lagen, wat het aannemelijk maakt dat de doorlatendheden op de beoogde HTO locatie (100-200 m afstand) ook in deze orde grootte zullen zijn, mits de filters in het gunstige deel van het opslag pakket worden geplaatst. De horizontale doorlatendheid van de verschillende zandpakketten wordt op basis van REGIS II v2.2 rond de 5 m/d geschat, echter is bij de WKO boringen bij het HagaZiekenhuis 18 m/d gemeten voor de bovenste lagen (MSz2 en MSz3), wat het aannemelijk maakt dat de doorlatendheden op de beoogde HTO locatie (100-200 m afstand) ook in deze orde grootte zullen zijn, mits de filters in het gunstige deel van het opslag pakket worden geplaatst. De filterlengte van de WKO boringen bedroeg 69% van de dikte van het opslagpakket in MSz2 en MSz3.

#### Formatie van Oosterhout

De Formatie van Oosterhout bestaat uit overwegend fijne zanden en klei en zandige klei welke zwak tot sterk siltig kunnen zijn. De zanden bevinden zich rondom Den Haag op een diepte van 300-350 m-mv. De Formatie van Oosterhout is in Zuid-Holland over het algemeen vaak kleiig/siltig ontwikkeld, met mogelijkheid op enkele meters zandlaag met fijn zand welke glauconiet (een kleimineraal dat in marine zanden voorkomt) en schelpenresten kunnen bevatten. De dikte varieert lateraal sterk en wordt naar het oosten toe dunner. Boring B30B0206, ten westen van de HTO locatie, laat een zandpakket van ~20m dikte zien, terwijl de boring B30G0935, ten oosten van de HTO locatie, een zeer dun (<5 m) zandpakket laat zien. De gamma ray van de geothermieboring (HAL-GT-02) laat ook een lage gammastraling zien rond 300-310 m-mv, wat kan duiden op een zandlaag, echter kan de aanwezigheid van glauconiet ook zorgen voor een hoge gamma ray en is de zandlaag wellicht wat dikker. De effecten van een HTO systeem op glauconiet, en de gevolgen daarvan voor de HTO, zijn nog relatief onbekend. De kleilaag OOK1 boven de Oosterhout zand lijkt van voldoende dikte (~80-100 m dikte).

### 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. Dit sluit niet uit dat andere watervoerende lagen mogelijk ook geschikt kunnen zijn voor warmteopslag, maar op basis van de beschikbare informatie van de ondergrond is gekozen om deze vier watervoerende lagen mee te nemen in de simulaties.

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	Waarde	Eenheid
Opslagpakket	Name_aq	Maassluis zand 2 + 3 + 4 gecombineerd (MSz2,3,4)	Oosterhout zand 2 (OOz2)	-
Achtergrond temperatuur	T_amb	14	17.5	°C
Dikte opslagpakket	L_storage	54	18	m
Horizontale doorlatendheid (incl. standaarddeviatie REGIS II v2.2 indien van toepassing)	K_h	17	6 (3.2)	m/d
Verticale doorlatendheid <sup>1</sup>	K_v	8.5	3	m/d

<sup>1</sup> Voor de berekening van de kv-waarden is een anisotropie factor van 0.5 gebruikt, gebaseerd op Linden et al. (2002) uit Roelofsen en Goorden (2008).

Uit bovenstaande tabel volgt dat het doorlaatvermogen van de tweede, derde en vierde zandige eenheden van de Formatie van Maassluis vele malen hoger is dan het doorlaatvermogen van de tweede zandige eenheid van de Formatie van Oosterhout. Daardoor zullen bronnen in MSz2,3,4 een veel hogere capaciteit hebben dan bronnen in OOz2. Verder is de dikte van de OOz2 onzeker en de aanwezigheid van glauconiet vormt een risico. Deze laag is toch meegenomen als diepere optie in de modelberekeningen, om het effect van warmteopslag in deze laag te kunnen weergeven. Een bijkomend voordeel van MSz2,3,4 is dat deze eenheden ondieper liggen, waardoor minder diep geboord hoeft te worden. Een combinatie van MSz2,3,4 is daarom het meest geschikt als opslagpakket.

#### 2.1.4 Onzekerheden ondergrond

Op basis van de beschikbare gegevens is een zo goed mogelijke inschatting van de hydrogeologische ondergrond parameters gemaakt. Echter, zoals in de vorige paragrafen al aangegeven, bestaan er onzekerheden wat betreft de ondergrond. De belangrijkste onzekerheden voor de locatie HAL (Den Haag) worden hieronder beschreven;

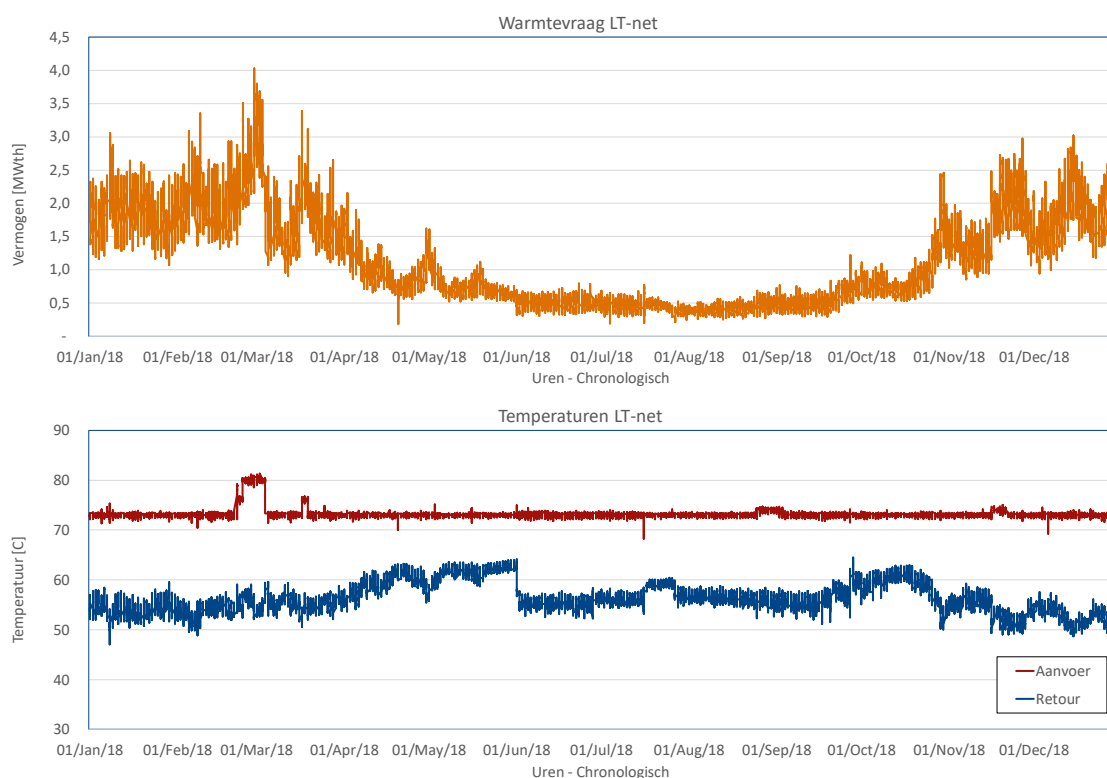
- *Dikte en kh van Fm. van Oosterhout*  
Er is onzekerheid wat betreft de dikte van de zandige eenheid in de Fm. van Oosterhout. De dikte en doorlatendheid van de watervoerende laag zijn onzeker en kunnen enkel worden vastgesteld doormiddel van een proefboring.
- *Aantal meter bronfilter dat naar verwachting kan worden geplaatst*  
Thermische simulaties zijn nu gedaan op basis van de dikte van de watervoerende laag. Echter blijkt uit de praktijk bij het WKO systeem van het HagaZiekenhuis dat ~69% van de watervoerende laag goed genoeg is om een filter in te plaatsen. Deze factor is niet meegenomen in de simulaties, wel in de debiet berekeningen.
- *Doorlatendheid en anisotropie*  
Een onzekere factor is de doorlatendheid van met name de Fm. van Oosterhout. Van de meeste hydrogeologische eenheden is van de doorlatendheid een standaarddeviatie berekend in REGIS II v2.2. De rasters geven voor elke rastercel de modelonzekerheid van de doorlatendheid weer. Dit is uitgedrukt in de standaarddeviatie (in m/d) van de door het model geschatte, meest waarschijnlijke doorlatendheid.  
Anisotropie is conditie van een medium dat niet in alle richtingen dezelfde eigenschappen heeft, in het geval van een watervoerende laag betekent dit dat de horizontale en de verticale doorlatendheid niet identiek zijn. Dit hangt erg af van de lokale(dunne) klei inschakelingen in een watervoerende laag en is daardoor moeilijk te voorspellen. Voor de berekening van de kv van een watervoerende laag is uitgegaan van  $0.5 \times kh$ -waarde (en voor kleiige lagen  $kh = 3 \times kv$ ), echter zijn in andere studies ook hogere anisotropie factoren aangehouden en zit er een grote onzekerheid in deze berekende kv- en kh-waarden.

## 3 Uitgangspunten en ontwerp

### 3.1 Energetische uitgangspunten warmte aanbod en vraag

#### Vraag

Het huidige warmtenet heeft momenteel 700 aangesloten woningen. In de komende jaren zal het aantal aangesloten woningen fors groeien, waardoor ook de warmtevraag fors toe zal nemen. Om de huidige warmtevraag te kunnen bepalen, heeft Eneco informatie aangeleverd over het warmteprofiel. Het warmteprofiel en bijbehorende temperaturen van het jaar 2018 zijn weergegeven in Figuur 3-1.



Figuur 3-1 Boven: warmtevraag van het LT-net in 2018. Onder: aanvoer en retourtemperatuur van het LT net in 2018

Seizoensmatige en dag/nacht fluctuaties zijn duidelijk waarneembaar. Het piekvermogen bedraagt circa 4 MW<sub>th</sub>. Dit komt overeen met circa 5,7 kW<sub>th</sub> per woning, inclusief gelijktijdigheidseffecten. In de zomer ligt het vermogen rond de 0,5 MW<sub>th</sub>. Warmte is dan nodig voor tapwater en het compenseren van warmteverliezen. De totale warmtevraag van het LT net bedroeg in 2018 circa 10.000 MWh (36.000 GJ). Dit komt overeen met circa 14 MWh (51 GJ) per woning. De warmtevraag van de woningen zal lager liggen doordat in het LT-net verliezen optreden. Ingeschat is dat de verliezen rond de 20% liggen. De warmtevraag per woning bedraagt dus circa 40 GJ.

De aanvoertemperatuur is gedurende het jaar nagenoeg constant en ligt gemiddeld op 73°C. In maart stijgt de temperatuur naar circa 80°C. Op hetzelfde moment stijgt ook de warmtevraag. Dit zal een relatief koude periode zijn geweest in 2018. De retourtemperatuur schommelt tussen de 50 en 65°C, waarbij de retourtemperatuur wat lager is bij hogere vermogens. De gemiddelde retourtemperatuur bedraagt 56°C. Het net is in het verleden ontworpen als een 70/40°C netwerk.

Eneco heeft aangegeven dat voor de retourtemperatuur in de zomer gerekend dient te worden met 55°C en in de winter met 50°C.



In Tabel 3-1 is een prognose gegeven van het aantal aangesloten woningen. Om de warmtevraag van de nieuwbouw in te schatten is een warmtevraag per woning van 25 GJ aangehouden. De energieverliezen in het warmtenet zijn ingeschat op 20%. Het piekvermogen is ingeschat door lineair te extrapoleren op basis van de warmtevraag.

Tabel 3-1 Prognose aantal woningen op warmtenet

Jaartal	Aantal woningen	Warmtevraag MT-net [GJ <sub>t</sub> ]	Piekvermogen [MW <sub>t</sub> ]
2019	700	36.000	4,0
2020	1.200	52.000	5,8
2023	2.400	90.000	10,0
2028	4.000	140.000	15,6

### Aanbod

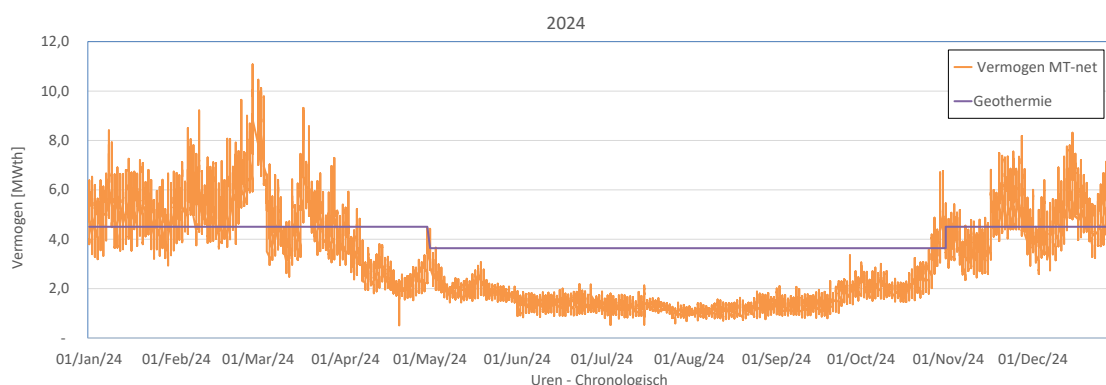
Op de locatie is een geothermiebron aanwezig. Deze heeft een aantal jaren stil gestaan. De bronnen zijn recentelijk schoon gespoeld en zijn gereed om warmte in te voeden op het warmtenet. Een aantal belangrijke eigenschappen van de geothermiebron zijn:

- Onttrekkingstemperatuur: 78°C
- Infiltratietemperatuur: 52/57°C<sup>2</sup>
- Debiet: 165 m<sup>3</sup>/h
- Vermogen: 4,5/3,6 MW<sub>t</sub>

Door de hoge retour temperatuur in het warmtenet is het vermogen van de geothermiebron beperkt.

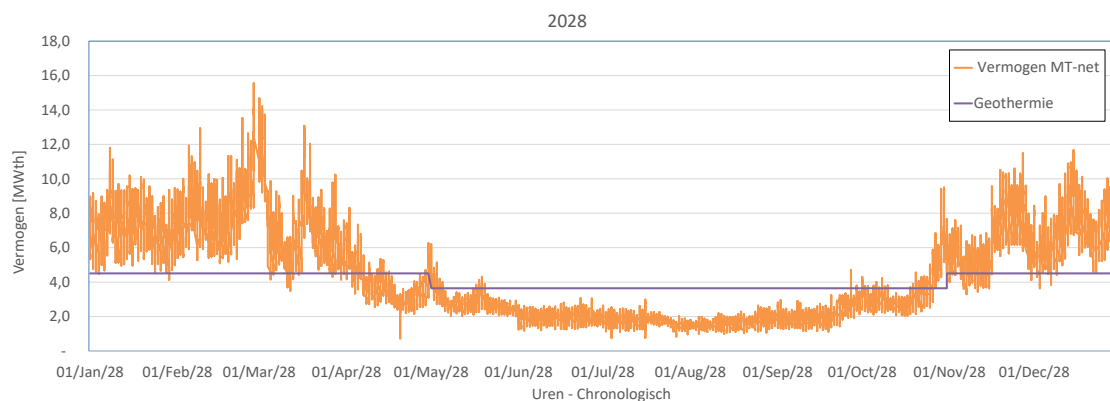
### HTO

Wanneer de planning van het WarmingUP-project wordt gevolgd, kan HTO ongeveer in het jaar 2023 worden gerealiseerd en vanaf 2024 operationeel zijn. Op dat moment is ook de warmtevraag dusdanig groot, dat geothermie niet meer rechtstreeks alle warmte in de winter kan leveren. In deze studie wordt 2024 als startpunt genomen. De warmtevraag neemt toe van 100.000 GJ naar 140.000 GJ in 2028. De warmtevraag in tussenliggende jaren wordt bepaald door middel van lineaire interpolatie. In deze studie is als uitgangspunt genomen dat na 2028 de warmtevraag niet meer verder toeneemt. Op zich is wel de verwachting dat de warmtevraag verder toe zal nemen, maar op dat moment ontstaat er ook ruimte voor een tweede geothermisch doublet en een tweede HTO-systeem. De warmtevraag en geothermisch aanbod in 2024 en 2028 zijn weergegeven in Figuur 3-2 en Figuur 3-3.



Figuur 3-2 Vermogen MT-warmtenet en Geothermie in 2024

<sup>2</sup> Met een retourtemperatuur van 50 of 55°C en een temperatuurverlies van 2°C over de warmtewisselaar wordt de infiltratietemperatuur dan 52 of 57°C.



