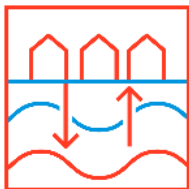
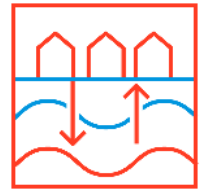


WINDOW *fase 1*



Verkenning HTO

Heerhugowaard

door

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

21 december 2020

Verkenning HTO Heerhugowaard



Dit rapport is gezamenlijk opgesteld door het uitvoeringsteam van WINDOW.

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

21 december 2020

Dit project is mede gefinancierd door TKI-Energie en TKI-Watertechnologie uit de Toeslag voor TopConsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat. WINDOW is een acroniem voor Warmtevoorziening In Nederland Duurzamer met Ondergrondse Warmteopslag. Doel van het WINDOW-programma is het wegnemen van technische, juridische en bedrijfseconomische belemmeringen en beter inzicht krijgen in de effecten voor het verantwoord toepassen van ondergrondse warmteopslag, zodat ondergrondse warmteopslag na 2025 als bewezen techniek kan worden toegepast en kan bijdragen aan kostenreductie van collectieve warmtesystemen op systeemniveau.

Projectnummer 402656 Rapportnummer KWR 2020.140

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 gegevens bestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

WINDOW fase 1

Verkenning ondergrondse warmteopslag Heerhugowaard

Beoordeling
(zie toelichting)

Over deze verkenning (hoofdstuk 1)

In het onderzoeksprogramma WINDOW zijn op zes locaties verkenningen uitgevoerd naar de haalbaarheid van ondergrondse warmteopslag (Hoge Temperatuur Opslag - HTO). De locatie Heerhugowaard is één van de locaties waar een verkenning is uitgevoerd. Met deze verkenning is de potentie van seizoensopslag in het warmtenet van HVC 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 één systeemconcept per verkenning helemaal volledig uitgewerkt, tot en met de businesscase en evaluatie van effecten en risico's. Deze variant staat hieronder weergegeven, als alternatief hoe HTO op deze locatie kan worden ingepast. We merken daarbij op dat het uitgewerkte systeemconcept een voorontwerp is: verdere optimalisatie en afweging van alternatieven valt buiten de scope van deze verkenningen.

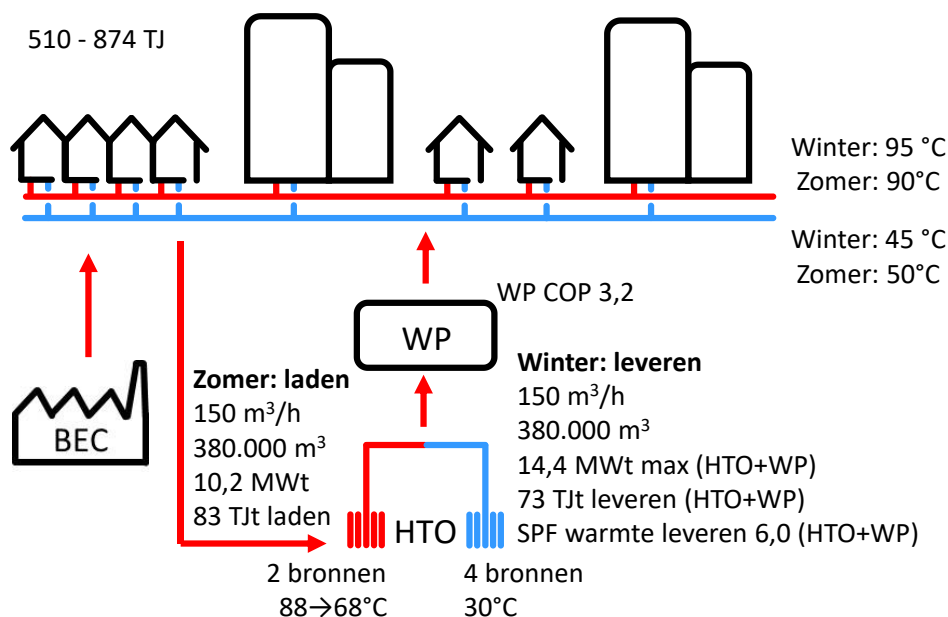
Geohydrologie (hoofdstuk 2)

Geschikte bodemlaag:	Formatie van Maassluis z3
Diepte opslag:	360-380 m-mv
Bodemtemperatuur opslagdiepte:	18,5°C
Proefboring:	Aangeraden (gemiddelde onzekerheid ondergrond)

a

Uitgewerkt systeemconcept (hoofdstuk 3)

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, nuancerings en alternatieven staan beschreven in de verkenning.



1

2

b

c

Thermisch opslagrendement (hoofdstuk 4)					
Systeemefficiëntie in jaar 2	54%	(45 TJ warmte uit HTO)			
Systeemefficiëntie in jaar 10	73%	(61 TJ warmte uit HTO)			
Systeemefficiëntie in jaar 50	81%	(67 TJ warmte uit HTO)			
Business case (hoofdstuk 4)					3
Investering	8,9 M€ = 0,85 M€/MW _t (bij gemiddeld vermogen 10,5 MW _t)				
Investering bronnen	2,4 M€	27%			
Investering warmtepomp	3,6 M€	40%			
Investering overig	2,9 M€	33%			
Operationele kosten	0,38 M€/jaar				
Kosten opgeslagen warmte	-0,17	M€	-45%		
Kosten elektriciteit	0,28	M€	74%		
Kosten overig	0,27	M€	71%		
Kostprijs geleverde warmte	14,7 €/GJ				
Kostprijs geladen warmte	-2,0 €/GJ				
Referentie: kostprijs warmte gasketel 12 €/GJ					
CO₂ emissie (hoofdstuk 4)					
CO ₂ emissie in periode van 30 jaar	19,1 kg CO ₂ /GJ				
CO ₂ emissie warmte laden	0,9 kg CO ₂ /GJ				
CO ₂ emissie warmte leveren	18,2 kg CO ₂ /GJ				
Referentie: emissie warmtelevering gasketel 62 kg CO ₂ /GJ					
Referentie: in 2030 doelstelling warmtenetten 18,9 kg CO ₂ /GJ					
Opmerking: gerekend met huidig kental voor elektriciteit 0,34 kg CO ₂ /kWh (bron NTA 8800)					
Thermische effecten (hoofdstuk 5)					
Thermische straal warmteopslag:	97 meter				
Horizontale warmte uitstraling: (25°C contour vanaf de bron)	na 50 jaar op circa 240 meter vanaf de bron				
Verticale warmte uitstraling: (25°C contour diepte)	na 50 jaar op circa 320 m-mv				
Juridische haalbaarheid (hoofdstuk 5)					4
Provinciaal beleid	Noord Holland heeft ervaring met vergunningverlening voor HTO				
Zoet of zout grondwater:	Zout grondwater				
Stakeholders ondergrond:	Op de beoogde diepte van de opslag zijn er geen belangen in de omgeving				
Inpassing bronnen:	Het beoogde gebied heeft een relatief lage stedelijkheid				

Beoordeling: positieve aspecten, nadelen en risico analyse (hoofdstuk 6 en 7)		
Positieve aspecten van deze locatie voor toepassing HTO:		
1	Aanbod en groot deel van de vraag al gerealiseerd, in de toekomst mogelijk geothermie	
2	HTO heeft een relatief grote omvang, dit leidt tot een gunstige warmteprijs en een gunstig thermisch rendement	
3	Goede kansen voor optimalisatie tot de streefprijs voor warmte, door verder optimaliseren van het ontwerp: - Gedeeltelijke aanpassing ontwerpnormen, zodat minder bronnen nodig zijn - Inzet geothermische warmte in de nabije toekomst (deze heeft een hoger subsidiebedrag) - Indien mogelijk gebruik maken van een DEI investeringssubsidie	
4	Juridische haalbaarheid en mogelijkheid voor inpassing bronnen wordt positief ingeschat. Locatie heeft veel ruimte bovengronds.	
Nadelen van deze locatie voor toepassing HTO:		
a	Relatief diepe bronnen, hogere investeringskosten	
b	Aanvoertemperatuur warmtenet en dus benodigde temperatuur van de warmtepomp 95°C is relatief hoog	
c	Ontwikkeling van geothermie duurt nog aantal jaren	
Conclusie (hoofdstuk 7)		
De toepassingsmogelijkheden van HTO op deze locatie wordt op basis van deze verkenning als relatief positief beoordeeld.		
Het WINDOW programma heeft als doel om HTO verder te ontwikkelen tot een bewezen techniek. Op dit moment bestaan er nog (algemene) technische, juridische en financiële onderzoeksvragen. De conclusie moet gezien worden binnen het kader van een techniek-in-ontwikkeling, met grotere risico's ten opzichte van bewezen techniek. Hoewel deze locatie relatief positief is beoordeeld, is na afweging van de voor- en nadelen deze locatie minder geschikt bevonden om binnen het WINDOW programma HTO tot een bewezen techniek te brengen.		

Inhoudsopgave

1	Inleiding	8
1.1	Achtergrond	8
1.2	Doelstelling	8
1.3	Studiegebied	9
2	Geologische haalbaarheid	11
2.1	Hydrogeologische situatie	11
3	Uitgangspunten en ontwerp	17
3.1	Energetische uitgangspunten warmte aanbod en vraag	17
3.2	Uitvoeringsvariant HTO	20
3.3	Basisontwerp van de HTO	25
4	Analyse van uitvoeringsvarianten	27
4.1	Thermische berekeningen	27
4.2	Financiële analyse	31
4.3	CO ₂ -besparing	36
5	Milieu hygiënische en juridische aspecten	38
5.1	Grondmechanica: zetting en opheffing	38
5.2	Temperatuur toename van de ondergrond	39
5.3	Reflectie op mogelijke verandering grondwaterkwaliteit door thermische effect op basis van bestaande data	42
5.4	Juridisch raamwerk	49
5.5	Omgevingsscan	50
6	Risico inventarisatie en plan van aanpak vervolgstappen	53
6.1	Introductie	53
6.2	Inschatting relevantie van de projectrisico's	53
6.3	Plan van aanpak voor het vervolg	58
7	Conclusies	60
	Referenties	62

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

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

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

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

1.2 Doelstelling

De doelstelling van deze verkenning is tweeledig. Ten eerste heeft HVC een doel met de inpassing van een HTO in het leveringsgebied rond Heerhugowaard. Ten tweede speelt deze verkenning een rol in het WINDOW project.

Het primaire doel van een HTO in het leveringsgebied van Alkmaar is om de Biomassa Energie Centrale (BEC) op een vaste basislast te kunnen laten draaien. Het zomerse warmte-overschot van

de BEC wordt dan opgeslagen met behulp van een HTO-systeem en 's winters terug geleverd aan naburige warmtegebruikers. HVC is ook bezig met de ontwikkeling van een geothermie-centrale. Op termijn zou de HTO ook de seizoensopslag-functie kunnen vervullen voor de geothermie-bron.

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

1.3 Studiegebied

Het warmtenet van Alkmaar en Heerhugowaard is globaal weergegeven in Figuur 1-1. De primaire bron voor dit warmtenet zijn de AfvalEnergieCentrale (AEC) en biomassa-energie-centrale (BEC) in het zuiden van het warmtenet, aangeduid met het HVC logo in Figuur 1-1. In de Noordoosthoek van het leveringsgebied ligt glastuinbouw. Aan deze kant wordt op termijn bovendien een geothermische bron voorzien. Een HTO in het noorden van het leveringsgebied heeft verschillende voordelen:

1. De tuinders aan de noordkant hebben een relatief lage retourtemperatuur, wat gunstig is voor de ontwerptemperatuur van de lauwe bron en voor het thermisch rendement van de HTO.
2. Een opslag in het noorden zorgt ervoor dat het warmtenet in de winter hydraulisch veel minder zwaar belast wordt. De warmte hoeft niet meer volledig vanuit het (verre) zuiden van het warmtenet aangevoerd te worden.

De HTO-locatie in het noorden van het leveringsgebied is daarmee de voordehand liggende voorkeurslocatie.

2 Geologische haalbaarheid

2.1 Hydrogeologische situatie

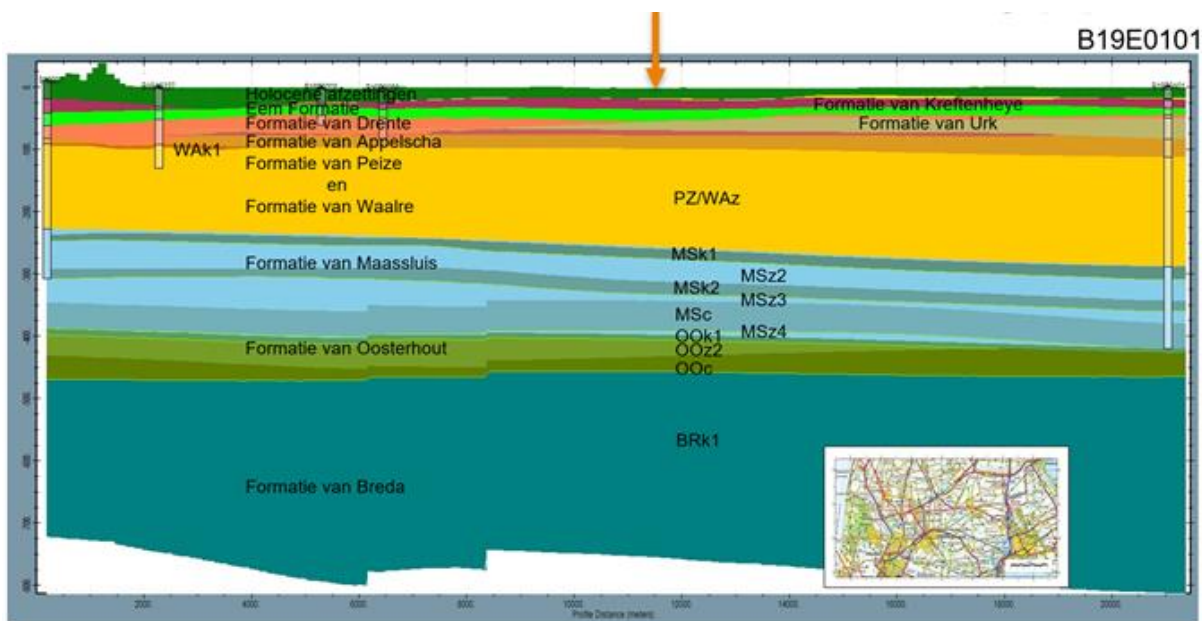
Voor de analyse van de geschiktheid van de ondergrond, is gebruikt gemaakt van de openbare modellen en datasets (DGM/REGIS II v2.2, NLOG, DINO, grondwatertools), aangevuld met boorbeschrijvingen van lokale boringen en/of informatie van open bodemenergiesystemen. TNO en IF Technology hebben deze informatie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

2.1.1 Beschrijving ondergrond

De ondergrond in de omgeving van Heerhugowaard 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 dieptes tot ~500 m zijn de Formatie van Maassluis en de Formatie van Oosterhout. In beide formaties bevindt zich zout water. De Formatie van Peize (model eenheid Formatie van Peize en Formatie van Waalre in DGM v2.2) laat een mogelijk geschikt zandpakket zien, maar er is risico op de afwezigheid van een afsluitende kleilaag. De dieper gelegen Formatie van Breda is kleilig ontwikkeld en wordt daarom ongeschikt geacht voor HTO. Tabel 2-1 laat een overzicht van de verwachte hydrogeologische eenheden zien.

