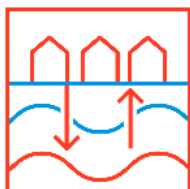


**WINDOW** *fase 1*



# Verkenning HTO

## Rotterdam Nesselande

**door**

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

21 december 2020

# Verkenning HTO Rotterdam Nesselande



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 Hette de Vlieger Peter Oerlemans	Dorien Dinkelman Willem Jan Zaadnoordijk Mariëlle Koenen	Sofie Kooreman 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      Rapportnummer  
402656                KWR 2020.143

Keywords  
Ondergrondse warmteopslag, HTO

Jaar van publicatie  
2020

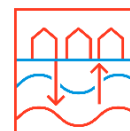
Meer informatie  
Marette Zwamborn  
E marette.zwamborn@kwrwater.nl

Rob Kleinlugtenbelt  
E R.Kleinlugtenbelt@iftechnology.nl

December 2020 ©

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

# Management samenvatting



<p><b>WINDOW fase 1</b> Verkenning ondergrondse warmteopslag Rotterdam Nesselande</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 Rotterdam Nesselande 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" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 33%;">Geschikte bodemlaag:</td> <td style="width: 33%;">Formatie van Maassluis z3</td> <td style="width: 33%;">Oosterhout z2</td> </tr> <tr> <td>Diepte opslag:</td> <td>145-167 m-mv</td> <td>218-240 m-mv</td> </tr> <tr> <td>Bodemtemperatuur opslagdiepte:</td> <td>13,6</td> <td>16,3°C</td> </tr> <tr> <td>Proefboring:</td> <td colspan="2">aangeraden</td> </tr> </table>	Geschikte bodemlaag:	Formatie van Maassluis z3	Oosterhout z2	Diepte opslag:	145-167 m-mv	218-240 m-mv	Bodemtemperatuur opslagdiepte:	13,6	16,3°C	Proefboring:	aangeraden		1 a
Geschikte bodemlaag:	Formatie van Maassluis z3	Oosterhout z2											
Diepte opslag:	145-167 m-mv	218-240 m-mv											
Bodemtemperatuur opslagdiepte:	13,6	16,3°C											
Proefboring:	aangeraden												
<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. De detail opzet, nuanceringen en alternatieven staan beschreven in de verkenning.</p> <p style="text-align: center;">175 TJ</p> <p>90 - 120°C 50°C 75 °C 50 °C</p> <p>Meng-injectie station</p> <p><b>Zomer: laden</b> 96 m<sup>3</sup>/h 432.000 m<sup>3</sup> 5,6 MWt max 74 Tjt laden</p> <p><b>Winter: leveren</b> 96 m<sup>3</sup>/h 400.000 m<sup>3</sup> 3,6 MWt max (HTO) 37 Tjt leveren (HTO)</p> <p>HTO</p> <p>2 bronnen 86→58°C      2 bronnen 54→42°C</p>	2 3 4 b												

<b>Thermisch opslagrendement (hoofdstuk 4)</b>		
Systeemefficiëntie in jaar 2	26%	(19 TJ warmte uit HTO)
Systeemefficiëntie in jaar 10	50%	(37 TJ warmte uit HTO)
Systeemefficiëntie in jaar 50	63%	(47 TJ warmte uit HTO)
<b>Business case (hoofdstuk 4)</b>		
Investering	2,6 M€ = 1,8 M€/MW <sub>t</sub> (bij gemiddeld vermogen 1,8 MW)	
Investering bronnen	1,0 M€	39%
Investering warmtepomp	0,0 M€	0%
Investering overig	1,6 M€	61%
Operationele kosten	0,21 M€/jaar	
Kosten opgeslagen warmte	0,00 M€	0%
Kosten elektriciteit	0,04 M€	21%
Kosten overig	0,17 M€	79%
Kostprijs geleverde warmte	8,8 €/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	18,3 kg CO <sub>2</sub> /GJ	
CO <sub>2</sub> emissie warmte laden	13,2 kg CO <sub>2</sub> /GJ	
CO <sub>2</sub> emissie warmte leveren	5,1 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)		
In Nesselande wordt de CO <sub>2</sub> -uitstoot van warmte laden in de zomer enkel toegeschreven aan de hulpenergie van het warmtenet.		
<b>Thermische effecten (hoofdstuk 5)</b>		
Thermische straal warmteopslag:	99 meter	
Horizontale warmte uitstraling: (25°C contour vanaf de bron)	na 50 jaar op circa 220 meter vanaf de bron	
Verticale warmte uitstraling: (25°C contour diepte)	na 50 jaar op circa 110 m-mv of op circa 220 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	5
Zoet of zout grondwater:	zout grondwater	
Stakeholders ondergrond:	er is een WKO-systeem in de omgeving aanwezig, maar niet in het opslagpakket	c
Inpassing bronnen:	het beoogde gebied ligt in stedelijk gebied, inpassing van de bronnen wordt haalbaar geacht	

<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	Het warmteaanbod en de warmtevraag zijn reeds aanwezig en meetdata zijn beschikbaar, geen risico op vertraging bij ontwikkeling van HTO en inpassing kan goed ontworpen worden.	
3	De temperatuur van het warmtenet in Nesselande ligt relatief laag. Bij een temperatuurdaling van de HTO kan worden bijgemengd vanuit het transportnet, waardoor een warmtepomp niet op beperkt nodig is.	
4	Er liggen plannen voor een toekomstige geothermie systeem.	
5	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. Dit heeft invloed op efficiëntie bronnen en businesscase Een proefboring kan uitsluitsel geven.	
b	Door de onbekendheid van de techniek is er een kans dat de kosten in exploitatie hoger uitvallen dan voorzien (generiek risico). Door de omvang van het systeem liggen de operationele kosten in deze verkenning hoog, waardoor de kostenverhoging in absolute zin gevoeliger is voor dit risico.	
c	Een nabijgelegen WKO-systeem vraagt aandacht. Negatieve thermische beïnvloeding is, op basis van de berekeningen, niet aan de orde.	
<b>Conclusie (hoofdstuk 7)</b>		
De toepassingsmogelijkheden van HTO op deze locatie wordt verder op basis van deze verkenning als relatief positief beoordeeld.		
Opmerking: het WINDOW programma heeft als doel om HTO verder te ontwikkelen tot een bewezen techniek. Op dit moment bestaan er nog technische, juridische en financiële onderzoeksvragen. De conclusie moet gezien worden binnen het kader van een techniek-in-ontwikkeling, met grotere risico's ten opzichte van bewezen techniek.		
<b>Beschouwde varianten:</b>		
Voor de locatie Nesselande zijn acht varianten beschouwd. Variant 2 is opgenomen, met bronnen in de Formatie van Maassluis. De overige varianten verschillen door een hoger temperatuurniveau in het distributienet, een warmtepomp, een enkelwandige warmtewisselaar, en door toepassing van de bronnen in de Formatie van Oosterhout.		

# Inhoudsopgave

<b>1 Inleiding</b>	<b>8</b>
1.1 Achtergrond	8
1.2 Doelstelling	8
1.3 Studiegebied	9
<b>2 Geologische haalbaarheid</b>	<b>10</b>
2.1 Hydrogeologische analyse	10
<b>3 Uitgangspunten en ontwerp</b>	<b>16</b>
3.1 Energetische uitgangspunten warmte aanbod en vraag	16
3.2 Uitvoeringsvarianten	17
3.3 Basisontwerp van de HTO	22
<b>4 Analyse van uitvoeringsvarianten</b>	<b>24</b>
4.1 Thermische berekeningen	24
4.2 Financiële analyse	28
4.3 CO <sub>2</sub> -besparing	35
<b>5 Milieu hygiënische en juridische aspecten</b>	<b>37</b>
5.1 Grondmechanica: zetting en opheffing	37
5.2 Thermische effecten	37
5.3 Reflectie op mogelijke verandering grondwaterkwaliteit door thermisch effect op basis van bestaande data	41
5.4 Juridisch raamwerk	47
5.5 Omgevingsscan	48
<b>6 Risico inventarisatie en plan van aanpak vervolgstappen</b>	<b>50</b>
6.1 Introductie	50
6.2 Inschatting relevantie van de projectrisico's	50
6.3 Plan van aanpak vervolg	56
<b>7 Conclusie</b>	<b>58</b>
<b>Referenties</b>	<b>60</b>

<b>Bijlagen</b>	<b>61</b>
Bijlage I. Ontwerpnorm bronnen	61
Bijlage II. Brontechniek	66
Bijlage III. Beschrijving numerieke model SEAWATv4	69
Bijlage IV. Grond mechanische processen	72
Bijlage V. Generieke risico-inventarisatie voor HTO	75

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Hoge Temperatuur opslag (HTO) kan een belangrijke schakel zijn in de optimale koppeling van warmtevraag enerzijds en duurzame warmte anderzijds, zo ook voor het warmtenet in Alkmaar en Heerhugowaard. In de toekomst zal het net steeds verder verduurzaamd worden, wat inhoudt dat de inzet van gasketels steeds verder wordt afgebouwd. 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 en kan in de winter (een deel van) de piekvraag worden ingevuld.

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

### Wat is HTO?

HTO is het opslaan van hoge temperatuurwarmte in 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 heeft Eneco een doel met de inpassing van een HTO in het leveringsgebied van Nesselande. Ten tweede speelt deze verkenning een rol in het WINDOW project.

Het primaire doel van een HTO in het leveringsgebied is om huidige en toekomstige duurzame bronnen zo efficiënt mogelijk in te kunnen zetten. HTO kan hierbij aan bijdragen.

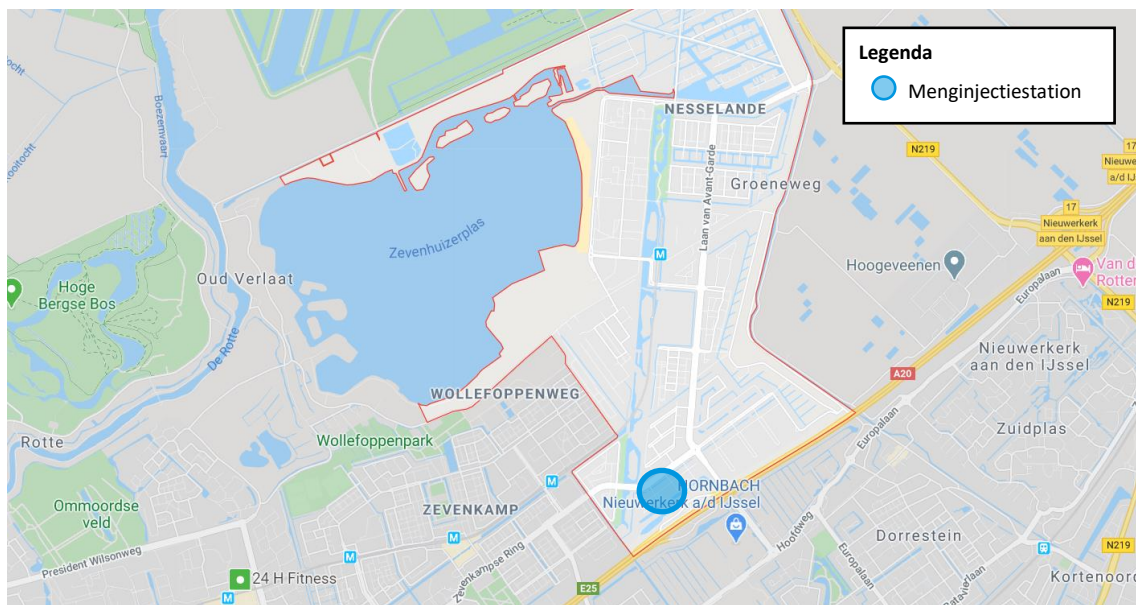
Het doel vanuit het WINDOW project is om een reeks verkenningen parallel uit te voeren, en vanuit de gedachte 'learning-by-doing' te leren van de verschillende situaties en de kansrijkheid van HTO op



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 Studieggebied

Een overzicht van het studieggebied is gegeven in Figuur 1-1. De wijk Nesselande is gelegen ten oosten van de Zevenhuizerplas. Vanuit het menginjectiestation loopt een primair net naar het onderstation voor Nesselande. De beoogde locatie voor de HTO is in de buurt van het menginjectiestation.



Figuur 1-1: Overzicht studieggebied Nesselande

## 2 Geologische haalbaarheid

### 2.1 Hydrogeologische analyse

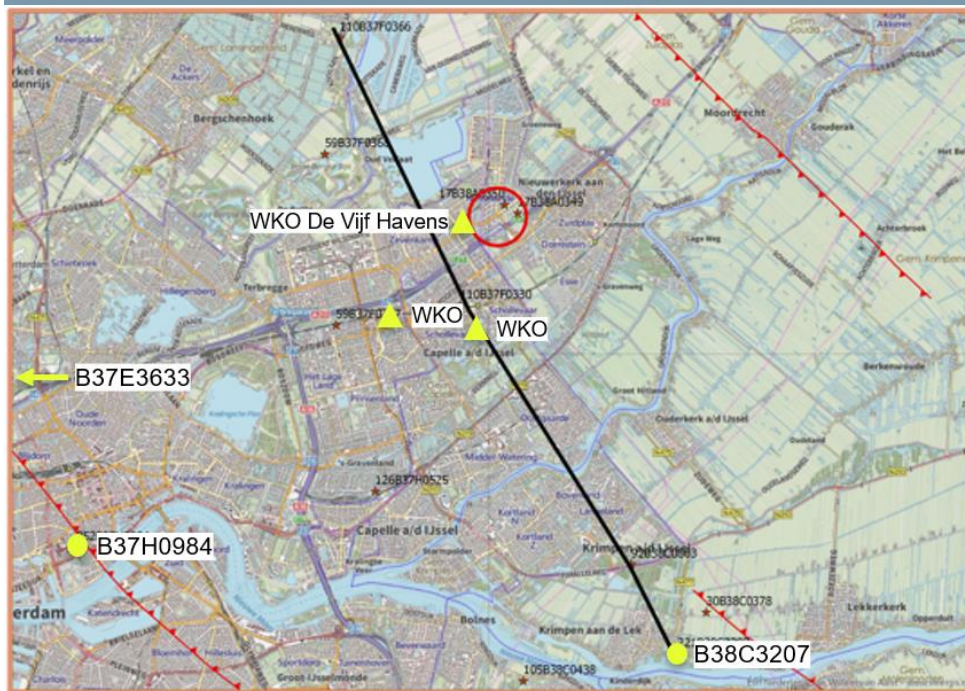
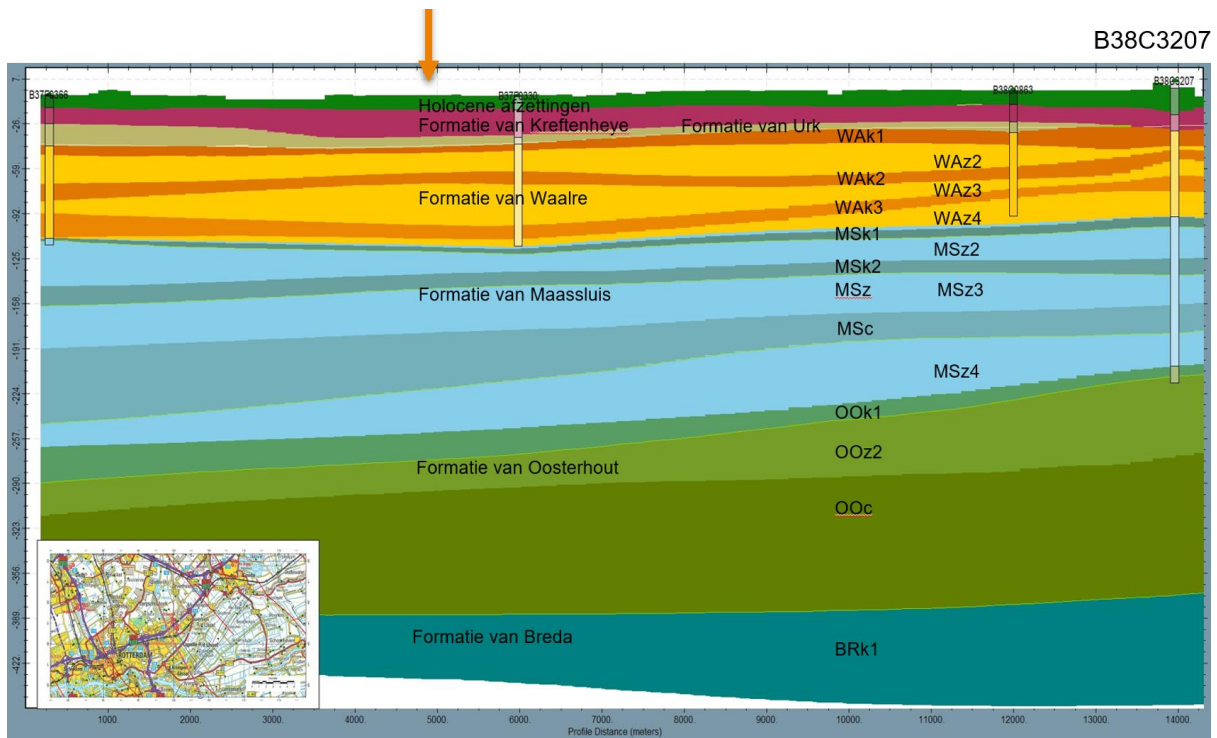
Voor de analyse van de geschiktheid van de ondergrond, is gebruikt gemaakt van de openbare modellen en datasets (DGM/REGIS II v2.2, NLOG, DINO, grondwatertools), aangevuld met boorbeschrijvingen van lokale boringen en/of informatie van open bodemenergiesystemen. TNO en IF Technology hebben deze informatie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

#### 2.1.1 Beschrijving ondergrond

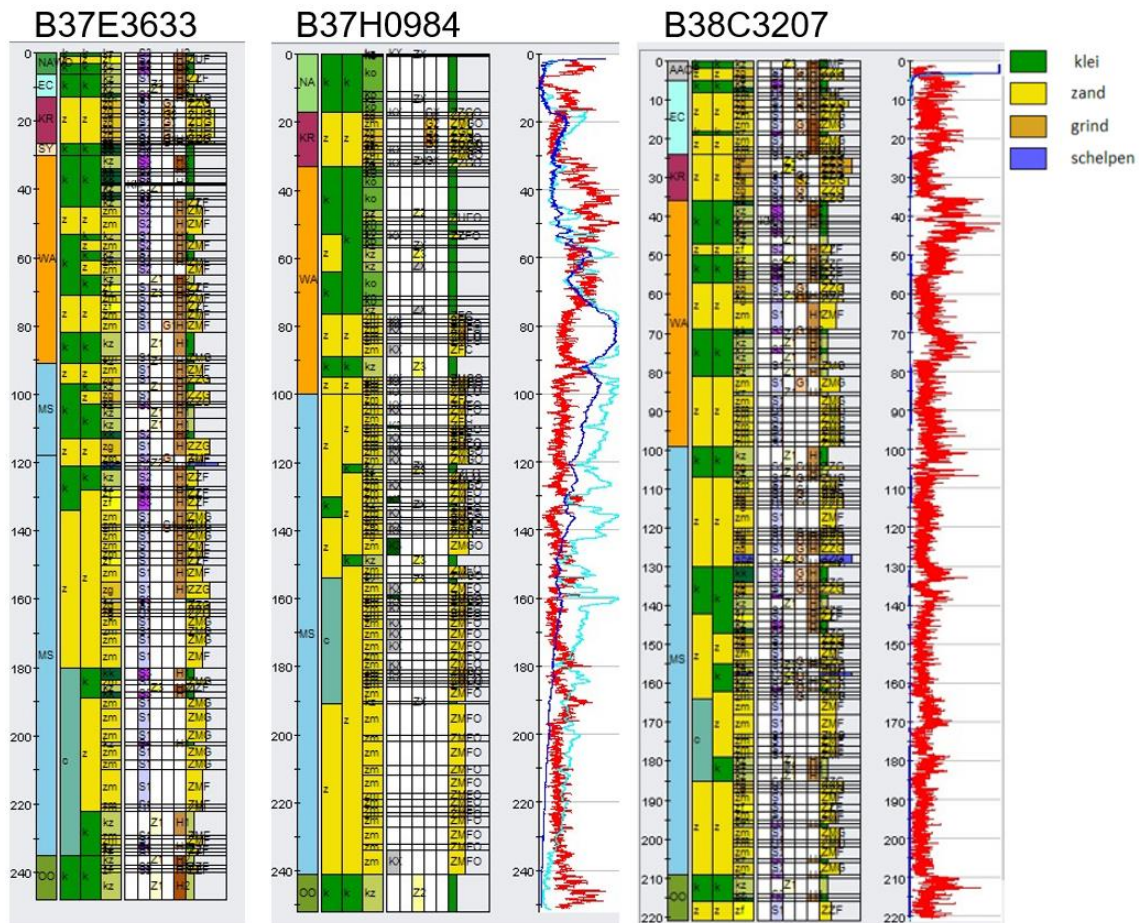
De ondergrond in de omgeving van Rotterdam Nesselande bestaat uit een opeenvolging van verschillende formaties, die weer zijn opgesplitst in verschillende deellagen (hydrogeologische eenheden), zie doorsnede van het onderzoeksgebied in Figuur 2-1. De verwachte geologische eenheden met mogelijk geschikte 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 de opeenvolging van de verwachte eenheden binnen deze formaties zien.