Figuur 3-3 Vermogen MT-warmtenet en Geothermie in 2028

Kijkende naar bovenstaande figuren, dan kunnen grofweg de volgende perioden worden gedefinieerd:

- Warmte laden in HTO: 1 mei tot en met 31 oktober
- Warmte leveren vanuit HTO: 1 november tot en met 30 april

Hoeveel warmte kan worden opgeslagen en worden geleverd is afhankelijk van het gekozen systeemconcept. Een van de uitgangspunten voor Eneco is daarbij dat de HTO “haar eigen broek” op moet houden. Dit kan op de volgende manieren gerealiseerd worden:

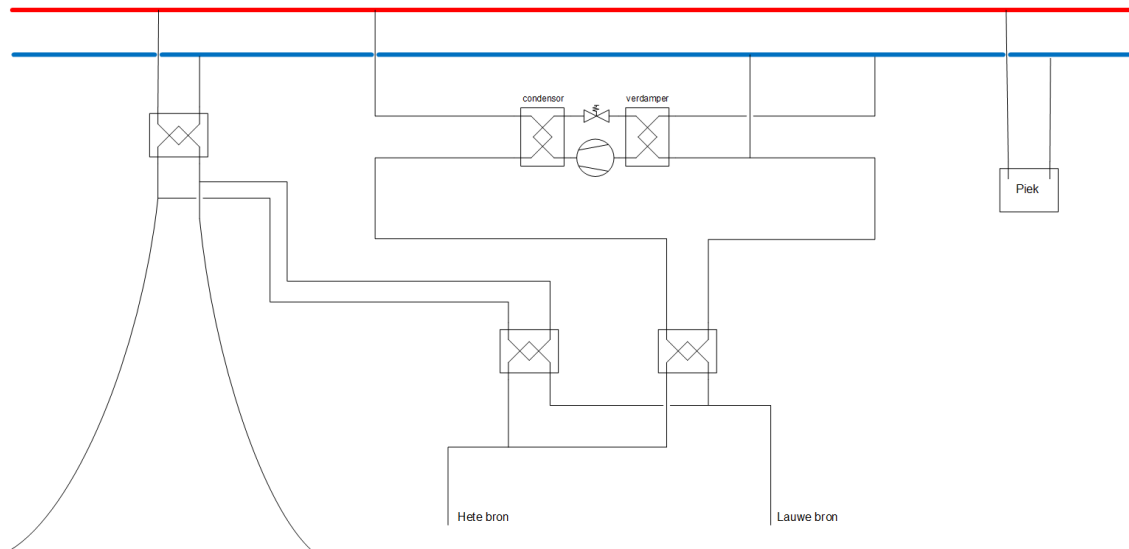
- HTO met bijwarm-ketel (bestaande piekketel)
- HTO met warmtepomp

De eerste variant is in deze studie niet verder uitgewerkt. Tijdens warmtelevering zal de temperatuur van de HTO dalen. Doordat de brontemperatuur relatief laag is en de retourtemperatuur in het warmtenet vrij hoog, zal de bijdrage van de HTO aan de warmtelevering beperkt blijven. In deze studie wordt in meer detail gekeken naar variant 2, waarbij gebruik wordt gemaakt van een warmtepomp.

### 3.2 Uitvoeringsvariant HTO

In de uitvoeringsvariant met warmtepomp wordt deze aan de warmtenet-zijde ingepast. Energetisch is het iets gunstiger om de verdamper 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 verdamper van de warmtepomp in verband met de verwachte saliniteit van het grondwater. De uitvoeringsvariant is weergegeven in Figuur 3-4, inclusief de geothermiebron en de piekvoorziening.

De meeste varianten zijn uitgevoerd met een enkele warmtewisselaars. Eneco geniet de voorkeur om gebruik te maken van dubbele warmtewisselaars om eventuele menging van zout water met het water in het warmtenet te voorkomen. Bij twee van de onderzochte varianten (zie Tabel 3-2) is gebruik gemaakt van dubbele warmtewisselaars. De inpassing hiervan is weergegeven in Bijlage VI. Dit is weergegeven voor de verschillende bedrijfssituaties tijdens laden en ontladen van de HTO. Merk op dat een dubbele warmtewisselaar resulteert in een temperatuurverlies van 4°C (2°C per warmtewisselaar).



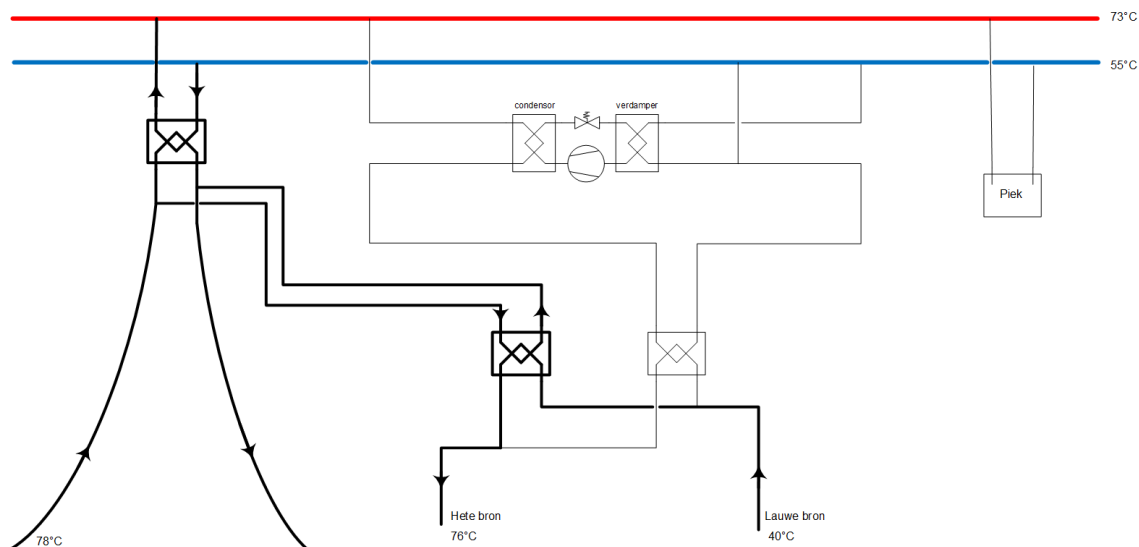
Figuur 3-4: Inpassing HTO HAL met warmtepomp

### COP-warmtepomp

Er is in deze studie uitgegaan van een ammoniak-warmtepomp. Met een ammoniak warmtepomp kan warmte opgewaardeerd worden tot max 85°C (in dit geval is 73°C nodig). 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 verdamper en condensor, en een systeemrendement van 60% rendement (t.o.v. Carnot), bedraagt de COP 4,2 bij een grondwaterinjectietemperatuur van 30°C en 5,2 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

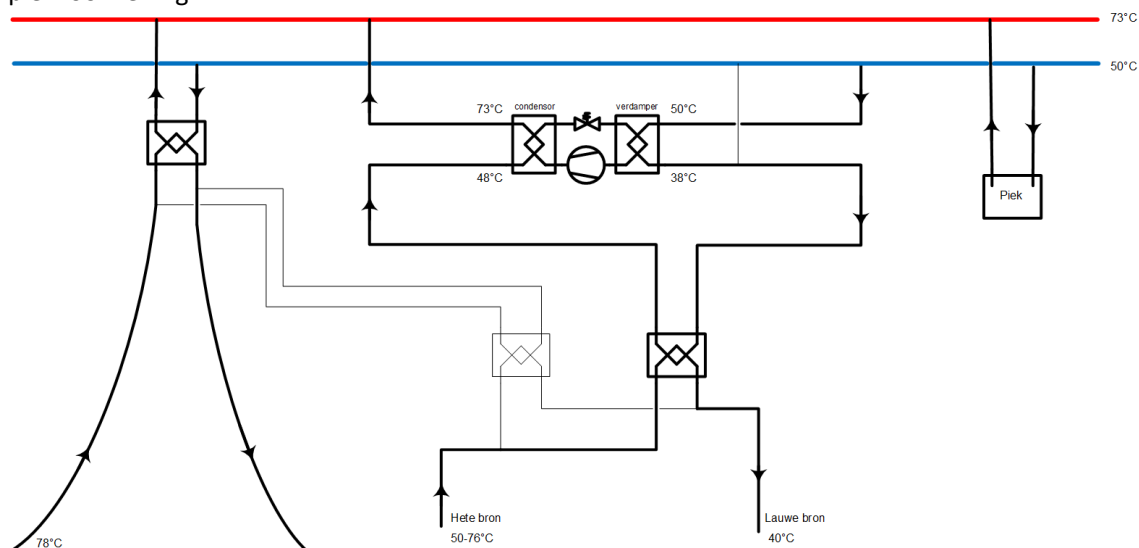
In de zomerperiode wordt de HTO geladen via de geothermiebron. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 3-5. Primair levert de geothermiebron warmte aan het warmtenet. Wanneer er capaciteit over blijft, wordt ook de HTO geladen. Water uit de lauwe bron wordt onttrokken en opgewarmd met warmte uit de geothermiebron. Het opgewarmde grondwater wordt geïnfiltrerd in de hete bron met een temperatuur van 76°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 3-5: Laden HTO

### Ontladen HTO

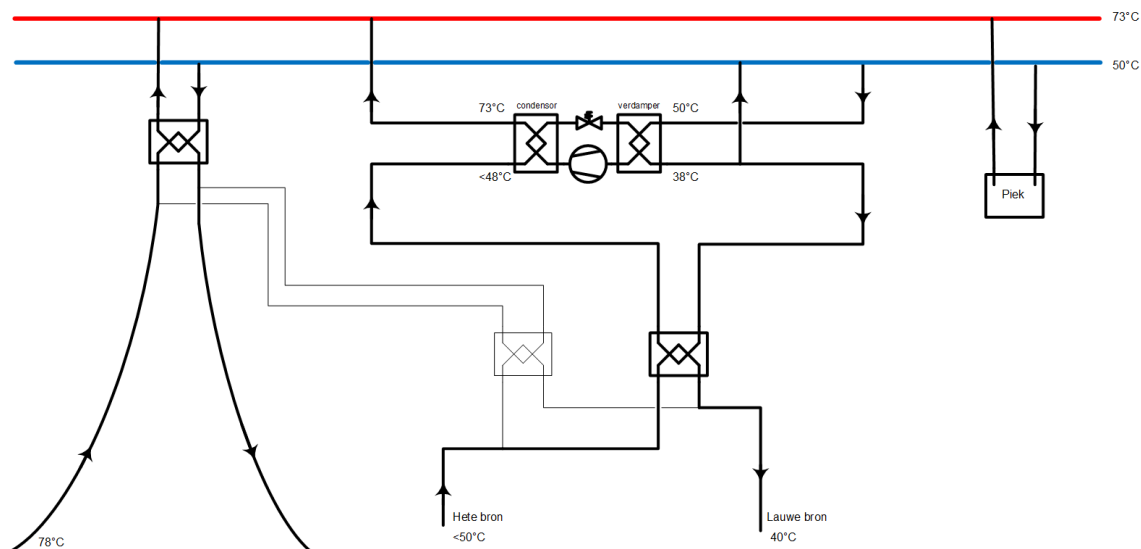
Bij het ontladen van de HTO zijn er twee bedrijfssituaties. Bij de eerste bedrijfssituatie (zie Figuur 3-6) is de HTO nog relatief warm. De geothermiebron levert in de winter zoveel mogelijk de basislast. Aanvullend op de geothermische warmte wordt warmte vanuit de HTO geleverd. Water uit de retourleiding wordt onttrokken. Het retourwater wordt in de verdamer afgekoeld tot 38°C. In de warmtewisselaar wordt warmte van de HTO overgedragen en het water uit de retourleiding. Het water wordt opgewarmd tot 48°C. De reden voor deze specifieke temperatuur is dat al het water uit de verdamer 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 verdamer. In de condensor wordt het water opgewarmd naar 73°C waarna het wordt gevoed op de aanvoerleiding. Mocht er nog een resterende warmtevraag zijn, dan wordt deze ingevuld door een piekvoorziening.



Figuur 3-6: Eerste bedrijfssituatie ontladen HTO

Wanneer de temperatuur van de HTO lager is dan 50°C, kan de gewenste aanvoertemperatuur naar de condensor van 48°C niet meer worden gehaald. In dat geval gaat het ontladen over naar de tweede bedrijfssituatie (zie Figuur 3-7). Met een verder dalende temperatuur van de HTO zal ook de aanvoertemperatuur naar de condensor dalen. Hiermee neemt het temperatuurverschil over de

condensor toe. Het temperatuurverschil over de verdampers daarentegen is constant. Om toch voldoende warmte te kunnen onttrekken, zal het debiet over de verdampers groter moeten zijn dan het debiet over de condensor. Een deel van het debiet over de verdampers wordt terug gevoerd naar de retourleiding. Hierdoor zal de retourleiding worden afgekoeld. Omdat er in deze case gebruik wordt gemaakt van een geothermiebron, is het positief om de retour verder af te koelen. Hierdoor kan de geothermiebron meer warmte leveren die anders toch in de bodem zou worden geïnfilteerd.



Figuur 3-7: Tweede bedrijfssituatie ontladen HTO

### Inzet bronnen en HTO

Voor een aantal varianten zoals weergegeven in Tabel 3-2 is de inzet van de bronnen en de HTO bepaald. Bij twee varianten (2 en 5) is uitgegaan van dubbele warmtewisselaars (voorkeur Eneco). Hierbij speelt er dus een warmteverlies van 4 graden Celsius in totaal over één set dubbele warmtewisselaars.

Tabel 3-2 Onderzochte varianten HAL

Variant	Formatie HTO	Temperatuur lauwe bron [C]	Warmtewisselaartype
Referentie	n.v.t.	n.v.t.	
Variant 1	Maassluis	30	Enkel
Variant 2	Maassluis	30	Dubbel
Variant 3	Maassluis	40	Enkel
Variant 4	Oosterhout	30	Enkel
Variant 5	Oosterhout	30	Dubbel
Variant 6	Oosterhout	40	Enkel

Voor elk van de varianten is bepaald wat de bijdrage is van de geothermie, HTO en piekvoorziening (resterende vraag) aan de warmtevraag van het MT net in 2028. De resultaten hiervan zijn samengevat in Tabel 3-3. 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 Bijdrage geothermie, HTO en piekvoorziening aan warmtevraag MT-net in 2028.

Variant	Geothermie [GJt]	HTO + WP [GJt]	Piek [GJt]
Referentie	91.000	-	49.000
Variant 1	104.000	24.000	12.000
Variant 2	99.000	23.000	18.000
Variant 3	106.000	14.000	20.000
Variant 4	103.000	36.000	1.000
Variant 5	98.000	33.000	9.000
Variant 6	105.000	26.000	9.000

Merk op dat de bijdrage van de HTO+WP uiteindelijk ook deels wordt geleverd door de geothermiebron. De weergegeven hoeveelheden in de kolom geothermie zijn de rechtstreekse bijdrage. Duidelijk is te zien dat de rechtstreekse bijdrage van geothermie bij varianten met HTO toeneemt. Dit is een rechtstreeks gevolg van het verder afkoelen van de retour met behulp van de warmtepomp. In Tabel 3-4 staan een aantal indicatoren die de omvang van de verschillende componenten aangeeft voor de verschillende varianten.

Tabel 3-4 Omvang componenten in verschillende varianten

Variabele	Eenheid	Referentie	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4	Var 5	Var 6
Opslag aquifer	-	-	Maassluis	Maassluis	Maassluis	Oosterhout	Oosterhout	Oosterhout
Opslag temperatuur (hete bron)	°C	-	76	74	76	76	74	76
Opslag temperatuur (lauwe bron)	°C	-	30	30	40	30	30	40
Opslag volume HTO	m <sup>3</sup>	-	162.000	151.000	181.000	165.000	154.000	200.000
Opslag warmte HTO	GJt	-	33.800	30.200	32.500	33.600	29.900	34.100
Maximaal debiet laden	m <sup>3</sup> /h	-	43	43	49	44	44	55
Maximaal debiet leveren	m <sup>3</sup> /h	-	59	59	59	63	63	70
Max. vermogen geothermie	MWt	3,6	5,0	4,6	5,3	4,6	4,3	5,3
Max. vermogen warmtepomp	MWt	-	5,6	6,3	2,3	6,0	6,8	2,5
Max. vermogen piekvoorziening	MWt	11,8	9,3	9,6	9,1	8,6	9,4	8,9
Bedrijfsuren HTO leveren	h		3.731	3.297	3.070	3.371	3.349	3.731
Vollasturen WP	h		1.542	1.413	1.381	2.063	1.871	2.259

### 3.3 Basisontwerp van de HTO

#### 3.3.1 Uitgangspunten

Het globaal principe van hoe de HTO wordt ingepast is reeds weergegeven in Figuur 3-4.

Het ontwerp betreft het grondwatersysteem van de ondergrondse opslag, inclusief warmtepomp en koppeling met het transportnet. De HTO wordt gescheiden van het transportnet door middel van een

warmtewisselaar. De warmtepomp is warmtenetzijdig ingepast. Meer informatie omtrent ontwerpkeuzes, zoals bijvoorbeeld materiaalkeuze en waterbehandeling, is te vinden in Bijlage II.

### 3.3.2 Putontwerp

Uit de ondergrond scan (hoofdstuk 2) blijkt dat er twee formaties aanwezig zijn met watervoerende lagen met potentie voor warmteopslag. De Formatie van Maassluis en de Formatie van Oosterhout. De Formatie van Maassluis bestaat uit 3 watervoerende lagen. Eerdere studies voor WKO hebben laten zien dat de 3 zandige lagen van Maassluis (MSz2, MSz3 en MSz4) gecombineerd kunnen worden. De Formatie van Oosterhout heeft 1 watervoerende laag van voldoende grootte (OOz2). Voor alle varianten zullen simulaties worden gedaan voor A) de Formatie van Maassluis en B) de Formatie van Oosterhout.

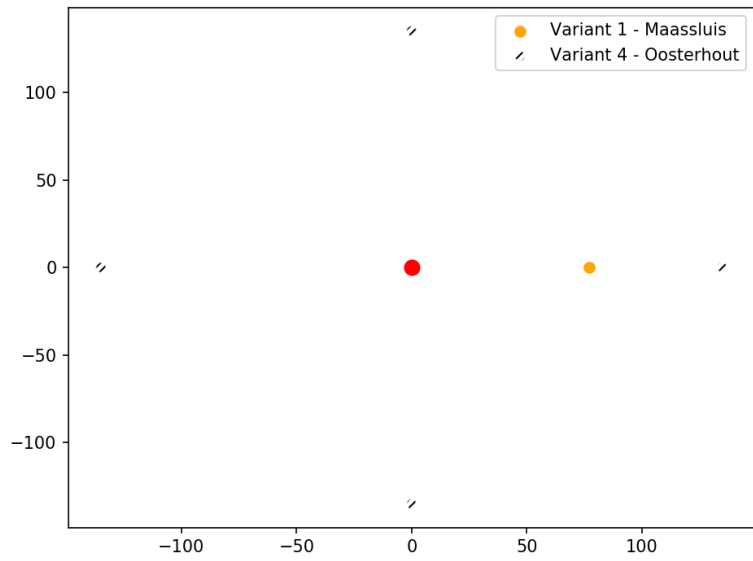
De dikte van de watervoerende pakketten, de horizontale hydraulische doorlatendheid, het benodigde opslag/onttrekkingsvolume en de verwachte onttrekkingstemperatuur bepalen tezamen hoeveel hete en warme bronnen er nodig zijn (meer info rapportage werkpakket C1 en C2), dit is vervolgens weer bepalend 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. De simulaties worden gedaan met de parameterinstellingen in Tabel 3-5.