De beoogde HTO locatie in Heerhugowaard ligt niet in een grondwaterbeschermingsgebied (i.e. grondwaterbeschermingsgebied, boringsvrijzone, 100-jaarszone, waterwingebied drinkwater, Natura2000). Er is een relatief ondiepe breuk aanwezig op tamelijk grote afstand (3-4 km), maar deze wordt gezien de afstand tot de locatie niet als direct risico gezien.

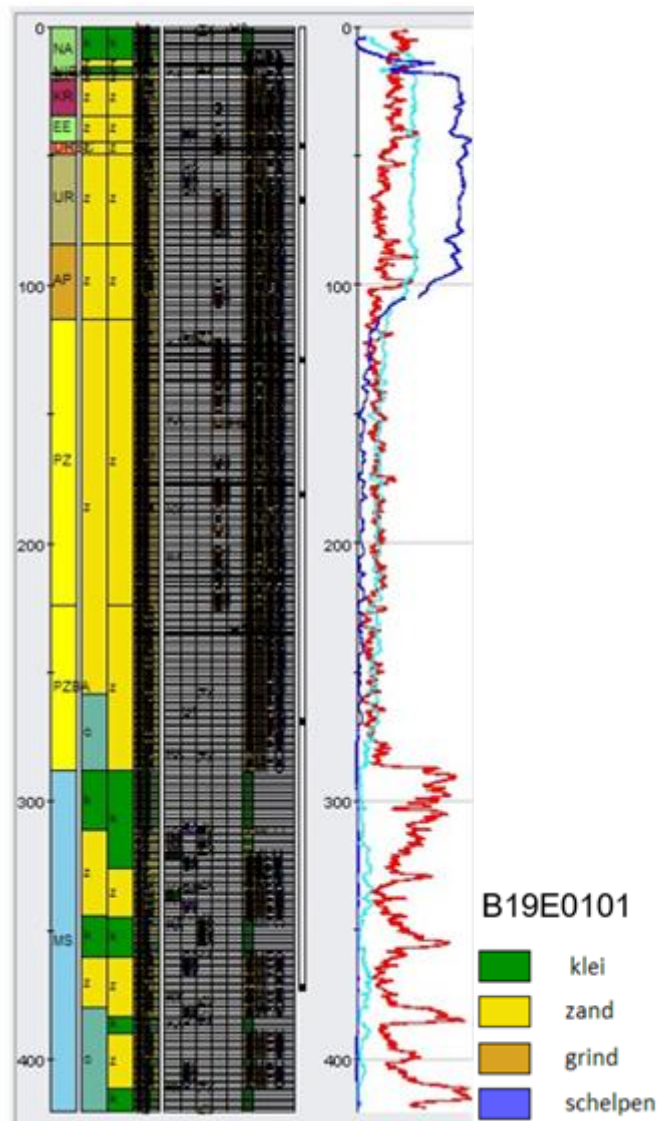
Voor meer gedetailleerde informatie over de ondergrond is gekeken naar boringen in de omgeving. De dichtstbijzijnde diepe boring in de DINO database is boring B19E0101 (Figuur 2-2). Deze boring ligt op ongeveer 10 km afstand van de beoogde HTO locatie. Daarnaast is de proefboring voor de HTO in Middenmeer (ECW), op ongeveer 20 km afstand van beoogde HTO locatie, gebruikt voor aanvullende informatie.



Figuur 2-1 Doorsnede (REGIS II v2.2) door het gebied van de beoogde HTO locatie in Heerhugowaard, van west naar oost. De rode cirkel op de plattegrond en de oranje pijl in de doorsnede geven de mogelijke HTO locatie aan. Boring B19E0101 ligt ten oosten van Heerhugowaard.

Tabel 2-1 - Overzicht van de verwachte hydrogeologische eenheden die in aanmerking komen voor gebruik voor de beoogde HTO. Op basis van REGIS II v2.2.

Hydrogeologische eenheid	Modeleenheid REGIS II v2.2	Opmerking
Fm. van Maassluis, 1 ^e kleiige eenheid	MSk1	Scheidende laag
Fm. van Maassluis, 2 ^e zandige eenheid	MSz2	Watervoerende laag
Fm. van Maassluis, 2 ^e kleiige eenheid	MSk2	Scheidende laag
Fm. van Maassluis, 3 ^e zandige eenheid	MSz3	Watervoerende laag
Fm. van Maassluis, complexe eenheid	MSc	Zowel watervoerende als scheidende lagen mogelijk
Fm. van Maassluis, 4 ^e zandige eenheid	MSz4	Watervoerende laag
Fm. van Oosterhout, 1 ^e kleiige eenheid	OOk1	Scheidende laag
Fm. van Oosterhout, 2 ^e zandige eenheid	OOz2	Watervoerende laag
Fm. van Oosterhout, complexe eenheid	OOC	Zowel watervoerende als scheidende lagen mogelijk



Figuur 2-2 Boorgatmeting en geohydrologische interpretatie van boring B19E0101. De rode lijn is de gemeten gamma ray straling. Een hoge gamma ray waarde (rechts) duidt vaak op shales/klei of de aanwezigheid van glauconiet, een lagere gamma ray (links) geeft meer zandige sedimenten aan.

Uit het REGIS II v2.2 model, de boorgatmeting B19E0101 en de HTO proefboring in Middenmeer, komen de volgende hydrogeologische eenheden naar voren die interessant kunnen zijn voor HTO. Hierbij is gekeken naar een zandige watervoerende laag met afsluitende kleilaag:

- Drie mogelijk geschikte zandige eenheden (MSz2, MSz3, MSc) in de Formatie van Maassluis, met boven elk zandpakket een afsluitende kleilaag.
- Mogelijk geschikte zandige eenheid (OOz2) in de Formatie van Oosterhout, met waarschijnlijk een erg dunne afsluitende kleilaag (OOK1).

2.1.2 Nadere analyse potentieel geschikte hydrogeologische eenheden Formatie van Maassluis

De Formatie van Maassluis (MS) bestaat uit fijn tot matig grove mariene zanden afgewisseld met aaneengesloten kleilagen. De Fm. van Maassluis ligt in Noord-Holland relatief diep, zo rond de 230-420 m-mv. De eerste zandige eenheid van de Fm. van Maassluis (MSz1) en de vierde zandige eenheid van de Fm. van Maassluis (MSz4) zijn waarschijnlijk erg dun (<5 m dikte) en worden

daarom niet geschikt geacht voor HTO.

Uit de REGIS II v2.2 doorsnede komt naar voren dat de tweede zandige eenheid van de Fm. van Maassluis (MSz2) een relatief grote en constante dikte lijkt te hebben in vergelijking met de andere zandige eenheden in deze formatie. Echter komt uit de proefboring bij Middenmeer en de gamma ray metingen van boring B19E0101 naar voren dat deze laag kleiig ontwikkeld is.

De dikte van de derde zandige eenheid van de Fm. van Maassluis (MSz3) lijkt lateraal sterk te kunnen variëren. De MSz3 laat op de gamma ray de minste verstoring zien en wordt als lithologisch geschikte laag beoordeeld. In de ECW proefboring is een erg dikke kleilaag (>100m) met enkele dunne zandige intervallen boven de MSz3 aanwezig, van 230-360 m-mv. In boring B19E0101 is deze kleilaag veel dunner, ~10m, deze grote verschillen maken de inschatting van de kleilaag op de locatie van de HTO lastig.

In de complexe laag van de Fm. van Maassluis (MSc) bevindt zich, aan de gamma ray te zien (Figuur 2-2), ook een mogelijk geschikt zandpakket, echter waarschijnlijk met een dunne kleilaag erin.

De horizontale doorlatendheid van de verschillende zandpakketten in de Fm. van Maassluis wordt op basis van REGIS II v2.2 rond de 4-5 m/d geschat, echter is uit de proefboring bij Middenmeer (op ongeveer 20 km afstand) gebleken dat de doorlatendheid van de MSz3 en de zandlaag in de MSc daar rond de 8-14 m/d ligt. Hierdoor is de verwachting dat de doorlatendheid in Heerhugowaard hoger is dan de 4-5 m/d uit REGIS II v2.2.

Formatie van Oosterhout

De Formatie van Oosterhout bestaat uit overwegend fijn zand en klei en zandige klei welke zwak tot sterk siltig kunnen zijn. De zanden zijn vaak glauconiet-houdend en bevinden zich rondom Heerhugowaard op een diepte van 380-480 m-mv. Er zijn weinig diepe boringen in de omgeving waarin de Fm. van Oosterhout is aangeboord, en diepere olie en gas boringen in de omgeving laten te weinig detail zien. De Fm. van Oosterhout is in Noord-Holland vaak kleiig/siltig ontwikkeld. Ook is bekend dat de zanden van de Fm. van Oosterhout in deze omgeving vaak een hoge gamma ray laten zien wat vaak duidt op de aanwezigheid van glauconiet, een kleimineraal dat in marine zanden kan voorkomen. De effecten van een HTO systeem op glauconiet, en de gevolgen daarvan voor de HTO, zijn nog relatief onbekend. De eerst kleiige eenheid van de Fm. van Oosterhout (OOk1) boven de tweede zandige eenheid van de Fm. van Oosterhout (OOz2) lijkt er dun ontwikkeld te zijn en de OOz2 zelf varieert sterk in dikte en kan ook erg dun of lokaal afwezig zijn. Geconcludeerd wordt dat de beschikbare informatie over de Fm. van Oosterhout beperkt is. De enige manier om meer duidelijkheid te krijgen is door het uitvoeren van een proefboring. Mocht de geothermie boring binnenkort al uitgevoerd gaan worden, dan is dat wellicht een kans om daarbij nog extra informatie te vergaren met betrekking tot de geschiktheid van de Fm. van Oosterhout (en de Fm. van Maassluis).

2.1.3 Conclusie meest geschikte opslagpakket

Tabel 2-II geeft een overzicht van de formaties die nader onderzocht zijn voor deze verkenning en de hydrogeologische parameters die gebruikt zijn 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 ervoor gekozen om deze twee watervoerende lagen mee te nemen in de simulaties.

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

Hydrogeologische parameter	Naam	Waarde	Waarde	Eenheid
Opslagpakket	Name_aq	MSz3	OOz2	-
Achtergrond temperatuur	T_amb	18	20	°C
Dikte opslagpakket	L_storage	20	10	m
Horizontale doorlatendheid (incl. standaarddeviatie REGIS II v2.2 indien van toepassing)	K_h	11	6 (3,4)	m/d
Verticale doorlatendheid ¹	K_v	5,5	3	m/d

Uit bovenstaande tabel volgt dat het doorlaatvermogen van de derde zandige eenheid van de Formatie van Maassluis (MSz3) ($220 \text{ m}^2/\text{d}$) bijna 4 maal zo hoog is als het doorlaatvermogen van de tweede zandige eenheid van de Formatie van Oosterhout (OOz2). Daardoor zullen bronnen in MSz3 een veel hogere capaciteit hebben dan bronnen in OOz2. Verder is de dikte en aanwezigheid van de OOz2 onzeker en de aanwezigheid van glauconiet vormt een risico. Deze laag is toch meegenomen als diepere optie in de modelberekeningen, om het effect van warmteopslag in deze laag te kunnen weergeven. Een bijkomend voordeel van MSz3 is dat deze eenheid ondieper ligt, waardoor minder diep geboord hoeft te worden. MSz3 is daarom het meest geschikt als opslagpakket. Ook bij de proefboring in Middenmeer is deze laag gekozen als opslagpakket. Echter is de dikte van de bovenliggende kleilaag onzeker, voor de thermische berekeningen in sectie 4 is voor de kleilaag boven de MSz3 een dikte van ~50m aangehouden op basis van beide boringen.

2.1.4 Onzekerheden ondergrond

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

- *Dikte van het opslagpakket en scheidende laag boven opslagpakket*

Door het ontbreken van diepe boringen in de omgeving van de beoogde HTO locatie, is een inschatting van de dikte en dieptes van de hydrogeologische eenheden gemaakt op basis van boringen op 10 en 20 km afstand van de HTO locatie en het REGIS II v2.2 model. De exacte diepte en dikte van de watervoerende lagen op de locatie kan variëren, maar er wordt wel een geschikte watervoerende laag verwacht op basis van de algemene hydrogeologische opbouw in de regio.

Een grotere onzekerheid is er wat betreft de dikte van de kleilaag boven de MSz3 en de dikte van de zandlagen in de Fm. van Oosterhout, aangezien er in de omgeving geen boringen zijn die tot deze formatie reiken. De dikte en diepte van zowel de watervoerende laag als de scheiden laag van de Fm. van Oosterhout zijn onzeker en kunnen enkel worden vastgesteld doormiddel van een proefboring. Mocht de boring voor het geothermie

¹ 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).

systeem op korte termijn worden uitgevoerd, dan is dat een kans om meer informatie te vergaren met betrekking tot de diepte, dikte en globale eigenschappen van de verschillende lagen.

- *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%.