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

Voor meer gedetailleerd informatie over de ondergrond is gekeken naar boringen in de omgeving. In de DINO database zijn drie diepere boringen in de omgeving bekend (Figuur 2-2). Daarnaast zijn boorstaten van drie WKO systemen gebruikt; één op 400 m afstand van de beoogde HTO locatie (De Vijf Havens), en twee op ~ 2 km afstand van de beoogde HTO locatie. Deze WKO's gaan tot max. 219 m diepte en kunnen hierdoor worden gebruikt voor een inschatting van de Formatie van Maassluis. Een warmteopslag systeem voor Rotterdam Nesselande in deze bodemlagen moet dus rekening houden met de WKO van De Vijf Havens.



Figuur 2-1 - Doorsnede (REGIS II v2.2) door het gebied van de beoogde HTO locatie, van west naar oost. De rode cirkel op de plattegrond en de oranje pijl in de doorsnede geven de mogelijke HTO locatie aan. Boring B38C3207 ligt ten zuidoosten van Rotterdam Oost. Twee diepere boringen ten zuidwesten van de HTO locatie zijn bekeken om een inschatting te kunnen maken van de Fm. van Oosterhout. De WKO systemen die zijn bekeken staan aangegeven met een driehoek.



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

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, 1 <sup>e</sup> kleiige eenheid	WAK1	Scheidende laag
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	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

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

- De zandige eenheden in de Fm. van Waalre. Op de locatie lijkt de zoet-zout grens nog ondiep te liggen, echter komt deze snel in de Formatie van Waalre te liggen richting naar het oosten toe. Ook liggen deze lagen erg ondiep en moet rekening worden gehouden met warmte uitstraling naar de oppervlakte/bovenliggende lagen.
- Drie of vier mogelijk geschikte zandige eenheden in de Fm. van Maassluis (MSz2, MSz3, MSc, MSz4). De kleilaag boven de MSz2 lijkt erg dun, waardoor opwarming van het bovenliggende watervoerende laag een risico vormt.
- Mogelijk geschikte watervoerende laag in de tweede zandige eenheid van de Fm. van Oosterhout (OOz2), de dikte varieert lateraal sterk, een kleilaag wordt aanwezig geschat.

### 2.1.2 Nadere analyse potentieel geschikte hydrogeologische eenheden

#### *Formatie van Waalre*

De Formatie van Waalre ligt rondom Rotterdam Nesselande op een diepte van 30-100 m-mv. Kleilagen van de Waalre klei wisselen de zandlagen van Waalre af. De zandlagen zijn over het algemeen matig grof. De kleilagen zijn vaak sterkt zandig tot zwak siltig. Uit de WKO boring dichtbij de locatie komt naar voren dat de tweede en derde zandige eenheden van de Fm. van Waalre (PZWAz2 en PZWAz3) waarschijnlijk voldoende dikte hebben (~7-18 m) met boven deze zandige eenheden dunne afsluitende kleilagen (~7 m dikte). In deze grove zanden kan de buoyancy stroming door injectie van een hoge temperatuur erg groot zijn en zorgen voor warmteverliezen, samen met een dunne kleilaag en de ondiepe ligging is er risico op warmte uitstraling naar bovenliggende lagen en het oppervlak. De zoet-zout grens ligt ondiep op de locatie (<50 m), echter naar het oosten toe daalt deze en komt in de Waalre Formatie te liggen.

#### *Formatie van Maassluis*

De Formatie van Maassluis wordt als meest interessante formatie gezien voor HTO. De formatie bestaat uit fijn tot matig grof marine zanden afgewisseld met aaneengesloten kleilagen. De Formatie van Maassluis ligt in Zuid-Holland rond de 90-260 m-mv.

Uit de REGIS II v2.2 doorsnede komt naar voren dat de zandige eenheden van de Fm. van Maassluis lateraal kunnen variëren in dikte, de lithologie van de zanden wordt geschikt geacht. De boringen in Figuur 2-2 laten zien dat er waarschijnlijk goede watervoerende lagen aanwezig zijn met een kleilaag erboven. De dikte van deze kleilagen kan lateraal variëren. De gamma ray in de complexe laag laat een zandig deel zien van ~10 m dikte, met klei erboven en onder. De WKO boorstaten laten zowel een zandige laag zien, als zand met dunne kleilaagjes tussen 170-220 m-mv. Bij de WKO van De Vijf Havens is een filter geplaatst in de MSz3 (10m filter) en in de MSc (10m filter).

De horizontale doorlatendheid van de verschillende zandpakketten wordt op basis van REGIS II v2.2 rond de 8-12 m/d geschat, dit komt goed overeen met de doorlatendheden uit de capaciteitsproeven van de WKO-systemen, deze liggen tussen de 8 en 14 m/d.

#### *Formatie van Oosterhout*

De Formatie van Oosterhout bestaat uit matig fijn tot fijne zanden en klei en zandige klei. De zanden zijn vaak glauconiet-houdend en bevinden zich rondom Rotterdam Oost tussen een diepte van 230-390 m-mv. De Fm. van Oosterhout is in Zuid-Holland over het algemeen vaak kleilig/siltig ontwikkeld, met mogelijkheid op enkele meters zandlaag met fijn zand welke glauconiet en schelpenresten kunnen bevatten. De zandlaag wordt naar het zuidoosten toe dikker, echter hebben de boringen in de omgeving enkel de bovenste 10 m van de kleiige eenheid in Fm. van Oosterhout aangeboord, waardoor de dikte

onzeker is. Op basis van interpolatie tussen boringen in de verdere omgeving geeft REGIS II v2.2 een inschatting van ~20-25 m dikte, dit is echter erg onzeker. Ook de dikte van de bovenliggende kleilaag is onzeker, in de boring B38C3207 in Figuur 2-2 is een relatief dunne (< 5m) kleilaag te zien, deze lijkt dikker te worden naar het noord en westen toe, echter is dit weer op basis van boringen op grote afstand van de beoogde HTO locatie, waardoor het lastig te bepalen is hoe dik deze kleilaag is op de beoogde HTO locatie.

### 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 twee (en mogelijk MSz4 als extra optie) 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	Evt. extra	Eenheid
Opslagpakket	Name_aq	MSz3	OOz2	MSz4 (dunne kleilaag)	-
Achtergrond temperatuur	T_amb	13.6	16.3	15.3	°C
Dikte opslagpakket	L_storage	22	25	22	m
Horizontale doorlatendheid (incl. standaarddeviatie REGIS II v2.2 indien van toepassing)	K_h	10	6 (3.4)	8 (3.8)	m/d
Verticale doorlatendheid <sup>1</sup>	K_v	5	3	4	m/d

Uit bovenstaande tabel volgt dat het doorlaatvermogens van de derde en vierde zandige eenheden van de Formatie van Maassluis hoger (220 m<sup>2</sup>/d en 176 m<sup>2</sup>/d resp.) zijn dan het doorlaatvermogen van de tweede zandige eenheid van de Formatie van Oosterhout (150 m<sup>2</sup>/d). Daardoor zullen bronnen in MSz3 en/of 4 een hogere capaciteit hebben dan bronnen in OOz2. Verder is de dikte van de OOz2 en de kleilaag erboven 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 MSz3 en 4 is dat deze eenheden ondieper liggen, waardoor minder diep geboord hoeft te worden, echter moet wel rekening worden gehouden met de effecten van een HTO op de aanwezige WKO op ~400m afstand.

### 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 worden hieronder beschreven;

- *Dikte van het opslagpakket OOz2 en scheidende laag boven opslagpakket*  
Door het ontbreken van diepe boringen in de omgeving van de beoogde HTO locatie, is de diepte en dikte van de tweede zandige eenheid van de Fm. van Oosterhout onzeker. Op basis van REGIS II v2.2 is een inschatting gemaakt. De exacte diepte en dikte van de watervoerende lagen op de

<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).

locatie kan variëren, maar er wordt wel een geschikte watervoerende laag verwacht op basis van de algemene hydrogeologische opbouw in de regio.

Zowel de dikte en diepte van de watervoerende laag als de scheiden laag van de Fm. van Oosterhout 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 WKO systemen vaak dat ~85% 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. In hoeverre die 85% ook hier van toepassing is, is onzeker. Er dient rekening te worden gehouden met een range van b.v. 50-90%.

- *Kh- en kv-waarden en anisotropie*

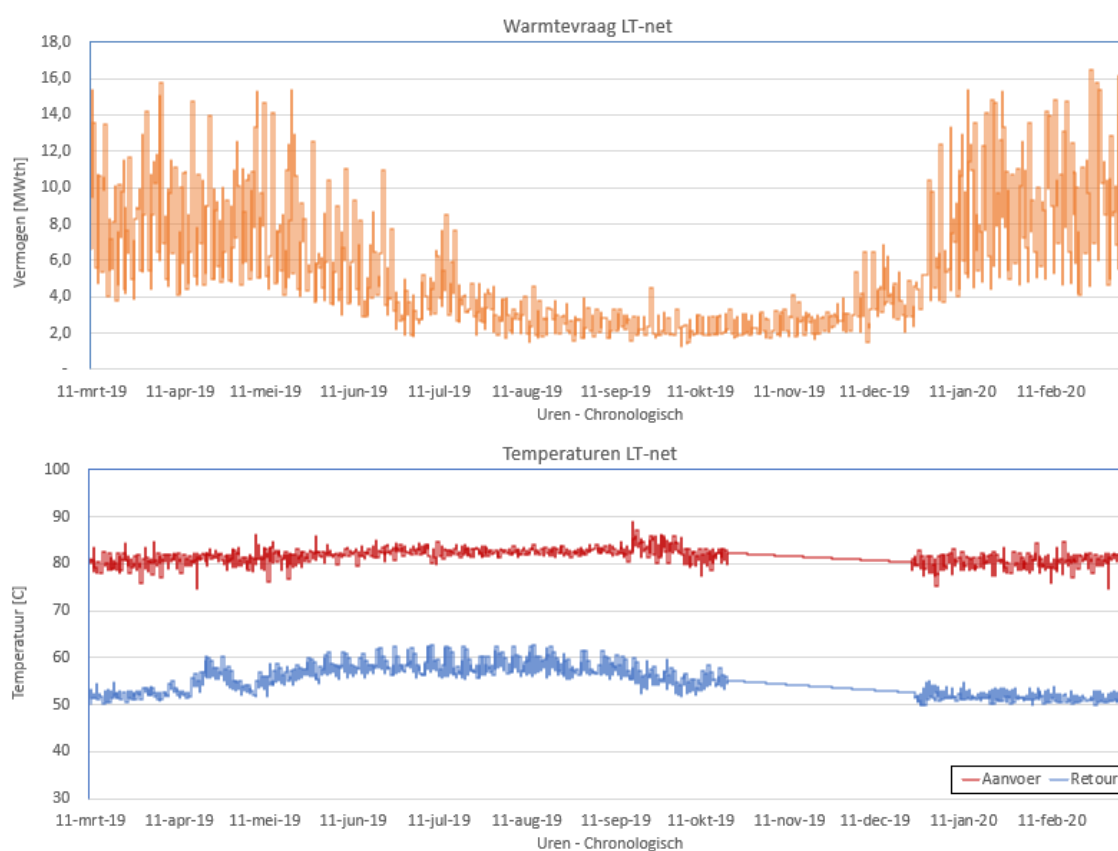
Een onzekere factor is de doorlatendheid. Van de meeste hydrogeologische eenheden is van de doorlatendheid een standaarddeviatie berekend in REGIS II v2.2. Dit is uitgedrukt in de standaarddeviatie (in m/d) van de door het model geschatte, meest waarschijnlijke doorlatendheid. Voor de locatie Rotterdam Nesselande is de standaarddeviatie voor de MSz4 3.8 m/d en voor de OOz2 3.4 m/d. De doorlatendheid voor de MSz3 is geschat op basis van de WKO-boring van De Vijf Havens, deze kwam goed overeen met de waarden in REGIS II v2.2 en dit maakt de onzekerheid in doorlatendheid van deze watervoerende laag minder onzeker. De anisotropie is een factor die verhouding tussen de doorlatendheid in twee verschillende richtingen aangeeft, in dit geval omdat de horizontale en de verticale doorlatendheid niet identiek zijn. De verticale anisotropie (de verhouding tussen de horizontale en verticale doorlatendheid) hangt erg af van de lokale(dunne) klei inschakelingen in een watervoerende laag en is daardoor moeilijk te voorspellen. Voor de berekening van de verticale doorlatendheid van een watervoerende laag is uitgegaan van de helft van de horizontale doorlatendheid (en voor kleiige lagen  $k_h = 3 * k_v$ ), echter zijn in andere studies ook hogere anisotropie factoren aangehouden en zit er een grote onzekerheid in deze anisotropie waarden.

## 3 Uitgangspunten en ontwerp

### 3.1 Energetische uitgangspunten warmte aanbod en vraag

#### Vraag

Het huidige warmtenet van Nesselande voorziet grofweg 5000 huishoudens van warmte. Het is een cascade waarbij het distributienet van Nesselande via een menginjectiestation is aangesloten op het distributienet van Zevenkamp. Naast het warmtenet van Nesselande is er nog een apart distributienet dat het bedrijventerrein-Nesselande van warmte voorziet. Het distributienet van Zevenkamp heeft een aanvoertemperatuur van 120°C in de winter en 90°C in de zomer. In het menginjectiestation wordt de aanvoertemperatuur voor Nesselande naar beneden gebracht tot 80°C.



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

Voor het bepalen van de kenmerken van het distributienet heeft Eneco de data aangeleverd welke staan afgebeeld in Figuur 3-1. Voor de temperaturen en het gevraagd vermogen van het warmtenet zijn er geen waarden voor een volledig jaar per uur beschikbaar, deze zijn daarom geëxtrapoleerd om een volledig jaar te genereren. Voor de temperatuur zijn de missende datapunten lineair van het eerst missende punt tot het laatst missende punt ingevuld. Voor het vermogen is ook de variatie van belang voor de huidige studie, vandaar is een voorgaande periode van dezelfde data waarbij er een vergelijkbare buitentemperatuur heerst gebruikt om de ontbrekende data op te vullen.



Seizoensmatige en dag/nacht fluctuaties zijn duidelijk waarneembaar. Het piekvermogen bedraagt circa 16 MW<sub>th</sub>. Dit komt overeen met circa 3,2 kW<sub>th</sub> per woning, inclusief gelijktijdigheidseffecten. In de zomer ligt het vermogen tussen de 2 MW<sub>th</sub> en 4 MW<sub>th</sub>. Warmte is dan nodig voor tapwater en het compenseren van warmteverliezen in het net. De totale warmtevraag van het net bedraagt 174.000 GJ van de afgebeelde periode.

De aanvoertemperatuur ligt generiek rond de 80°C en de retour temperatuur varieert tussen de 50°C en 62°C. Waarbij de retourtemperatuur in de winter lager is dan in de zomer. De aanvoer van het bedrijventerrein-Nesselande wordt gevoed vanuit het distributienet Nesselande op 50°C en heeft een retour op 30°C, indien nodig wordt er bijgemengd vanuit het distributienet van Zevenkamp.

### **Aanbod**

De warmte beschikbaar om de HTO te laden zou afkomstig kunnen zijn uit ofwel de biomassacentrale, of het Rotterdamse net gevoed door de AVR centrale. De warmte uit het Rotterdamse net is enkel beschikbaar zolang er nog geen hydraulische beperking is bij het pompstation Boszoom, de bottleneck. Vanwege de geringe regelcapaciteit van een biomassacentrale kan de HTO ook als buffer deze geproduceerde warmte kunnen dienen.

Een mogelijk geothermiebron is nog vroeg in de ontwikkelfase en wordt niet meegenomen in onderstaande varianten.

De bron voor de HTO is warmte uit het primaire net, welke ongeacht de bron, een aanvoer temperatuur tussen de 90°C en 120°C graden heeft. In de zomer, wanneer de HTO wordt geladen, is de aanvoertemperatuur grofweg 90°C.

### **HTO**

Afgaande op het primaire net als bron, met ofwel de ARN centrale ofwel de biomassa centrale wordt de HTO geladen met 90°C. De functie van de HTO is om de vraag Nesselande te balanceren en zo een basislast tijdens de zomer te creëren welke in de winter geleverd kan worden en het primaire net kan ontlasten dan wel geschikt maken voor uitbreiding.