Tabel 3-5 Gegevens simulaties varianten locatie HAL, beide opslagpakketen (Maassluis MSz2,3,4, Oosterhout OOz2) hebben een ander aantal bronnen nodig.

	T <sub>heet</sub> °C	T <sub>warm</sub> °C	T <sub>cut-off</sub> °C	V <sub>opslag</sub> m <sup>3</sup>	Opslagformatie	L <sub>aquifer</sub> (m)	Thermische straal (R <sub>th</sub> )	Bronnen <sub>heet</sub>	Bronnen <sub>warm</sub>
Variant 1	76	30	32	162.000	Maassluis	54	38.6	1	1
Variant 2	74	30	34	151.000	Maassluis	54	37.3	1	1
Variant 3	76	40	42	181.000	Maassluis	54	40.8	1	1
Variant 4	76	30	32	165.000	Oosterhout	18	67.5	3	4
Variant 5	74	30	34	154.000	Oosterhout	18	65.2	2	4
Variant 6	76	40	42	200.000	Oosterhout	18	74.3	3	4

### 3.3.3 3D putontwerp

De 3D opstelling van de warme putten rondom de hete bronnen zal in eerste instantie worden gedaan volgens de methode getoond in Figuur 3-8. Eerste onderzoeksresultaten laten zien dat een afstand van 2\*thermische straal (R<sub>th</sub>) een gunstige afstand is om de efficiëntie van het systeem als geheel te optimaliseren. Deze afstand wordt 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 dit ontwerp in een later stadium aangepast worden voor de specifieke case (in WINDOW fase 2). Dit wordt in verder detail beschreven in WINDOW rapportage werkpakket C2.



Figuur 3-8 Plaatsing van de warme bron ten opzichte van de hete bron voor variant 1 en variant 4 ( $2 \cdot R_{th}$ ). De afstand tussen de hete en warme bron is kleiner bij variant 1 en 2 omdat de opslagformatie van Maassluis in totaal een grotere dikte heeft, wat leidt tot een kleinere thermische straal.



## 4 Analyse van uitvoeringsvarianten

### 4.1 Thermische berekeningen: temperatuur en efficiëntie

#### 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 modelopzet 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 de temperatuur. Een relatief lage dichtheid van het warme geïnjecteerd water leidt tot een dichtheid verschil met het omringende 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 simulatie 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 het echte warmteopslag systeem gemodelleerd. Om de rekencapaciteit te verlagen wordt er 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 achter (en dus energie) in de hete bron(nen).

#### 4.1.2 Methode efficiëntie berekeningen

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

Voor een bron wordt dit berekend als:

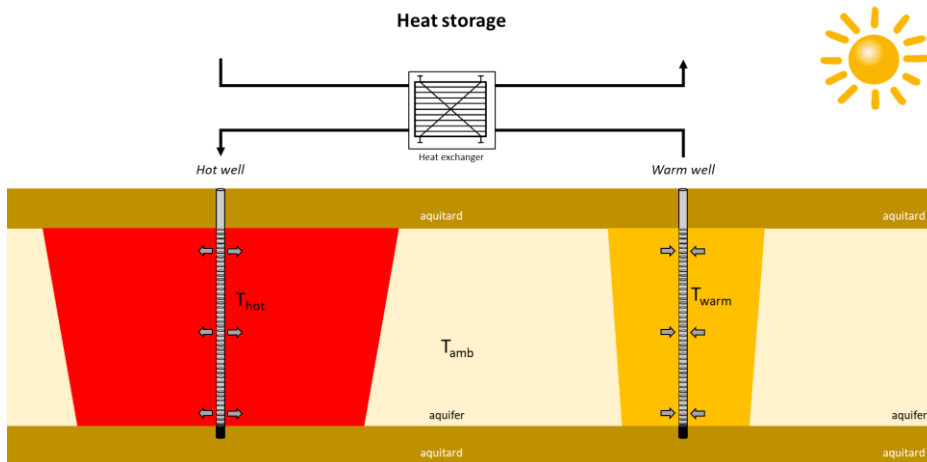
$$\eta_{bron} = \frac{V_{uit} \cdot \Delta T_{uit} \cdot c_w \cdot \rho_w}{V_{in} \cdot \Delta T_{in} \cdot c_w \cdot \rho_w}$$
$$\Delta T = T_{opslag} - T_{ambient}$$

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

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. De systeem efficiëntie wordt als volgt berekend:

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

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

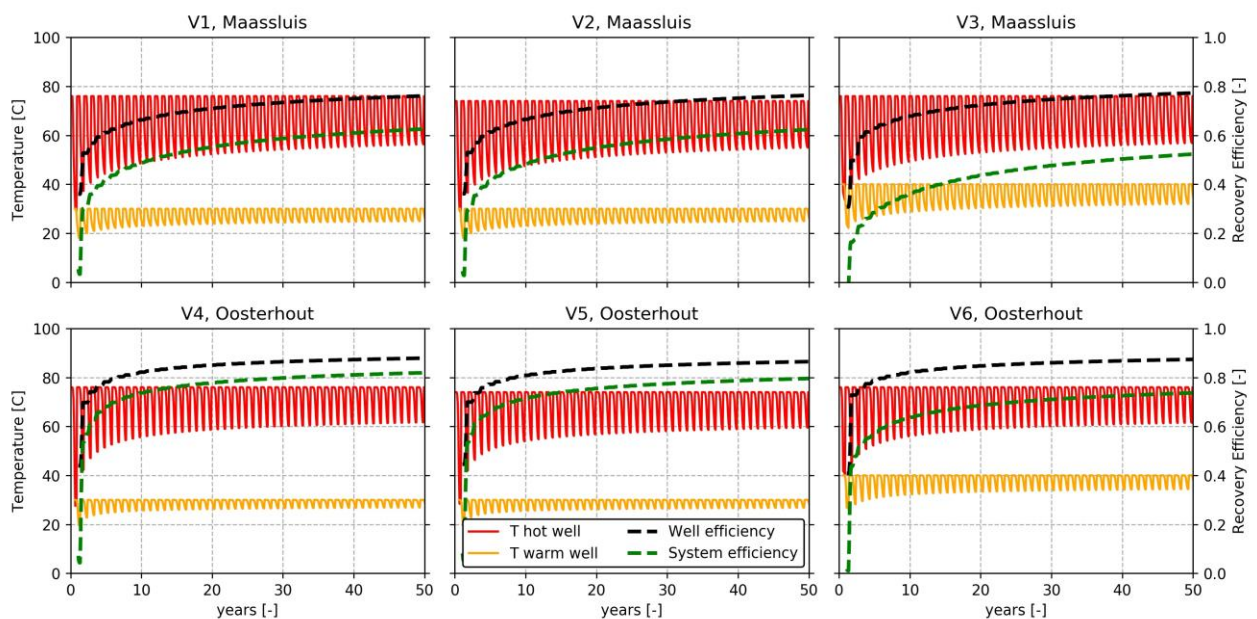


Figuur 4-1 Schematische weergave van een HTO met de temperatuur van de hete bron ( $T_{hot}$ ), warme bron ( $T_{warm}$ ) en de achtergrondtemperatuur ( $T_{amb}$ ).

### 4.1.3 Resultaten

#### Axisymmetrisch – 50 jaar

De zes varianten zijn doorgerekend met een axisymmetrisch model voor 50 jaar (Figuur 4-2). Hieruit blijkt dat A) de tweede zandige eenheid van de Fm. van Oosterhout, OOz2, (variant 4,5 en 6) een betere laag is voor warmteopslag (minder verliezen) en B) het systeemconcept waarbij de retourtemperatuur in de warme bron 30 °C (variant 1,2,4 en 5) het grootste systeemrendement geeft. Variant 4 heeft dus het hoogste systeemrendement (0.74 na 10 jaar, 0.81 na 50 jaar), Tabel 4-1. Echter, het gaat hier om een worst-case benadering, het verwachte systeemrendement bij een meer gedetailleerde analyse is naar verwachting hoger.



Figuur 4-2 Ontwikkeling van de bron temperatuur, jaarlijkse bron efficiëntie en jaarlijkse systeem efficiëntie berekend met het axisymmetrische model voor 50 jaar gebruik van de warmteopslag.

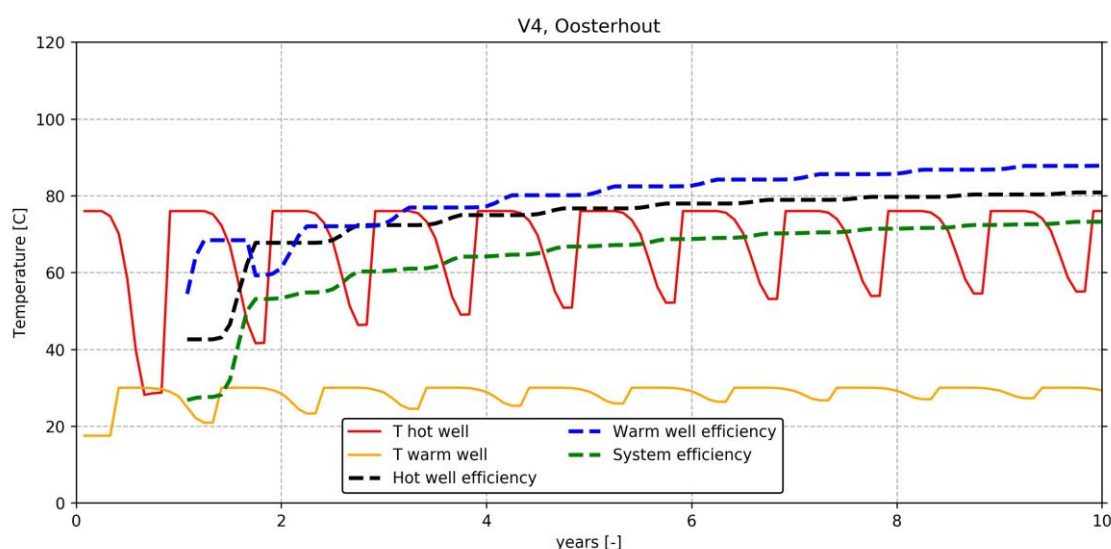
Tabel 4-1 Resultaten axisymmetrische simulaties van de vier varianten

Parameter	Variante 1 - Maassluis	Variante 2 - Maassluis	Variante 3 - Maassluis	Variante 4 - Oosterhout	Variante 5 - Oosterhout	Variante 6 - Oosterhout
<b>Hete bron</b>						
Efficiëntie (2 <sup>e</sup> jaar)	0.52	0.53	0.49	0.70	0.70	0.73
Efficiëntie (10 <sup>e</sup> jaar)	0.66	0.67	0.68	0.82	0.81	0.82
Efficiëntie (50 <sup>e</sup> jaar)	0.76	0.76	0.77	0.88	0.86	0.87
<b>Systeem</b>						
Efficiëntie (2 <sup>e</sup> jaar)	0.31	0.30	0.17	0.55	0.55	0.47
Efficiëntie (10 <sup>e</sup> jaar)	0.49	0.48	0.36	0.74	0.72	0.64
Efficiëntie (50 <sup>e</sup> jaar)	0.63	0.62	0.52	0.82	0.80	0.74

De axisymmetrische simulaties gedaan in dit stadium geven een goed inzicht in de verwachte verschillen tussen opslag lagen en de verschillen tussen de varianten. Echter, het thermische rendement van de bronnen, en dus ook van het systeem als geheel, kan nog beter worden ingeschat d.m.v. een 3D model.

### 3D model – 10 jaar

Er is gekozen om variant 4 door te rekenen met het 3D model omdat deze variant het hoogste systeemrendement heeft. Door de positieve interactie van de hete met de warme bron warmte de warme bron op en stijgt ook het systeemrendement mee (Figuur 4-3). Dit laat zien dat de warme bronnen kunnen profiteren van het verlies uit de hete bron. In een later stadium kan worden gezocht naar de meest optimale afstand tussen de bronnen.



Figuur 4-3 3D model 10 jaar variant 4 (opslag in formatie van Oosterhout).

## 4.2 Financiële analyse

In paragraaf 4.1 zijn berekeningen uitgevoerd voor opslag in de Formatie van Oosterhout en opslag in de Formatie van Maassluis. Het opslagrendement is in de Fm. van Oosterhout hoger. De Fm. van Oosterhout ligt dieper dan de Fm. van Maassluis. Het maximale debiet per bron ligt in de Fm. van Oosterhout lager dan het maximale debiet in de Fm. van Maassluis. Hieruit kan berekend worden dat de CAPEX voor opslag in de Fm. van Maassluis lager zullen zijn dan voor de opslag in de Fm. van Oosterhout. Echter

doordat het opslag rendement in de Fm. van Oosterhout hoger ligt, worden er meerdere varianten meegenomen in beide formaties.

De bovengenoemde argumenten resulteren in de verdere uitwerking van de case in de volgende varianten zoals vermeld in Tabel 6:

- Variant 2: opslag met maximaal 43 m<sup>3</sup>/h, levering met maximaal 59 m<sup>3</sup>/h. Opslag in Fm. Maassluis met opslagtemperatuur in lauwe bron van 30 graden Celsius. Variant maakt gebruik van dubbele warmtewisselaars. Hierbij is één hete en één lauwe bron benodigd.
- Variant 3: opslag met maximaal 49 m<sup>3</sup>/h, levering met maximaal 59 m<sup>3</sup>/h. Opslag in Fm. Maassluis met opslagtemperatuur in lauwe bron van 40 graden Celsius. Variant maakt gebruik van enkele warmtewisselaars. Hierbij is één hete en één lauwe bron benodigd.
- Variant 5: opslag met maximaal 44 m<sup>3</sup>/h, levering met maximaal 63 m<sup>3</sup>/h. Opslag in Fm. Oosterhout met opslagtemperatuur in lauwe bron van 30 graden Celsius. Variant maakt gebruik van dubbele warmtewisselaars. Hierbij zijn drie hete en vier lauwe bronnen benodigd.
- Variant 6: opslag met maximaal 55 m<sup>3</sup>/h, levering met maximaal 70 m<sup>3</sup>/h. Opslag in Fm. Oosterhout met opslagtemperatuur in lauwe bron van 40 graden Celsius. Variant maakt gebruik van enkele warmtewisselaars. Hierbij zijn drie hete en vier lauwe bronnen benodigd.

#### 4.2.1 Investeringskosten

De investeringskosten voor de variant is 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. Deze waarden zijn gebaseerd op projectervaring met ECW waarbij IF Technology betrokken was.

Tabel 4-2 Geraamde investeringskosten HTO varianten

		Variant 2	Variant 3	Variant 5	Variant 6
Proefboring	[€]	180.000	180.000	220.000	220.000
HTO bronnen	[€]	800.000	800.000	2.100.000	2.400.000
Warmtepomp	[€]	3.800.000	1.100.000	4.100.000	1.300.000
WTB/CT/E overig	[€]	900.000	810.000	920.000	820.000
Onvoorzien (10%)	[€]	550.000	270.000	720.000	460.000
Ontwerp/advies/vergunningen (25%)	[€]	1.400.000	700.000	1.800.000	1.100.000
<b>Totaal</b>	<b>[€]</b>	<b>7.630.000</b>	<b>3.860.000</b>	<b>9.850.000</b>	<b>6.300.000</b>

#### 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 en bronpompen. 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, koppeland leidingwerk met het warmtenet, waterbehandeling, stikstofinstallatie en 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 2	Variant 3	Variant 5	Variant 6
Opslag warmte	[€/jaar]	-	-	-	-
Elektriciteitsverbruik	[€/jaar]	188.000	63.000	231.000	91.000
Onderhoud en beheer	[€/jaar]	163.000	106.000	214.000	166.000
Waterbehandeling	[€/jaar]	8.000	9.000	8.000	10.000
Monitoring en BRL inspecties	[€/jaar]	30.000	30.000	30.000	30.000
<b>Totaal</b>	<b>[€/jaar]</b>	<b>389.000</b>	<b>208.000</b>	<b>483.000</b>	<b>297.000</b>

### Opslag warmte

In de zomerperiode is er nog warmte over vanuit de geothermiebron. De marginale kosten zijn door Eneco ingeschat op 3 €/GJ. De uiteindelijke prijs zal echter ook afhangen van eventuele SDE+ subsidie die beschikbaar is wanneer de geothermiebron meer uur kan draaien. Dit kan zelf leiden tot een negatieve prijs. In basis wordt uitgegaan van 'gratis warmte', dus een prijs van €0 per GJ. In de gevoeligheidsanalyse wordt er echter voor de boven- en onderwaarde €3 per GJ en -€3 per GJ meegenomen.