- *Horizontale en verticale doorlatendheid en anisotropie*

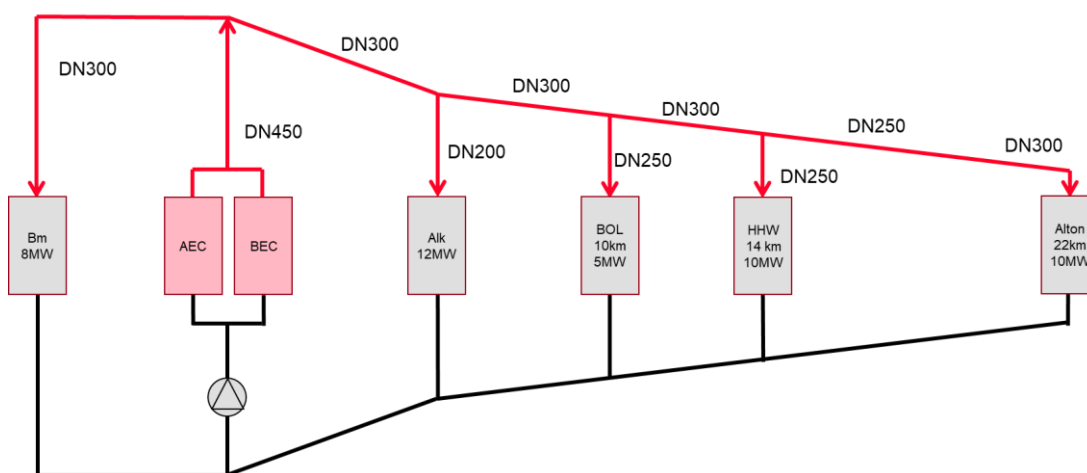
Een onzekere factor is de doorlatendheid. Van de meeste hydrogeologische eenheden is van de doorlatendheid een standaarddeviatie berekend in REGIS II v2.2. De rasters geven voor elke rastercel de modelonzekerheid van de doorlatendheid weer. Dit is uitgedrukt in de standaarddeviatie (in m/d) van de door het model geschatte, meest waarschijnlijke doorlatendheid. Voor de locatie Heerhugowaard is de standaarddeviatie bij de OOz2 3.4 m/d, en doorlatendheid voor de MSz3 is geschat op basis van de proefboring in Middenmeer, deze bleek ongeveer 6 m/d hoger dan inschat in REGIS II v2.2, wat de onzekerheid in doorlatendheid goed weergeeft. Vooralsnog wordt uitgegaan van een doorlatendheid tussen 8 en 14 m/d, op basis van de resultaten bij de HTO van ECW. 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 en aanbod

De warmte in het warmtenet van Alkmaar/Heerhugowaard wordt geleverd vanuit de BEC en de AfvalEnergieCentrale (AEC), die zich beide bevinden in het zuiden van het leveringsgebied met aanzienlijke transportafstanden naar de noordrand van het leveringsgebied; zie Figuur 1-1 en Figuur 3-1. De piek wordt geleverd met de AEC, maar de BEC draait ook met een variabele levering.



Figuur 3-1: Schematisatie warmtenet Alkmaar en Heerhugowaard met leidingdiameters en overdrachtstations

Het primaire doel van de HTO is om de BEC op een vaste (optimale) basislast van 21 MW te laten draaien. De totale warmtevraag in het leveringsgebied (510.000 GJ) is momenteel nog te klein om de BEC jaarrond op 21 MW (oftewel 660.000 GJ/jr) te kunnen laten draaien. HVC verwacht dat de jaarvraag de komende jaren blijft toenemen (Tabel 3-I).

Tabel 3-I: Prognose warmteproductie Alkmaar (Bron: HVC)

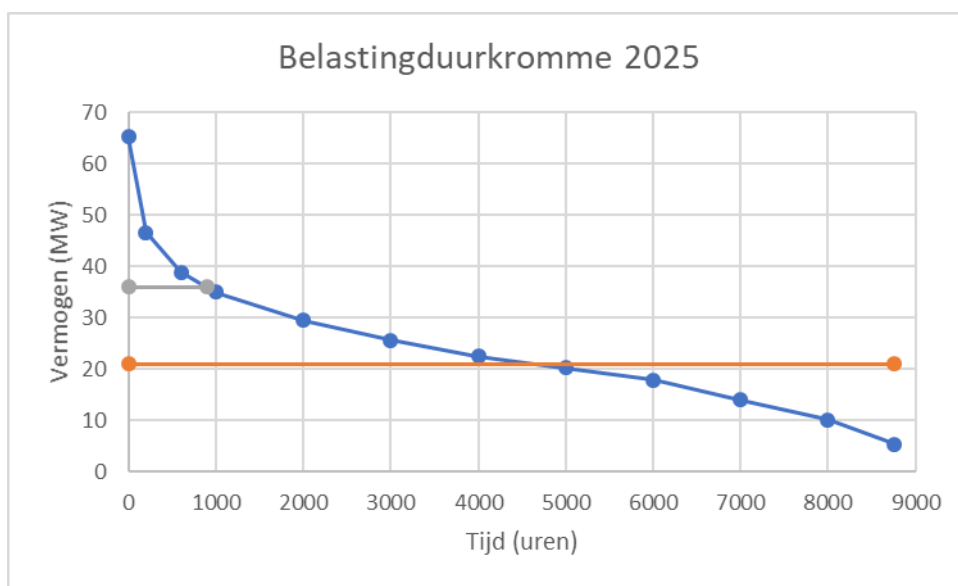
Jaar	Warmteproductie (GJ)
2019	(realisatie) 510.000
2025	724.000
2030	874.000

De belastingduurkromme van 2019 is opgeschaald om de verwachte belastingduurkromme voor 2025 respectievelijk 2030 te verkrijgen (Figuur 3-2, Figuur 3-3). Door uit te gaan van deze opschaling nemen we eigenlijk aan dat de verdeling over verschillende warmtevragers (m.n. glastuinbouw, huishoudens en utiliteit), gelijk blijft. Als het aandeel glastuinbouw toeneemt, dan gaat de belastingduurkromme wat vlakker lopen, omdat de glastuinbouw 's zomers nog relatief veel warmte vraagt.

Met een zomerproductie van minimaal 5 MW in 2025 en een BEC die kan doordraaien op 21 MW, is er ruimte om het overschot aan warmteproductie van ongeveer 15 MW in een HTO op te slaan. De BEC en HTO kunnen dan 's winters gezamenlijk maximaal 36 MW leveren. Hierbij moet worden opgemerkt, dat de HTO productiecapaciteit aan het begin van het winterseizoen nog in de buurt

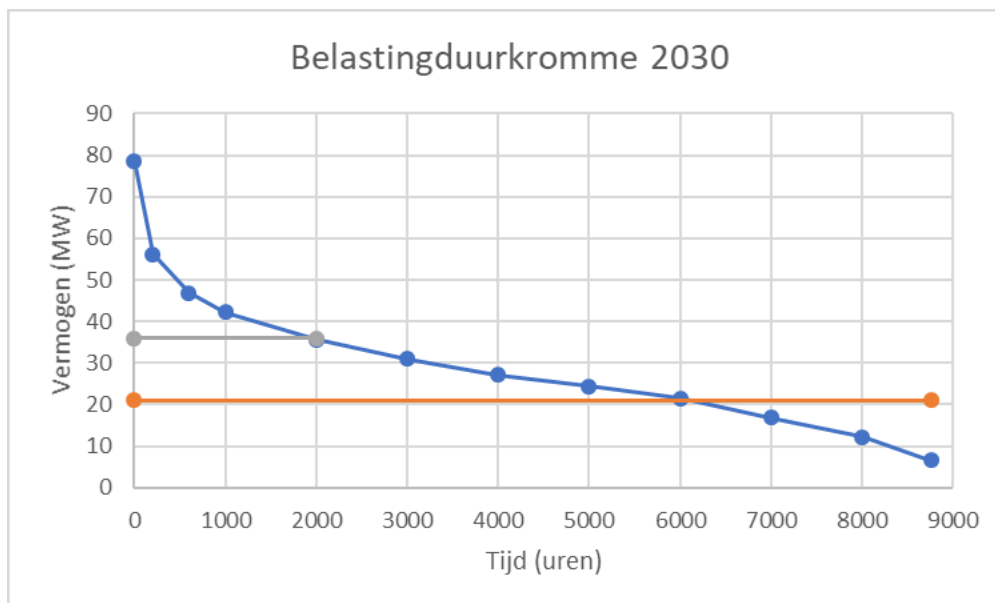
van de 15 MW zal liggen, maar gedurende de winter zal afnemen vanwege de daling van de temperatuur van het onttrokken water.

In de periodes dat de warmtevraag kleiner is dan de gewenste basislast van de BEC (21 MW) wordt warmte opgeslagen in de HTO. De opgeslagen energie kan worden berekend aan de hand van de belastingduurkromme, zie Figuur 3-2. Uit de belastingduurkromme volgt dat sprake is van overcapaciteit van de BEC in de uren tussen 4700 en 8760. De hoeveelheid warmte die kan worden opgeslagen bedraagt ruim 90.000 GJ (25.000 MWh). In Figuur 3-2 is direct te zien dat de teruglevering (in perioden dat de warmtevraag groter is dan de gewenste basislast van de BEC: tussen 0 en 4700 uur in de belastingduurkromme) een groter potentieel heeft (130.000 GJ) en bijna 1000 vollasturen bevat. Dat betekent dat de opgeslagen warmte (voor zover deze nog kan worden teruggewonnen met een bruikbare temperatuur) in het winterseizoen ook weer kan worden terug geleverd aan het warmtenet en nuttig kan worden ingezet.



Figuur 3-2: Belastingduurkromme 2025 Warmtenet Alkmaar (blauw: belastingduurkromme; oranje: gewenste basislast BEC; grijs: maximale levering vanuit BEC en HTO)

In 2030 heeft de BEC minder overcapaciteit, omdat de verwachte warmtevraag gedurende 6000 uur groter is dan 21 MW. Dus zijn er 2760 uur beschikbaar om de HTO te laden. Het verwachte BEC overschot bedraagt dan 61.500 GJ. Om toch 90.000 GJ te kunnen laden zal een tweede duurzame bron de resterende 28.500 GJ (3 MW gedurende 2500 uur) moeten leveren. In 2030 kan een HTO alle opgeslagen warmte (afgezien van de warmteverliezen: alleen het gedeelte dat bruikbaar is) op vollast terug leveren.



Figuur 3-3: Belastingduurkromme 2030 Warmtenet Alkmaar

Er liggen plannen voor de ontwikkeling van een geothermiebron. De geothermie-bron heeft een verwachte capaciteit van bijna 20 MW (440 m³/h bij 90 °C productie en 50 °C injectie) en heeft daarmee een vergelijkbare capaciteit als de BEC. Onderzoek zal moeten uitwijzen hoe ver de productiecapaciteit van de geothermie-bron 's zomers teruggedraaid kan worden zonder nadelige gevolgen. Dat is bepalend voor de rol die geothermie in het Alkmaarse warmtenet kan spelen. In deze verkenning gaan wordt hierop niet verder ingegaan.

Temperatuurniveaus en debieten

Voor de HTO wordt uitgegaan van een locatie tussen WOS-HHW (warmte-overdrachtsstation Heerhugowaard) en het tuindersgebied aan de noordrand van het leveringsgebied (Numan, All Plants); zie Figuur 3-1. In deze studie zijn uitgangspunten voor de temperatuurniveaus vastgesteld o.b.v. actuele temperatuurdata ter plaatse van het tuinbouwgebied en weergegeven in Tabel 3-II.

Tabel 3-II: Typische primaire temperaturen in zomer en winter aan de noordzijde van warmtenet Alkmaar

Grootheid	Actuele data	Uitgangspunt voor HTO	Opmerkingen
Zomer - aanvoer	90 - 95 °C	90 °C	
Zomer - retour	55 - 70 °C	55 °C	
Winter - aanvoer	100 - 110 °C	95 °C	O.b.v. 85 °C secundaire aanvoer (contractueel) bij tuinders en gemeten ΔT_{WOS} van 10 °C.
Winter - retour	45 - 50 °C	45 °C	Contractueel moeten tuinders streven naar 35 °C in de secundaire retour.

Uitgaande van een gemiddelde temperatuurval over de warmtewisselaar (TSA) van de HTO van 2°C, betekenen bovenstaande uitgangspunten dat het grondwater opgeslagen wordt bij een temperatuur van 88°C.

Uitgangspunt voor injectietemperatuur van grondwater in de lauwe bron van de HTO is 30°C. Deze keuze is gebaseerd op de volgende overwegingen:

1. In principe kiezen we een injectietemperatuur die beperkt hoger ligt dan de omgevingstemperatuur om verliezen in de ondergrond te beperken.
2. Het tweede argument heeft te maken met de wijze van inpassing van de warmtepomp, waarbij de uitkoeling aan de verdamperkant vergelijkbaar moet zijn met de benodigde opwarming aan de condensorkant; dit argument is verder toegelicht in sectie 3.2.

Er zijn op hoofdlijnen twee varianten denkbaar, die in sectie 3.2 verder uitgewerkt zijn:

- HTO zonder warmtepomp
- HTO met warmtepomp

In een HTO zonder warmtepomp, bepaalt de retourtemperatuur in de winter de infiltratietemperatuur in de lauwe bron. Bij een temperatuurverschil van 2°C over de TSA wordt het grondwater afgekoeld tot 47°C. In een HTO met warmtepomp, is het streven om iets boven de achtergrondtemperatuur in de koude put te komen. Dit levert de volgende debieten op voor een opslagvermogen van 15 MW (Tabel 3-III).