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

1. HTO zonder warmtepomp (met bijmenging vanuit het primaire net)
2. HTO met warmtepomp

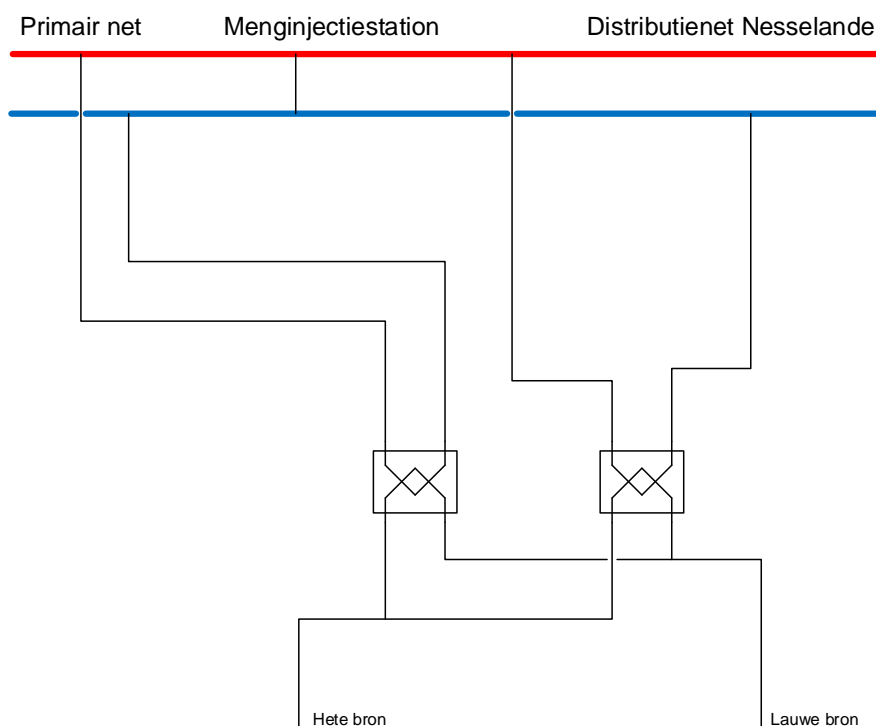
## **3.2 Uitvoeringsvarianten**

### **3.2.1 HTO zonder warmtepomp**

In de variant zonder warmtepomp levert de HTO direct aan het distributienet van Nesselande. De HTO wordt gevoed vanuit het primaire net en dus geladen met een temperatuur van 90°C. Eneco heeft belang bij het installeren van dubbele warmtewisselaars om te voorkomen dat er zoutwater in het warmtenet terecht komt. Per warmtewisselaar is er gerekend met een temperatuurverschil van 2°C. Dit resulteert in een injectietemperatuur van 86°C in de hete bron van de HTO. Als de overcapaciteit van het primaire net afneemt door de toenemende vraag vanuit het net Nesselande zal de HTO overgaan op warmtelevering.

Er zijn twee varianten waarbij alleen enkele warmtewisselaars worden toegepast. Dit om een vergelijking te leggen tussen beide situaties. Merk op dat er dan met een temperatuur van 88°C in de hete bron van de HTO wordt geïnjecteerd. Als standaard wordt de dubbele warmtewisselaar weergegeven, maar er

zullen ter vergelijking ook varianten worden uitgewerkt met een enkele wisselaar. Een uitvoering met enkele warmtewisselaars is weergegeven in Figuur 3-2.



Figuur 3-2: Inpassing HTO Rotterdam-Nesseland zonder warmtepomp met enkele warmtewisselaars. Er zijn ook varianten uitgewerkt met dubbele warmtewisselaars.

#### Laden HTO

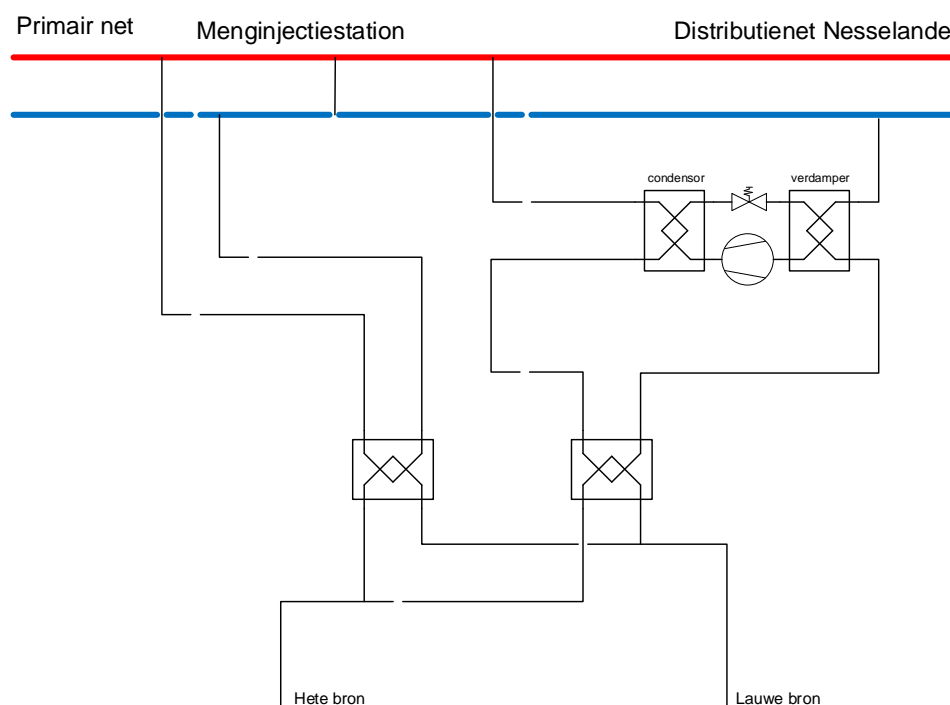
In de zomerperiode wordt de HTO geladen via het primaire net. Wanneer er sprake is van overcapaciteit van het net dan wel bronnen, zal de HTO geladen worden. Water uit de lauwe bron wordt onttrokken en opgewarmd met warmte uit het primaire net van 90°C. Door de warmtewisselaars treedt een temperatuurverlies van 4°C op. Het opgewarmde grondwater wordt geïnfilteerd in de hete bron met een temperatuur van 86°C. De lauwe bron temperatuur ligt maximaal 4°C hoger dan de retourtemperatuur van het distributienet van Nesseland in de winter. Het temperatuurverschil tussen de lauwe bron en de injectietemperatuur van de hete bron bepaalt, samen met het haalbare debiet, het laadvermogen van de HTO.

#### Ontladen HTO

Bij het ontladen van de HTO wordt water uit de retour van Nesseland verwarmd tot maximaal 4°C kouder dan de temperatuur van de hete bron. Naarmate de HTO meer geleverd heeft zal de productietemperatuur inzakken en zal onder de gewenste aanvoertemperatuur van het warmtenet komen. Door middel van bijmenging van het primaire net kan toch de gewenste temperatuur gehandhaafd worden. Wanneer de productietemperatuur van de HTO lager wordt moet er relatief meer worden bijgemengd en daalt het haalbare debiet van de HTO.

### 3.2.2 HTO met warmtepomp

In de uitvoeringsvariant met warmtepomp wordt deze aan de warmtenet-zijde ingepast. Energetisch is het iets gunstiger om de verdamer 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 verdamer van de warmtepomp in verband met de verwachte saliniteit van het grondwater. De uitvoeringsvariant is weergegeven in Figuur 3-3, inclusief de aanvoer vanuit het primaire net.



*Figuur 3-3: Inpassing HTO Rotterdam-Nesselande met warmtepomp met enkele warmtewisselaars. Er zijn ook varianten uitgewerkt met dubbele warmtewisselaars.*

#### COP-warmtepomp

Er is gekeken naar een variant met een grondwaterinjectietemperatuur van 40°C, het retourwater dient dan afgekoeld te worden tot 38°C. Rekening houdend met een approach van 2,5°C in de verdamer en condensor, en een systeemrendement van 60% rendement (t.o.v. Carnot), bedraagt de COP 4,5 bij een grondwaterinjectietemperatuur van 40°C. Er wordt hierbij vastgehouden aan een gewenste aanvoertemperatuur van 80 graden van het distributienet Nesselande.

### Laden HTO

Het laden van de HTO met warmtepomp is vrijwel identiek aan de situatie zonder warmtepomp. Het verschil is enkel dat de productietemperatuur van de koude bron lager zal zijn omdat er tijdens het ontladen met een lagere temperatuur wordt geïnjecteerd. Het maximale vermogen dat de HTO kan leverentijdens laden is dan ook hoger in de variant met warmtepomp.

### Ontladen HTO

Bij het ontladen van de HTO met warmtepomp wordt, in tegenstelling tot de situatie zonder warmtepomp, de aanvoertemperatuur van het distributienet Nesselande aangehouden. De HTO zal vanaf het begin zo veel mogelijk de basislast op zich nemen. Aan het begin van de ontlaadperiode is de temperatuur van de hete bron van de HTO nog heet genoeg om direct te leveren aan het warmtenet. Toch wordt er echter gebruik gemaakt van de warmtepomp om de injectietemperatuur van 40°C in de lauwe bron te waarborgen. Het water wordt namelijk uit de retourleiding onttrokken en in de verdamper afgekoeld tot 38°C. In de warmtewisselaar wordt warmte van de HTO overgedragen, de aanvoertemperatuur naar de condensor is afhankelijk van de retourtemperatuur van het distributienet, dit bepaald namelijk de hoeveelheid warmte die in de verdamper is opgenomen en door de condensor kan worden afgegeven. Na de condensor wordt de aanvoertemperatuur van 80°C gehandhaafd. Het resterende vermogen wordt aangevuld door toevoer vanuit het primaire net.

### Inzet bronnen en HTO

Voor een aantal varianten zoals weergegeven in Tabel 3-1 is de prestatie van de HTO bepaald. Hierbij is voor de variant zonder warmtepomp ook een situatie doorgerekend waarbij er rekening wordt gehouden met een constante aanvoertemperatuur en retourtemperatuur van het distributienet van Nesselande van respectievelijk 75°C en 50°C.

Tabel 3-1 Onderzochte varianten Rotterdam Nesselande

Variant	Formatie HTO	Warmtenet Nesselande	Warmtepomp	Warmtewisselaar
Variant 1	Maassluis	Huidige data	Nee	Dubbel
Variant 2	Maassluis	75 °C-50 °C	Nee	Dubbel
Variant 3	Maassluis	Huidige data	Ja	Enkel
Variant 4	Maassluis	Huidige data	Ja	Dubbel
Variant 5	Oosterhout	Huidige data	Nee	Dubbel
Variant 6	Oosterhout	75 °C-50 °C	Nee	Dubbel
Variant 7	Oosterhout	Huidige data	Ja	Enkel
Variant 8	Oosterhout	Huidige data	Ja	Dubbel

Tabel 3-2 Energieverdeling varianten Rotterdam Nesselande

Variant	Aandeel primair net [GJt]	Aandeel HTO [GJt]	Aandeel WP [GJt]
Variant 1	139.500	30.500	n.v.t.
Variant 2	132.900	37.100	n.v.t.
Variant 3	107.200	52.700	10.100
Variant 4	107.200	50.700	12.100
Variant 5	130.900	39.100	n.v.t.
Variant 6	121.000	49.000	n.v.t.
Variant 7	87.700	68.800	13.500
Variant 8	87.500	66.300	16.200

In **Error! Reference source not found.** is de energieverdeling gegeven voor de verschillende varianten die zijn uitgewerkt. 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 10<sup>e</sup> jaar.

Het aandeel primaire net is de energie die direct door het primaire net aan het distributienet van Nesselande wordt geleverd. Naarmate het aandeel van de HTO stijgt daalt dat van het primaire net. In de variant zonder warmtepomp waarbij het distributienet een constante temperatuur heeft van 75°C-50°C, kan meer energie geleverd worden omdat de retourtemperatuur kouder is dan in de gemeten data. Hierdoor kan de productietemperatuur van de HTO verder worden afgekoeld en met een lagere temperatuur worden geïnjecteerd in de koude bron. In de variant met een warmtepomp kan de productietemperatuur nog verder worden uit gekoeld en stijgt het aandeel van de HTO verder. Het aandeel WP is feitelijk het elektriciteitsverbruik. Dit wordt via de condensor van de warmtepomp ook als warmte geleverd aan het net. De uitwerking van de 8 varianten is gegeven in Tabel 3-3.

Tabel 3-3 Uitwerking resultaten varianten Rotterdam Nesselande

Variabele	Eenheid	Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5	Variant 6	Variant 7	Variant 8
Opslag aquifer	-	MSz3	MSz3	MSz3	MSz3	OOz2	OOz2	OOz2	OOz2
Opslag temperatuur (hete bron)	°C	86	86	88	86	86	86	88	86
Opslag temperatuur (lauwe bron)	°C	60	54	40	40	60	54	40	40
Afkaptemperatuur	°C	64	58	42	44	64	58	42	44
Opslag volume HTO	m <sup>3</sup>	473.000	432.000	369.000	369.000	549.000	504.000	441.000	441.000
Opslag warmte HTO	GJt	72.600	74.200	82.400	79.200	83.100	86.000	98.300	94.700
Maximaal benodigd debiet laden	m <sup>3</sup> /h	105	96	82	82	122	112	98	98
Maximaal benodigd debiet leveren	m <sup>3</sup> /h	105	96	82	82	122	112	98	98
Max. vermogen warmtepomp	MWt	-	-	4,6	5,3	-	-	6,2	6,9
Bedrijfsuren HTO leveren	h	3.227	3.678	4.264	4.264	3.473	4.106	4.264	4.264
Vollasturen WP	h	-	-	2.760	2.780	-	-	2.720	2.860

### 3.3 Basisontwerp van de HTO

#### 3.3.1 Uitgangspunten

Het globaal principe van hoe de HTO wordt ingepast is reeds weergegeven in Figuur 3-2 en Figuur 3-3. 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 warmtenet-zijdig ingepast. Meer informatie omtrent ontwerpkeuzes, zoals bijvoorbeeld materiaalkeuze en waterbehandeling, is te vinden in Bijlage II.

#### 3.3.2 Putontwerp

Uit de ondergrond scan, sectie 2.1, blijkt dat er twee watervoerende lagen aanwezig zijn die geschikt lijken voor warmteopslag, de derde watervoerende laag in de Formatie van Maassluis (MSz3) en de tweede watervoerende laag in de Formatie van Oosterhout (OOz2). Beide lagen hebben iets andere karakteristieken die dus leiden tot een ander putontwerp.

De natuurlijke grondwatertemperatuur van de OOz2 is ruim 1 graad hoger dan de grondwatertemperatuur in de MSz3 omdat de OOz2 ruim 110m dieper ligt. De dikte van de MSz3 is ingeschat op 22m en de dikte van de OOz2 op 25m. Hierdoor is de thermische straal die zich vormt tijdens de warmteopslag, voor hetzelfde volume, voor de MSz3 iets groter (Tabel 3-4).

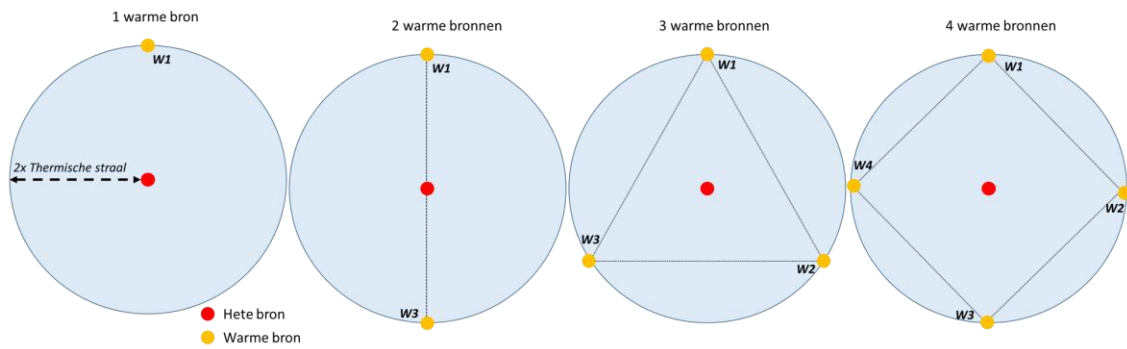
De dikte van de watervoerende pakketten, de horizontale hydraulische doorlatendheid, het benodigde opslag/onttrekkingsvolume en de verwachte onttrekkingstemperatuur bepalen tezamen hoeveel hete en warme bronnen er nodig zijn (meer info rapportage werkpakket C1 en C2), dit is vervolgens weer bepalend voor het 3D putontwerp. De (conservatieve) NVOE richtlijnen die gemaakt zijn voor WKO systemen worden in dit stadium toegepast (zie Bijlage I). Echter, er zijn aanwijzingen dat ruimere normen mogelijk kunnen zijn voor warmteopslag, de onzekerheid om dit te kunnen toepassen is in dit stadium echter te groot. De wijze waarop de putten worden geboord is beschreven in Bijlage II.

Tabel 3-4 Putontwerp varianten Rotterdam Nesselande

	T <sub>heet</sub> °C	T <sub>warm</sub> °C	T <sub>cut-off</sub> °C	V <sub>opslag</sub> m <sup>3</sup>	Opslagform atie	L <sub>aq</sub>	T <sub>amb</sub>	Thermische straal (R <sub>th</sub> )	Bronnen <sub>heet</sub>	Bronnen <sub>warm</sub>
Variant 1	86	60	64	473,000	MSz3	22	15.4	103.3	2	2
Variant 2	86	54	58	432,000	MSz3	22	15.4	98.7	2	2
Variant 3	88	40	42	369,000	MSz3	22	15.4	91.2	2	2
Variant 4	86	40	44	369,000	MSz3	22	15.4	91.2	2	2
Variant 5	86	60	64	549,000	OOz2	25	16.5	104.4	4	5
Variant 6	86	54	58	504,000	OOz2	25	16.5	100.0	4	5
Variant 7	88	40	42	441,000	OOz2	25	16.5	93.6	3	5
Variant 8	86	40	44	441,000	OOz2	25	16.5	93.6	3	5

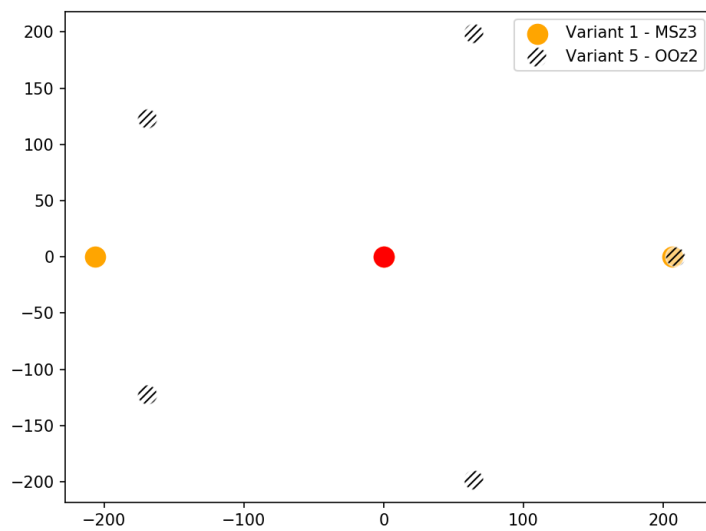
#### 3D putontwerp

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



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

In Figuur 3-7 is de mogelijke 3D plaatsing voor variant 1 en variant 5 weergegeven. De thermische straal, en daarbij de afstand tussen de hete en warme bron, verschilt weinig. Het aantal bronnen is voor de Oosterhout echter significant hoger.



Figuur 3-7 Voorbeeld van 3D plaatsing voor Variant 1 (2 warme bronnen in MSz3) en Variant 5 (5 warme bronnen in Oosterhout). De hete bronnen worden hier gerepresenteerd in het midden.