### Elektriciteitsverbruik

De warmtepomp, circulatie- 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 (MWht) die wordt opgeslagen en geleverd uit de HTO, 20 kWh aan elektriciteit nodig is. De SPF voor het ontladen ligt door inzet van de warmtepomp lager. De COP van de warmtepomp is ingeschat op 4,2 (bij lauwe bron van 30°C) en 5,2 (bij lauwe bron van 40 °C, 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 2,8, 6,4, 2,9 en 6,6 voor varianten 2, 3, 5 en 6 respectievelijk. Voor de kosten van elektriciteit is gerekend met een waarde van 65 €/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

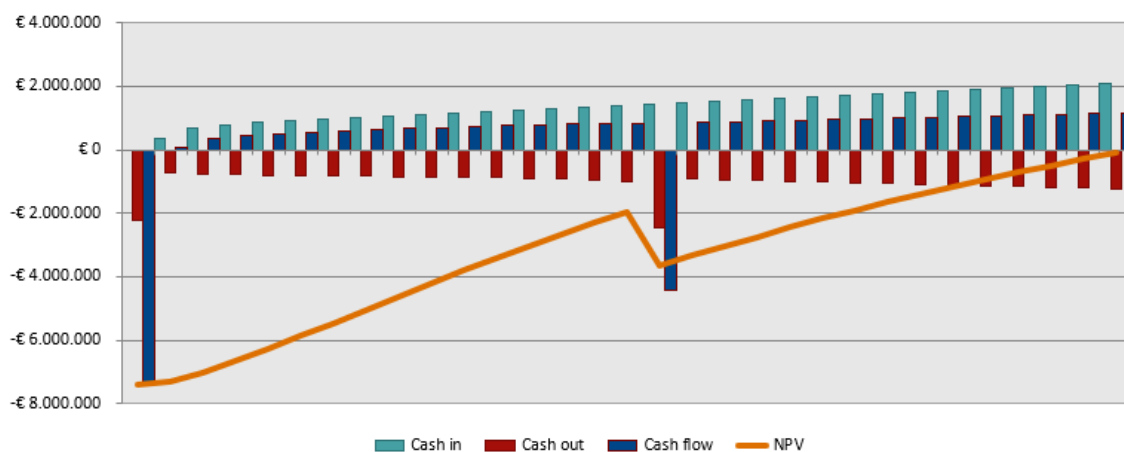
### Aannames

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.

### Business case variant 2

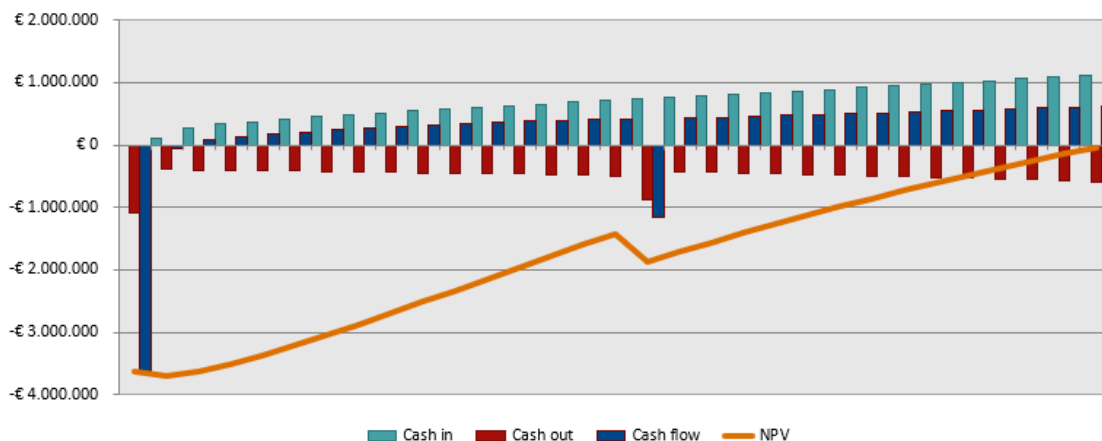
De kasstromen over de projectperiode voor variant 2 zijn weergegeven in Figuur 4-4. In jaar 0 worden alle investeringen gedaan. Na 15 jaar vindt voor een deel van de componenten een herinvestering plaats. De jaarlijkse operationele kosten stijgen jaarlijks als gevolg van de indexatie. De jaarlijkse inkomsten 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 2 de prijs voor warmte 41,5 €/GJ.



Figuur 4-4: Kasstromen variant 2

### Business case variant 3

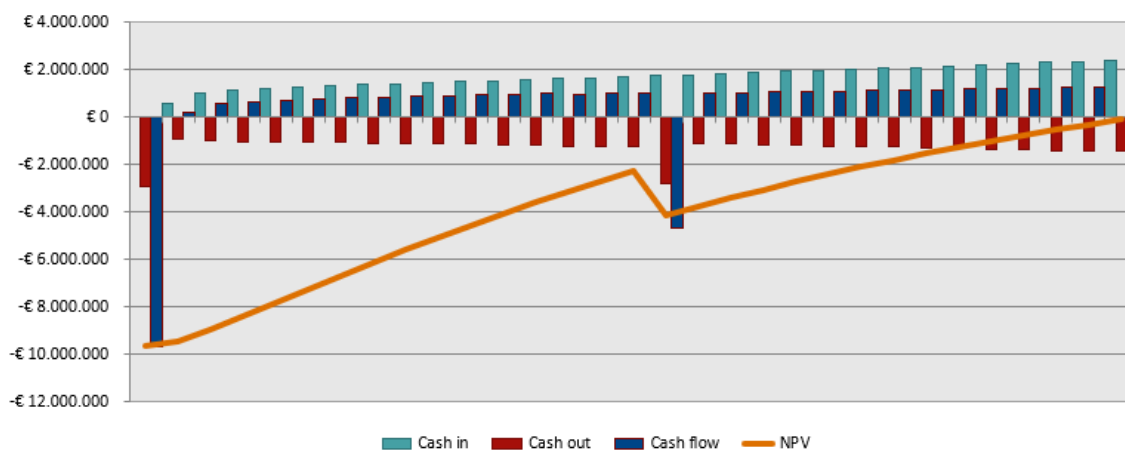
De kasstromen over de projectperiode voor variant 3 zijn weergegeven in Figuur 4-5. Om een projectrendement van 6% te halen over een looptijd van 30 jaar bedraagt voor variant 3 de prijs voor warmte 32,9 €/GJ.



Figuur 4-5: Kasstromen variant 3

### Business case variant 5

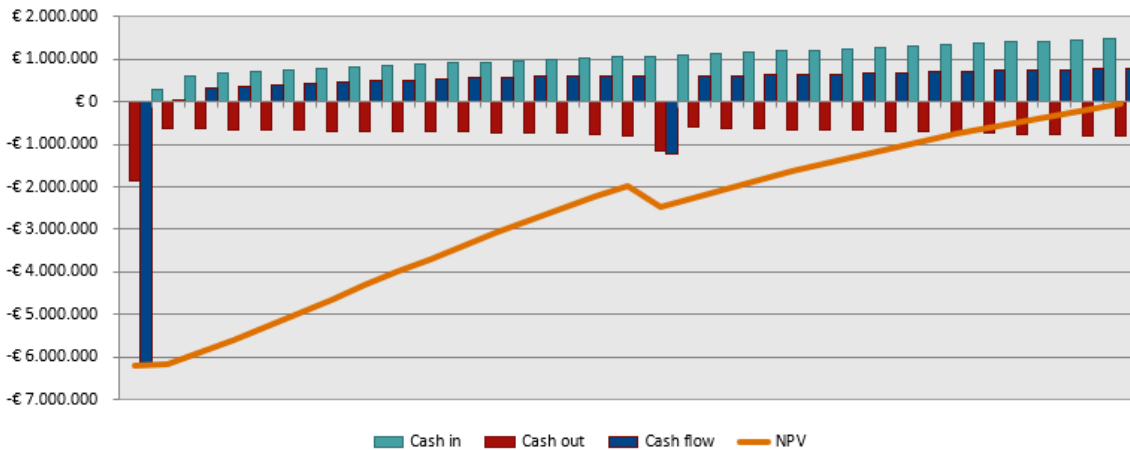
De kasstromen over de projectperiode voor variant 5 zijn weergegeven in Figuur 4-6. Om een projectrendement van 6% te halen over een looptijd van 30 jaar bedraagt voor variant 2 de prijs voor warmte 37,0 €/GJ.



Figuur 4-6: Kasstromen variant 5

### Business case variant 6

De kasstromen over de projectperiode voor variant 5 zijn weergegeven in Figuur 4-7. Om een projectrendement van 6% te halen over een looptijd van 30 jaar bedraagt voor variant 2 de prijs voor warmte 27,9 €/GJ.



Figuur 4-7: Kasstromen variant 6

### Specifieke investeringskosten

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. De specifieke investeringskosten zijn 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. Berekende specifieke investeringskosten warmte-opslag.

Tabel 4-4 Specifieke investeringskosten

		Variant 2	Variant 3	Variant 5	Variant 6
Investeringskosten	[€]	7.630.000	3.860.000	9.850.000	6.300.000
Gemiddeld geleverd vermogen	[MW <sub>t</sub> ]	2,0	1,5	2,3	1,6
<b>Specifieke investeringskosten</b>	<b>[€/MW<sub>t</sub>]</b>	<b>3.820.000</b>	<b>2.570.000</b>	<b>4.280.000</b>	<b>3.940.000</b>

### 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 6, 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.

Tabel 4-5 Gevoeligheidsanalyse investeringssubsidie

		Variant 6	Investeringssubsidie
Subsidie	[€]	0	2.790.000
<b>Prijs warmte</b>	<b>[€/GJ]</b>	<b>27,9</b>	<b>22,3</b>



De vergelijking van de casus met en zonder investeringssubsidie laat zien dat een voornaam gedeelte van de warmteprijs ook ten grondslag ligt aan de voorheen berekende operationele kosten (Tabel 4-5). Een installatie met lage marginale kosten heeft een sterke relatie tussen de investeringskosten en de warmteprijs.

### Projectrendement

Het gewenste projectrendement 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 Tabel 4-6 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.

Tabel 4-6 Gevoeligheidsanalyse Projectrendement

		Onderwaarde	Variant 6 (basis)	Bovenwaarde
Hete bronnen	[-]	3	3	3
Lauwe bronnen	[-]	4	4	4
Projectrendement	[%]	4%	6%	8%
Prijs opslag warmte	[€/GJ]	0	0	0
<b>Prijs warmte</b>	<b>[€/GJ]</b>	<b>23,9</b>	<b>27,9</b>	<b>32,4</b>

### Prijs opgeslagen warmte

Binnen de huidige SDE++-systematiek wordt subsidie verstrekt op warmte die door de geothermiebron 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, door de prijs van warmte te verlagen en te verhogen met 3 €/GJ ten opzichte van de basis (0 €/GJ), Tabel 4-7. Echter blijkt dat de subsidie voor warmte specifiek voor HAL erg hoog kan zijn. Er wordt daarom in de gevoeligheidsanalyse gerekend met een prijs voor de opslag van warmte van -17 €/GJ<sub>t</sub>. Er zit vijftien jaar subsidie op en aangezien het project over circa drie jaar gerealiseerd kan worden, wordt er gerekend met dit bedrag voor de eerste twaalf jaar. Daarna wordt de prijs weer gezet op 0 €/GJ<sub>t</sub>. De onderstaande tabel vergelijkt de basis variant met de hierboven uitgelegde varianten.

Tabel 4-7 Gevoeligheidsanalyse opslag prijs warmte

		Extremum	Onderwaarde	Variant 6 (basis)	Bovenwaarde
Hete bronnen	[-]	3	3	3	3
Lauwe bronnen	[-]	4	4	4	4
Projectrendement	[%]	6%	6%	6%	6%
Prijs opslag warmte	[€/GJ]	-17 (t/m jr 12)	-3	0	3
<b>Prijs warmte</b>	<b>[€/GJ]</b>	<b>17,5</b>	<b>24,3</b>	<b>27,9</b>	<b>31,4</b>

Het verschil in GJ prijs is iets groter dan het verschil in prijs van opgeslagen warmte, doordat een deel van de opgeslagen warmte verloren gaat. Bij de huidige referentie (gasketel) ligt de prijs voor warmte ongeveer rond de 12€/GJ<sub>t</sub>. Uit bovenstaande tabel kan afgeleid worden dat voor de basisvariant dan de

prijs van opgeslagen warmte ver onder de -3 €/GJ<sub>t</sub> dient te zijn. Zelfs bij een prijs van -17 €/GJ<sub>t</sub> gedurende de eerste twaalf jaar, haalt de prijs voor warmte nog lang niet de referentieprijs.

### Hogere onttrekkingsnorm

De NVOE-norm vereist momenteel bij variant 6 drie hete en vier lauwe bronnen. Gezien de relatieve diepe ligging en ervaringen opgedaan binnen Heatstore is de verwachting dat de NVOE-normen opgehoogd zouden kunnen worden, maar onduidelijk is nog hoeveel.

In de gevoeligheidsanalyse is gezocht naar een verhoging van de norm waarmee de prijs iets beter kan concurreren met de referentie (gas, 12€/GJ<sub>t</sub>). Dit is gedaan door de norm in stappen te verhogen en op basis hiervan het aantal hete en lauwe bronnen te verlagen om het benodigde debiet te bereiken. Op basis hiervan is opnieuw de prijs voor geleverde warmte berekend. Alle andere uitgangspunten zijn gelijk aan de basisvariant. Wanneer de prijs concurreert met de referentie, of wanneer het aantal bronnen 2 is (1 hete bron en 1 lauwe bron), wordt gestopt met het verder ophogen van de norm (Tabel 4-8).

Tabel 4-8 Gevoeligheidsanalyse aantal doubletten

		Var 6 – Basis	Var 6 - Minimum
Hete bronnen	[-]	3	1
Lauwe bronnen	[-]	4	1
Projectrendement	[%]	6%	6%
Prijs opslag warmte	[€/GJ]	0	0
<b>Prijs warmte</b>	<b>[€/GJ]</b>	<b>27,9</b>	<b>20,3</b>

Ook met 1 doublet kan de HTO nog niet concurreren met een gasketel. Het verschil met de referentiewaarde is meer dan 50%.

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.

### Herinvestering titanium warmtewisselaar

Er is ook gekeken naar het vervangen van de titanium warmtewisselaars om de tien jaar. Deze kunnen namelijk aangetast worden door het zoute water. De basisvariant is vergeleken met hetzelfde concept enkel nu met een tienjarige levensduur van de titanium warmtewisselaar. Tabel 4-9 geeft de resultaten weer.

Tabel 4-9 Gevoeligheidsanalyse aantal doubletten

		Var 6 – Basis	Var 6 - herinvestering
Levensduur titanium TSA	[-]	30	10
Projectrendement	[%]	6%	6%
Prijs opslag warmte	[€/GJ]	0	0
<b>Prijs warmte</b>	<b>[€/GJ]</b>	<b>27,9</b>	<b>28,4</b>

## 4.2.5 Samenvatting en conclusie

Kijkend naar de geanalyseerde varianten 2, 3, 5 en 6 wordt duidelijk dat zowel Fm. Maassluis en Fm. Oosterhout eventueel geschikt zouden zijn voor de inpassing van een HTO. Echter dient het systeem ook financieel aantrekkelijk te blijven. De onderstaande tabel geeft een samenvatting van de varianten met de benodigde prijs voor warmte om een projectrendement van 6% te halen. In de Fm. Oosterhout zijn er

weliswaar meer bronnen benodigd, echter ligt daar het opslagrendement ook significant hoger dan in de Fm. Maassluis. Uit Tabel 4-10 wordt direct duidelijk dat de huidige varianten niet kunnen concurreren met de referentiewaarde van een gasketel (12€/GJt).

Tabel 4-10 Gevoeligheidsanalyse opslag prijs warmte

		Var 2	Var 3	Var 5	Var 6
Hete bronnen	[-]	1	1	3	3
Lauwe bronnen	[-]	1	1	4	4
Projectrendement	[%]	6%	6%	6%	6%
<b>Prijs warmte</b>	<b>[€/GJ]</b>	<b>41,5</b>	<b>32,9</b>	<b>37,0</b>	<b>27,9</b>

Voor de laatste variant is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor verschillende parameters. Het toevoegen van een investeringssubsidie van 45% op de investeringskosten resulteert in een reductie naar 22,3 €/GJt. Het projectrendement verlagen naar 4% leidt tot een prijs van 23,9 €/GJt. Dit reduceert de benodigde prijs voor warmte dus wel, maar nog lang niet tot de gewenste referentieprijs.

Kijkend naar de prijs voor de opslag van warmte, bestaat er een situatie waar de eerste twaalf jaar een subsidie van 17 €/GJt kan worden ontvangen op de opgeslagen warmte. Daarna zal dit weer gewoon 0 €/GJt zijn tot het einde van de projectperiode. Dit allemaal resulteert in een benodigde prijs voor warmte van 17,5 €/GJt. Dit ligt nog steeds significant boven de referentiewaarde. Het reduceren van het aantal bronnen van drie hete en vier lauwe naar één hete en één lauwe reduceert de prijs naar 20,3 €/GJt.

Dit alles resulteert in de conclusie dat voor HAL het mogelijk is om een HTO te installeren, maar dat er niet geconcurrereerd kan worden met de huidige referentiewaarde van een gasketel. Beide formaties zijn geschikt voor de implementatie van een HTO. Hierbij kan men kijken naar het gewenste aantal bronnen dat geplaatst dient te worden.

### 4.3 CO<sub>2</sub>-besparing

De CO<sub>2</sub>-besparing wordt berekend door de CO<sub>2</sub> uitstoot van de geleverde warmte te vergelijken met de CO<sub>2</sub> uitstoot van warmte geleverd met een gasketel.

De CO<sub>2</sub>-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. De hulpenergie voor levering van de warmte bestaat grotendeels uit elektriciteit voor de warmtepomp. Voor het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp wordt gebruik gemaakt van de resultaten van hoofdstuk 3.

Voor de omzetting van elektriciteit naar CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-uitstoot als ook de relatieve CO<sub>2</sub> uitstoot per geleverde GJ warmte verschillen. In Tabel 4-11 is de afleiding gegeven van de CO<sub>2</sub>-uitstoot. Dit is gedaan voor zowel jaar 30, als over de totale looptijd van 30 jaar.