Tabel 3-III: temperaturen en debieten variant met en zonder warmtepomp

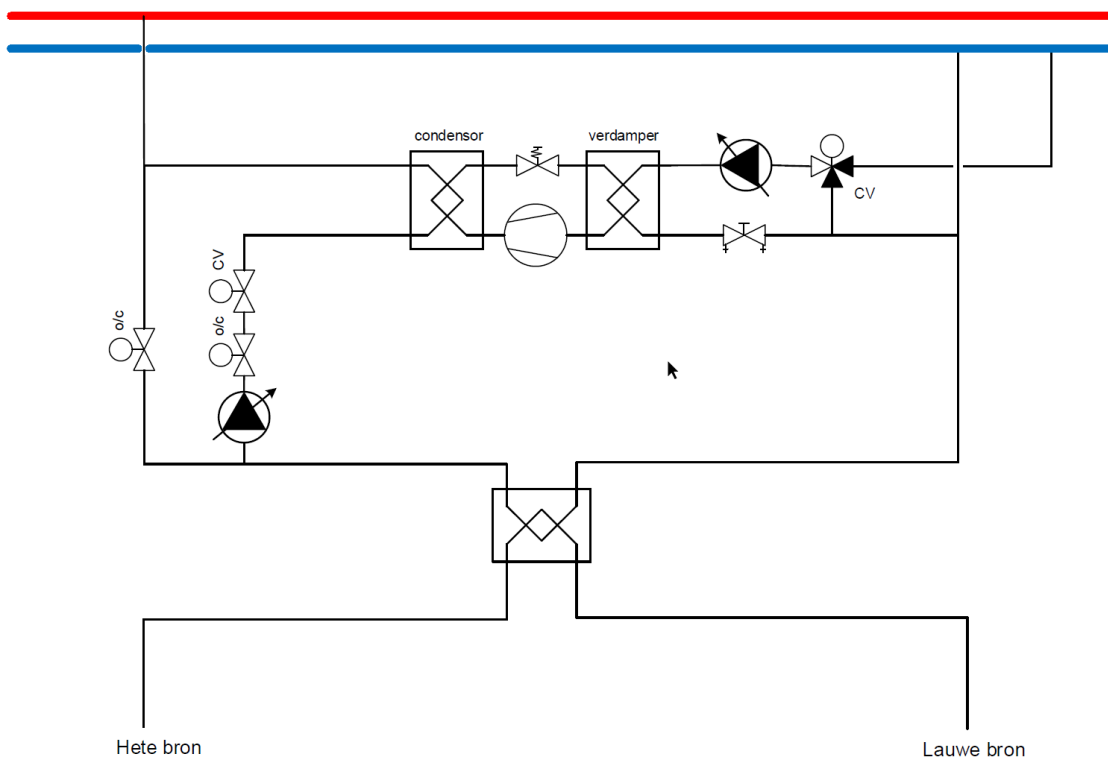
	Lauwe HTO-bron temperatuur [°C]	Warme HTO bron temperatuur [°C]	Debiet [m ³ /h]
HTO met warmtepomp			
Opslag in HTO	30	88	223
HTO zonder warmtepomp			
Opslag in HTO	47	88	317

Met 95°C als uitgangspunt voor de aanvoertemperatuur in de winter is inpassing van een warmtepomp noodzakelijk. Er komen dus alleen uitvoeringsvarianten met een warmtepomp in aanmerking.

In de uitvoeringsvarianten wordt de variant met een HTO-ontwerpdebiet van 150 m³/h opgenomen. Met 150 m³/h HTO-debiet daalt het opslag-vermogen naar 10 MW en het energetische opslagvolume daalt heel beperkt van 25.000 GJ naar 23.000 GJ (in 2025). In de financiële analyse in sectie 4.2 is deze variant met een kleiner ontwerpdebiet meegenomen.

3.2 Uitvoeringsvariant HTO

In de uitvoeringsvariant met warmtepomp wordt de HTO aan de warmtenet-zijde ingepast. Energetisch is het iets gunstiger om de verdamper HTO-zijdig aan te sluiten, maar dit voordeel (max 5% COP) weegt niet op tegen de meerprijs van het extra onderhoud en de noodzaak om een dure Titanium warmtewisselaar toe te passen in de verdamper van de warmtepomp in verband met de verwachte saliniteit van het grondwater (orde 10 g/l). Het principeschema van de uitvoeringsvariant is weergegeven in Figuur 3-4.



Figuur 3-4: Inpassing HTO Heerhugowaard met warmtepomp

COP-warmtepomp

Met een grondwater-injectietemperatuur van 30°C moet het retourwater afgekoeld worden tot 28°C en bedraagt het setpoint in de verdamer 26°C. Het setpoint aan de condensorzijde van de warmtepomp wordt gelijkgesteld aan de leveringstemperatuur (95°C). Uitgaande van 60% rendement (t.o.v. Carnot) bedraagt de COP van de warmtepomp dan 3,2.

Bedrijfscondities warmtelevering

Uitgaande van de temperaturen in Tabel 3-II en een maximaal injectiedebiet in de lauwe HTO-bron van 180 m³/h en een afkaptemperatuur van 68°C (20°C verlies) worden de volgende bedrijfscondities verkregen gedurende de winterperiode (Tabel 3-IV). Bij levering kort na opslag aan het begin van de winter is er nog geen temperatuurverlies in de warme bron en kan de HTO-bron 12,2 MW leveren.

Tabel 3-IV: Bedrijfscondities bij warmtelevering (50 kg/s HTO injectie)

Locatie	T _{in} [°C]	T _{uit} [°C]	Flow [m ³ /h]	Vermogen [MW]	Opmerkingen
Aanvang winter					
TSA, HTO-zijde	88	30	180	12,2	
TSA, net-zijde	28	70	250	12,2	Deze uitgangstemperatuur is gebaseerd op $\Delta T_{\text{cond}} = \Delta T_{\text{verd}} \cdot \text{COP} / (\text{COP} - 1)$. LMTD = 7. ^{*)}
Verdamper	45	28	250	4,9	
Condensor	70	95	250	7,1	
Totaal geleverd				14,4	waarvan 2,2 MW elektrisch. Systeem COP = 6,5
Einde winter					
TSA, HTO-zijde	68	30	180	8	
TSA, net-zijde	28	66	180	8	LMTD = 2 (ontwerpwaarde)
Verdamper	45	28	210	4,2	
Condensor	66	95	180	6,1	
Totaal geleverd				10,5	waarvan 1,9 MW elektrisch en 0,6 MW uitkoeling retourleiding. Systeem COP = 5,5.

^{*)} LMTD = Log-Mean Temperature Difference. Het effectieve gemiddelde temperatuurverschil aan beide zijden van de warmtewisselaar.

De flow door verdamper en condensor is zodanig gekozen dat de productietemperatuur wordt gehaald. Dit betekent dat de flow aan de warmtenetzijde van de TSA aan het begin van de winter hoger is dan aan de HTO-zijde. Op dit moment kan de HTO met warmtepomp het grootste vermogen leveren: 14,4 MW, waarbij de warmtepomp 4,9 MW onttrekt en 7,1 MW levert. Het thermische ontwerpvermogen van de warmtepomp bedraagt derhalve 7,1 MW. Gedurende de winter daalt de temperatuur van het water dat wordt teruggewonnen uit de HTO en worden de flows aan beide zijden van de TSA aan elkaar gelijk. Bij een vaste flow van de HTO wordt op dit moment het minimale warmtepompvermogen bereikt (5,2 MW). Vanaf een bepaalde temperatuurdaling in de HTO-bron moet de flow aan de verdamper-zijde gaan toenemen en wordt een deel van de flow aan verdamperzijde teruggevoerd naar de retourleiding (op 28°C). De retourleiding wordt dus verder uitgeoeld om de gewenste productietemperatuur te kunnen halen aan de condensor-zijde. Hierbij stijgt het warmtepompvermogen weer naar de ontwerpwaarde. Het kantelpunt voor de bedrijfsvoering is het moment waarop de retourleiding verder uitgeoeld moet worden om de productietemperatuur te kunnen halen. Dit moment treedt pas op bij een HTO-temperatuurdaling van 16°C. De totale warmtelevering is dan gezakt tot 10,5 MW. Bij verdere daling van de HTO-temperatuur wordt dit vermogen gehandhaafd door een combinatie van uitkoeling van de retourleiding en elektrisch vermogen. Bij deze uitgangspunten zou de HTO-bron maximaal 25°C mogen afkoelen voordat de condensor haar maximale vermogen van 7,1 MW levert. De COP van de gehele HTO (gedefinieerd als de totale warmtelevering gedeeld door het elektriciteitsverbruik WP) is constant en gelijk aan 6,5 tot het kantelpunt. Als de retourleiding verder uitgeoeld wordt dan daalt de systeem-COP naar 5,5 bij 20°C temperatuurdaling in de HTO en tot 4,7 bij 25°C HTO-temperatuurdaling. Met bovenstaande bedrijfscondities (met 50 kg/s grondwaterflow en HTO vermogens tussen 8 en 12,2 MW) varieert het benodigde warmtepompvermogen tussen 5,2 en 7,1 MW.

Als we uitgaan van 1 doublet en een maximaal HTO-debiet van 42 kg/s, dan volstaat een warmtepomp-vermogen van 6 MW en bedraagt de afkaptemperatuur 63 °C; zie de samenvatting van de verwachte bedrijfscondities in Tabel 3-V hieronder.

Tabel 3-V: Bedrijfscondities bij warmtelevering (42 kg/s HTO injectie)

Locatie	T _{in} [°C]	T _{uit} [°C]	Flow [kg/s]	Vermogen [MW]	Opmerkingen
Aanvang winter					
TSA, HTO-zijde	88	30	42	10,2	
TSA, net-zijde	28	70	58	10,2	Deze uitgangstemperatuur is gebaseerd op $\Delta T_{\text{cond}} = \Delta T_{\text{verd}} * \text{COP} / (\text{COP} - 1)$. LMTD = 7.
Verdamper	45	28	58	4,1	
Condensor	70	95	58	6,0	
Totaal geleverd				12,1	waarvan 1,9 MW electrisch. Systeem COP = 6,5
Einde winter					
TSA, HTO-zijde	68	30	42	6,7	
TSA, net-zijde	28	66	42	6,7	LMTD = 2 (ontwerpwaarde)
Verdamper	45	28	49	3,5	
Condensor	66	95	42	5,1	
Totaal geleverd				8,8	waarvan 1,6 MW electrisch en 0,5 MW uitkoeling retourleiding. Systeem COP = 5,5.

Samenvatting uitgangspunten voor bepaling specificaties van warmtepomp en warmtewisselaars

Tabel 3-VI: Specificaties warmtepomp; tussen haakjes de specificaties met een HTO-debiet van 42 kg/s.

Condensor setpoint	95 °C	Leveringstemperatuur is ook 95 °C.
Verdamper setpoint	26 °C	Uitgangstemperatuur is 28 °C op de verdamper-uitgang, zodat het grondwater gekoeld kan worden naar 30 °C.
OntwerpfLOW	69 (58) kg/s	
Ontwerpvermogen	7,1 (6,0) MW	

Tabel 3-VII: Specificaties TSA HTO; tussen haakjes de specificaties met een HTO-debiet van 42 kg/s.

	Warmtenet-zijde	HTO-zijde
Ontwerp-aanvoertemperatuur opslag/laden	90 °C	88 °C
Retourtemperatuur opslag	55 °C	30 °C
OntwerpfLOW laden	370 (250) m³/h	223 (150) m³/h
Ontwerpvermogen	15 (10) MW	15 (10) MW
LMTD	7	
Ontwerp-aanvoertemperatuur levering / ontladen	66 °C, max 70 °C	68 °C, max 88 °C
Ontwerp-injectietemperatuur	28 °C	30 °C
OntwerpfLOW ontladen	180 , max 250 m³/h (150, max 209)	180 (150) m³/h
Ontwerpvermogen	8 MW, max 12,2 MW (6,7, max 10,2)	8 MW, max 12,2 MW (6,7, max 10,2)
LMTD	2 (max 7, niet maatgevend)	

De hoge retourtemperatuur in de zomer in het warmtenet is nu bepalend voor de dimensionering van de TSA. Als deze retourtemperatuur verder verlaagd kan worden, kan de TSA kleiner gedimensioneerd worden.

De uitgangspunten voor het geohydrologisch ontwerp staan grotendeels in de TSA tabel hierboven (kolom HTO-zijde). De overige specificaties zijn gebaseerd op de energetische uitgangspunten in sectie 3.1 en zijn hieronder samengevat.

Tabel 3-VIII: Overige specificaties HTO

Parameter	Waarde	Opmerkingen
Opslagvolume laden	25000 MWh = 90000 GJ	Met hete bronnen en vier lauwe bronnen met een totale debiet van 150 m³/h kan in 2025 23000 MWh opgeslagen worden.
Waterverplaatsing	380.000 m³	
Aantal uren beschikbaar voor laden	3000 hr	In 2025 is een langere periode beschikbaar; zie belastingduurkrommes in paragraaf 3.1.
Aantal uren beschikbaar voor ontladen	3000 hr	Het maximale vermogen uit de bron loopt terug van 12 naar 8 MW. Dit vermogen moet teruggeregeld kunnen worden naar 4 MW om de gevraagde vermogens voldoende in te kunnen vullen. Als de bron en WP verder teruggeregeld kunnen worden, dan zijn er meer uren voor levering beschikbaar.
Afkaptemperatuur	63 °C	Hieronder wordt de productie temperatuur lager dan de streefwaarde

3.3 Basisontwerp van de HTO

3.3.1 Uitgangspunten

Het globaal principe van hoe de HTO wordt ingepast is reeds weergegeven in Figuur 3-4. Het ontwerp betreft het grondwatersysteem van de ondergrondse opslag, inclusief warmtepomp en koppeling met het transportnet. De HTO wordt gescheiden van het transportnet door middel van een warmtewisselaar. De warmtepomp is warmtenetzijdig ingepast. Meer informatie omtrent ontwerpkeuzes, zoals bijvoorbeeld materiaalkeuze en waterbehandeling, is te vinden in Bijlage II.

3.3.2 Putontwerp

Uit de ondergrond scan, sectie 2.1.2, blijkt dat er twee watervoerende lagen aanwezig zijn die het meest geschikt lijken voor warmteopslag, de derde zandige eenheid van de Fm. van Maassluis (MSz3) en de tweede zandige eenheid van de Fm. van Oosterhout (OOz2). Beide lagen hebben andere karakteristieken die dus leiden tot een ander putontwerp, Tabel 3-IX.

De natuurlijke grondwatertemperatuur van de OOz2 is ruim 1 graad hoger dan de grondwatertemperatuur in de MSz3 omdat de OOz2 ruim 80m dieper ligt. De dikte van de MSz3 is ingeschat op 20m en de dikte van de OOz2 op 10m. Hierdoor is de thermische straal die zich vormt tijdens de warmteopslag in de OOz2 bijna 1.5 keer groter dan bij opslag in de MSz3.