## 4 Analyse van uitvoeringsvarianten

### 4.1 Thermische berekeningen

#### 4.1.1 Model beschrijving

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

#### Axisymmetrisch & 3D model

De 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:

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

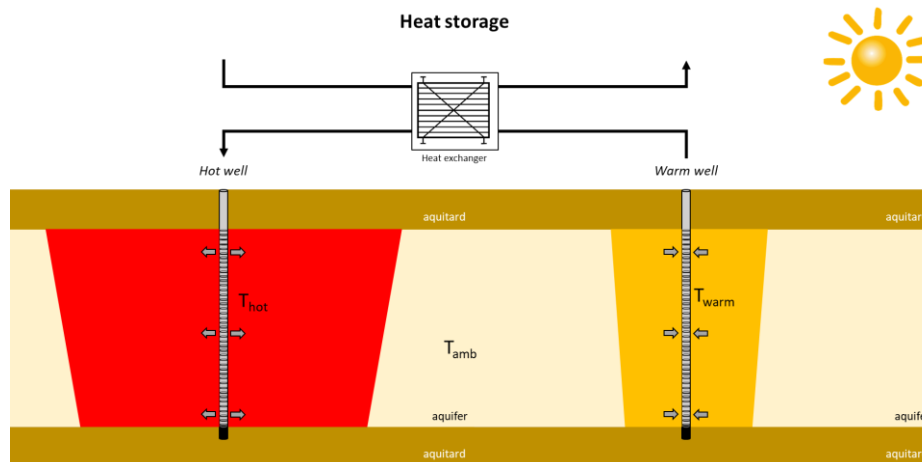
De  $\Delta T$  is voor een bron berekend als het temperatuur verschil met de achtergrond temperatuur ( $T_{ambient}$ ). Dit kan dus gedaan worden voor zowel de hete en de warme bron (4-1).



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 (Figuur 4-1):

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

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



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

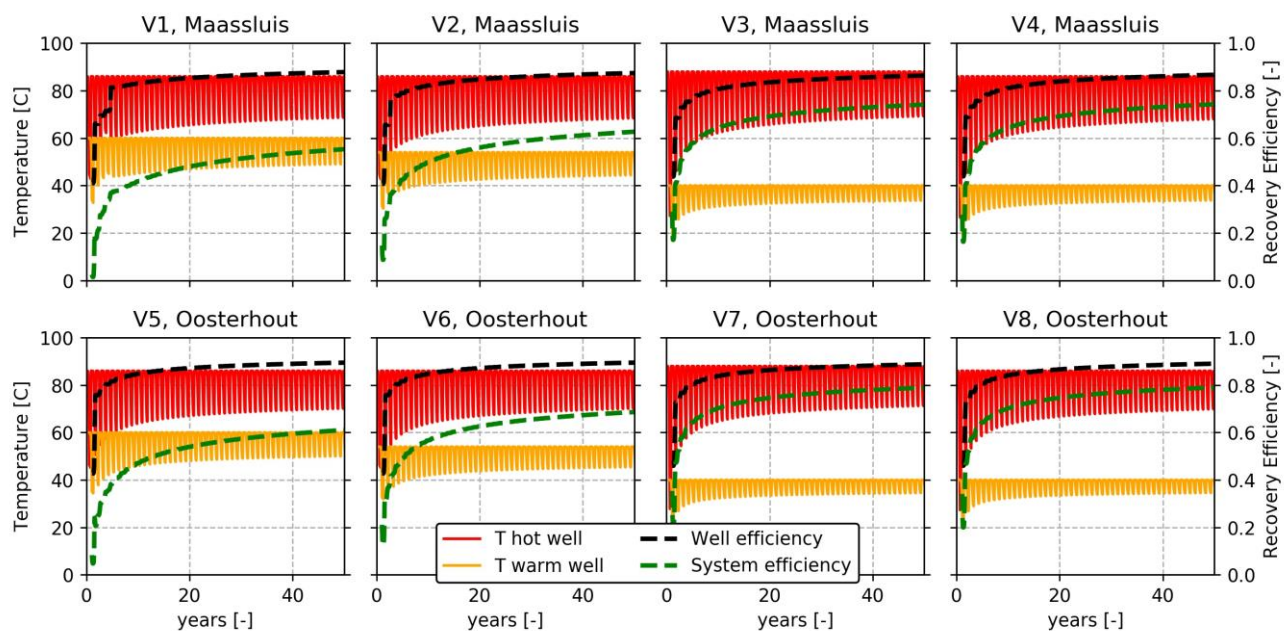
### 4.1.3 Resultaten

#### Axisymmetrisch 50 jaar

Alle 8 de varianten zijn thermisch gemodelleerd om te bepalen welke varianten het meest opportuun zijn voor een verdere uitwerking. Zoals te zien in Figuur 4-2 zijn de verschillen tussen opslag in de formatie van Maassluis en Oosterhout relatief klein. De rendementen zijn iets hoger voor opslag in de formatie van Oosterhout. Echter, voor deze varianten wordt ook een groter volume opgeslagen. Het lijkt er dus op dat de formatie van Maassluis en Oosterhout een vergelijkbare toepasbaarheid hebben voor ondergrondse warmteopslag.

Het rendement van de hete bron is vergelijkbaar voor alle 8 de varianten (na 10 jaar 0.81-0.85) en varieert iets door de variatie in opslagvolumes, laagdikte en afkap temperatuur (Tabel 4-1). Tussen de vier energetische varianten (1 t/m 4 en 5 t/m 8) zijn echter wel flinke verschillen voor het systeemrendement. Dit heeft vooral te maken met de variatie van de warme bron temperatuur. Een

lagere warme bron temperatuur resulteert in A) een groter temperatuurverschil tussen de hete en warme bron en B) kleinere verliezen door opdriving.



Figuur 4-2 Bron temperaturen en de daarop gebaseerde rendementen voor de hete bron en het systeem voor 50 jaar. Axisymmetrisch model.

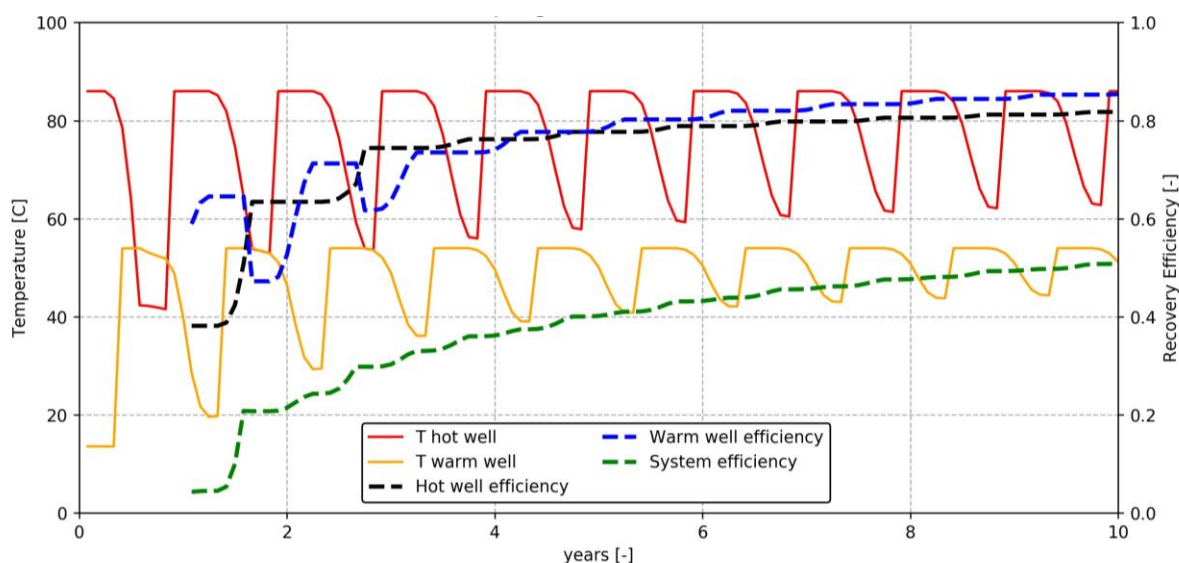
Tabel 4-1 Efficiëntie van de hete bron en het systeem na 2, 10 en 50 jaar gegeven voor de 8 varianten.

	<b>Variant 1 - Maassluis</b>	<b>Variant 2 - Maassluis</b>	<b>Variant 3 - Maassluis</b>	<b>Variant 4 - Maassluis</b>	<b>Variant 5 - Oosterhout</b>	<b>Variant 6 - Oosterhout</b>	<b>Variant 7 - Oosterhout</b>	<b>Variant 8 - Oosterhout</b>
<b>Hete bron</b>								
Efficiëntie (2 <sup>e</sup> jaar)	0.66	0.66	0.69	0.69	0.76	0.76	0.73	0.73
Efficiëntie (10 jaar)	0.83	0.82	0.81	0.81	0.85	0.85	0.84	0.84
Efficiëntie (50 jaar)	0.88	0.87	0.86	0.87	0.89	0.89	0.89	0.89
<b>Systeem</b>								
Efficiëntie systeem (2 <sup>e</sup> jaar)	0.18	0.26	0.41	0.41	0.21	0.32	0.47	0.47
Efficiëntie systeem (10 jaar)	0.42	0.50	0.64	0.64	0.47	0.57	0.70	0.70
Efficiëntie systeem (50 jaar)	0.55	0.63	0.74	0.74	0.61	0.69	0.79	0.79

### 3D model - 10 jaar

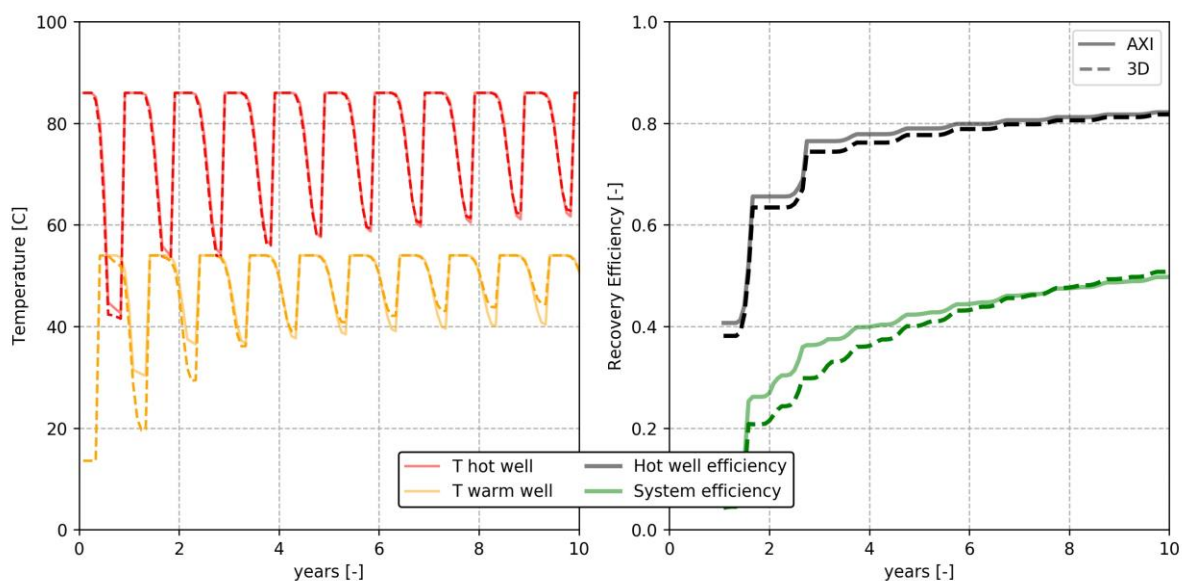
Uit de resultaten van de axisymmetrische berekeningen blijkt dat zowel de formatie van Maassluis als de formatie van Oosterhout een geschikte laag is voor de opslag. Omdat voor de formatie van Maassluis A) minder bronnen nodig zijn, B) het thermische effect vergelijkbaar is met opslag in de formatie van Oosterhout en C) de rendementen vergelijkbaar zijn is deze variant doorgerekend met het 3D model (Figuur 4-3).

Doordat de afkaptemperatuur in de eerste jaren invloed heeft op het volume dat onttrokken kan worden schommelt de efficiëntie van de hete en warme bronnen in de eerste jaren wat. Vervolgens zien we dat de efficiëntie van de warme bronnen langzaam toeneemt en hoger wordt dan de efficiëntie van de hete bron, dit gebeurt omdat de warme bronnen profiteren van de warmte die verloren gaat in de hete bron.



Figuur 4-3 Variant 2 doorgerekend voor 10 jaar met het 3D model. De gegeven temperatuur van de warme bron is het gemiddelde van de 2 warme bronnen.

Dit is nog beter zichtbaar wanneer de resultaten van het axisymmetrische en het 3D model met elkaar vergelijken (Figuur 4-4). In eerste instantie is de efficiëntie van het systeem lager dan was ingeschat op basis van het axisymmetrische model, echter, na 5 jaar is het rendement gelijk en uiteindelijk is het systeemrendement  $> 0.5$  na 10 jaar. Het systeemrendement blijft relatief laag omdat het temperatuur verschil tussen de hete en warme bron relatief klein is ( $\sim 20$  °C). Omdat de temperatuur van de warme bron relatief hoog is zijn hier ook verliezen door oprijving, en, wordt een relatief groot aandeel van de opgeslagen warmte niet teruggewonnen.



Figuur 4-4 Vergelijking tussen de resultaten van het axisymmetrische en 3D model voor variant 2.

## 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. Maassluis hoger dan in de Fm. Oosterhout. Hierdoor kan beredeneerd 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, is ook deze casus interessant om financieel door te rekenen. De casus zonder warmtepomp wordt alleen geschikt geacht indien de retourtemperatuur in de toekomst omlaag gaat in verband met een beter opslagrendement. Daarom zijn casus 2 en 6 financieel doorgerekend in plaats van 1 en 2.

De bovengenoemde argumenten resulteren in de verdere uitwerking van de case in de volgende varianten zoals vermeld in Tabel 6-1:

- Variant 2: opslag en levering met maximaal 96 m<sup>3</sup>/h. Opslag in Fm. Maassluis met opslagtemperatuur in lauwe bron van 54 graden Celsius. Variant maakt gebruik van dubbele warmtewisselaars. Hierbij zijn twee hete en twee lauwe bronnen benodigd.
- Variant 4: opslag en levering met maximaal 82 m<sup>3</sup>/h. Opslag in Fm. Maassluis met opslagtemperatuur in lauwe bron van 40 graden Celsius. Variant maakt gebruik van dubbele warmtewisselaars en een warmtepomp. Hierbij zijn twee hete en twee lauwe bronnen benodigd.
- Variant 6: opslag en levering met maximaal 112 m<sup>3</sup>/h. Opslag in Fm. Oosterhout met opslagtemperatuur in lauwe bron van 54 graden Celsius. Variant maakt gebruik van dubbele warmtewisselaars. Hierbij zijn vier hete en vijf lauwe bronnen benodigd.
- Variant 8: opslag en levering met maximaal 98 m<sup>3</sup>/h. Opslag in Fm. Oosterhout met opslagtemperatuur in lauwe bron van 40 graden Celsius. Variant maakt gebruik van dubbele warmtewisselaars en een warmtepomp. Hierbij zijn vier hete en vijf 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

		<b>Variant 2</b>	<b>Variant 4</b>	<b>Variant 6</b>	<b>Variant 8</b>
Proefboring	[€]	150.000	150.000	210.000	210.000
HTO bronnen	[€]	1.000.000	1.000.000	2.900.000	2.500.000
Warmtepomp	[€]	n.v.t.	3.200.000	n.v.t.	4.100.000
WTB/CT/E overig	[€]	920.000	950.000	950.000	980.000
Onvoorzien (10%)	[€]	200.000	520.000	400.000	790.000
Ontwerp/advies/vergunningen (15%)	[€]	300.000	800.000	600.000	1.200.000
<b>Totaal</b>	<b>[€]</b>	<b>2.570.000</b>	<b>6.620.000</b>	<b>5.060.000</b>	<b>9.780.000</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, koppelend 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 4	Variant 6	Variant 8
Opslag warmte	[€/jaar]	-	-	-	-
Elektriciteitsverbruik	[€/jaar]	43.000	273.000	52.000	354.000
Onderhoud en beheer	[€/jaar]	115.000	178.000	174.000	245.000
Waterbehandeling	[€/jaar]	21.000	22.000	24.000	26.000
Monitoring en BRL inspecties	[€/jaar]	30.000	30.000	30.000	30.000
<b>Totaal</b>	<b>[€/jaar]</b>	<b>209.000</b>	<b>503.000</b>	<b>280.000</b>	<b>655.000</b>

### Opslag warmte

In de zomerperiode is er nog warmte over vanuit de geothermiebron. De prijs voor opgeslagen warmte wordt in de referentiesituatie kosteloos meegenomen, m.a.w. €0 per GJ. In de gevoeligheidsanalyse wordt er echter voor de boven- en onderwaarde €3/GJ en -€3/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 (MWh) die wordt opgeslagen en geleverd uit de HTO, 20 kWh aan elektriciteit nodig is. De SPF voor het ontladen ligt in variant 4 en variant 8 door inzet van de warmtepomp lager. De COP van de warmtepomp is ingeschat op 4,5 (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 5,2 en 5,1 voor variant 4 en 8 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**

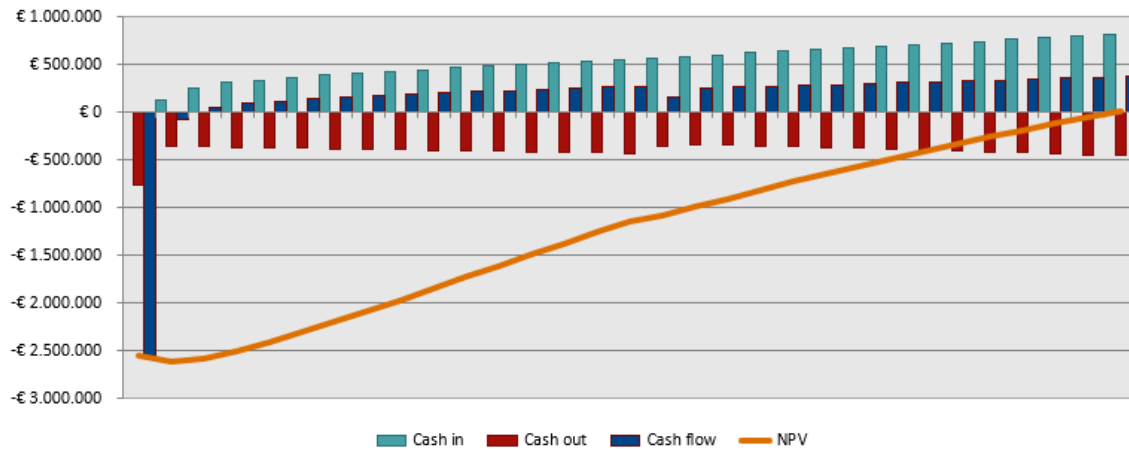
#### **Aannames**

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%.
- CO<sub>2</sub> besparing wordt gewaardeerd met een waarde van 24€ per ton vermeden CO<sub>2</sub>.