Tabel 4-11 Afleiding CO<sub>2</sub>-uitstoot warmteopslag

		<b>Variant 6</b>
<b>Jaar 30</b>		
Opgeslagen warmte	[GJ <sub>t</sub> ]	34.000
Elektriciteitsverbruik warmteopslag <sup>1</sup>	[MWh <sub>e</sub> ]	200
Geleverde warmte	[GJ <sub>t</sub> ]	29.000
Elektriciteitsverbruik warmtelevering <sup>2</sup>	[MWh <sub>e</sub> ]	1.200
CO <sub>2</sub> -uitstoot opgeslagen warmte <sup>3</sup>	[ton CO <sub>2</sub> ]	400
CO <sub>2</sub> -uitstoot elektriciteit <sup>4</sup>	[ton CO <sub>2</sub> ]	500
CO <sub>2</sub> -uitstoot totaal	[ton CO <sub>2</sub> ]	800
Specifieke CO <sub>2</sub> -uitstoot	[kg CO <sub>2</sub> /GJ <sub>t</sub> ]	28,9
<b>Periode van 30 jaar</b>		
Opgeslagen warmte	[GJ <sub>t</sub> ]	1.000.000
Elektriciteitsverbruik warmteopslag	[MWh <sub>e</sub> ]	6.000
Geleverde warmte	[GJ <sub>t</sub> ]	800.000
Elektriciteitsverbruik warmtelevering	[MWh <sub>e</sub> ]	33.000
CO <sub>2</sub> -uitstoot opgeslagen warmte	[ton CO <sub>2</sub> ]	11.000
CO <sub>2</sub> -uitstoot elektriciteit	[ton CO <sub>2</sub> ]	13.000
CO <sub>2</sub> -uitstoot totaal	[ton CO <sub>2</sub> ]	24.000
Specifieke CO <sub>2</sub> -uitstoot	[kg CO <sub>2</sub> /GJ <sub>t</sub> ]	30,4

1) Aangenomen COP van 50 voor de HTO

2) Gemiddelde COP systeem (HTO, WP, pompen) ingeschat op 6,6

3) CO<sub>2</sub>-uitstoot opgeslagen warmte 10 kg/GJ<sub>t</sub> (berekend op basis van info Eneco)

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

De CO<sub>2</sub>-uitstoot van de HTO met warmtepomp wordt vergeleken met de CO<sub>2</sub>-uitstoot van een gasketel. Warmte geleverd met een gasketel heeft een CO<sub>2</sub>-uitstoot van 62 kg/GJ<sub>t</sub> (bij een rendement van de gasketel van 90% op de bovenwaarde). Dit betekent dat met HTO (i.c.m. een warmtepomp) een CO<sub>2</sub>-reductie van circa 50% kan worden gerealiseerd.

De uitstoot van 30,4 kg/GJ wordt voor de helft bepaald door de uitstoot t.g.v. het elektriciteitsverbruik voor de warmtepomp (14,3 kg/GJ) en circulatiepompen. 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 30,4 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

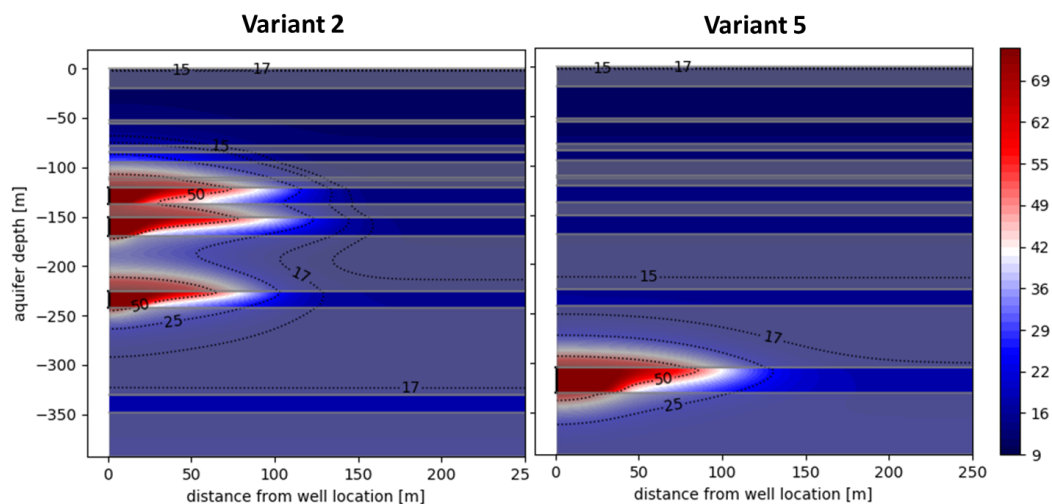
Op basis van deze kwalitatieve beschouwing kan geen belangrijk onderscheid gemaakt worden tussen de geselecteerde locaties wat betreft grondmechanische risico's. Na selectie van locaties voor verdere evaluatie dienen locatie specifieke berekeningen een inschatting geven van de verwachte effecten aan 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 Thermisch effect: temperatuur verhoging ondergrond

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 warmte verlies 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.

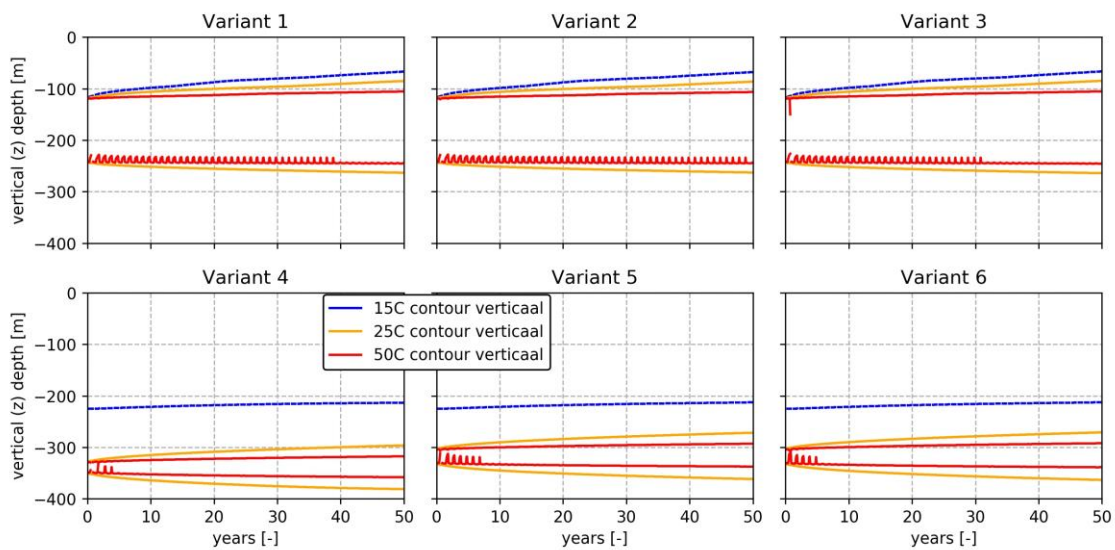
In het vervolg van dit hoofdstuk worden alleen de thermische effecten beschouwd die optreden door de opslag van de thermische energie in de aquifer. In deze verkenningen is nog geen rekening gehouden met de natuurlijke grondwaterstroming.

Figuur 5-1 laat de warmteverspreiding voor twee van de zes scenario's zien na 50 jaar simulatie van de warme bron. Er is goed te zien dat voor zowel warmteopslag in de formatie van Oosterhout als de formatie van Maassluis opdrijving van warmte 'buoyancy' een rol speelt. Hierdoor bevindt het grootste gedeelte van de warmte zich in het bovenste deel van de aquifer. Dit leidt tot een verlies van opgeslagen warmte omdat een deel niet meer kan worden teruggehaald. De temperatuur contouren zijn gegeven van 15,17,25 en 50 °C. Omdat de natuurlijke grondwatertemperatuur toeneemt met de diepte bevindt de 15 °C contour zich van nature op ~225m -mv en de 17°C graden contour zich op ~300m -mv.

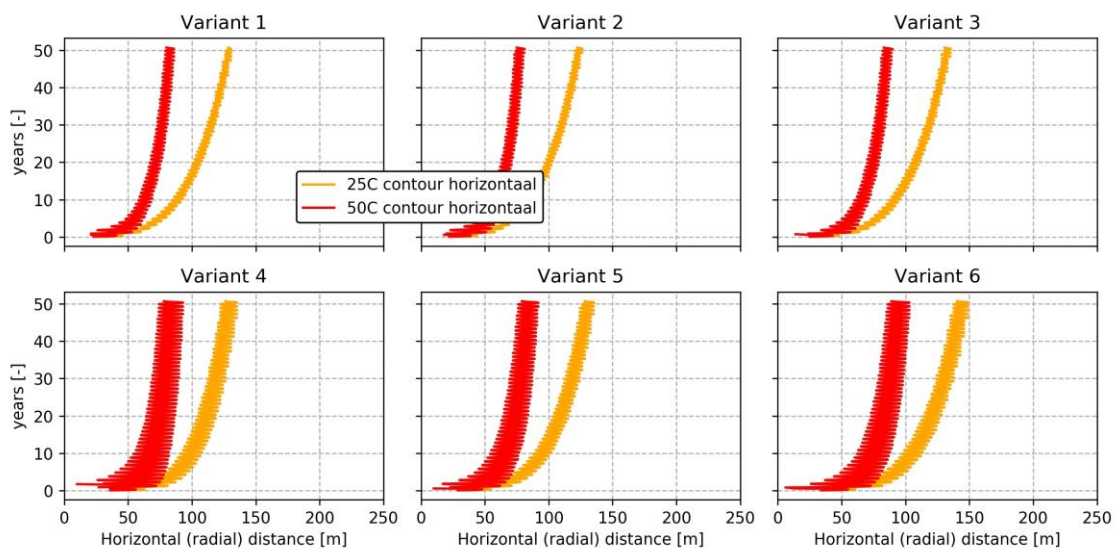


Figuur 5-1 Warmteverspreiding na 50 jaar simulatie voor twee van de zes gemodelleerde varianten, doorsnede vanaf de injectieput. Links: opslag in Maassluis (variant 2) en rechts: opslag in Oosterhout (variant 5).

De verspreiding van warmte, gevisualiseerd in Figuur 5-1 na 50 jaar, is tijdens de simulaties gemonitord. Dit is weergegeven in Figuur 5-2 en Figuur 5-3. De verticale en horizontale verspreiding van de 15, 25 en 50 °C contour zien door de tijd heen gepresenteerd. Figuur 5-2 laat goed zien dat in de verticale richting een groter gebied wordt beïnvloed bij opslag in de formatie van Maassluis t.o.v. Oosterhout. Dit gebeurt voornamelijk omdat hier 3 losse aquifers worden gebruikt, die dus automatisch een groter oppervlak beslaan. In horizontale richting laat de formatie van Oosterhout een iets groter bereik zien, wat voornamelijk ontstaat omdat de standaard thermische straal door opslag groter is (totale laagdikte kleiner) en er meer invloed is van opdrijving (grotere ononderbroken laagdikte t.o.v. Maassluis).



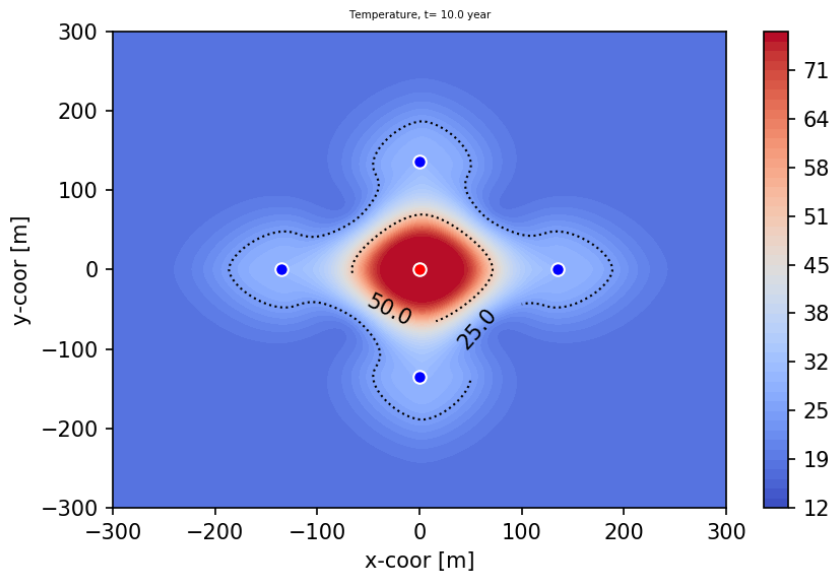
Figuur 5-2 Verticale thermische verspreiding in 50 jaar gebruik van de warmteopslag voor de 6 varianten recht boven de hete put(ten). Dit is dus het meest opgewarmde gebied.



Figuur 5-3 Horizontale thermische verspreiding in 50 jaar gebruik van de warmteopslag voor de 4 varianten in het bovenste deel van de aquifer. Dit laat dus de maximale horizontale verspreiding van de warmte zien vanaf de hete bron. Er wordt hierbij nog geen rekening gehouden met een warme bron die zich in de buurt van de hete bron kan bevinden.

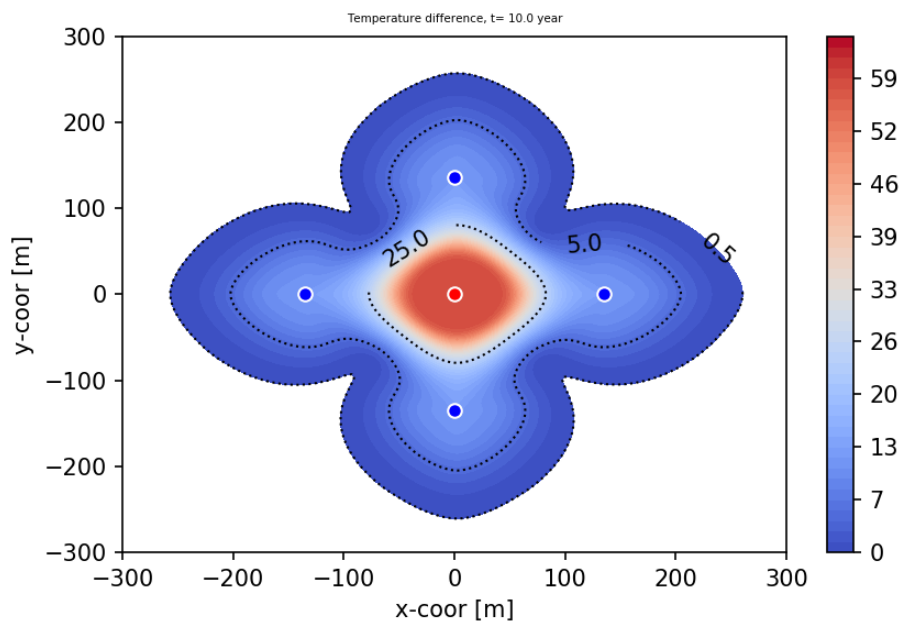
### 3D resultaten – 10 jaar variant 4

Variante 4, in de formatie van Oosterhout (OOz2), is doorgerekend. Deze variant heeft 3 hete bronnen en 4 warme bronnen. De 3 hete bronnen worden nu gerepresenteerd als 1 hete bron in het midden, de 4 warme bronnen bevinden zich daaromheen. De opwarming na 10 jaar is gerepresenteerd in Figuur 5-4.



Figuur 5-4 Variant 4 10 jaar doorgerekend.

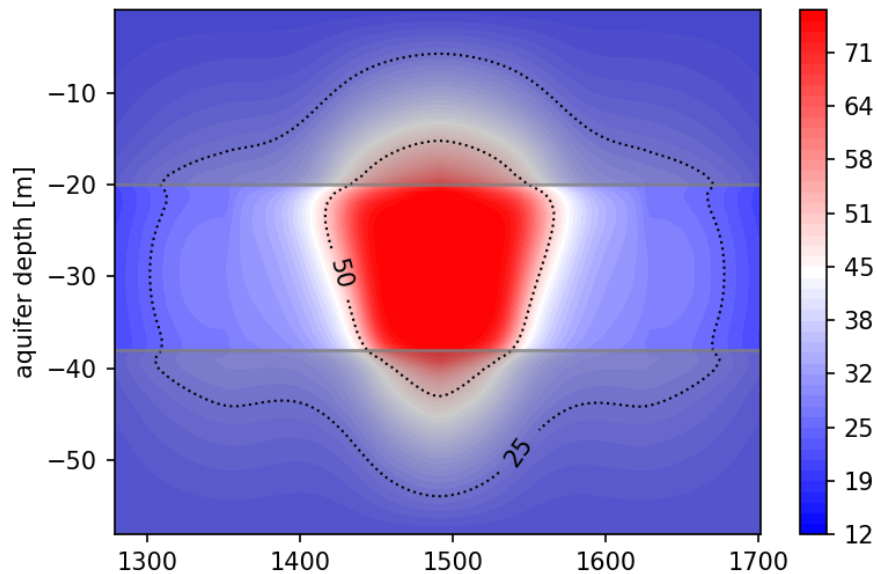
Op vergelijkbare wijze is de absolute opwarming ( $>0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) door de warmteopslag weergegeven in Figuur 5-5. Een klaverbladpatroon is hierin goed herkenbaar. Het opgewarmde gebied betreft ongeveer 500 bij 500 meter.



Figuur 5-5 Absolute temperatuur stijging ondergrond door de warmteopslag na 10 jaar (variant 4).

Om inzicht in de vorm van de warmteopslag te krijgen is een doorsnede van het 3D model gegeven in Figuur 5-6. Opdrijving van warmte, en de daaruit volgende kanteling van het thermische vlak is hierin zichtbaar. De warme bronnen ( $T= 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) zijn daarin zichtbaar als het rechte vlak aan weerszijden van de hete bron op ongeveer 140m afstand.





Figuur 5-6 Doorsnede HTO na 10 jaar gebruik in de formatie van Oosterhout (Ooz2) voor variant 4. Let op: de grootte van de y en x as zijn niet gelijk.