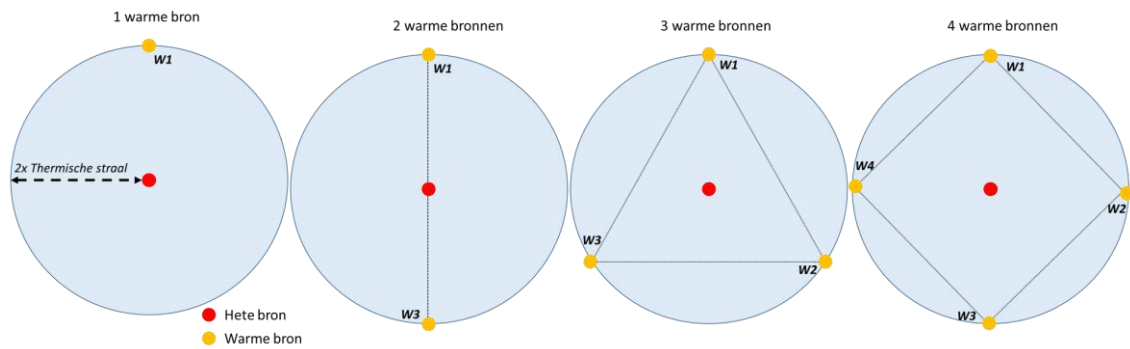
De dikte van de watervoerende pakketten, de horizontale hydraulische doorlatendheid, het benodigde opslag/onttrekkingsvolume en de verwachte onttrekkingstemperatuur bepalen tezamen hoeveel hete en warme bronnen er nodig zijn (meer info rapportage werkpakket C1 en C2), dit is vervolgens weer bepalend 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-IX Gegevens simulaties varianten locatie Heerhugowaard, beide opslag pakketten (Maassluis MSz3, Oosterhout OOz2) hebben een ander aantal bronnen. *thermische straal

	T _{heet} °C	T _{warm} °C	T _{cut-off} °C	V _{opslag} m ³	L _{aq} (m)	R _{th} * [m]	Opslagformatie	Bronnen- heet	Bronnen _{warm}
Variant 1	88	30	63	380,000	20	97.1	Maassluis zand 3	2	4
Variant 2	88	30	63	380,000	10	137.3	Oosterhout zand 2	9	14

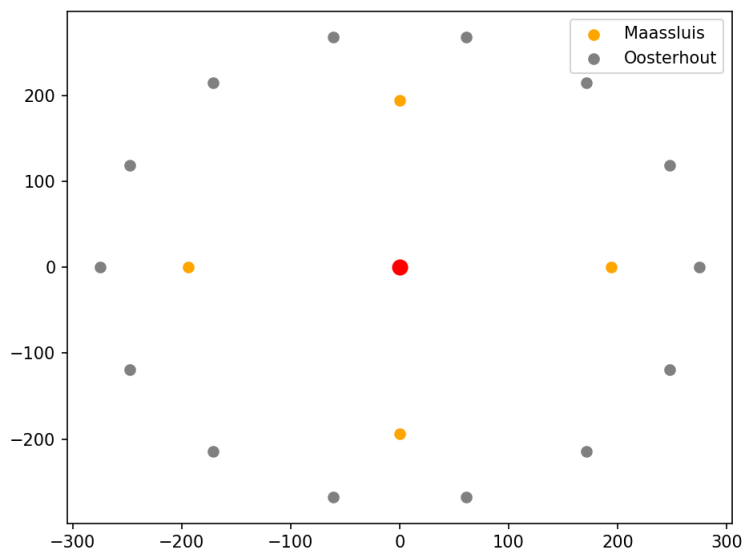
3D putontwerp

De 3D opstelling van de warme putten rondom de hete bronnen zal in alle gevallen worden gedaan volgens de generieke methode getoond in Figuur 3-5. Eerste onderzoeksresultaten laten zien dat een afstand van 2*thermische straal (R_{th}) de meest gunstige afstand is om de efficiëntie van het systeem als geheel te optimaliseren. Deze afstand wordt dus gebruikt om een 3D ontwerp te maken voor de bronnen van het warmteopslag systeem. Indien er andere stakeholders in de buurt van het systeem zitten waar rekening mee gehouden moeten worden of omdat dit ontwerp niet mogelijk is door beperkte bovengrondse inpassing zal het ontwerp in een later stadium (WINDOW fase 2) aangepast worden voor de specifieke case.



Figuur 3-5 Basisontwerp 3D plaatsing bronnen. Afstand Hete bronnen en warme bronnen is 2x de thermische straal van de hete bron.

Omdat de OOz2 de helft van de dikte van de MSz3 heeft op deze locatie is thermische straal ongeveer 50% groter (162m en 114m respectievelijk). De warme bronnen worden dus geplaatst op een afstand van 334m of 228m vanaf de hete bron (Figuur 3-6).



Figuur 3-6 Plaatsing van de warme bronnen rondom de hete bron(nen) (rood) op een afstand van 2x de thermische straal voor beide opslag formaties. De hete bronnen worden hier gerepresenteerd als 1 hete bron in het midden van het vlak.

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 omringende grondwater, het warmere water heeft dan de neiging op te drijven (van Lopik et al., 2016). De verliezen die hierdoor optreden, plus de verliezen die optreden door andere processen (e.g. conductie, dispersie), kunnen goed worden berekend met dit model.

Axisymmetrisch & 3D model

De simulatie worden gedaan met een axisymmetrisch model en een 3D model (Langevin, 2008). Met het axisymmetrische model wordt alleen de hete bron gesimuleerd, met het 3D model alle putten o.b.v. het putontwerp. Omdat het axisymmetrische model relatief weinig rekencapaciteit vergt, kan hierbij de gehele ondergrondse opbouw worden gemodelleerd (van maaiveld tot bijv. 500m diepte). Echter, de interactie tussen de verschillende bronnen en de ruimtelijke (x,y) invloed van het systeem kan dan niet inzichtelijk worden gemaakt.

Nadat het axisymmetrisch model heeft bepaald welke laag/lagen de meeste potentie hebben, wordt daarom met een 3D model het echte warmteopslag systeem gemodelleerd. Om de rekencapaciteit te verlagen wordt er alleen gekeken naar het opslagpakket en de daar boven en onderliggende laag.

Uitgangspunten model

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

4.1.2 Methode efficiëntie berekeningen

Bronrendement

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

Voor een bron wordt dit berekend als:

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

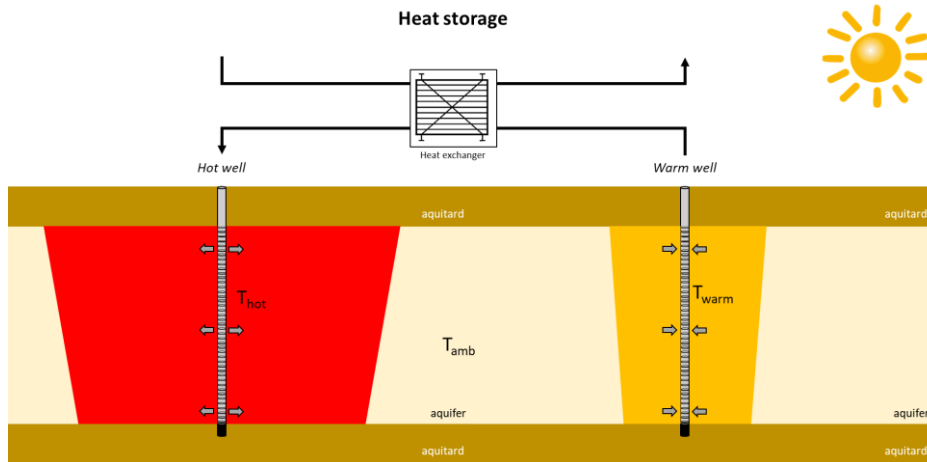
De ΔT is voor een bron berekend als het temperatuur verschil met de achtergrond temperatuur ($T_{ambient}$). Dit kan dus gedaan worden voor zowel de hete en de warme bron (Figuur 4-1).

Systeemrendement

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

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

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



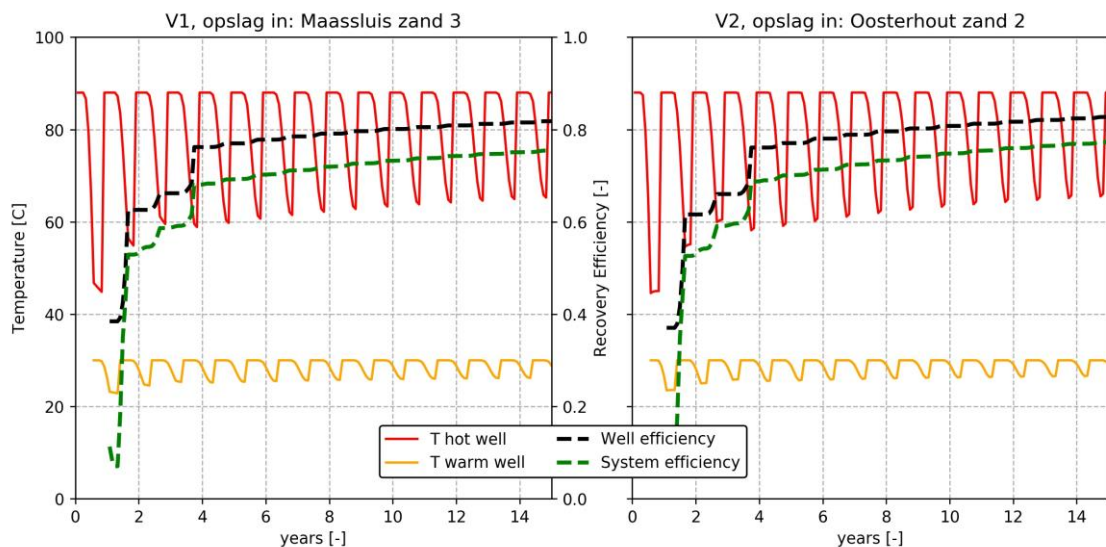
Figuur 4-1 Schematische weergave van een HTO met de temperatuur van de hete bron (T_{hot}), warme bron (T_{warm}) en de achtergrond temperatuur (T_{amb}).

4.1.3 Resultaten

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

Axisymmetrisch 15 jaar

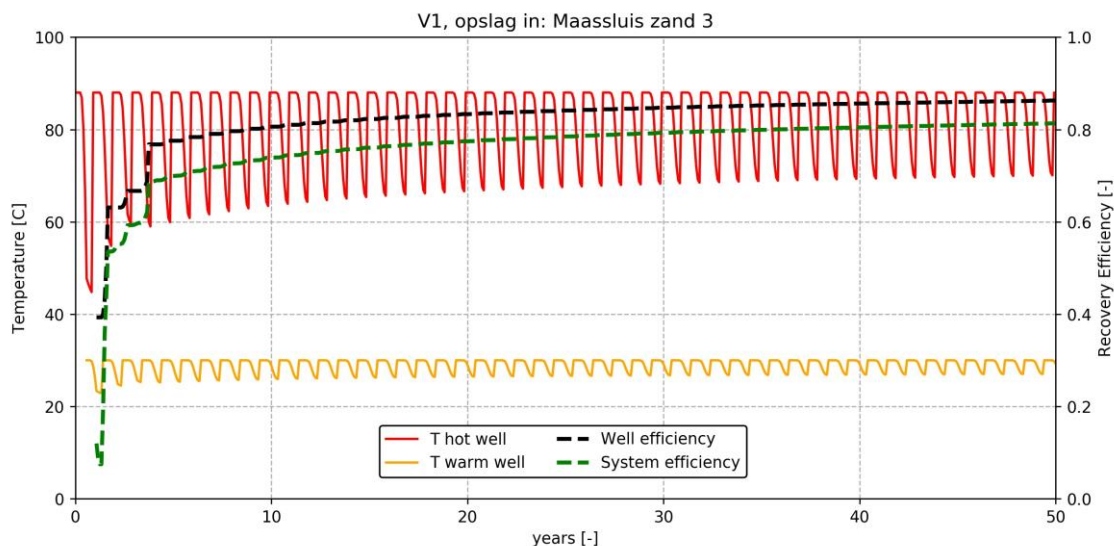
De temperatuur ontwikkeling in het opslagpakket, en dus de efficiëntie, is redelijk vergelijkbaar voor beide formaties (Figuur 4-2). De Formatie van Oosterhout heeft een iets hogere bron efficiëntie na 15 jaar (0.83 t.o.v. 0.81). De afkap temperatuur (63 °C) wordt in beide scenario's alleen in de eerste 3 jaren bereikt tijdens onttrekking, dit gebeurt echter pas in de laatste maand van het onttrekkingsseizoen. Omdat de efficiëntie van beide opslagpakketten vrijwel gelijk is, is de Formatie van Maassluis verder uitgewerkt omdat A) deze laag ondieper ligt wat leidt tot mindere boorkosten, B) deze laag dikker is, waardoor minder putten/bronnen benodigd zijn en C) er een dikke afsluitende laag boven MSz3 lijkt te zitten, die dus waarschijnlijk tot minder thermische impact zal leiden.



Figuur 4-2 Bron temperatuur en efficiëntie voor opslag in Maassluis (links) en Oosterhout (rechts).

Axisymmetrisch - 50 jaar

Opslag in de formatie van Maassluis is doorgerekend voor 50 jaar, Figuur 4-3. Hieruit blijkt dat de efficiëntie van de hete bron en dus de efficiëntie van het warmteopslag systeem langzaam blijft stijgen na de eerste 15 jaar. Na 40 jaar resulteert dit in een systeemrendement van meer dan 80%. Na 50 jaar is de maximale efficiëntie voor de hete bron 87% en 81% voor het systeem als geheel (Tabel 4-I).