#### **Business case variant 2**

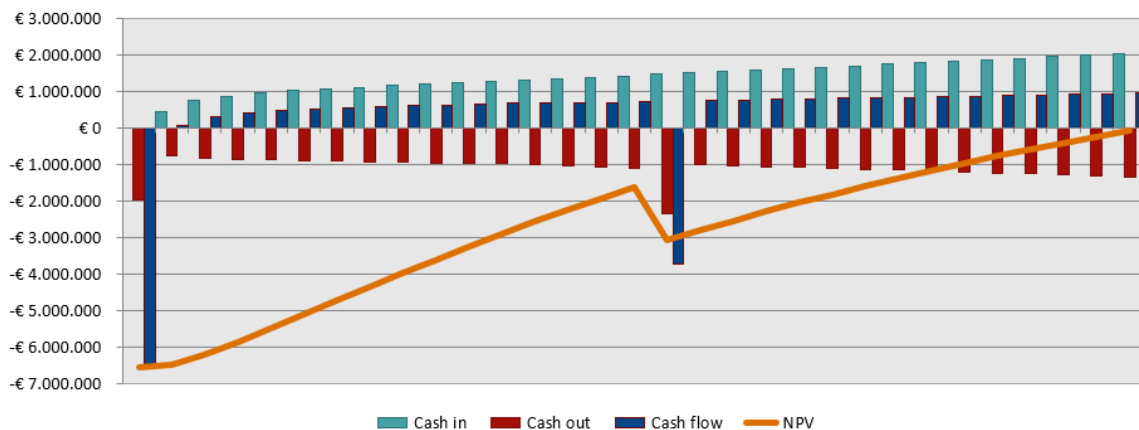
De kasstromen over de projectperiode voor variant 2 zijn weergegeven in Figuur 4-5. In jaar 0 worden alle investeringen gedaan. Na 15 jaar vindt voor de warmtepomp een grote herinvestering plaats. De jaarlijkse operationele kosten stijgen jaarlijks als gevolg van de indexatie. De jaarlijkse inkomsten 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 8,8 €/GJ.



Figuur 4-5: Kasstromen variant 2

#### Business case variant 4

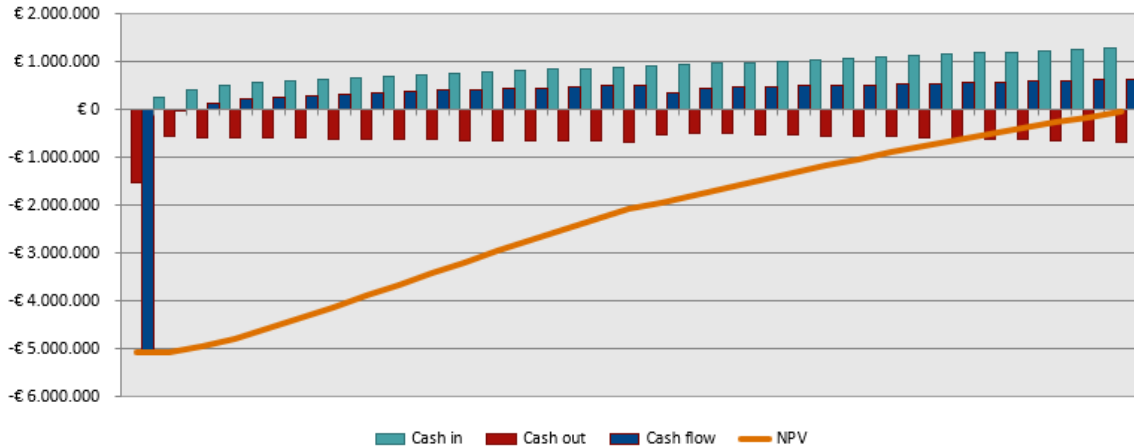
De kasstromen over de projectperiode voor variant 3 zijn weergegeven in Figuur 4-6. Om een projectrendement van 6% te halen over een looptijd van 30 jaar bedraagt voor variant 2 de prijs voor warmte 15,0 €/GJ.



Figuur 4-6: Kasstromen variant 4

#### Business case variant 6

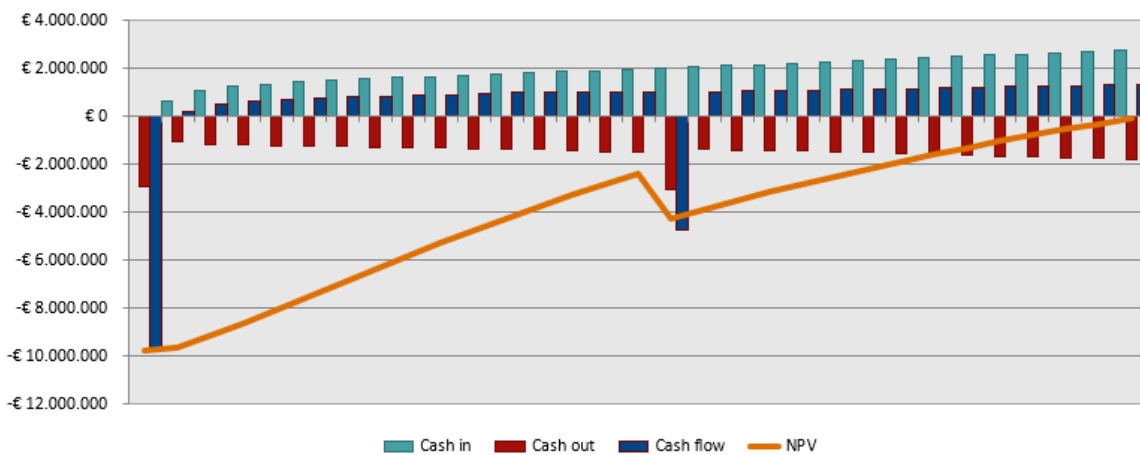
De kasstromen over de projectperiode voor variant 5 zijn weergegeven in Figuur 4-7. Om een projectrendement van 6% te halen over een looptijd van 30 jaar bedraagt voor variant 2 de prijs voor warmte 11,1 €/GJ.



Figuur 4-7: Kasstromen variant 6

### Business case variant 8

De kasstromen over de projectperiode voor variant 5 zijn weergegeven in Figuur 4-8. Om een projectrendement van 6% te halen over een looptijd van 30 jaar bedraagt voor variant 2 de prijs voor warmte 16,0 €/GJ.



Figuur 4-8: Kasstromen variant 8

### 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.

Tabel 4-4: Specifieke investeringskosten

		Variant 2	Variant 4	Variant 6	Variant 8
Investeringskosten	[€]	2.570.000	6.620.000	5.060.000	9.780.000
Gemiddeld geleverd vermogen	[MW <sub>i</sub> ]	1,78	3,17	2,05	4,07
Specifieke investeringskosten	[€/MW <sub>i</sub> ]	1.444.000	2.086.000	2.466.000	2.406.000



#### 4.2.4 Gevoeligheidsanalyses

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 2, 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 2	Investeringssubsidie
Subsidie	[€]	0	1.150.000
Prijs warmte	[€/GJ]	8,8	7,2

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. Als er gebruik gemaakt kan worden van de investeringssubsidie zal de prijs voor warmte dus significant dalen onder de referentie waarde voor een gasketel (12 €/GJ).

##### Projectrendement

Het gewenste projectrendementen wordt door de exploiterende partij bepaald. Verschillende partijen zullen de risico's en baten van een HTO verschillend inschatten, vandaar dat de gevoeligheid van de warmteprijs als functie van het gewenste projectrendement is onderzocht.

Zoals te zien in onderstaande Tabel 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 2 (basis)	Bovenwaarde
Hete bronnen	[-]	2	2	2
Lauwe bronnen	[-]	2	2	2
Projectrendement	[%]	4%	6%	8%
Prijs opslag warmte	[€/GJ]	0	0	0
Prijs warmte	[€/GJ]	7,6	8,8	10,1

##### 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). De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 4-7.

Tabel 4-7: Gevoeligheidsanalyse opslag prijs warmte

		Onderwaarde	Variante 2 (basis)	Bovenwaarde
Hete bronnen	[-]	2	2	2
Lauwe bronnen	[-]	2	2	2
Projectrendement	[%]	6%	6%	6%
Prijs opslag warmte	[€/GJ]	-3	0	3
<b>Prijs warmte</b>	<b>[€/GJ]</b>	<b>3,8</b>	<b>8,8</b>	<b>13,7</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 al een stuk onder de 12€/GJ<sub>t</sub>. Uit bovenstaande tabel kan afgeleid worden deze referentiewaarde behaald wordt voor een prijs voor de opslag van warmte van 1,9€/GJ<sub>t</sub>.

### Hogere onttrekkingsnorm

De NVOE-norm vereist momenteel bij variant 2 twee hete en twee lauwe bronnen. 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>). Echter blijkt dat de basisvariant 2 al ver onder de referentiewaarde ligt. Dus hier wordt ook gekeken met hoe veel dubletten de prijs wel in lijn ligt met de referentiewaarde. Dit is gedaan door de norm in stappen te verhogen of verlagen en op basis hiervan het aantal hete en lauwe bronnen aan te passen 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 of verlagen van de norm. Dit geeft de volgende resultaten (Tabel 4-8):

Tabel 4-8: Gevoeligheidsanalyse aantal dubletten

		Var 2 - Basis	Var 2 - Minimum	Var 2 - Ref
Hete bronnen	[-]	2	1	4
Lauwe bronnen	[-]	2	1	4
Projectrendement	[%]	6%	6%	6%
Prijs opslag warmte	[€/GJ]	0	0	0
<b>Prijs warmte</b>	<b>[€/GJ]</b>	<b>8,8</b>	<b>7,2</b>	<b>11,8</b>

Hieruit blijkt dat de referentiewaarde wordt bereikt bij het toepassen van meerdere bronnen, namelijk vier hete en vier lauwe bronnen. Het minimaliseren van het aantal bronnen resulteert in een prijs van 7,2 €/GJ<sub>t</sub>.

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 2 – Basis	Var 2 - herinvestering
Levensduur titanium TSA	[-]	30	10
Projectrendement	[%]	6%	6%
Prijs opslag warmte	[€/GJ]	0	0
<b>Prijs warmte</b>	<b>[€/GJ]</b>	<b>8,8</b>	<b>9,1</b>

### 4.2.5 Samenvatting en conclusie

Er zijn vier varianten meegenomen in de business case die op het eerste oog de meeste potentie hadden om te concurreren met een gasketel. Tabel 4-10 geeft nogmaals het belangrijkste resultaat weer van deze varianten.

Tabel 4-10 Gevoeligheidsanalyse aantal doubletten

		Var 2	Var 4	Var 6	Var 8
Hete bronnen	[-]	2	2	4	4
Lauwe bronnen	[-]	2	2	5	5
<b>Prijs warmte</b>	<b>[€/GJ]</b>	<b>8,8</b>	<b>15,0</b>	<b>11,1</b>	<b>16,0</b>

Hieruit bleek dat twee varianten al onder de referentiewaarde van een gasketel liggen. In de gevoeligheidsanalyse is gekozen voor de meeste rendabele variant, namelijk variant 2. Deze komt het meest positieve uit omdat deze relatief weinig bronnen benodigd heeft, in de Fm. van Maassluis niet diep ligt (167 m-mv) en een rendement van ongeveer 60% behaald. Het rendement in Oosterhout ligt dan wel iets hoger, echter dienen de bronnen ook dieper geplaatst te worden en zijn daarnaast meer bronnen benodigd.

De geleverde warmte vanuit de HTO zal wel bijmenging vanuit de backbone benodigd hebben om de gewenste temperatuur te behalen. Deze basisvariant kan een projectrendement van 6% behalen tegen een verkoopprijs van 8,8 €/GJt. Deze bijmenging wordt buiten het kader gehouden, wat inhoudt dat deze warmte niet ingekocht en niet verkocht wordt. Hier wordt dus ook niets aan verdiend. Daarnaast heeft het geen invloed op de CO<sub>2</sub>-besparing.

Kijkend naar de gevoeligheidsanalyse kan deze verkoopprijs van warmte nog fluctueren. Als men bijvoorbeeld een investeringssubsidie kan ontvangen zou deze prijs kunnen dalen naar 7,2 €/GJt. Daarnaast resulteert een subsidie voor de opslag van warmte van -3 €/GJt tot een verkoopprijs van 3,2 €/GJt. Al met al biedt deze basisvariant genoeg potentie om warmte te kunnen leveren aan het warmtenet zonder directe tussenkomst van een gasketel.

## 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 de referentie.

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 2</b>
<b>Jaar 30</b>		
Opgeslagen warmte	[GJ <sub>t</sub> ]	74.000
Elektriciteitsverbruik warmteopslag <sup>1</sup>	[MWh <sub>e</sub> ]	400
Geleverde warmte	[GJ <sub>t</sub> ]	45.000
Elektriciteitsverbruik warmtelevering <sup>2</sup>	[MWh <sub>e</sub> ]	200
CO <sub>2</sub> -uitstoot opgeslagen warmte <sup>3</sup>	[ton CO <sub>2</sub> ]	100
CO <sub>2</sub> -uitstoot elektriciteit <sup>4</sup>	[ton CO <sub>2</sub> ]	200
CO <sub>2</sub> -uitstoot totaal	[ton CO <sub>2</sub> ]	400
Specifieke CO <sub>2</sub> -uitstoot	[kg CO <sub>2</sub> /GJ <sub>t</sub> ]	7,9
<b>Periode van 30 jaar</b>		
Opgeslagen warmte	[GJ <sub>t</sub> ]	2.200.000
Elektriciteitsverbruik warmteopslag	[MWh <sub>e</sub> ]	12.000
Geleverde warmte	[GJ <sub>t</sub> ]	1.200.000
Elektriciteitsverbruik warmtelevering	[MWh <sub>e</sub> ]	6.000
CO <sub>2</sub> -uitstoot opgeslagen warmte	[ton CO <sub>2</sub> ]	4.000
CO <sub>2</sub> -uitstoot elektriciteit	[ton CO <sub>2</sub> ]	6.000
CO <sub>2</sub> -uitstoot totaal	[ton CO <sub>2</sub> ]	10.000
Specifieke CO <sub>2</sub> -uitstoot	[kg CO <sub>2</sub> /GJ <sub>t</sub> ]	8,8

<sup>1)</sup> Aangenomen COP van 50 voor de HTO

<sup>2)</sup> Gemiddelde COP systeem (HTO, pompen) ingeschat op 50

<sup>3)</sup> CO<sub>2</sub>-uitstoot warmte in de zomer wordt enkel toegeschreven aan de hulpenergie van het warmtenet.

<sup>4)</sup> 0,34 kg/kWh, bron NTA 8800

De CO<sub>2</sub>-uitstoot van de HTO 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, gedurende de looptijd van 30 jaar, een CO<sub>2</sub>-reductie van circa 85% kan worden gerealiseerd.

De uitstoot van 8,8 kg/GJ wordt bepaald door de CO<sub>2</sub>-uitstoot van het elektriciteitsverbruik van de circulatiepompen voor opslag en levering van warmte. De uitstoot van het elektriciteitsverbruik is gebaseerd op de huidige energiemix en zal de komende decennia nog aanzienlijk dalen. De werkelijke uitstoot zal dus lager uitvallen dan deze 8,8 kg/GJ, afhankelijk van de toekomstige elektriciteitsmix.

# 5 Milieu hygiënische en juridische aspecten

## 5.1 Grondmechanica: zetting en opheffing

### 5.1.1 Grond mechanische effecten

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

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

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

### 5.1.2 Samenvatting grond mechanische risico's

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

### 5.1.3 Aanbeveling

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

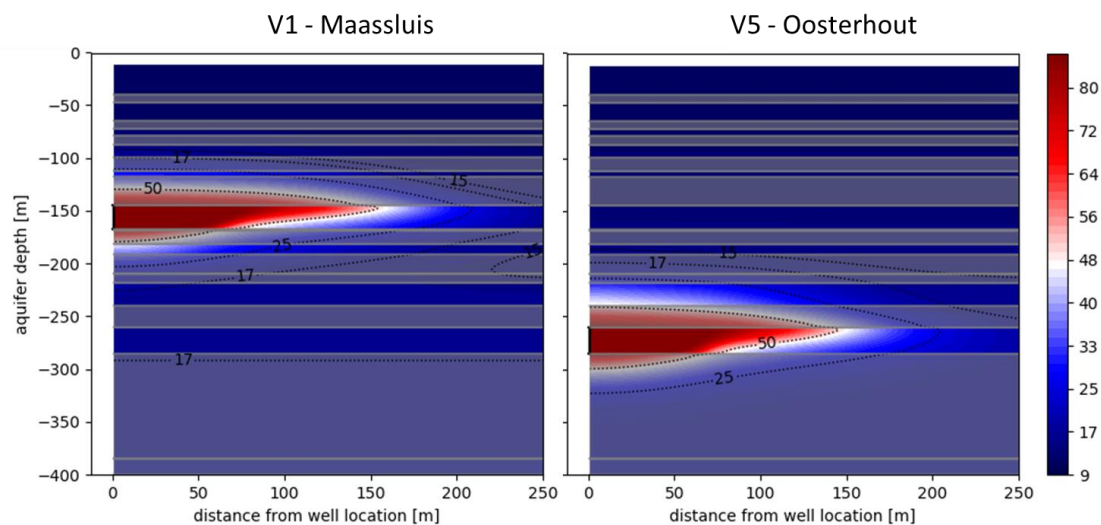
## 5.2 Thermische effecten

De grootste thermische effecten vinden plaats in de opslag-aquifer en de daaromheen liggende lagen. Daarnaast is er warmte-uitstraling vanuit de put naar de ondergrond rondom. De mate waarin thermische effecten door dit 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.

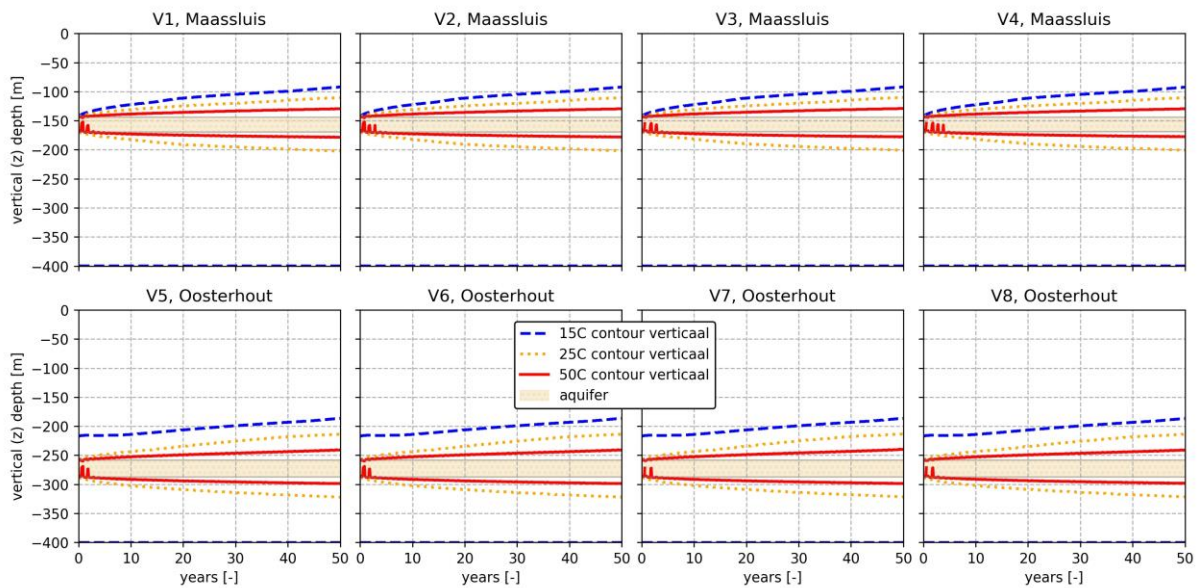
### Vergelijking tussen de Formatie van Maassluis en de Formatie van Oosterhout

De thermische verspreiding van de opgeslagen warmte in de ondergrond is weergegeven in Figuur 5-1. Omdat er relatief weinig verschil is tussen de 4 varianten in een formatie is het thermische effect door de grootste opslag (v1 en v5) weergegeven. Omdat de efficiëntie vergelijkbaar is, maar het opgeslagen volume varieert. Het thermische effect is voor alle varianten niet te merken aan maaiveld. Voor opslag in de Formatie van Maassluis is er op een diepte van 100m (50m boven het opslag pakket) een lichte temperatuurverhoging van 3 tot 4 graden te merken. De Formatie van Oosterhout heeft t.o.v. opslag in de Formatie van Maassluis een groter effect op de bovenliggende aquifer (onderste watervoerende deel van de Formatie van Maassluis), omdat de afsluitende laag voor de Formatie van Oosterhout waarschijnlijk minder dik is ontwikkeld.