### 5.3 Reflectie op mogelijke invloed 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 huidige 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 Oosterhout bij Heerhugowaard, de Maassluis bij Leeuwarden, en de Oosterhout bij Rotterdam is bijvoorbeeld geen data. Daarnaast is de data bij Rotterdam voor de Maassluis wel uit de zelfde 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 verkenningslocatie 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.

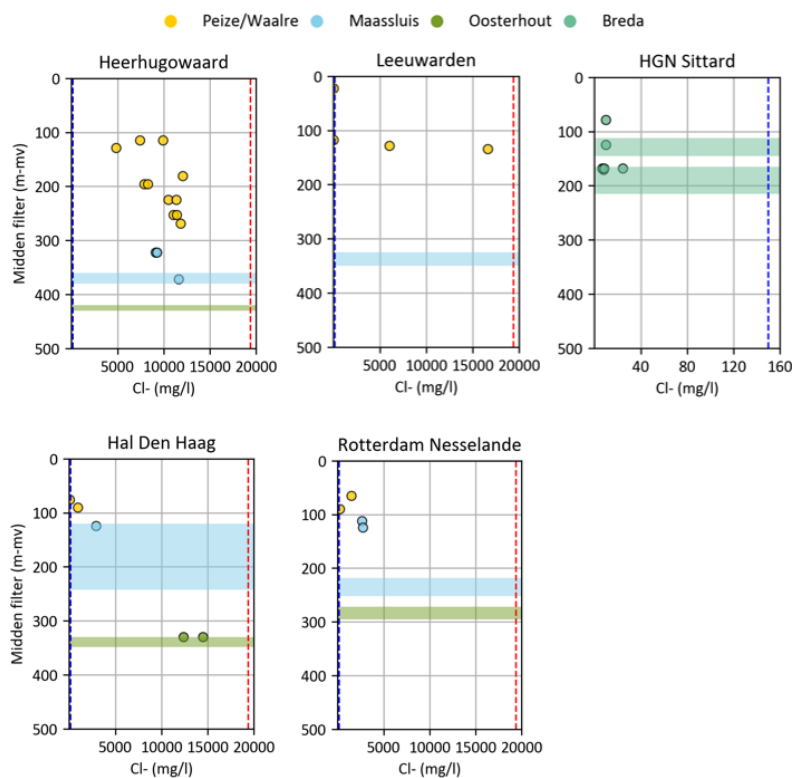
Locatie	Formatie	Aantal monsters	As (ug/l)	Ca (mg/l)	Cl- (mg/l)	Fe (mg/l)	HCO3 (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Mn (mg/l)	NH4 (mg/l)	NO3 (mg/l)	Na (mg/l)	SO4 (mg/l)	SiO2 (mg/l)	T-PO4 (mg/l)	pH (-)
Heerhugowaard	Maassluis	3		340	10018	5.4	353	116	642	0.8	43	0	5521	496	17	0.1	7.8
Heerhugowaard	Oosterhout	0															
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 verkend 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 ( $\text{HCO}_3$ ). 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.

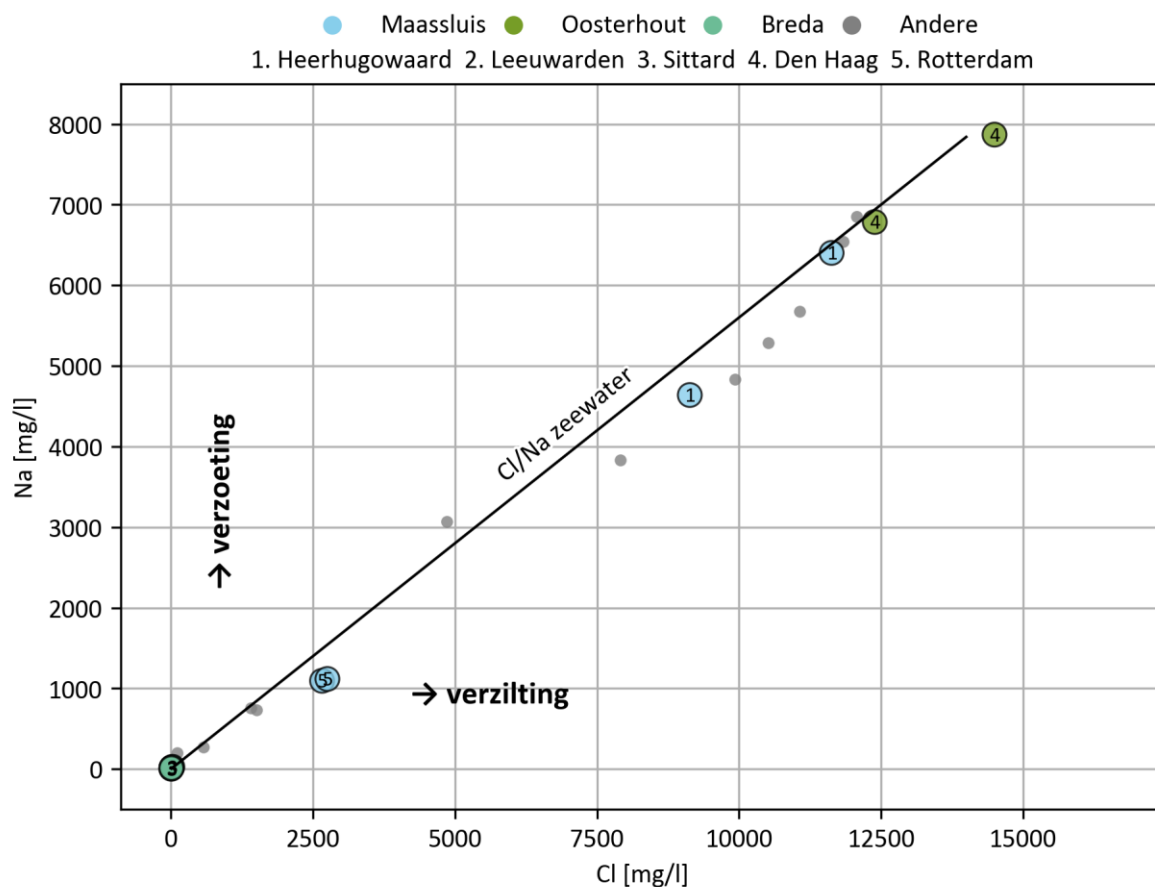
Voor zowel Leeuwarden en Rotterdam, waar geen data voor de beschouwde lagen beschikbaar is, is in Figuur 5-7 te zien dat de chloride gehalten in de monsters uit de meest diep gelegen filters hierboven wel 10 tot 100 keer hoger zijn dan zoet grondwater. In Leeuwarden nadert de waarneming van ~16.600 mg/l 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 5-7. Diepteprofiel 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 Maasluis en Oosterhout Formatie 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 5-8. 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.

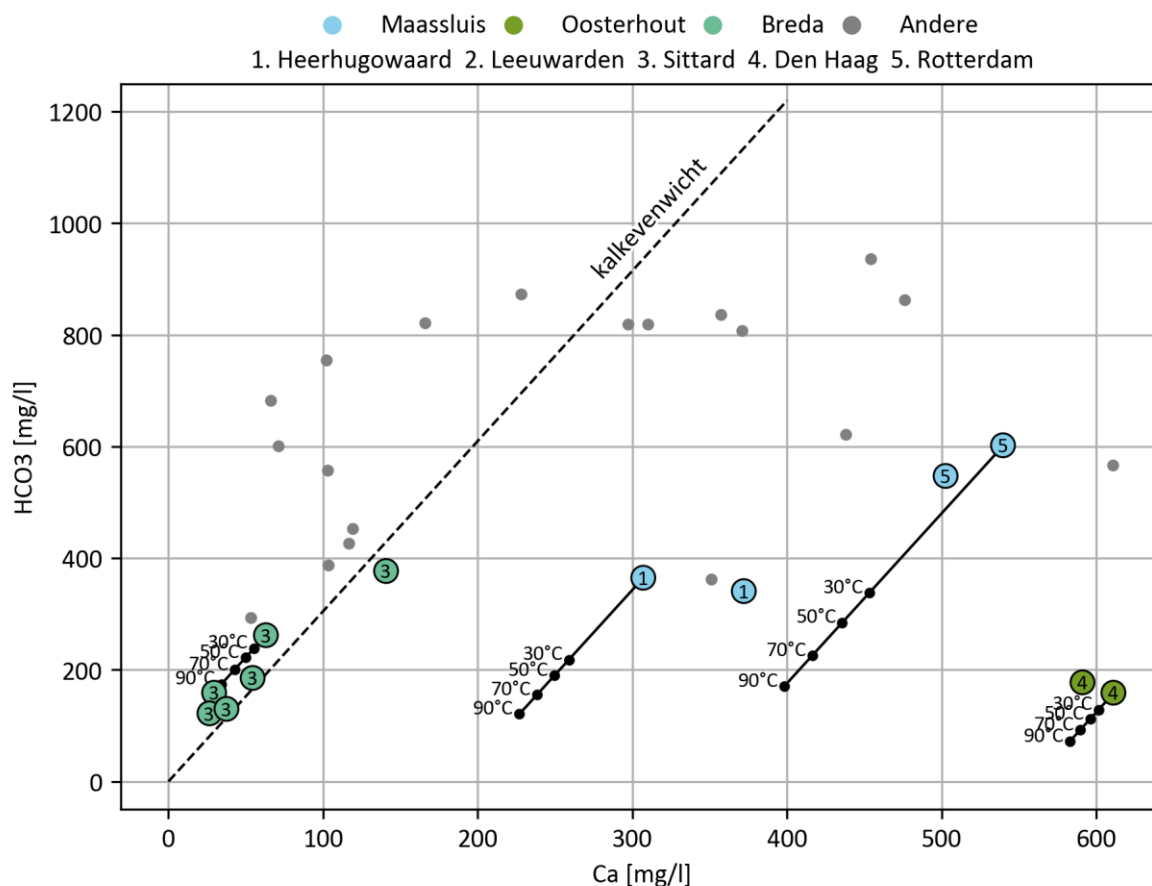
Tabel 5-2. Volledige waterkwaliteitsdataset gebruikt voor de voorverkenning

Loc	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		Nee	B14D0062	16.5	1978	8.4		59													
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		Nee	B14D0062	37.5	1978	7.3		60													
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		Nee	B14D0062	81	1978	7.8		1566													
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	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	Peize/Waalre	Nee	B14D0062	115	1978	7.7		7439													
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	Peize/Waalre	Nee	B14D0062	196	1978	7.9		8293													
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	Peize/Waalre	Nee	B14D0062	225	1978	7.9		11372													
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	Peize/Waalre	Nee	B14D0062	253	1978	7.9		11425													
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	Maassluis	Ja	B14D0062	322.5	1978	7.9		9290													
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		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	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	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	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	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		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		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	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	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	Peize/Waalre	Nee	B05H0004	134.6	1952	7.5	454	16637	5.2	936	241	1073		50		9050	1726	6.5		-14.7	
2	Peize/Waalre	Nee	B10F0041	128.645	1969		610.5	6050	9.6	566.7		359.7		10			450.8				
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	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	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	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	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	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		Nee	B30G0500	19				190		204											
4		Nee	B30G0500	44				193		207											
4	Peize/Waalre	Nee	B30G0500	76				78		436											
4	Peize/Waalre	Nee	B30G0500	90.5				955		476											
4	Maassluis	Ja	B30G0500	124.5				2930		281											
4	Oosterhout	Ja	B30D0064	330	1938		611	14498	0.1	159	123	399		49.9	0	7869	17.9	0		-59.9	
4	Oosterhout	Ja	B30D0064	330	1938		591	12390	2.8	177.56	112	274		41.5	0	6785	30.9	0		-53.9	
5	Peize/Waalre	Nee	B37H0129	90.14	1939			248.5	0.7	441.17			0								
5		Nee	B37F0104	19.75	1925		162.6	388	29.4			59.9	0.78	25	0		0				
5		Nee	B37F0104	28.5	1935		228	576	25.6	873.19		59.9	1.01	25	0	273.8	0				-0.3
5		Nee	B37F0104	40	1925			812													
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	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	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 ijzerreducerend 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 SO<sub>4</sub>/Cl verhoudingen ver onder dat van zeewater (Figuur 5-9). 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



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<sub>2</sub> ontgassing veroorzaakt door de drukverlaging bij onttrekking kalkverstopping veroorzaken (Hartog, 2015).



Figuur 5-10. Calcium en bicarbonaat concentraties in grondwatermonsters. Gestreepte zwarte lijn geeft de theoretische Ca/HCO<sub>3</sub> verhouding weer bij kalkevenwicht, puur als functie van CO<sub>2</sub> 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<sub>3</sub> 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 verstopingsrisico's zal dit risico verder geadresseerd moeten worden, samen met de noodzaak voor mitigerende maatregelen, zoals zoutzuur of CO<sub>2</sub> dosering.

## **5.4 Juridisch raamwerk**

### **5.4.1 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**

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).

### **5.4.2 BUM**

Om de provincies te helpen bij de vergunningverlening rond open bodemsystemen is een zogenaamde BUM (Besluitvorming Uitvoerings Methode) ontwikkeld (SIKB, 2015). HTO voldoet niet aan de standaardvoorschriften die zijn opgesteld in de BUM, vanwege de infiltratietemperatuur (>25°C) en het warmteoverschot in de bodem. De BUM stelt dat af kan worden geweken van de standaardvoorschriften, wanneer systemen als onderzoeksproject worden uitgevoerd, en de BUM stelt concreet dat HTO hier voorlopig ook onder valt. De BUM geeft als richtlijn dat provincies HTO mogen vergunnen mits het een onderzoeksproject betreft en er geen andere belangen worden geschaad.

### **5.4.3 Vergunningsprocedure voor HAL**

Voor een HTO op de locatie van HAL 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 Zuid-Holland. Gedeputeerde Staten (GS) van de provincie Zuid-Holland hebben de beoordeling van de Waterwet neergelegd bij de Omgevingsdienst Haaglanden. 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. Op basis van de input van de Provincie Zuid-Holland in WINDOW is het van belang om na te

gaan of de GS van Zuid-Holland specifiek goedkeuring moeten geven voor HTO. Indien dit proces inderdaad nodig is, dient rekening te worden gehouden met een langer traject (+ 1 jaar). Wanneer er door GS een uitzondering wordt toegekend, kan de procedure Waterwet starten.

## 5.5 Omgevingsscan

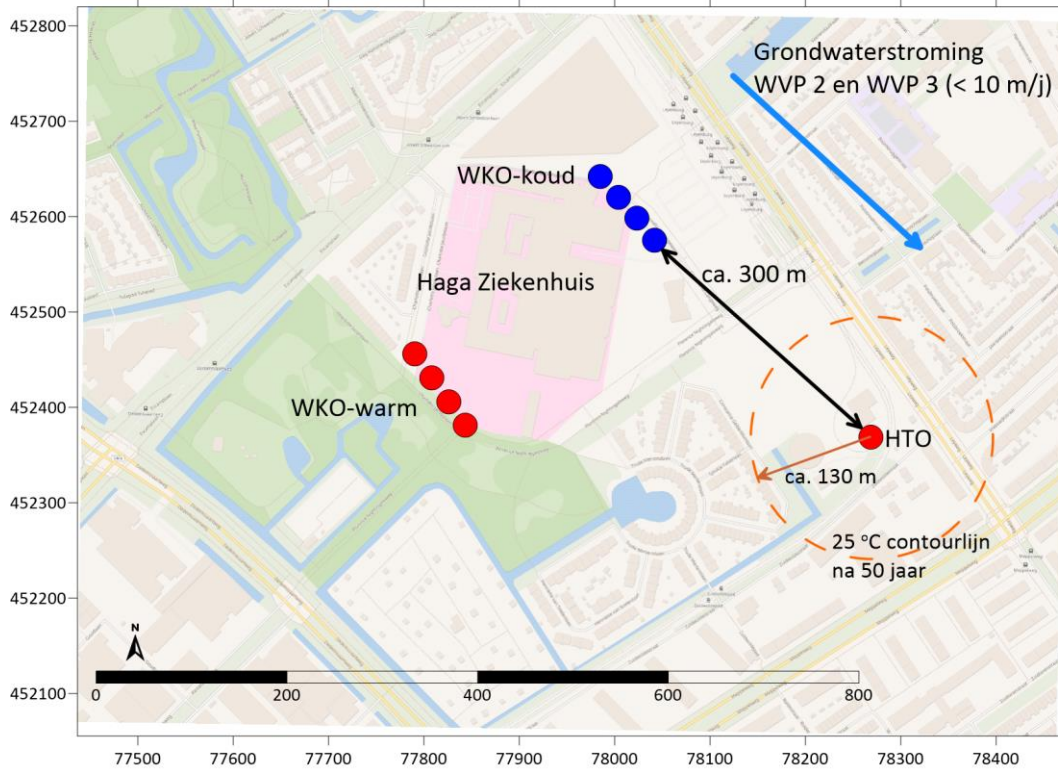
In de vergunningsprocedure zal het bevoegd gezag de noodzaak van HTO afwegen tegen de optredende effecten op de omgeving. Daarom is het belangrijk om een beeld te hebben van de stakeholders nabij de projectlocatie. Er is daartoe een stakeholderanalyse uitgevoerd om te zien welke belangen er zich in de ondergrond bevinden.

Het WKO-systeem van het Haga Ziekenhuis ligt dicht bij de projectlocatie (zie onderstaande Figuur 5-11). De bronfilters van dit systeem bevinden zich op een diepte van circa 125 – 200 m-mv. Als de HTO wordt gerealiseerd in de formatie van Maassluis is de kans op hydrologische en thermische invloed op het WKO-systeem van het ziekenhuis het grootst. Wanneer de HTO op een andere diepte wordt ontworpen, zullen de effecten kleiner zijn.