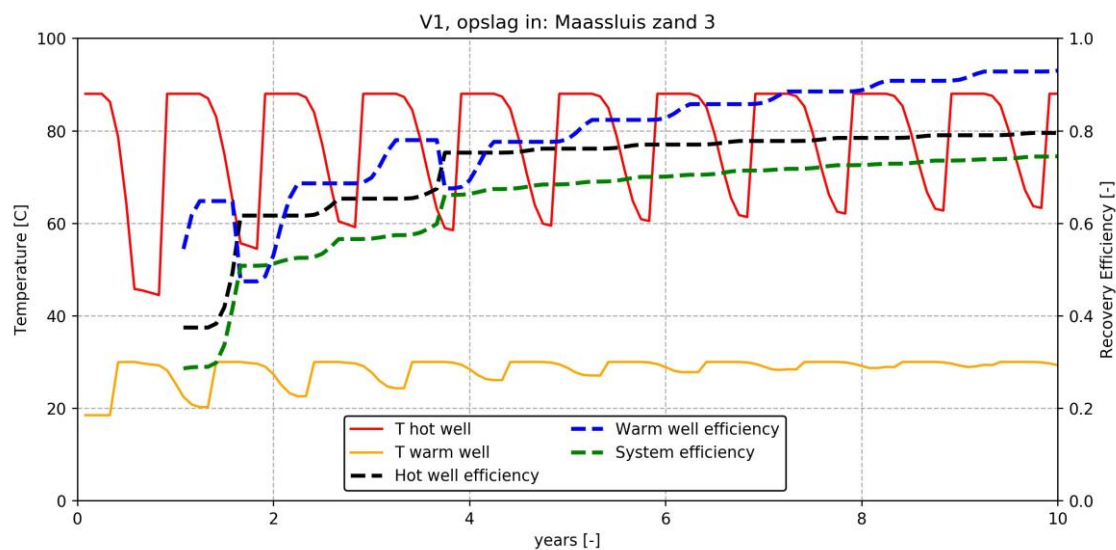
Figuur 4-3 Ontwikkeling van de temperatuur in de warmteopslag bij 50 jaar gebruik. De temperatuur van de hete en warme bron (linker as) bepalen hete bron efficiëntie en het systeem efficiëntie (rechter as).

Tabel 4-I Resultaten modellering warmteopslag systeem voor opslag in formatie van Maassluis en de formatie van Oosterhout.

Parameter	Variant 1 - Maassluis	Variant 2 - Oosterhout
Hete bron		
Efficiëntie (2 ^e jaar)	0.63	0.62
Efficiëntie (10 jaar)	0.80	0.81
Efficiëntie (50 jaar)	0.87	XX
Systeem		
Efficiëntie systeem (2 ^e jaar)	0.54	0.54
Efficiëntie systeem (10 jaar)	0.73	0.75
Efficiëntie systeem (50 jaar)	0.81	XX

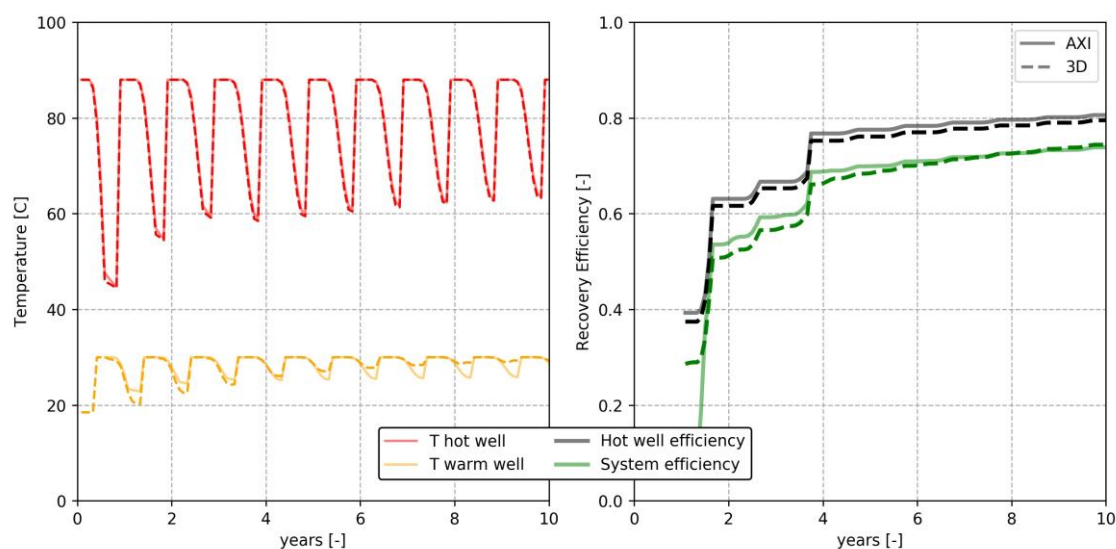
3D simulatie - 10 jaar

De resultaten voor het 3D model laten hetzelfde beeld zien als de axisymmetrische simulaties, na 10 jaar is de jaarlijkse systeem efficiëntie ongeveer 0.73 (Figuur 4-4). Echter, doordat de warme bron na een aantal jaar start met profiteren van de verliezen uit de hete bron, neemt de efficiëntie in de warme bron gestaag toe (blauwe lijn in Figuur 4-4). Dit resulteert dus in een verbetering van het systeem rendement.



Figuur 4-4 3D simulatie van de warmteopslag in de formatie van Maassluis voor 10 jaar.

De resultaten van het 3D model zijn vergeleken met de axisymmetrische resultaten (Figuur 4-5). De verschillen zijn klein tussen de twee modellen voor de eerste 10 jaar. Aan het eind van deze periode is de systeem efficiëntie in het 3D model hoger, en verwacht wordt dat dit nog meer toeneemt in de opvolgende jaren doordat de warme bron steeds meer profiteert van de verliezen uit de hete bron. Het axisymmetrisch model is dus goed in staat om het systeem rendement in te schatten, maar op de lange termijn zal het realistische systeem rendement groter zijn dan wat de axisymmetrische resultaten laten zien. De rendementen worden dus waarschijnlijk in praktijk hoger dan is berekend met het axisymmetrisch model.



Figuur 4-5 Vergelijking tussen de axisymmetrische en 3D resultaten voor de warmteopslag in de formatie van Maassluis.

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 nagenoeg gelijk. De Fm. van Oosterhout ligt dieper dan de Fm. van Maassluis. Het maximale debiet per bron ligt in de Fm. van Oosterhout lager dan het maximale debiet in de Fm. van Maassluis. Hieruit kan beredeneerd worden dat opslag in de Fm. van Maassluis financieel aantrekkelijker zal zijn. Voor de opslag in de Fm. van Oosterhout zijn significant meer bronnen benodigd welke een lager maximum debiet hebben en daardoor minder kostenefficiënt zijn.

De bovengenoemde argumenten resulteren in de verdere uitwerking van de case in de volgende basis variant:

- Variant 1 (basis): opslag met maximaal 150 m³/h (42 kg/s), levering met maximaal 150 m³/h (42 kg/s). Hier zijn twee hete en vier lauwe bronnen voor benodigd.

4.2.1 Investeringskosten

De investeringskosten voor de variant is op haalbaarheidsniveau geraamd. De geraamde kosten exclusief BTW zijn weergegeven Tabel 4-II. 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-II Geraamde investeringskosten HTO variant

		Variant 1 (basis)
Proefboring	[€]	250.000
HTO bronnen	[€]	2.400.000
Warmtepomp	[€]	3.600.000
WTB/CT/E overig	[€]	830.000
Onvoorzien (10%)	[€]	710.000
Ontwerp/advies/vergunningen (15%)	[€]	1.100.000
Totaal	[€]	8.890.000

Proefboring

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

HTO bronnen

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

Warmtepomp

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

WTB/CT/E overig

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

Onvoorzien

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

Ontwerp/advies/vergunningen

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

4.2.2 Operationele kosten

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

Tabel 4-III Geraamde operationele kosten HTO varianten

		Variant 1 (basis)
Opslag warmte	[€/jaar]	166.000-
Elektriciteitsverbruik	[€/jaar]	280.000
Onderhoud en beheer	[€/jaar]	212.000
Waterbehandeling	[€/jaar]	23.000
Monitoring en BRL inspecties	[€/jaar]	30.000
Totaal	[€/jaar]	379.000

Opslag warmte

In de zomerperiode is nog veel warmte over vanuit de BEC. De marginale kosten voor warmte liggen lager dan de SDE+ subsidie. Hierdoor heeft de opgeslagen warmte een negatieve prijs, welke is ingeschat op -€ 2 per GJ.

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 door inzet van de warmtepomp lager. De COP van de warmtepomp is ingeschat op 3,2 (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 6,0 (zie ook Tabel 3-III). Voor de kosten van elektriciteit is gerekend met een waarde van 80 €/MWh.

Onderhoud en beheer

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

Waterbehandeling

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

Monitoring en BRL inspecties

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

4.2.3 Business case

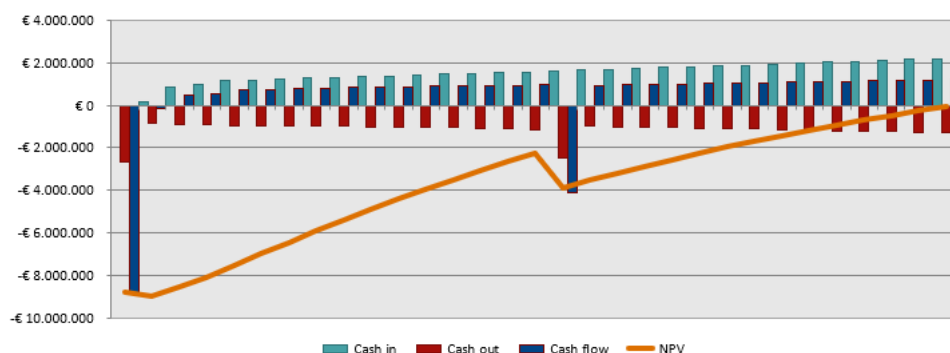
Aannames

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

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

Business case variant 1 (basis)

De kasstromen over de projectperiode voor variant 1 zijn weergegeven in Figuur 4-6. In jaar 0 worden alle investeringen gedaan. Na 15 jaar vindt voor een deel van de componenten een herinvestering plaats. De jaarlijkse operationele kosten stijgen jaarlijks als gevolg van de indexatie. De jaarlijkse inkomsten stijgen omdat ten eerste het opslagrendement steeds verder toeneemt. Hierdoor kan elk jaar meer warmte worden geleverd. Ten tweede stijgen de inkomsten doordat ook de prijs voor warmte jaarlijks wordt geïndexeerd. Om een projectrendement van 6% te halen over een looptijd van 30 jaar bedraagt voor variant 1 de prijs voor warmte 14,7 €/GJ.



Figuur 4-6: Kasstromen variant 1

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-IV.

Tabel 4-IV Berekende specifieke investeringskosten warmte-opslag

		Variant 1 (basis)
Investeringskosten	[€]	8.890.000
Gemiddeld geleverd vermogen	[MW _t]	10,5
Specifieke investeringskosten	[€/MW_t]	850.000

4.2.4 Gevoeligheidsanalyse

Prijs opgeslagen warmte

Momenteel liggen de marginale kosten voor opgeslagen warmte vanuit de BEC lager dan het SDE+ subsidiebedrag, waardoor de prijs van warmteopslag negatief is. Er wordt ook gewerkt aan de realisatie van een geothermiebron. Wanneer deze gerealiseerd is, zal in de zomer meer warmte beschikbaar zijn, en ligt de prijs voor opslag van warmte in de zomer wellicht nog lager.

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

De gevoeligheid van de prijs van opgeslagen warmte is onderzocht, door de prijs van warmte te verlagen en te verhogen met 4€/GJ ten opzichte van de basis (-2 €/GJ). De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 4-5.

Tabel 4-5 Gevoeligheidsanalyse opslag prijs warmte

		Onderwaarde	Variant 1 (basis)	Bovenwaarde
Hete bronnen	[-]	2	2	2
Lauwe bronnen	[-]	4	4	4
Projectrendement	[%]	6%	6%	6%
Prijs opslag warmte	[€/GJ]	-6	-2	2
Prijs warmte	[€/GJ]	10,5	14,7	18,9

Het verschil in GJ prijs is iets groter dan het verschil in prijs van opgeslagen warmte, doordat een deel van de opgeslagen warmte verloren gaat. Bij de huidige referentie (gasketel) ligt de prijs voor warmte ongeveer rond de 12€/GJ_t. Uit bovenstaande kan afgeleid worden dat voor de basisvariant dan de prijs van opgeslagen warmte circa -4,5 €/GJ_t dient te zijn.

Hogere onttrekkingsnorm

De NVOE-norm vereist momenteel bij variant 1 twee hete en vier lauwe bronnen. Dit is een inschatting op basis van wat nu bekend is over de ondergrond. Er zijn nog onzekerheden over de exacte opbouw en eigenschappen van de ondergrond. Daarmee kan het aantal bronnen ook weer wijzigen. Gezien de relatieve diepe ligging en ervaringen opgedaan binnen Heatstore is de verwachting dat de NVOE-normen opgehoogd zouden kunnen worden, maar onduidelijk is nog hoeveel.

In de gevoeligheidsanalyse is gezocht naar een verhoging van de norm waarmee de prijs kan concurreren met de referentie (gas, 12€/GJt). Dit is gedaan door de norm in stappen te verhogen en op basis hiervan te berekenen hoeveel hete en lauwe bronnen nodig zijn voor een systeem met een debiet van 150 m3/h. Op basis hiervan is opnieuw de prijs voor geleverde warmte berekend. Alle andere uitgangspunten zijn gelijk aan de basisvariant. Wanneer de prijs concurreert met de referentie, of wanneer het aantal bronnen 2 is (1 hete bron en 1 lauwe bron), wordt gestopt met het verder ophogen van de norm. Dit geeft de volgende resultaten:

Tabel 4-6 Gevoeligheidsanalyse aantal doubletten

		Var 1 – Basis	Var 1 - min
Hete bronnen	[-]	2	1
Lauwe bronnen	[-]	4	1
Projectrendement	[%]	6%	6%
Prijs opslag warmte	[€/GJ]	-2	-2
Prijs warmte	[€/GJ]	14,7	12,4

Ook met 1 doublet kan de HTO nog niet concurreren met een gas, maar het verschil is niet heel groot meer.

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.

4.2.5 Samenvatting en conclusie

Qua kostenefficiëntie is er voor Heerhugowaard gekozen voor enkel opslag in Fm. Maassluis. De opslag in Fm. Oosterhout is enkel mogelijk met een hoog aantal doubletten. Dit is financieel niet aantrekkelijk. De geanalyseerde variant in de business case maakt gebruik van twee hete en vier lauwe bronnen met een maximum debiet van 150 m3/h. De warmtepomp waardeert de temperatuur op.