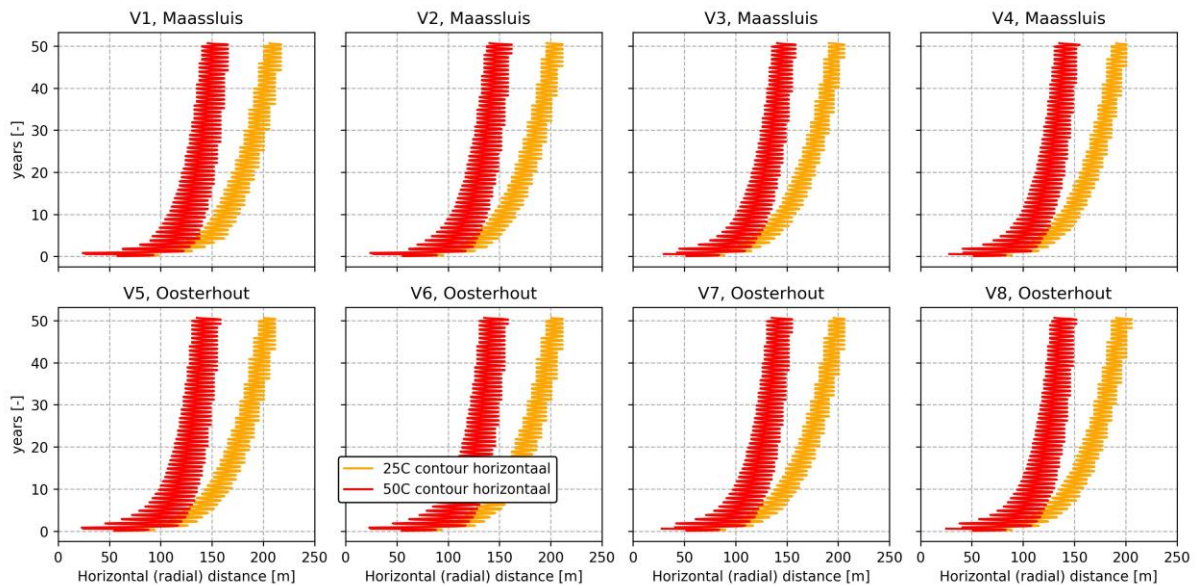


Figuur 5-1 Temperaturen in de ondergrond na 50 jaar voor variant 1 en variant 4. Dit zijn de varianten met de grootste opslagvolumes en daarom de grootste thermische impact (t.o.v. de andere varianten voor dezelfde formatie).

D.m.v. analyse van de simulaties zijn de contouren van 15, 25 en 50 °C gemonitord in de aquifer. Dit geeft een beeld van de verspreiding van de warmte door de tijd heen (Figuur 5-2 & Figuur 5-3). Ook hieruit blijkt dat de verschillen klein zijn tussen de verschillende systeemconcepten. Omdat zowel de Formatie van Maassluis als de formatie van Oosterhout zijn afgesloten met een relatief dikke kleilaag. Is de verticale verspreiding van de warmte gering. Voor de Formatie van Oosterhout (heeft een minder dikke kleilaag) is zichtbaar dat na 50 jaar warmte ook de warmte de bovenliggende aquifer bereikt. De opwarming is op dat moment maximaal 25°C.



Figuur 5-2 verticale verspreiding van de opgeslagen warmte vanaf de opslag-aquifer weergegeven d.m.v. verschillende temperatuur contouren.

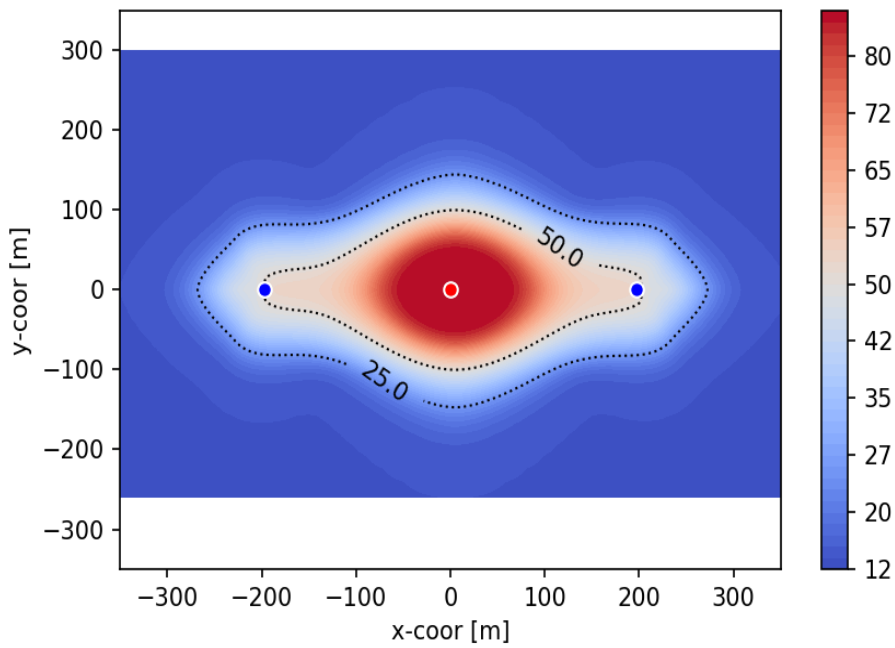


Figuur 5-3 Horizontale (radiale) verspreiding van de opgeslagen warmte in de opslag-aquifer vanaf de hete put weergegeven d.m.v. de 25 en 50 °C contour.

De dikte van de kleilaag en de geohydrologische en thermische eigenschappen zijn op dit moment ingeschat (HF 2). Echter, de daadwerkelijke eigenschappen moeten in een later stadium beter bepaald worden.

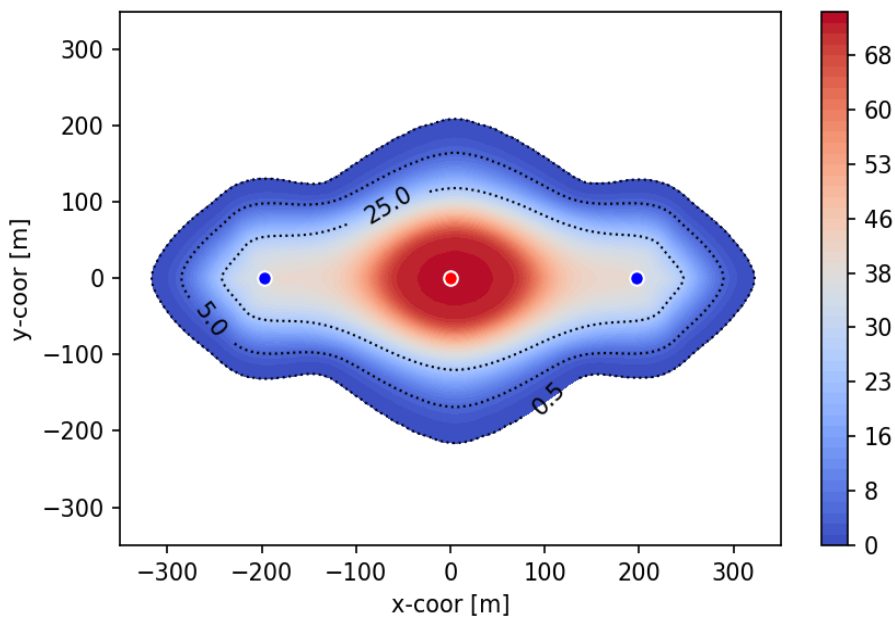
### 3D simulaties

Variante 2 (opslag in Fm. van Maassluis) is doorberekend met het 3D model. Deze opslag variant heeft een relatief hoge warme bron temperatuur (54 °C). Hierdoor ontstaat er een zone van water dat >50 °C dat de zowel de hete en warme bronnen omsluit (Figuur 5-4). De hete en warme bronnen ondervinden een positief effect door deze interactie.



Figuur 5-4 Thermisch effect van de opslag aquifer (MSz3) na 10 jaar voor variant 2. Natuurlijke grondwatertemperatuur is  $\sim 15.3$  °C.

Het oppervlak dat wordt opgewarmd ( $>0.5$  °C) door de warmteopslag is ongeveer 4,5 hectare (45000 m<sup>2</sup>) zoals te zien is in (Figuur 5-5). De grootste opwarming vindt plaats op de lijn waarop de hete en warme bronnen zicht bevinden, dit heel gebied strekt zich ongeveer 600m uit.



Figuur 5-5 Opwarming ( $T_{\text{aquifer}} - T_{\text{natuurlijk}}$ ) door gebruik warmteopslag in de opslag aquifer (MSz3) na 10 jaar voor variant 2.



### 5.3 Reflectie op mogelijke verandering grondwaterkwaliteit door thermisch effect op basis van bestaande data

Op basis van de beschikbare data in Dinoloket over de samenstelling van grondwater nabij de verkenninglocaties is een eerste algemene interpretatie gemaakt van de geohydrochemie in de voor opslag beschouwde lagen ter plekke van de 5 verkenninglocaties. 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 verkenninglocaties niet toereikend is voor een uitgebreide analyse van mogelijke effecten op grondwaterkwaliteit. Dit omdat de hoeveelheid van geanalyseerde parameters zeer beperkt is, of analyses zelfs geheel afwezig voor de formaties waarin de lagen zich bevinden die worden verkend voor HTO (Tabel 5-1). Voor de Fm. van Oosterhout bij Heerhugowaard, de Fm. van Maassluis bij Leeuwarden, en de Fm. van Oosterhout bij Rotterdam is bijvoorbeeld geen data. Daarnaast is de data bij Rotterdam voor de Fm. van 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 verkenninglocatie in de formaties waarin de voor HTO verkende lagen zich bevinden. \*Monsters wel uit Formatie van Maassluis maar ruim 100 m ondieper dan de voor HTO verkende laag.

Locatie	Formatie	Aantal monsters	As (ug/l)	Ca (mg/l)	Cl- (mg/l)	Fe (mg/l)	HCO <sub>3</sub> (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Mn (mg/l)	NH <sub>4</sub> (mg/l)	NO <sub>3</sub> (mg/l)	Na (mg/l)	SO <sub>4</sub> (mg/l)	SiO <sub>2</sub> (mg/l)	T-PO <sub>4</sub> (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															

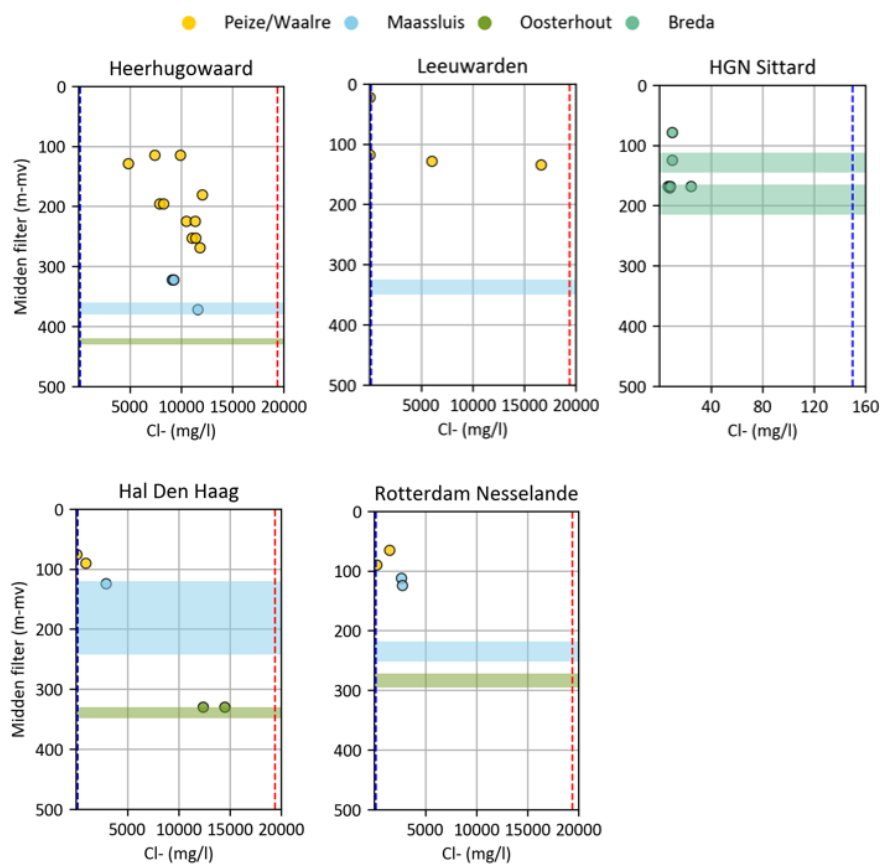
Naast deze ruimtelijke beperking is er ook een beperking in termen van de waterkwaliteitsparameters die zijn geanalyseerd in de monsters. Zo is er helaas slechts 1 monster waarvan sporenelementen geanalyseerd zijn zoals bijvoorbeeld arseen, en is geen microbiologische data voorhanden. Uit de literatuur 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 (HCO<sub>3</sub>). 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 5-6 te zien dat de chloride gehalten in de monsters uit de meest diep gelegen filters hierboven wel

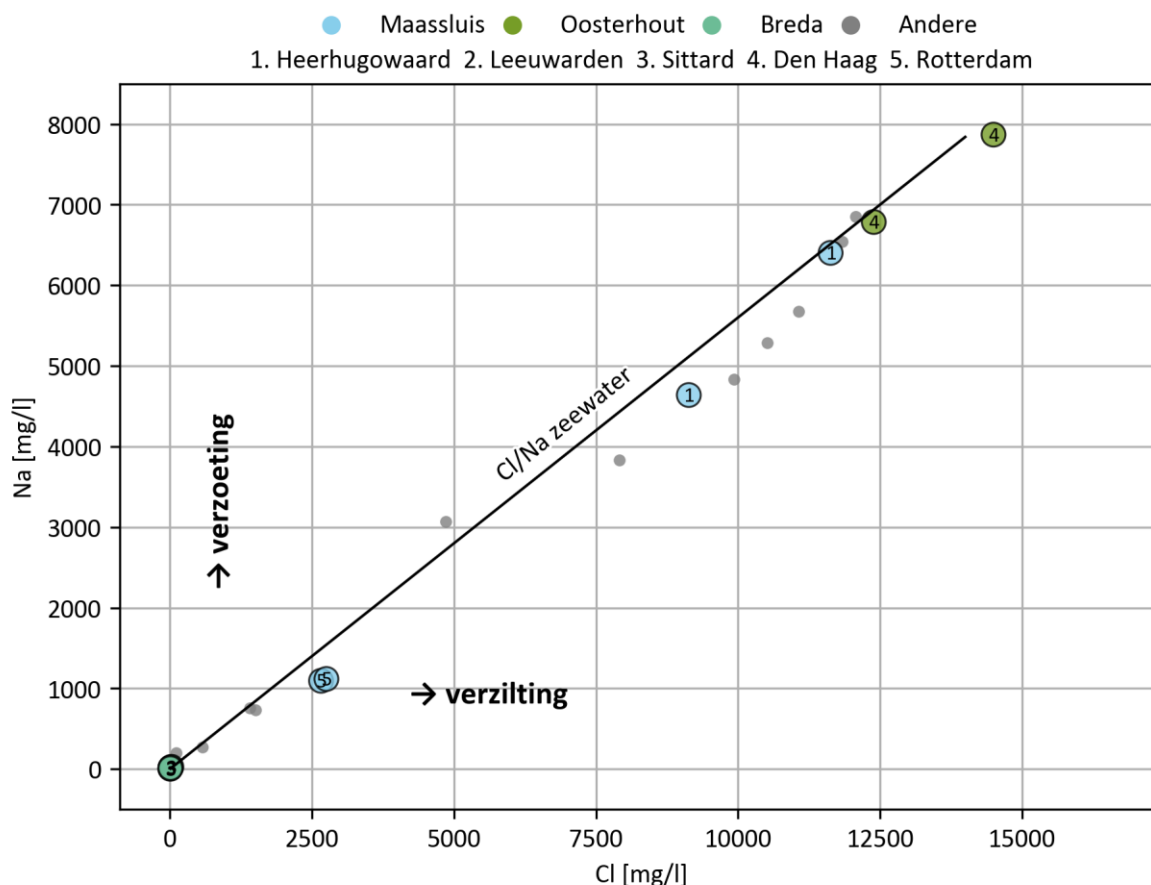
10 tot 100 keer hoger zijn dan zoet grondwater. In Leeuwarden nadert de waarneming van ~16.600 mg/l zelfs dat van zeewater (~19.400 mg/l). Het feit dat er zich ver boven de beschouwde lagen nog zout grondwater bevindt geeft aan dat het risico op verzilting van bovenliggend zoet grondwater veroorzaakt door een mogelijk HTO systeem gering is.



Figuur 5-6. 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 5-7 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 Maassluis en Oosterhout Formatie enigszins afwijken van de op basis van menging met zeewater te verwachtte 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 5-7. Chloride versus natrium concentraties. Grijs punten zijn monsters uit de verzamelde putten maar uit bovenliggende formaties. Doorgetrokken streep geeft de chloride/natrium verhouding weer in zeewater.