Thermische effecten bieden vermoedelijk het grootste risico voor de bronnen van het ziekenhuis. Echter, op basis van de simulaties (hoofdstuk 4) is de thermische beïnvloeding niet of in beperkte mate aan de orde. De resultaten van de axisymmetrische modellen geven aan dat de 25 °C-isotherm na 50 jaar op een afstand van circa 130 m van de bron ligt (zie onderstaande figuur). Dit is op het 'worst-case' moment in het jaar, wanneer alle warmte geladen is. Bovendien heerst er een zuidoostelijk gerichte grondwaterstroming, waardoor de impact op de koude bronnen van het Haga Ziekenhuis nog kleiner wordt geacht.

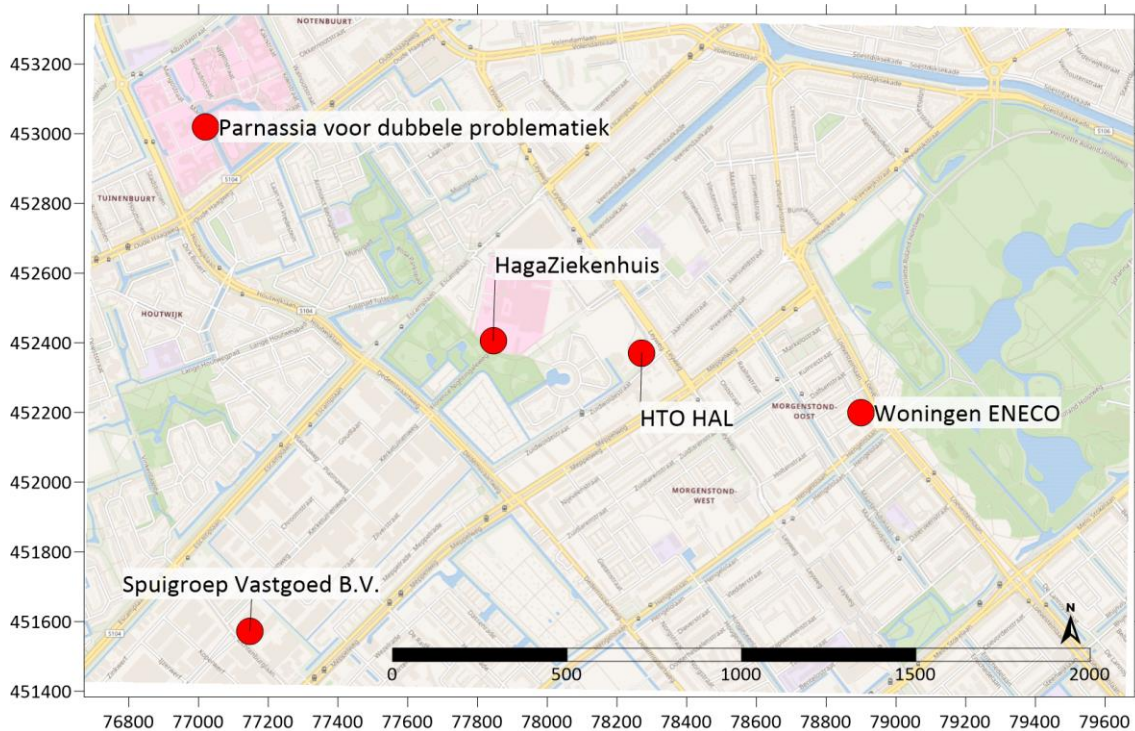


## Overzichtsk kaart HTO HAL WKO-bronnen Haga Ziekenhuis



Figuur 5-11 De WKO-bronnen van het Haga ziekenhuis zijn weergegeven met stippen: vier warme bronnen geclusterd in rood, koude bronnen in blauw. De HTO is ten zuidoosten van deze WKO-systemen beoogd. De cirkel geeft de indicatieve locatie van de 25 °C isotherm na 50 jaar aan, op basis van de axisymmetrische modelsimulaties. Bij de axisymmetrische simulaties is geen rekening gehouden met grondwaterstroming, die ertoe zou leiden dat de warmte van de HTO in zuidoostelijke richting wordt afgevoerd, waardoor effecten op de koude bronnen van het Haga Ziekenhuis beperkter zullen zijn dan in deze figuur weergegeven. RD-coördinaten (m) zijn op de X en Y-as weergegeven.

Op grotere afstand zijn ook enkele ondergrondse stakeholders aanwezig. Ten oosten van de beoogde HTO-locatie is een open bodemenergiesysteem aanwezig (Weerselosestraat) in de formatie van Maassluis. Vanwege de afstand wordt thermische interferentie niet verwacht. Hydrologische effecten van de HTO op de bronnen van het Haga Ziekenhuis en van het systeem aan de Weerselosestraat kunnen niet op voorhand worden uitgesloten.



Figuur 5-12. Omgevingsbelangen binnen een straal van 2 km van de beoogde HTO-projectlocatie. Zie figuur 4.4 voor indicatieve thermische invloed van HTO op het Haga Ziekenhuis. De bronnen van het WKO-systeem van Eneco (Weerselosestraat) bevinden zich in de Maassluis-formatie. Thermische invloed wordt hier niet verwacht maar hydrologische invloed is niet uit te sluiten.

Mede op basis van de in kaart gebrachte hydrologische en thermische effecten kan het bevoegd gezag afwegen of de effecten van de HTO op de omgeving, en specifiek op de bronnen van het Haga-ziekenhuis, acceptabel zijn. Vooral nog worden de aanwezige omgevingsbelangen in de ondergrond op voorhand niet als showstopper gezien, wanneer voldoende afstand kan worden gehouden tot die belangen.

Inpassing zal echter wel degelijk een groot risico vormen. Naast de hete bronnen moeten ook de lauwe bron(nen) worden ingepast aan de bovengrond. Deze kunnen niet te dichtbij de koude bronnen van het WKO-systeem van het Haga ziekenhuis worden geplaatst, wanneer warmte in de formatie van Maassluis wordt opgeslagen. Wanneer de bronnen in de dieper gelegen formatie van Oosterhout worden geplaatst mag met meer zekerheid verwacht worden dat de effecten van de HTO geen negatieve beïnvloeding van andere systemen teweegbrengt, omdat er dan een scheidende laag tussen de belangen aanwezig is. Wanneer de lauwe bronnen niet in de nabijheid van het Haga systeem kunnen worden geplaatst, vanwege bovengrondse inpassingsfactoren, zal gezocht moeten worden naar alternatieve locaties, bv langs de Zuidwoldestraat. De lauwe bronnen kunnen dan echter niet in een cirkel om de hete bron worden geplaatst, waardoor het systeemrendement naar verwachting iets zal dalen. De sterk stedelijke omgeving is echter een groot risico voor het vinden van geschikte bronlocaties. Aanvullend zal ook nog een ruimte gevonden moeten worden voor een nieuwe technische ruimte. In een stakeholderoverleg werd aangegeven dat een uitbreiding van de bestaande energiecentrale mogelijk lijkt, maar dat daar door het architectonische karakter wel een prijskaartje aan hangt.

# 6 Risico inventarisatie en plan van aanpak vervolgstappen

## 6.1 Introductie

De belangrijkste risico's gerelateerd aan HTO projecten zijn geïdentificeerd 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	Gemiddeld	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.	Gemiddeld	Gemiddeld	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	Klein	Groot	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	Groot	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 temperatuurniveau 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 Optimalisatie van het ontwerp om het opslagrendement te maximaliseren (b.v. verlagen afkaptemperatuur of aanpassen putconfiguratie)	Groot	Groot	De ondergrondgegevens en de plaatsing van de bronnen zijn bepaling voor het opslagrendement. De Fm. van Maassluis is hier goed in beeld en geeft relatief weinig onzekerheid, de Fm. van

		Grotere thermische effecten (en daaraan gekoppelde effecten op de grondwaterkwaliteit)	Putafwerking met isolerend materiaal en/of dikkere omstorting			Oosterhout is meer onzeker en geeft een gemiddelde onzekerheid relatief t.o.v. de andere locaties. Echter, de bovengrondse inpassing is voor deze specifiek case een groot aandachtspunt. De kans is groot dat het vinden van locaties voor de hete en warme bronnen problemen gaat opleveren. Een ongunstige plaatsing van de bronnen heeft invloed op het rendement van het HTO systeem.
	Te hoge retourtemperatuur	Bijdrage directe warmtelevering kleiner, lagere inkomsten	Afnemers stimuleren tot lagere retourtemperaturen Voldoende aandacht bij ontwerp/uitrol warmtenet	Klein	Groot	Huidige schatting van 50°C is conservatief. Warmtenet moet nog deels 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 in warmtenet hoger dan beoogd	Slechtere COP warmtepomp of naverwarming noodzakelijk. Hogere operationele kosten.	Voldoende aandacht bij ontwerp/uitrol warmtenet	nihil	Groot	Eneco hanteert een vaste aanvoertemperatuur (73°C) in dit warmtenet.
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	Gemiddeld	Generiek groot	De mogelijke effecten van de HTO op WKO-bronnen van Haga Ziekenhuis vragen aandacht, wanneer de HTO in de Maassluis formatie wordt voorzien. Thermische beïnvloeding lijkt niet aan de orde, maar dit is mede afhankelijk van de bronlocatie (inpassingsmogelijkheden). Wanneer

						vergunning niet verleend is heeft dat grote gevolgen, want zonder vergunning geen warmteopslag.
	Maatschappelijk draagvlak ontbreekt	Vergunning wordt niet (tijdig) verleend	Voldoende tijdige communicatie richting stakeholders	Groot	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) Bij geringe dikte opslagpakket, opslag in meerdere lagen, indien mogelijk (voorbeeld concept ECW)	Laag	Gemiddeld	Fm. van Maassluis is goed in kaart gebracht in omgeving, door het WKO systeem in de buurt, hierdoor wordt verwacht dat de Fm. Van Maassluis niet erg zal afwijken van de verwachting. Voor de Fm. van Oosterhout meer onzekerheid door de variabele dikte van de zandlaag en onzekerheid van de kh-waarde.
	HTO leidt tot bodembeweging aan het oppervlak	Schade aan infrastructuur (tramlijn, gebouwde omgeving)	(Veld)onderzoek naar effect hoge temperatuur op bodembeweging Lokaal specifiek onderzoek naar effecten (met name impact hoge temperatuur)	Klein	Gemiddeld-groot	Opslaglocatie is in dicht bebouwde stedelijke omgeving, hierdoor wegen de effecten van bodembeweging zwaar. Kans op risico door temperatuur wordt klein ingeschat, echter zijn de gevolgen groot indien er veel zetting optreedt.
	Verstopping van warmtewisselaar en bronnen door scaling	Daling vermogen door lager debiet en slechtere warmteoverdracht. Hogere operationele kosten	Proefboring om geochemische 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	Klein	Klein	Kans bepaald op basis van condensortemperatuur warmtepomp. Gevolg ingeschat op basis van omvang warmtepomp.
Milieu en veiligheid						
	Onvoorziene impact op andere belangen	Vergunning wordt ingetrokken tijdens looptijd	Zorgvuldige effectbeoordeling in ontwerpfase Proefboring voor zekerheid bodemopbouw	Gemiddeld	Groot	Nabij projectlocatie ligt een aantal grote WKO-bronnen. Thermische beïnvloeding lijkt niet aan de orde. De hydrologische effecten op WKO-bronnen en de grondmechanische effecten aan maaiveld dienen nauwkeuriger in kaart te worden gebracht, vanwege mogelijke impact op de WKO-bronnen en de bebouwing aan maaiveld respectievelijk. 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 2,3); Gemiddeld-groot (variant 5,6)	Groot(variant 2,3); Klein(variant 5,6)	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 fors 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	Groot	Groot	Stakeholders wel allemaal positief over mogelijkheden HTO, maar in vergelijking met andere verkenningen geven ze aan dat dit niet de meest voor de hand liggende locatie is.
	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	Groot	Groot	Ingeschat op basis van benodigd aantal bronnen in relatie tot stedelijkheid.



### 6.3 Plan van aanpak vervolg

Wanneer deze verkenning vergeleken wordt met de andere uitgevoerde verkenningen, is deze verkenning niet de meest voor de hand liggende verkenning om uit te werken in WarmingUp (WINDOW fase 2). Een belangrijk risico dat hier speelt is de inpasbaarheid van de HTO. De omgeving is sterk stedelijk, waardoor afgestemd zal moeten worden met vele stakeholders en de inpassing van de bronnen zeer uitdagend zal zijn. Ook is de omvang van het HTO systeem ten opzichte van andere verkenningen relatief klein, waardoor de prijs voor de geleverde warmte van de HTO relatief hoog uitvalt. Naast risico's heeft deze verkenning ook zeker sterke pluspunten, waaronder de aanwezigheid van een duurzame geothermiebron en een gemeente die zeer betrokken is bij de ontwikkeling van het geheel. Geadviseerd wordt om eerst meer ervaring te ontwikkelen met HTO op locaties die minder veeleisend zijn, en om daarna een heroverweging te maken met betrekking tot HTO op deze locatie. Wanneer er een positief besluit ligt, zijn de onderstaande generieke vervolgstappen mogelijk.

- 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 effectenstudie, proefboring en ontwerp
  - 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 mer-beoordelingsnotitie 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.
- Proefboring  
Een proefboring geeft wezenlijk inzicht in de lokale bodemopbouw en haalbare debiet. De proefboring zal na afloop worden omgebouwd tot monitoringsput. De volgende stappen worden uitgevoerd:
  - Locatie bepaling
  - Ontwerp en aanbesteding proefboring
  - Realisatie proefboring
  - Uitvoeren van boorgatmetingen, grondmechanische testen en grondwater-, gas en bodemanalyse.
  - Uitvoeren van onttrekkingstesten en bepalen van het doorlaatvermogen. Aangeraden wordt om ook onttrekkingstesten uit te voeren die de huidige NVOE-norm overschrijden om zodoende te bepalen of en op welk moment zandlevering optreedt.
- **Go/No Go:** Het uitvoerende team maakt op basis van de proefboring een inschatting van het maximaal haalbare debiet. Op basis van de resultaten van de proefboring en het

maximaal haalbare debiet nemen de stakeholders van de locatie een besluit om al dan niet verder te gaan met het ontwerp.

- **Ontwerp**

Op basis van de inzichten verkregen uit de proefboring 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**

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 Conclusies

De toepassingsmogelijkheden van HTO op deze locatie kent specifieke beperkingen. De geringe omvang van het systeem resulteert in een hoge warmteprijs. De ligging in druk stedelijk gebied vormt een risico.

Het WINDOW programma heeft als doel om HTO verder te ontwikkelen tot een bewezen techniek. Op dit moment bestaan er nog (algemene) technische, juridische en financiële onderzoeksvragen voor toepassing van HTO. De specifieke beperkingen op deze locatie zijn wellicht overkomelijk, maar vanwege deze nadelen is deze locatie minder geschikt om binnen het WINDOW programma HTO tot een bewezen techniek te brengen.

- De ondergrond in de omgeving van de beoogde HTO locatie lijkt geschikt voor HTO. Met name de Fm. van Maassluis, door de WKO boring in de buurt is een goede inschatting gemaakt van de aquifer eigenschappen. Grotere onzekerheid bestaat over de mogelijk geschikte Fm. van Oosterhout (dikte en diepte van zandlaag onzeker). Een proefboring kan hier meer inzicht in geven.
- De ondergrondgegevens zijn relatief goed in beeld. Dit geeft dus weinig risico's m.b.t. tot het rendement van het HTO systeem. Echter, de bovengrondse inpassing in het drukke centrum gebied van Den Haag kan zorgen voor niet optimale plaatsing van de hete en warme bronnen en dus een negatieve impact hebben op het rendement dat behaald kan worden met de HTO.
- De wijze van inpassing van de HTO die wordt voorzien is bij de energiecentrale. HTO wordt in de zomer geladen via de geothermiebron. Hierdoor kan de geothermiebron ook in de zomer maximaal draaien.
- Om warmte in de winter te leveren aan het transportnet is een hoge temperatuur warmtepomp nodig om de warmte uit de HTO op te waarden naar de gewenste temperatuur (73°C).
- Ingeschat wordt dat inpassing van de HTO in Oosterhout een betere business case geeft dan inpassing in Maassluis. Ondanks dat er meer bronnen nodig zijn op een grotere diepte. Dit komt doordat verwacht wordt dat het systeemrendement van de HTO hoger ligt. Voor de best case (variant 6) is de kostprijs van geleverde warmte uit de HTO ingeschat op 27,9€/GJ. Dit is aanzienlijk 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 64% en na 50 jaar op 74%.
- Warmte geleverd door de HTO i.c.m. een warmtepomp reduceert de CO<sub>2</sub> uitstoot met circa 50% ten opzichte van warmte geleverd door een gasketel.
- Geadviseerd wordt om een proefboring uit te voeren tot en met de formatie van Oosterhout. De kosten hiervoor zijn ingeschat op € 220.000,-. Dit is € 40.000,- 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:
  - Er is een reeds gerealiseerde geothermiebron aanwezig, waardoor de beschikbaarheid van duurzame warmte zeker is.
  - Het warmtenet draait op een relatief lage temperatuur (73°C). Dit is gunstig voor het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp.