Om een projectrendement van 6% te behalen, dient de warmte bij de bovenstaande variant te worden verkocht voor een prijs van 14,7 €/GJ. Hierbij gaan we uit dat de opgeslagen warmte verkocht kan worden voor een prijs van -2 €/GJ. In vergelijking met een gasketel ligt deze prijs hoger dan de referentiewaarde van 12 €/GJ.

De gevoeligheidsanalyse wijst uit dat dit bedrag behaald kan worden als er een hogere prijs zou kunnen worden ontvangen voor de opgeslagen warmte. Bij een prijs van -6 €/GJ resulteert dit in een verkoopprijs van 10,5 €/GJ en bij een opslagprijs van -4,5 €/GJ resulteert dit in een verkoopprijs van 12 €/GJ. Dit terwijl het aantal doubletten gelijk blijft, twee hete en vier lauwe bronnen.

Kijkend naar het aantal bronnen, resulteert het aanpassen naar het minimum in een minder gewenst resultaat in vergelijking met de prijs voor de opslag van warmte. Als het aantal bronnen geminimaliseerd is naar één hete en één lauwe bron dan zal de prijs voor warmte nog steeds 12,4 €/GJ moeten zijn om het projectrendement van 6% te behalen.

HTO wordt voor HVC interessant wanneer de prijs voor warmte rond de 10 á 12 euro per GJ komt te liggen. In het kader van het leerproces om de piekvraag verder te verduurzamen zou dat best iets meer mogen zijn, mits het binnen de perken blijft. Ingeschat wordt dat er goede kansen liggen om rond de streefprijs voor warmte uit te komen door een combinatie van maatregelen, zoals het verder optimaliseren van het ontwerp, het gedeeltelijk verhogen van de NVOE-normen (minder bronnen), het opslaan van geothermische warmte in de nabije toekomst (deze heeft een hoger subsidiebedrag) en, indien mogelijk, gebruik te maken van een DEI investeringssubsidie.

4.3 CO₂-besparing

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

De CO₂-uitstoot wordt bepaald door twee termen: de uitstoot voor productie en transport van de opgeslagen warmte en de hulpenergie voor de levering van de HTO-warmte. 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 CO₂-uitstoot wordt gebruik gemaakt van een vaste uitstoot volgens NTA 8800 (0,34 kg/kWh).

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

Tabel 4-V Afleiding CO₂-uitstoot warmteopslag

		Variant 1
Jaar 30		
Opgeslagen warmte	[GJ _t]	83.000
Elektriciteitsverbruik warmteopslag ¹	[MWh _e]	500
Geleverde warmte	[GJ _t]	79.000
Elektriciteitsverbruik warmtelevering ²	[MWh _e]	3.600
CO ₂ -uitstoot opgeslagen warmte ³	[ton CO ₂]	100
CO ₂ -uitstoot elektriciteit ⁴	[ton CO ₂]	1.400
CO ₂ -uitstoot totaal	[ton CO ₂]	1.500
Specifieke CO ₂ -uitstoot	[kg CO ₂ /GJ _t]	18,8
Periode van 30 jaar		
Opgeslagen warmte	[GJ _t]	2.500.000
Elektriciteitsverbruik warmteopslag	[MWh _e]	14.000
Geleverde warmte	[GJ _t]	2.200.000
Elektriciteitsverbruik warmtelevering	[MWh _e]	100.000
CO ₂ -uitstoot opgeslagen warmte	[ton CO ₂]	2.000
CO ₂ -uitstoot elektriciteit	[ton CO ₂]	39.000
CO ₂ -uitstoot totaal	[ton CO ₂]	41.000
Specifieke CO ₂ -uitstoot	[kg CO ₂ /GJ _t]	19,1

1) Aangenomen COP van 50 voor de HTO

2) Gemiddelde COP systeem (HTO, WP, pompen) ingeschat op 6,0

3) CO₂-uitstoot warmte in de zomerperiode 1 kg/GJ_t (info HVC)

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

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

De uitstoot van 19,1 kg/GJ wordt sterk gedomineerd door de uitstoot t.g.v. het elektriciteitsverbruik voor de warmtepomp (15,7 kg/GJ) en circulatiepompen. Deze uitstoot is gebaseerd op de huidige energiemix en zal de komende decennia nog aanzienlijk dalen. De werkelijke uitstoot zal dus lager uitvallen dan deze 19,1 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

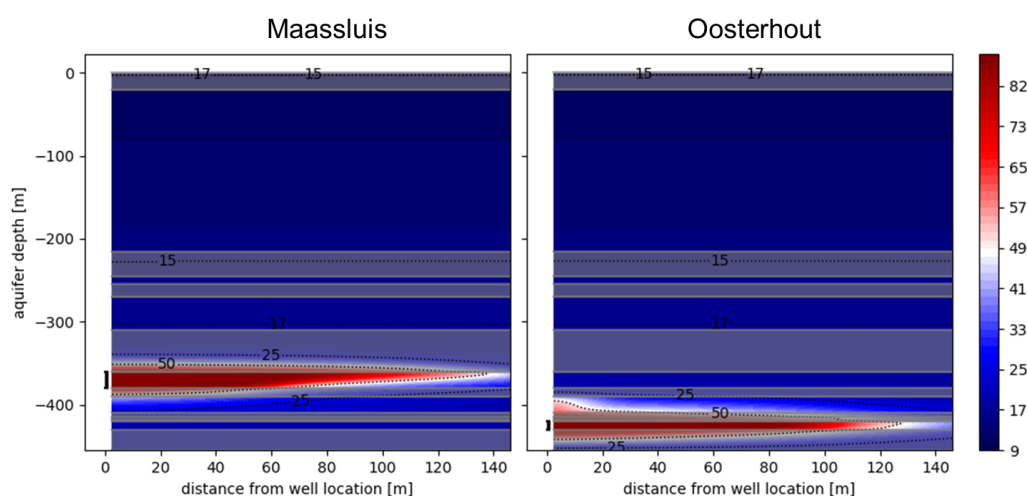
Op basis van deze kwalitatieve beschouwing kan geen belangrijk onderscheid gemaakt worden tussen de geselecteerde locaties wat betreft grondmechanische risico's. Na selectie van locaties voor verdere evaluatie dienen locatie specifieke berekeningen een inschatting geven van de verwachte effecten aan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

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

Vergelijking tussen de Formatie van Maassluis en de Formatie van Oosterhout

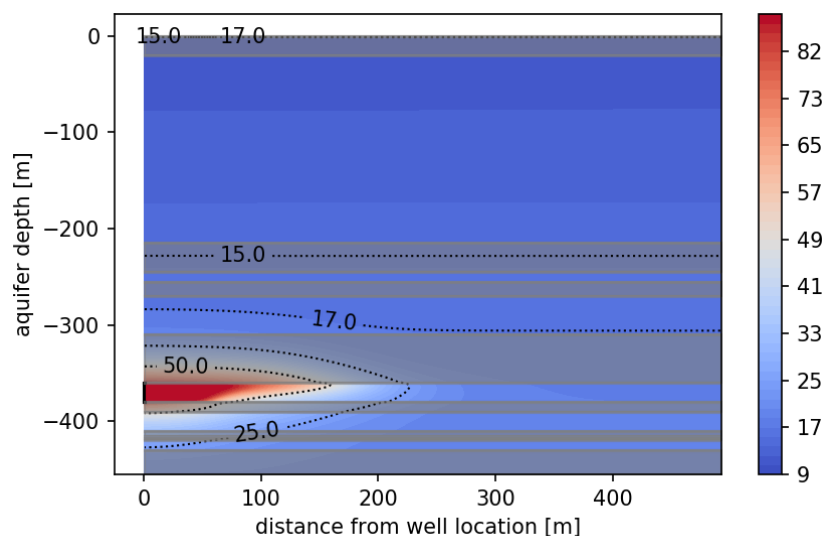
De thermische verspreiding bij opslag in de Formatie van Maassluis en de Formatie van Oosterhout is gepresenteerd in Figuur 5-1. De horizontale verspreiding van de warmte in beide formaties is vergelijkbaar. Boven de derde zandige eenheid van de Fm. van Maassluis (MSz3) bevindt zich op basis van de proefboring in Middenmeer een relatief dikke kleilaag, hierdoor is de verspreiding van warmte naar bovenliggende lagen klein. Echter is de dikte van deze kleilaag onzeker en zeer variabel (zie 2.1.4). Bij de tweede zandige eenheid van de Fm. van Oosterhout (OOz2) is de afsluitende laag relatief dun (schatting op basis van REGIS II v2.2, ~3 m). Hierdoor is er na 15 jaar al een duidelijke opwarming van de bovenliggende watervoerende laag zichtbaar. De verspreiding van de warmte in deze zandlaag gaat sneller dan in de afsluitende kleilaag.



Figuur 5-1 Zijaanzicht: thermische verspreiding van de hete bron berekend met het axisymmetrisch model na 15 jaar.

Maximale verspreiding warmte – 50 jaar | Maassluis

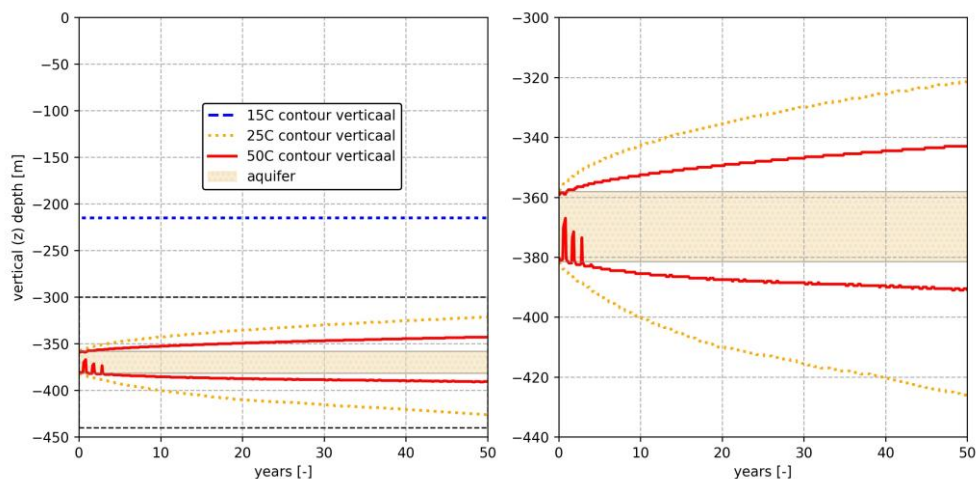
D.m.v. analyse van de simulaties is inzichtelijk gemaakt hoe de warmte zich verspreidt door de ondergrond gedurende 50 jaar (Figuur 5-2). Figuur 5-3 laat de maximale verspreiding in de verticale richting zien boven en onder het opslagpakket. De verspreiding van de warmte wordt beïnvloed door het specifieke materiaal waar de ondergrond uit bestaat. Warmte wordt sneller verspreid in zand dan in klei.



Figuur 5-2 Zijaanzicht: Invloed van de warmteopslag in Maassluis na 50 jaar. (let op; grotere x as lengte dan Figuur 5-1).

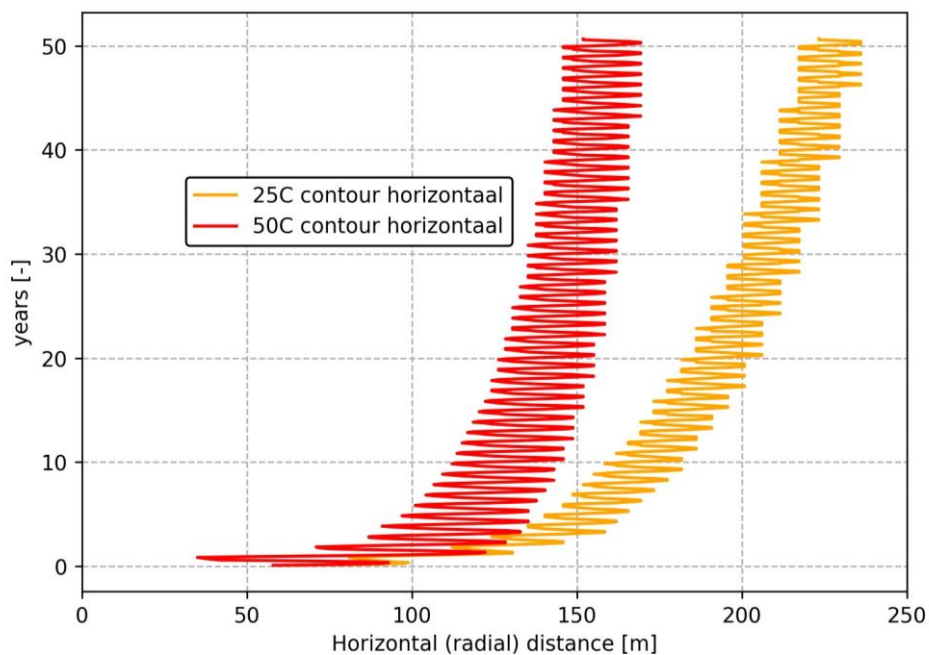
Boven de MSz3 is waarschijnlijk een voldoende dikke kleilaag aanwezig, dit zorgt ervoor dat de verspreiding van warmte richting bovenliggende lagen relatief langzaam gaat. De 25°C contour bevindt zich na 50 jaar op 37 meter boven de aquifer, de 50°C contour op 17 meter (beiden in de afsluitende kleilaag).

Onder de MSz3 vinden we al snel een zandige watervoerende laag, deze geleidt de warmte sneller dan een kleige laag. Dit is te zien in de relatief snelle uitbreiding van de 25 °C richting onderliggende lagen (45 meter onder aquifer na 50 jaar).



Figuur 5-3 Maximale verticale verspreiding van warmte door de ondergrond voor 50 jaar. Links: totale diepte, rechts: zoom-in formatie van Maassluis. Axisymmetrisch model.