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

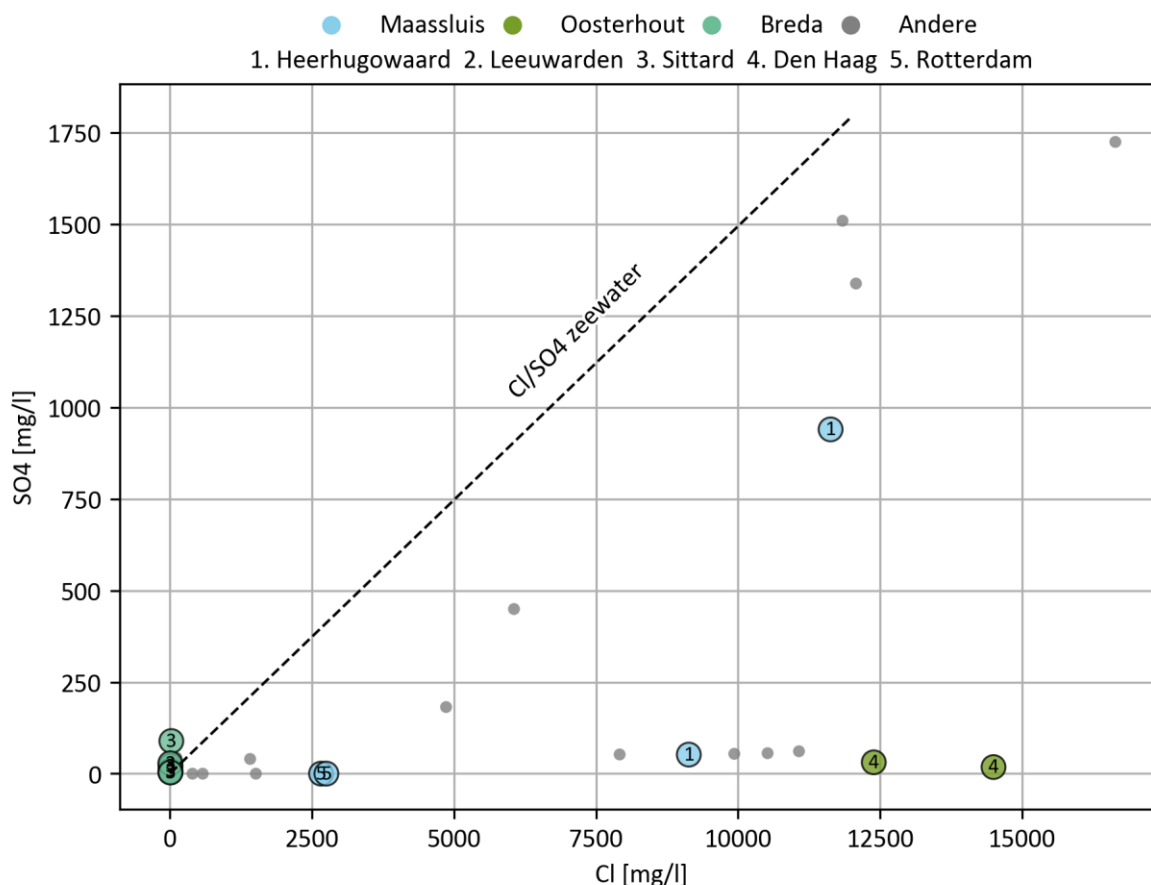
### 5.3.2 Verwachte invloed temperatuur op redox chemie en microbiologie

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

Tabel 5-2. Volledige waterkwaliteitsdataset gebruikt voor de voorverkenning

Loc Nr	Formatie	Target	NITG nr	Mid filter (m-mv)	Analyse datum	pH (-)	Ca (mg/l)	Cl- (mg/l)	Fe (mg/l)	HCO3 (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Mn (mg/l)	NH4 (mg/l)	NO3 (mg/l)	Na (mg/l)	SO4 (mg/l)	T-PO4 (mg/l)	TOC (mg/l)	BEX
1		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 5-8). Dit toont aan dat het natuurlijke milieu dus waarschijnlijk al sulfaat reducerend is, of dat het aanwezige sulfaat reeds is weg gereduceerd. Bij toepassing van HTO mag dus worden verwacht het nog aanwezige sulfaat relatief snel weg reduceert. Bij sulfaat reductie komt H<sub>2</sub>S vrij, wat niet wenselijk is vanwege corrosieve en verstoppingsreacties, bijvoorbeeld door neerslag met ijzer en het vormen van pyriet. Tegelijk kunnen bij deze neerslag sporenelementen als arseen worden opgenomen, waardoor eventuele mobilisatie hiervan beperkt kan blijven (Van Breukelen & Bonte, 2016).



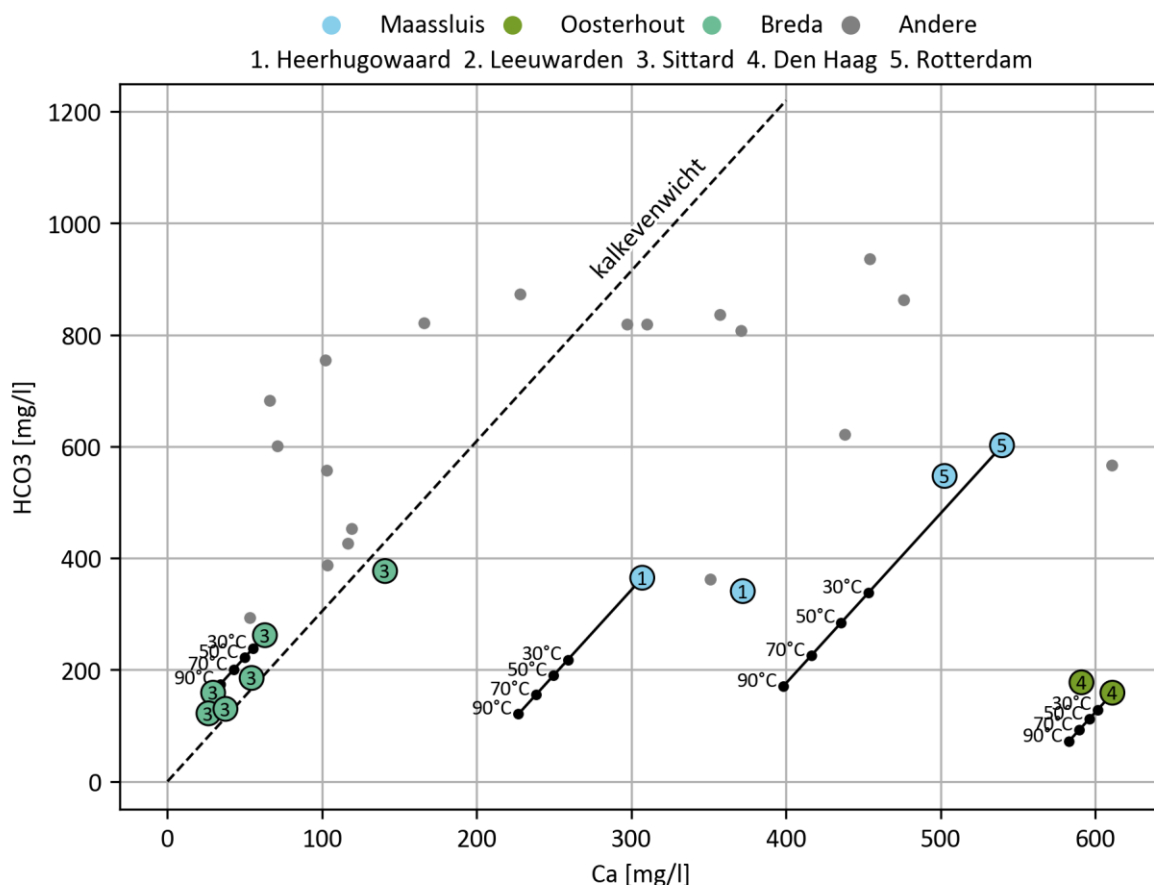
Figuur 5-8. Chloride versus sulfaat concentraties. Grijze punten zijn monsters uit de verzamelde putten maar uit bovenliggende formaties. Gestreepte lijn geeft de chloride/sulfaat verhouding in zeewater weer.

### 5.3.3 Verwachte invloed op kalkchemie en carbonaatneerslag

In Figuur 5-9 zijn de concentraties aan calcium en bicarbonaat ( $\text{HCO}_3$ ) weergegeven. Voor de Formatie van Breda in Sittard is te zien dat de verhouding tussen deze twee goed te verklaren valt door kalkevenwicht puur op basis van de  $\text{CO}_2$  spanning. Voor de andere locaties geldt dat de calcium concentraties verhoogd zijn – wat goed te verklaren valt door de waargenomen verzilting, waarbij Ca vrijkomt en de  $\text{Ca}/\text{HCO}_3$  verhouding verschuift.

Een belangrijk risico bij HTO is dat de temperatuurverhoging neerslag van kalk veroorzaakt, met putverstopping tot gevolg. Om het risico hierop ondanks de beperkte databeschikbaarheid enigszins in te schatten is met behulp van het geochemisch modelleer programma PHREEQC voor de combinatie pH, Ca en  $\text{HCO}_3$  van vier representatieve grondwatermonsters berekend wat het effect zou zijn een verhoging van temperatuur van 15 graden naar achtereenvolgens 30, 50, 70 en 90 graden (Figuur 5-9). De berekeningen laten best grote verschillen in potentiële neerslag zien, zoals geïllustreerd wordt door de mate waarin Ca en  $\text{HCO}_3$  concentraties afnemen. Vooral voor de omstandigheden in de Formatie van Maassluis bij zowel Heerhugowaard als in Rotterdam is een aanzienlijke verlaging ten gevolge van kalkneerslag te zien.

Hierbij moet worden aangetekend dat het verstoppingsrisico niet alleen afhangt van de potentie om kalk neer te slaan maar zeker ook van de snelheid waarmee dat gebeurt. Die snelheid is mede afhankelijk van verhouding  $\text{Ca}/\text{HCO}_3$ . De berekende  $\text{CO}_2$  druk als gevolg van de verschuiving (bij  $90^\circ\text{C}$ ) varieerden van 0.1 tot 0.5 atm, en de resulterende pH's daalde als gevolg hiervan tot 5.9 – 6.8. Naast de temperatuur verhoging kan ook  $\text{CO}_2$  ontgassing veroorzaakt door de drukverlaging bij onttrekking kalkverstopping veroorzaken (Hartog, 2015).



Figuur 5-9. 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 verstoppingsrisico'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

### Wettelijk kader

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

### Waterwet en bevoegd gezag

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

### Wijzigingsbesluit Bodemenergie

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

### Richtlijnen voor vergunningverlening: de BUM

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

### Vergunningsprocedure voor HTO in Rotterdam - de Waterwet

Voor een HTO bij Rotterdam Nesselande 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 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.

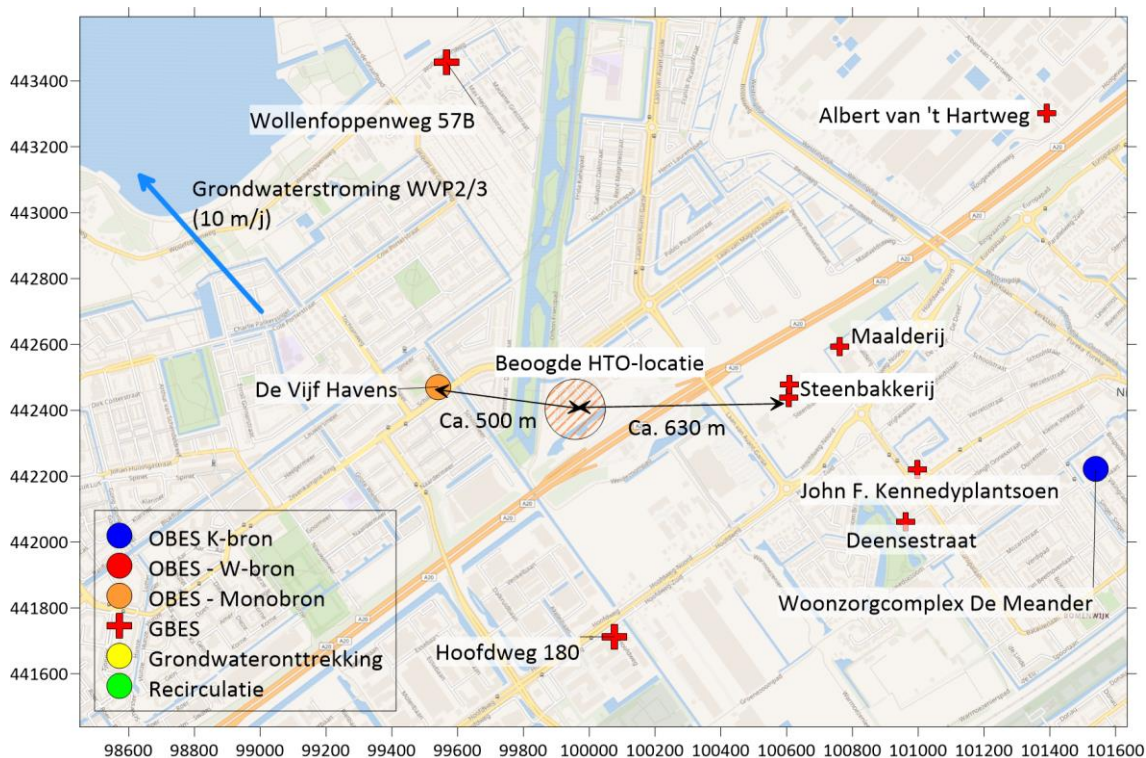
Op basis van input van de provincie in Zuid-Holland, valt het binnen de verwachting dat er een uitzondering vanuit de Gedeputeerde Staten van de Provincie nodig is, om HTO toe te passen in deze provincie. Wanneer dat het geval is, dient er rekening te worden gehouden met een langer traject. De precieze procedure dient in overleg met de Provincie, of de Omgevingsdienst Haaglanden, te worden overlegd.

## 5.5 Omgevingscan

### Stakeholderanalyse ondergrond

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.

Onderstaande kaart bevat de omgevingsbelangen in de directe omgeving van de beoogde HTO (Figuur 5-10).



Figuur 5-10. Omgevingsbelangen in de directe omgeving van de beoogde HTO-locatie. Omdat de bronfilters van de HTO vermoedelijk dieper liggen dan de bronfilters van de monobron van Vijf Havens en de bodemlussen bij de Steenbakkerij en Maalderij, wordt geen negatieve thermische of hydrologische invloed op andere ondergrondse stakeholders verwacht.

Volgens de axisymmetrische modellen (hoofdstuk 4) mag na 50 jaar verwacht worden dat de 25 °C-isotherm op een afstand van circa 220 m van de warme bron ligt. Op circa 500 m ten westen van de beoogde locatie is een monobron tot een diepte van 190 m-mv. Wanneer de HTO in de formatie van Maassluis (dieper dan de monobron) wordt geplaatst, is er vermoedelijk een kleilaag aanwezig tussen de filters van de monobron en van de HTO, waardoor thermische en hydrologische effecten van de HTO op de monobron naar verwachting zeer beperkt zijn. Omdat het onderste filter van de monobron de koude bron betreft, dient in de vergunningfase wel gekeken te worden naar de thermische effecten op dit filter.



Ten oosten van de HTO liggen een aantal gesloten systemen (Steenbakkerij, Maalderij) tot een diepte van maximaal 108 m-mv. Deze liggen dus ondieper dan de voorziene bronfilters van de HTO, waardoor er geen negatieve thermische beïnvloeding van de gesloten systemen wordt verwacht.

Mede op basis van de in kaart gebrachte hydrologische en thermische kan het bevoegd gezag afwegen of de effecten van de HTO op de omgeving, en specifiek op de bodemenergiesystemen nabij de beoogde HTO locatie, acceptabel zijn. Vooralsnog worden de aanwezige omgevingsbelangen niet als showstopper gezien voor vergunningverlening voor deze HTO.

### Scan bovengrond

Technisch en financieel gezien heeft het de voorkeur dat de HTO dichtbij het onderstation voor Nesselande ligt. Er is hoge temperatuur beschikbaar om op te slaan en warmte kan op een relatief lage temperatuur geleverd worden. Eneco heeft aangegeven dat het onderstation dichtbij het menginjectiestation ligt. Het menginjectiestation ligt op het bedrijventerrein in het zuidelijk deel van Nesselande. In Figuur 5-11 is ingezoomd om het bedrijventerrein locatie van het verdeelstation. Mogelijke locaties voor het inpassen van de HTO is in de groenstroken of op een parkeerterrein. Bronnen in een lijnconfiguratie plaatsen lijkt hiermee mogelijk. Een sterconfiguratie (hete bronnen in het midden en lauwe bronnen in een cirkel er omheen) zal een stuk lastiger in te passen zijn.



Figuur 5-11 Potentiële locatie HTO

# 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)

Nr.	Algemene risico omschrijving			Locatie specifieke beoordeling (relatief t.o.v. andere verkenningen)		
	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.	Gemiddeld	Groot	Kans hang af van de diepte van de bronnen. Hoe dieper de bronnen, hoe minder partijen in de markt in staat zijn dit technisch te boren. Gevolg op CAPEX van de bronnen.
	Hogere investeringskosten of operationele kosten vanwege onvoldoende bewezen techniek	Hogere CAPEX/OPEX	Zoveel mogelijk aanhaken bij onderzoeksprojecten waarbij subsidie/leergeld beschikbaar is.	Groot	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	Klein	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	Klein	Klein	Kans bepaald op basis van huidige vraag en gewenste vraag in eindsituatie. Gevolg afhankelijk van opslagvolume Kleiner opslagvolumes reageren gevoeliger dan grotere opslagvolumes.
	Warmteverlies in de ondergrond groter dan verwacht, opslagrendement lager dan verwacht.	- Lager vermogen en temperatuurniveau aan het einde van het stookseizoen	- Proefboring om met grotere zekerheid de opbouw en eigenschappen van de ondergrond te bepalen	Klein	Gemiddeld	De kans dat het rendement voor deze locatie tegen gaat vallen wordt klein geacht. De onzekerheid is daarbij iets groter voor opslag in de formatie van

		- Lagere inkomsten en/of hogere operationele kosten - Grotere thermische effecten (en daaraan gekoppelde effecten op de grondwaterkwaliteit)	- Optimalisatie van het ontwerp om het opslagrendement te maximaliseren (b.v. verlagen afkaptemperatuur of aanpassen putconfiguratie) - Putafwerking met isolerend materiaal en/of dikkere omstorting			Oosterhout omdat hier minder data van beschikbaar is. Ook is het risico van bovengrondse inpassing op het optimaal plaatsen van de bronnen is relatief klein.
	Te hoge retourtemperatuur	Bijdrage directe warmtelevering kleiner, lagere inkomsten	- Afnemers stimuleren tot lagere retourtemperaturen - Voldoende aandacht bij ontwerp/uitrol warmtenet - Hogere temperatuur lauwe bron toelaten	Klein	Groot	Actuele waarde van 50 °C is gebruikt voor de retourtemperatuur.
	Bij toepassing warmtepomp: Aanvoertemperatuur voor warmtenet hoger dan beoogd	Slechtere COP warmtepomp of naverwarming noodzakelijk. Hogere operationele kosten.	- Voldoende aandacht bij ontwerp/uitrol warmtenet - Naverwarming vanuit warmtenet	Klein	Groot	Actuele waarde van 80 °C is gebruikt.
Juridische haalbaarheid en draagvlak						
	HTO niet vergunbaar (in het kader van de Waterwet)	Vergunning wordt niet verleend.	- Vroegtijdig betrekken en informeren van het bevoegd gezag	Klein	Generiek Groot	Kans is klein vanwege de naar verwachting beperkte impact op omgevingsbelangen. Bevoegd gezag heeft enige ervaring met HTO-vergunningverlening. Wanneer vergunning niet verleend wordt, heeft dat grote gevolgen, want zonder vergunning geen warmteopslag.
	Maatschappelijk draagvlak ontbreekt	Vergunning wordt niet (tijdig) verleend	- Voldoende tijdige communicatie richting stakeholders	Klein - Gemiddeld	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)	Klein-gemiddeld	Gemiddeld	Het risico dat de Fm. van Maassluis afwijkt t.o.v. de verwachting wordt kleiner geacht dan voor de Fm. van Oosterhout, doordat voor de Fm. van Maassluis voldoende informatie

			Bij geringe dikte opslagpakket, opslag in meerdere lagen, indien mogelijk (voorbeeld concept ECW)			beschikbaar is uit WKO boringen. Voor de Fm. van Oosterhout liggen diepe boringen op grote afstand (>10 km afstand) en hebben deze alleen tot het bovenste deel van de formatie aangeboord.
	Verstopping van warmtewisselaar en bronnen door scaling	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Daling vermogen door lager debiet en slechtere warmteoverdracht.</li> <li>- hogere operationele kosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proefboring om geo-chemische eigenschappen van grondwater en doelpakket te analyseren en ontwerp daarop afstemmen (materialen en waterbehandeling)</li> <li>- Gebruik waterbehandeling aanpassen</li> <li>- Systeem reinigen gedurende operatie</li> </ul>	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	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hoger stroomverbruik</li> <li>- Hogere kosten onderhoud</li> <li>- Gewenste temperatuur wordt niet gehaald</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ontwerpen op zo laag mogelijke temperatuur</li> <li>-</li> </ul>	n.v.t.	n.v.t.	Voorkeursvariant zonder warmtepomp
Milieu en veiligheid						
	Onvoorziene impact op andere belangen	Vergunning wordt ingetrokken tijdens looptijd	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Zorgvuldige effectbeoordeling in ontwerpfase</li> <li>- Proefboring voor zekerheid bodemopbouw</li> </ul>	Klein	Groot	Kans wordt bepaald door aanwezige omgevingsbelangen in ondergrond en de relatief kleine onzekerheid over de bodemopbouw. Impact op één nabijgelegen WKO-systeem vraagt om nauwkeurige beoordeling, maar kans op negatieve impact wordt klein ingeschat. Bij HTO verdienen temperatuur-gerelateerde processen en effecten daarvan op omgevingsbelangen extra aandacht.