De volgende punten hebben een hoger risicoprofiel dan gemiddeld:

- De omvang van het HTO-systeem is relatief klein. Hierdoor liggen de kosten voor warmte vanuit de HTO relatief hoog en is de prijs ook gevoelig voor een schommelingen in omvang.
- Een groot deel van de beoogde warmtevraag is nog niet gerealiseerd. Dit verhoogt het risico op vertraging van het project.
- De locatie ligt in een zeer druk stedelijk gebied. Er zijn nabijgelegen WKO systemen en een hoge bebouwingsdichtheid. Dit maakt inpassing een stuk complexer. Bij juiste positionering van de bronnen zijn de effecten op nabijgelegen WKO-systemen gering, waardoor vergunbaarheid in het kader van de Waterwet mogelijk lijkt. De gemeente staat positief tegenover de techniek. Inpassing zal in het meest gunstige geval meer tijd kosten dan gemiddeld. Ook bovengronds zijn er beperkte mogelijkheden om de energiecentrale in te passen, maar ingeschat wordt dat er mogelijkheden zijn voor het uitbreiden van de huidige energiecentrale.
- Er is onzekerheid over het effect van opslag van hoge temperatuur op bodembeweging. Dit is bij andere projecten ook aan de orde, maar door de hoge stedelijkheid speelt het hier een grotere rol. Hiernaar is meer (veld)onderzoek nodig. Doordat de HTO is gepland in een sterk stedelijk gebied, moet risico op schade aan infrastructuur door bodembeweging worden uitgesloten.
- 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 verstoring van het bodemmilieu en integriteit in opslagpakket door eventuele toediening van HCl heeft relatief minder effect door het hoge chloridegehalte in het opslagpakket.
- De diepte van en het aantal bronnen geven bij de opslag in de Fm. van Maassluis een kleiner en bij opslag in de Fm. van Oosterhout een groter risico op verstoring van het bodemmilieu in de bovenliggende pakketten door zowel uitstraling van warmte vanuit de putten als door de kans op lekkage.

# Referenties

- Brons, H. J., Griffioen, J., Appelo, C. A. J., & Zehnder, A. J. B. (1991). (Bio) geochemical reactions in aquifer material from a thermal energy storage site. *Water research*, 25(6), 729-736.
- Ghabezloo S., Sulem J. (2010) Temperature induced pore fluid pressurization in geomaterials, Italian Geotechnical Journal, 1/2010, 29-43.
- Roelofsen, F., & Goorden, N. (2008). Grondwatereffecten aan de oppervlakte (gebracht): Onderzoek naar effecten van stopzetting grondwaterontrekking DSM Delft-Technisch rapport. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:439d4a1d-74b2-4647-9d7e-65f4f51b88f7>
- Van Dalssen, W. (1984). Tijdelijke warmte-opslag in ondergrondse watervoerende lagen. Een beschrijving van de fysische principes. Rijks Geologische Dienst, OS 84-21.
- 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 geïnfiltreerd 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 geïnfiltreerd, 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 alleen 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]
- $\rho_f$  = dichtheid van de vloeistof [kg/m<sup>3</sup>]
- g = de valversnelling [9,8 m/s<sup>2</sup>]
- $\mu$  = dynamische viscositeit van de vloeistof [Pa\*s]
- $K_i$  = de intrinsieke permeabiliteit [m<sup>2</sup>]

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 geïnfilterde 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):

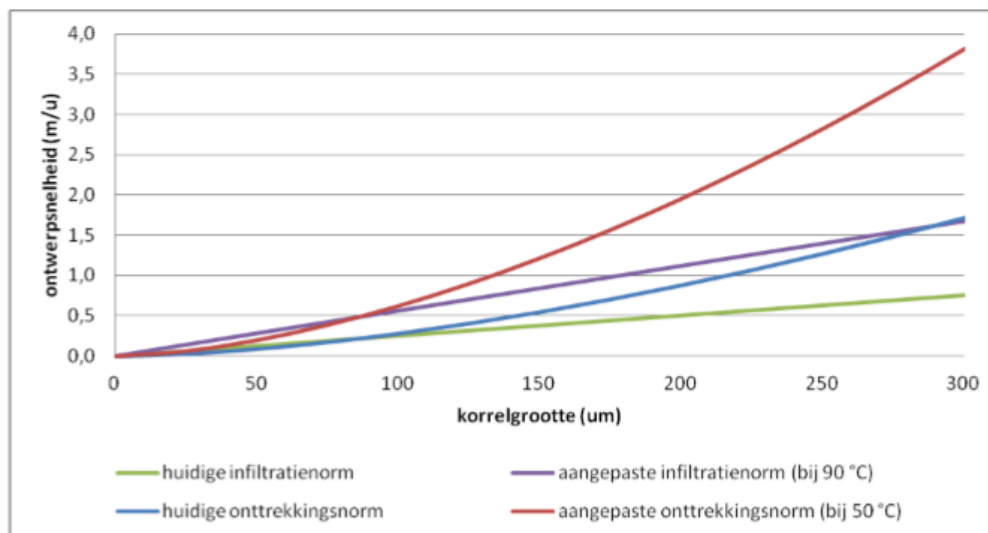


$$v_{max} = 1000 \left( 576 * \frac{\rho_f \cdot g}{\mu} \cdot K_i \right)^{0,6} \cdot \sqrt{\frac{v_v}{2 \cdot MFI \cdot U_{eq}}} \quad (1.5)$$

$v_{max}$	=	ontwerpsnelheid op de boorgatwand bij infiltratie [m/uur]
$\rho_f$	=	dichtheid van de vloeistof [kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	=	de valversnelling [9,8 m/s <sup>2</sup> ]
$\mu$	=	dynamische viscositeit van de vloeistof [Pa*s]
$K_i$	=	de intrinsieke permeabiliteit [m <sup>2</sup> ]
$v_v$	=	specifieke verstoppingssnelheid [m/jaar]
MFI	=	MFI [s/l <sup>2</sup> ]
$U_{eq}$	=	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 ontwerpsnelheid 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 m<sup>2</sup> (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

	<b>ionenwisseling</b>	<b>(zout)zuurdosering</b>	<b>inhibitors</b>
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 <sub>2</sub> -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.

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/m<sup>3</sup> (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 CO<sub>2</sub>, 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-1. Een relatief lage dichtheid van het warme geïnjecteerd water leidt tot een dichtheid verschil met het omringende 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 berekend d.m.v. de volgende vergelijkingen.

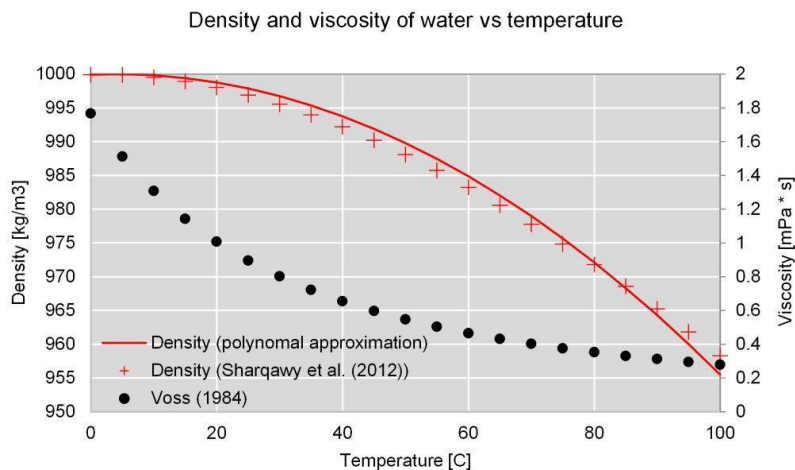
Viscositeit is berekend volgens is (Langevin, 2009):

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

De dichtheidsverandering van water bij oplopende temperaturen is berekend volgens:

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

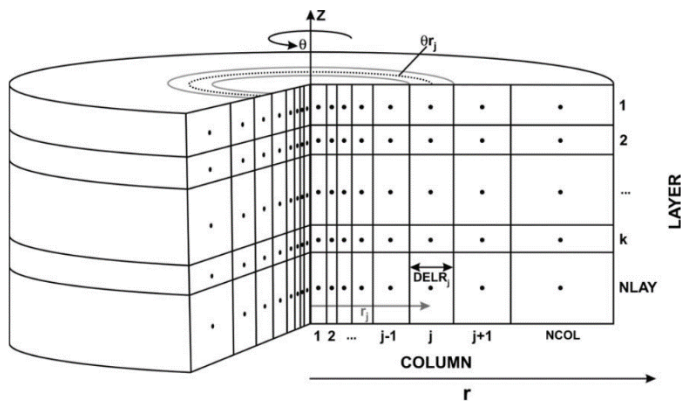
Dit is een benadering van de vergelijking opgesteld door Sharqawy et al. (2012) waarbij ook verschil in zoutconcentratie wordt meegenomen. Bij deze simulaties wordt er vanuit gegaan dat er geen water wordt gemengd van verschillende kwaliteiten (e.g. uit verschillende grondwaterpakketten). Daardoor is 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 rekestijden 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 rekestijden 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)	$\rho_{H2O}$	1000 kg/m <sup>3</sup>	
Dichtheid vast materiaal	$\rho_{solids}$	2640 kg/m <sup>3</sup>	
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	$\lambda_{zand}$	1.9 W/m °C	Dalla Santa et al. (2020)
Thermische geleidbaarheid klei	$\lambda_{klei}$	1.1 W/m °C	Dalla Santa et al. (2020)
Thermische geleidbaarheid water	$\lambda_{H2O}$	0.58 W/m °C	Dalla Santa et al. (2020)
Bulk thermal diffusivity*	$D_{m\_temp}$	0.05 – 0.08 m <sup>2</sup> /d	# relatief lage waarde
Porositeit zand (-z=0)	$\phi_{zand}$	0.41	Hantschel & Kauerauf (2009)
Porositeit klei (-z=0)	$\phi_{klei}$	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 CO<sub>2</sub> 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 kostenschattings 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 seizoensvariëaties 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 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**

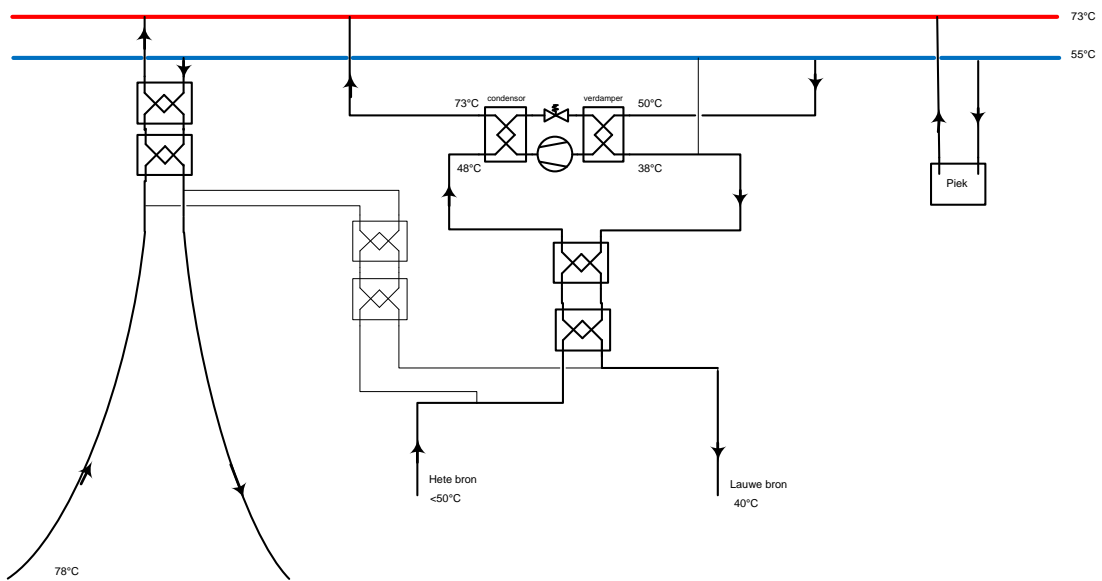
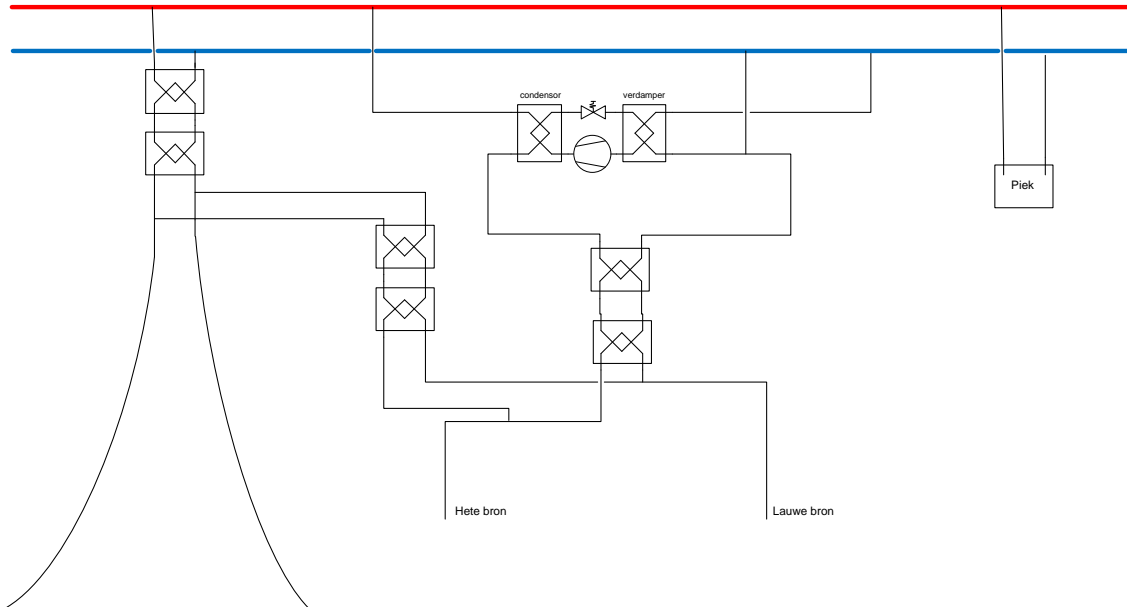
A. Ontbreken of onvoldoende commitment stakeholders

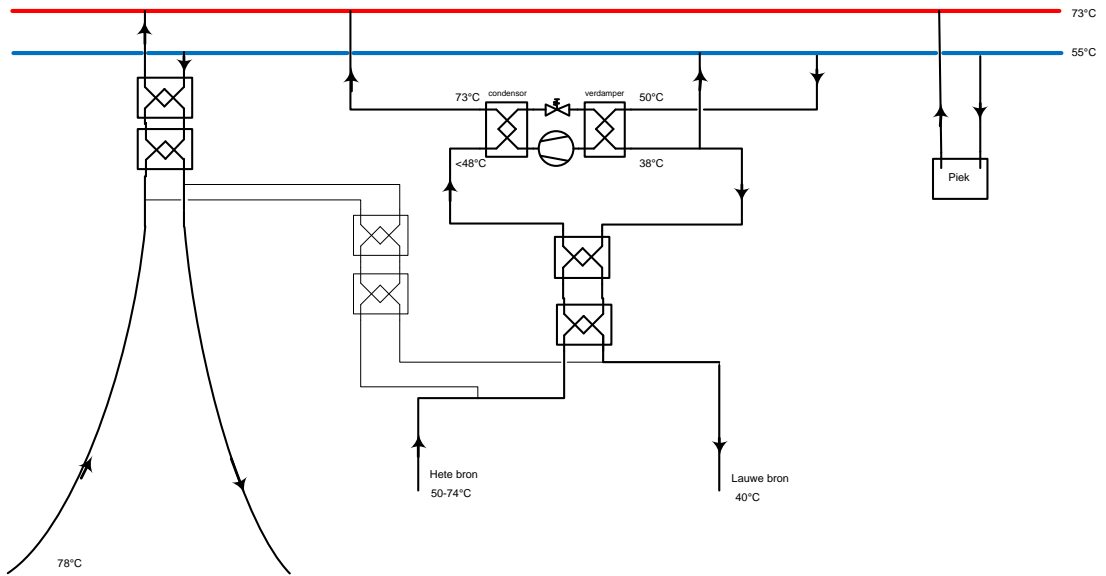
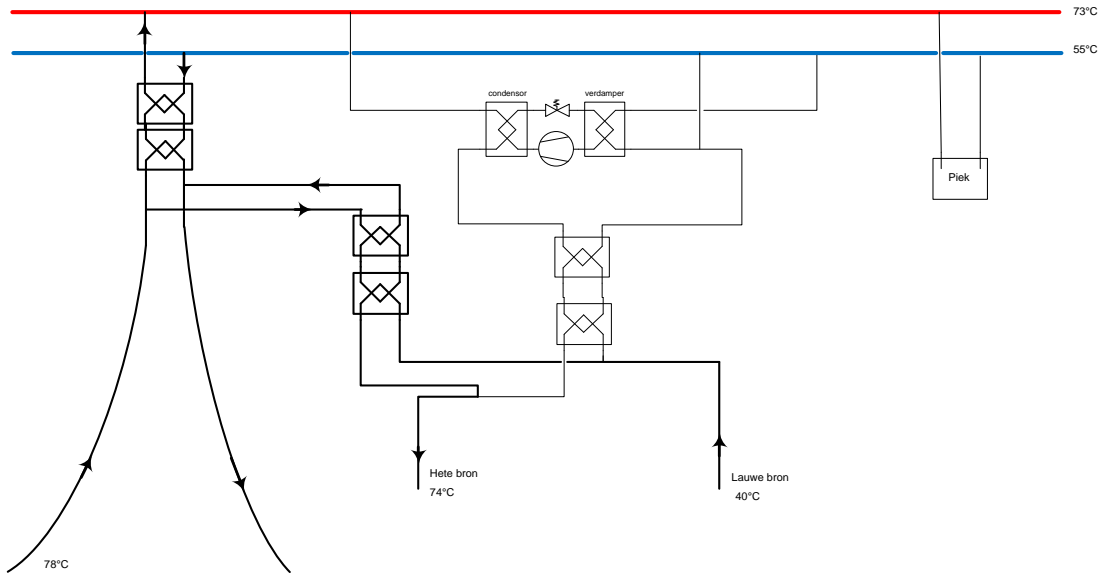
B. Inpassing systeem lastig of niet mogelijk

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.

## Bijlage VI. Uitvoeringsvarianten met dubbel uitgevoerde warmtewisselaars





**Eindredactie van dit  
deelrapport door KWR**

**Adres**  
Groningenhaven 7

**Postadres**  
Postbus 1072  
3430 BB Nieuwegein