	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	groot	Gemiddeld - klein	Kans ingeschat op basis van diepte boringen en aantal putten. Een gedegen en robuust ontwerp put en monitoringsstrategie zodat de kans op lekkage klein is en snel wordt gedetecteerd tijdens of voor optreden verkleint de kans. Gevolg is 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	Klein	Groot	Kans ingeschat op basis van gevoerde gesprekken met relevante consortiumleden.
	Inpassing ruimtebeslag lastig door grote aantal bronnen	- Vertraging bij vindengeschikte bronlocaties, mogelijk verder weg. Tijdvertraging en kostenverhogend. - Geen geschikte locatie kunnen vinden. Stop zetten project.	- Aantal bronnen minimaliseren door goed ruimte verhogen NVOE-normen te onderzoeken. - Tijdig grondpositie nemen of in overleg gaan met grondeigenaren/gemeente	Klein	Groot	Ingeschat op basis van benodigd aantal bronnen in relatie tot stedelijkheid.

### 6.3 Plan van aanpak vervolg

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

- **Go/No Go:** besluit, door de relevante stakeholders, op basis van resultaten WINDOW Fase 1 om al dan niet verder te gaan met de ontwikkeling van HTO. Welke projecten doorgaan in WINDOW fase 2 onder het programma WarmingUp wordt door het consortium als geheel bepaald, waarbij het schrijfteam in overleg met de adviescommissie een voorstel voorbereiden. Wanneer de HTO niet binnen WarmingUp wordt uitgewerkt, maar er is vanuit de stakeholders wel de intentie om HTO verder te ontwikkelen, dan kunnen de stappen ook buiten WarmingUp worden uitgevoerd.
- Opstellen plan van aanpak: In overleg met de stakeholders van de locatie wordt een plan van aanpak opgesteld, waarin in ieder geval de volgende onderdelen aan bod komen:
  - Bespreken rolverdeling en verantwoordelijkheden
  - Bepalen operationele volgorde 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 merbeoordelingsnotitie worden opgesteld en afgestemd met het bevoegd gezag. De operator/opdrachtgever dient zelf de vergunning aan te vragen.  
Om de totale doorlooptijd zo kort mogelijk te houden, kan deze stap parallel worden uitgevoerd met de proefboring en het voorontwerp. In dat geval worden de voorbereidende studies gebaseerd op een zo goed mogelijke inschatting van de omvang van het beoogde HTO-systeem. Mogelijk moet na het definitief ontwerp een wijziging worden ingediend.
- Proefboring  
Met name voor de formatie van Oosterhout is er onzekerheid over de ondergrond. Op basis van de huidige gegevens is ingeschat dat een HTO in de formatie van Maassluis de beste business case geeft, maar wanneer de formatie van Oosterhout positief uitvalt, kan een gevolg zijn dat toch beter gekozen kan worden voor de formatie van Oosterhout. 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 schrijftteam 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 (WINDOW fase 3, niet in WarmingUP)**  
Nadat de vergunning is verleend, kan verder worden gegaan met de realisatie van het HTO-systeem. Grofweg worden hierin de volgende stappen uitgevoerd:
  - Aanbesteding
  - Realisatie
  - Commissioning
  - Exploitatie
  - Periodieke evaluatie

## 7 Conclusie

De toepassingsmogelijkheden van HTO op deze locatie wordt verder op basis van deze verkenning als relatief positief beoordeeld.

Opmerking: het WINDOW programma heeft als doel om HTO verder te ontwikkelen tot een bewezen techniek. Op dit moment bestaan er nog technische, juridische en financiële onderzoeksvragen. De conclusie moet gezien worden binnen het kader van een techniek-in-ontwikkeling, met grotere risico's ten opzichte van bewezen techniek.

- De Formatie (Fm.) van Maassluis wordt bij Rotterdam Nesselande geschikt geacht voor HTO, door de WKO boring op ~400m afstand is een goede inschatting gemaakt van de aquifer eigenschappen. Voor de Fm. van Oosterhout heerst grotere onzekerheid wat betreft de ondergrond (diepte, dikte en kh-waarde van zand- en kleilaag), door het geringe aantal diepe boringen in de omgeving. Een proefboring kan hier uitsluitsel geven.
- Doordat de ondergrond hier relatief goed bekend is voor de Fm. van Maassluis, is de kans dat het rendement van het HTO systeem gaat tegenvallen in die laag relatief klein. Voor opslag in de Fm. van Oosterhout heeft dit een grotere onzekerheid. Op basis van meer gedetailleerde ondergrondgegevens kan het HTO systeem nog worden geoptimaliseerd (aantal bronnen, bronontwerp, plaatsing, etc.).
- De wijze van inpassing van de HTO die wordt voorzien is in de directe omgeving van het menginjectiestation. Hier kan de HTO in de zomer geladen worden met een hoge temperatuur (86-88°C) en leveren op een relatief lage temperatuur (80°C).
- De temperatuur van de HTO zakt gedurende warmtelevering. De temperatuurdaling hangt af van het jaar van operatie en de variant, maar ligt na een aantal jaren tussen de 60 en 70°C aan het einde van warmtelevering.
- Mogelijke oplossingen om de temperatuur op te waarden naar de gewenste 80°C is door bij te mengen vanuit het transportnet of door een hoge temperatuur warmtepomp toe te passen. De warmtepomp wordt gezien als onderdeel van de HTO. Warmte gebruikt om bij te mengen is niet meegenomen in de verdere analyse.
- In variant 2, waarbij warmte wordt bijgemengd, heeft warmte uit de HTO de laagste prijs. De kostprijs van geleverde warmte uit de HTO is ingeschat op 8,0€/GJ. Dit is lager dan wanneer dezelfde warmte met een gasketel zou worden geleverd (10 – 12 €/GJ). Een groot voordeel ten opzichte van de meeste andere verkenningen is dat hier een temperatuursprong mogelijk is, wat de noodzaak en/of inzet van een warmtepomp sterk beperkt.
- Het systeemrendement van de HTO na 10 jaar is ingeschat op 50% en na 50 jaar op 63%.
- Warmte geleverd door de HTO reduceert de CO<sub>2</sub> uitstoot met circa 85% 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 € 210.000,-. Dit is € 30.000,- 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 risico-profiel dan gemiddeld:

- Het warmteaanbod en de warmtevraag zijn reeds aanwezig, waardoor het risico op vertraging als gevolg van de ontwikkeling hiervan niet aanwezig is. Ook zijn de te verwachten temperaturen bekend op basis van bestaande meetdata, waardoor het goed mogelijk is om de inpassing van de HTO goed te ontwerpen.
- De temperatuur in het warmtenet van Nesselande is relatief laag. Temperatuurdaling van de HTO kan worden opgevangen door bijmenging vanuit het transportnet. Hierdoor is de inzet van een warmtepomp niet, of slechts zeer beperkt nodig.
- Er zijn plannen voor een geothermie-systeem. Dit kan een aanvullende duurzame bron zijn die warmte op slaat in de HTO.
- De onzekerheid over de bodemopbouw is, door de aanwezigheid van nabijgelegen WKO-systemen, relatief klein.

De volgende punten hebben een hoger risico-profiel dan gemiddeld:

- Door de onbekendheid van de techniek is er een kans dat de kosten in exploitatie hoger uitvallen dan voorzien (generiek risico). Door de omvang van het systeem liggen de operationele kosten in deze verkenning hoog, waardoor de kostenverhoging in absolute zin gevoeliger is voor dit risico.
  - Er ligt een WKO systeem in de directe omgeving. Ingeschat wordt dat dit geen belemmering vormt. Het is wel een aandachtspunt bij het bepalen van de bronlocaties.
- 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 partiële drukken en eventueel de mineralogische samenstelling van de aquifer.
  - Risico's met betrekking tot de vergunbaarheid in het kader van de Waterwet worden klein ingeschat. Een nabijgelegen WKO-systeem vraagt aandacht, maar negatieve thermische beïnvloeding is, op basis van de berekeningen, niet aan de orde.
  - 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

# Bijlagen

## Bijlage I. Ontwerpnorm bronnen

### NVOE norm WKO

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

#### *Onttrekkingsnorm*

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

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

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

#### *infiltratienorm*

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

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

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

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

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

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

### Kans voor ruimere normen

#### 1. Hogere hydrologische conductiviteit

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

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

k =	doorlatendheid [m/s]
$\rho_f$ =	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 geïnfiltreerde te worden meegenomen. Zowel voor de onttrekkingsnorm als de infiltratienorm zal de ontwerpsnelheid bij een hogere temperatuur hoger zijn.

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

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

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

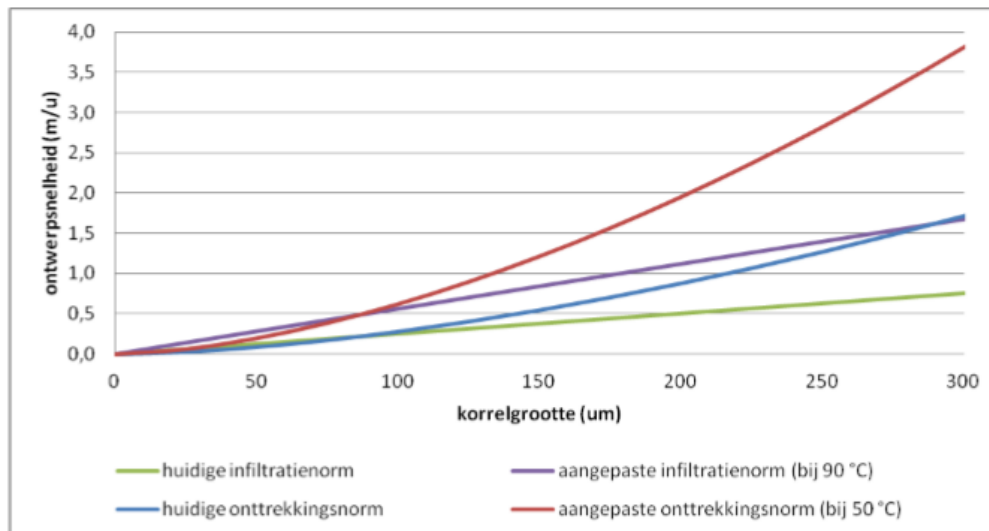
Als de invloed van de temperatuur op de doorlatendheid meegenomen wordt, ziet de infiltratienorm er als volgt uit (IF Technology, 2012):

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

- $v_{max}$  = ontwerpnelheid op de boorgatwand bij infiltratie [m/uur]
- $\rho_f$  = 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 verstoppingsnelheid [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 Figuur I-1 is de huidige onttrekkings- en infiltratienorm vergeleken met de aangepaste normen. De weergegeven norm is gebaseerd op de warme bron van de case in Gorinchem. Hierin bedraagt de onttrekkingstemperatuur uit de warme bron 50°C en de infiltratietemperatuur 90°C. Uit de vergelijking blijkt dat door het integreren van de temperatuur in de ontwerpnormen in deze case de ontwerpnelheid ruim twee keer zo groot mag zijn in vergelijking met de huidige ontwerpnormen.



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

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

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

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

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

#### *Praktijktesten ECW (Wieringermeer)*

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

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



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

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

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

## Bijlage II. Brontechniek

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

De benodigde ruimte voor het boren bedraagt 300 tot 400 m<sup>2</sup> (zie Figuur II-0-1) voor opstellingsruimte). Het gehele boorproces inclusief het schoonmaken van de bron kost circa 1 maand.



Figuur II-0-1: 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-0-2). 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-0-2 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 annemelijk 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--0-1.

Tabel II--0-1 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 omringede grondwater, het warmere water heeft dus de neiging op te drijven (van Lopik et al., 2016). Doordat de viscositeit ook sterk afneemt met hogere temperatuur kan water makkelijker door de ondergrond stromen waardoor het opdrijf effect versterkt wordt. Dit wordt in SEAWATv4 berekend d.m.v. de volgende vergelijkingen.

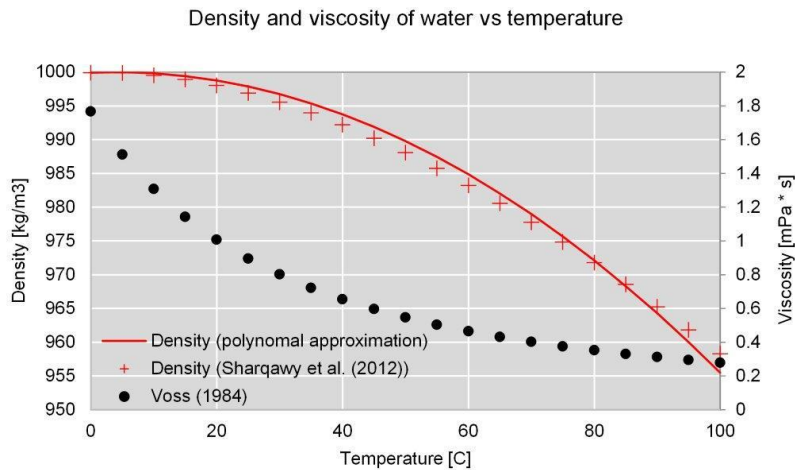
Viscositeit is berekend volgens is (Langevin, 2009):

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

De dichtheidsverandering van water bij oplopende temperaturen is berekend volgens:

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

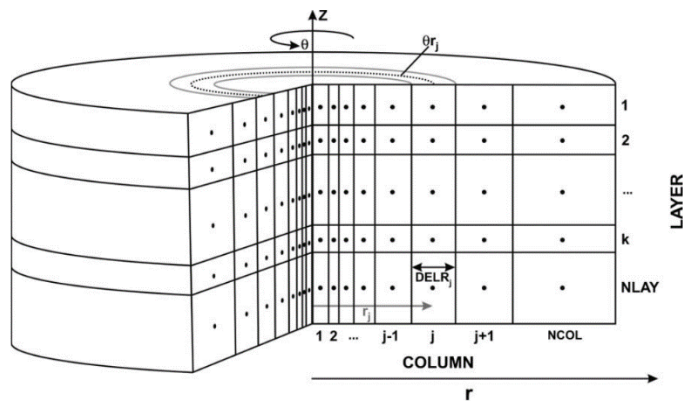
Dit is een benadering van de vergelijking opgesteld door Sharqawy et al. (2012) waarbij ook verschil in zoutconcentratie wordt meegenomen. Bij deze simulaties wordt er vanuit gegaan dat er geen water wordt gemengd van verschillende kwaliteiten (e.g. uit verschillende grondwaterpakketten). Daardoor is 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 (minimale lineaire afstand) vanaf de putten worden de cellen logaritmisches 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 -> logaritmisches)	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 kleig 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 (hoofdbestanddeel 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 kostenschatting voor de investeringen en exploitatie kunnen in realiteit afwijken (zeker +/- 25%). Na het doen van de proefboring en de terrein-inventarisatie kunnen de investeringskosten veel nauwkeuriger (+/- 10 %) worden ingeschat. Het risico is dat de kosten te hoog uitvallen waardoor deze niet volgens verwachting kunnen worden terugverdiend.

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

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

#### **Juridische haalbaarheid en draagvlak**

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

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

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

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

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

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

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

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

#### **Technische en geohydrologische risico's**

De belangrijkste risico's van technische aard zijn:

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

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

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

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

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

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

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

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

Een algemeen risico is dat een verkeerde materiaalkeuze leidt tot een suboptimale operatie van de HTO. Hier zal dan ook uitgebreid aandacht aan moeten worden besteed in de ontwerpfase. Ook hier is het temperatuurniveau van de opgeslagen een belangrijke randvoorwaarde. Bij lage opslagtemperaturen (45 °C) kan nog gewerkt worden met standaard materialen die gebruikelijk zijn bij "lage temperatuur WKO-systemen". Als de opslagtemperaturen verder oplopen, moet worden overgeschakeld op andere materialen, die bestand zijn tegen de hogere temperaturen. Belangrijke componenten in het ontwerp van de HTO zijn de pompen. Ook voor de keuze van de pompen geldt dat een verkeerde keuze kan leiden tot een suboptimale operatie. De meest waarschijnlijke keuze

voor een pompsysteem is een submersible pump (ESP). Het ontwerp en configuratie voor de pompinstallatie is van groot belang voor de continuïteit van de operatie van de HTO en verdient dus extra aandacht in de ontwerpfase. Het vervangen van een pomp tijdens operationele fase is een kostbare en tijdrovende situatie. Redundantie in het ontwerp (bijvoorbeeld door capaciteit middels meerdere injectie en productiebronnen), O&M planning en monitoring van de pompen tijdens operationele fase zijn belangrijke mitigatiemaatregelen.

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

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

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

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

#### **Milieu- en veiligheidsrisico's**

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

De belangrijkste aandachtspunten in de vergunningverlening zijn:

- A) Fysische/chemische eigenschappen van het grondwater
- B) Microbiologie
- C) Grond mechanische effecten

- D) Effecten waterbehandeling op waterkwaliteit
- E) Warmteverlies van de put naar ondiepe lagen
- F) Lekkage van boorvloeistoffen of radioactieve vloeistoffen voor loggingsdoeleinden
- G) Lekkage van reservoir water naar ondiepe lagen

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

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

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

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

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

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

### **Organisatorische risico's**

- A. Ontbreken of onvoldoende commitment stakeholders
- B. Inpassing systeem lastig of niet mogelijk

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



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

**Eindredactie van dit  
deelrapport door KWR**

**Adres**  
Groninghaven 7

**Postadres**  
Postbus 1072  
3430 BB Nieuwegein