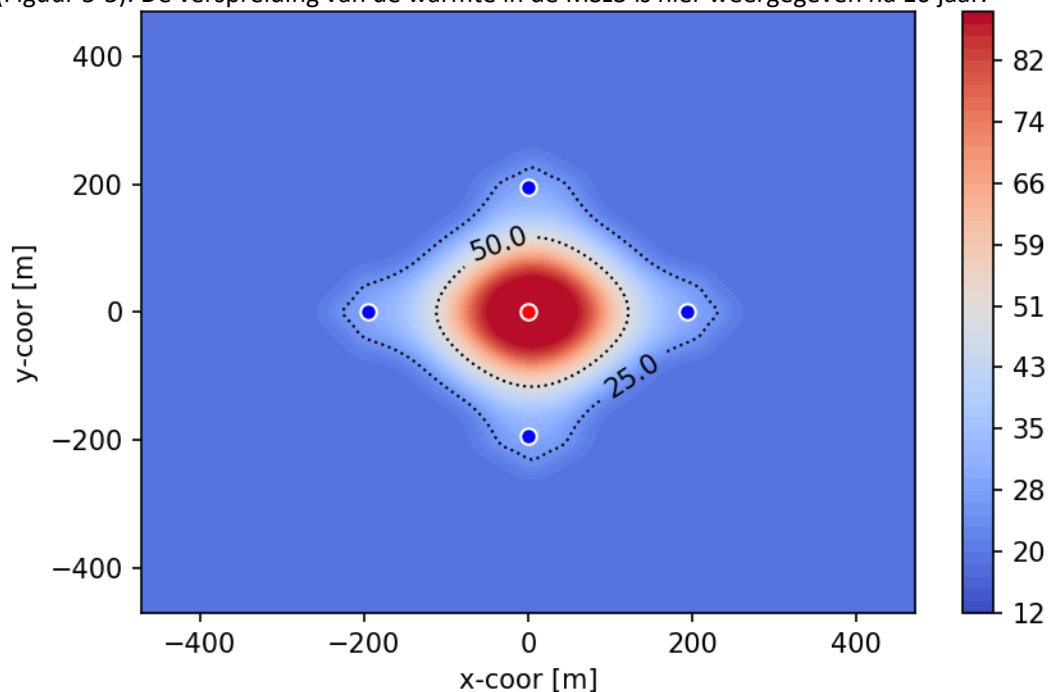
Voor de horizontale verspreiding van de warmte in de MSz3 is een vergelijkbare analyse gedaan, Figuur 5-4. De horizontale verspreiding van de warmte is het grootste in de watervoerende laag zelf (zie Figuur 5-1). De maximale thermische straal (T_{inj}) die tijdens injectie ontstaat rondom de hete bron is in de basis al 98m (R_{th} , Tabel 3-IX). Naarmate de tijd verstrijkt verspreidt de warmte zich verder in de watervoerende laag door middel van warmte geleiding en convectie. De verspreiding van de 50°C contour groeit langzaam tot ~160m na 50 jaar. De 25°C contour bevindt zich na 50 jaar op ongeveer 225m vanaf de bron. De invloed van het seizoenale pompregime is nog steeds goed zichtbaar na 50 jaar op relatief grote afstand van de bron.



Figuur 5-4 Maximale verspreiding warmte in horizontale (radiale) richting van de warmteopslag (axisymmetrisch model) in de Maassluis formatie. Axisymmetrisch model.

3D simulatie 10 jaar | Maassluis

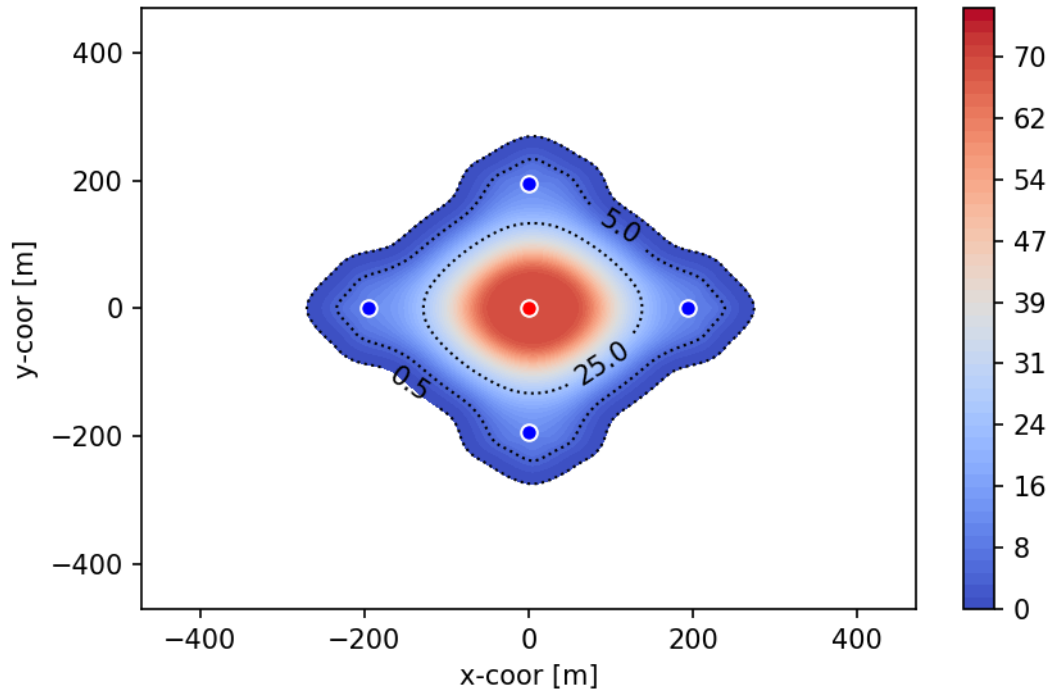
De warmteopslag in de MSz3 heeft 4 warme bronnen gesitueerd op een afstand van $2 \cdot R_{th} \sim 200m$ (Figuur 5-5). De verspreiding van de warmte in de MSz3 is hier weergegeven na 10 jaar.



Figuur 5-5 Boven aanzicht: thermische verspreiding van de warmteopslag na 10 jaar in het midden van de MSz3. In het midden de hete bron met daaromheen de 2 warme bronnen.

Een vergelijkbaar figuur is gepresenteerd in Figuur 5-6, echter, hier is het absolute temperatuur verschil weergegeven dat is ontstaan door de warmteopslag ($T_{natuurlijk} - T_{warmteopslag}$) tot een

opwarming van 0,5 °C. In dit figuur is de daadwerkelijke invloed van de warmteopslag duidelijk te zien. De natuurlijke temperatuur is op deze diepte ongeveer 18,5°C. De opwarming naar buiten toe is het grootst op de plekken waar ook een warme bron is gesitueerd, de horizontale opwarming kan daarom nooit groter zijn dan de temperatuur van de warme bron.



Figuur 5-6 Boven-aanzicht: absolute temperatuurverandering in ondergrond door warmteopslag na 10 jaar in het midden van de MSz3 ($T_{\text{natuurlijk}} - T_{\text{warmteopslag}}$).

5.3 Reflectie op mogelijke verandering grondwaterkwaliteit door thermische 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 huidig 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 Oosterhout bij Heerhugowaard, de Maassluis bij Leeuwarden, en de Oosterhout bij Rotterdam is bijvoorbeeld geen data. Daarnaast is de data bij Rotterdam voor de Maassluis wel uit de zelfde formatie, maar zo'n 100 m minder diep gelegen dan de laag die verkend wordt voor HTO.

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

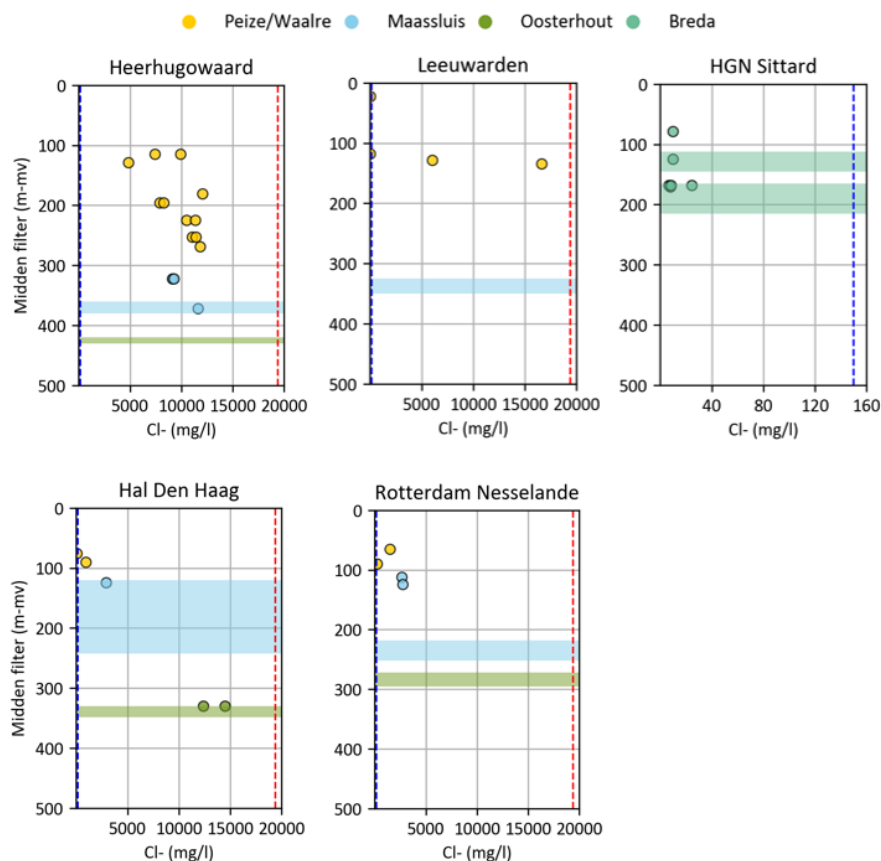
Locatie	Formatie	Aantal monsters	As (ug/l)	Ca (mg/l)	Cl- (mg/l)	Fe (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Mn (mg/l)	NH ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	Na (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	T-PO ₄ (mg/l)	pH (-)
Heerhugowaard	Maassluis	3		340	10018	5.4	353	116	642	0.8	43	0	5521	496	17	0.1	7.8
Heerhugowaard	Oosterhout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

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

5.3.1 Algemene interpretatie en risico op vermenging van watertypen

Een van de grondwaterkwaliteitsaspecten waarop de toepassing van HTO in een bepaalde laag beschouwd kan worden is het zoutgehalte van het grondwater, omdat dat mede de geschiktheid bepaald voor waterproductie. Alleen voor de locatie in Sittard bevindt zich zoet water in de voor HTO verkende lagen, met een gemiddeld chloride gehalte van slechts 11 mg/l. Op deze locatie wordt de samenstelling van de in het grondwater opgeloste ionen dus grotendeels bepaald door de concentratie calcium en bicarbonaat (HCO₃). Op de andere locaties is het grondwater zout, met chloride gehalten die variëren van zoon 3.000 tot 13.500 mg/l (Tabel 5-I Tabel 5-II. Volledige waterkwaliteitsdataset gebruikt voor de voorverkenning **Error! Reference source not found.**). Hier wordt de samenstelling van het grondwater dus bepaald door met name de chloride en natrium concentraties.

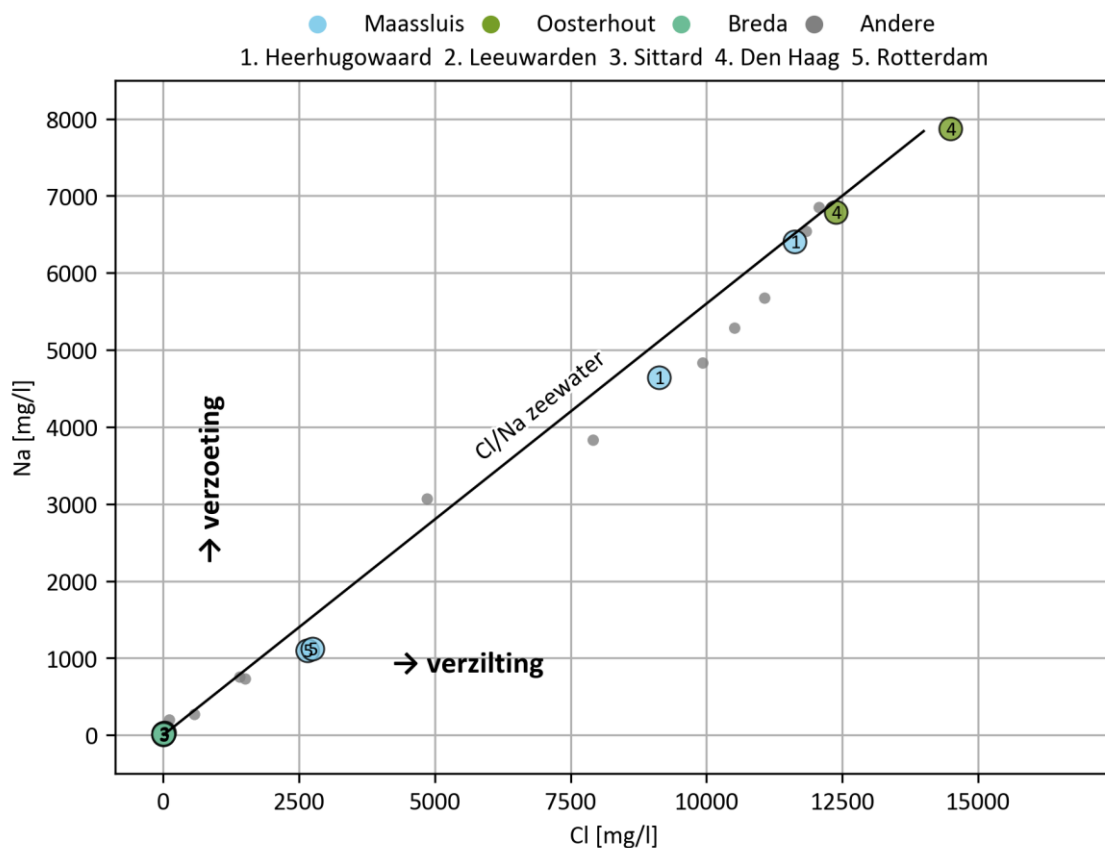
Voor zowel Leeuwarden en Rotterdam, waar geen data voor de beschouwde lagen beschikbaar is, is in Figuur 7 te zien dat de chloride gehalten in de monsters uit de meest diep gelegen filters hierboven wel 10 tot 100 keer hoger zijn dan zoet grondwater. In Leeuwarden nadert de waarneming van ~16.600 mg/l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



Figuur 7. Diepteprofiel van chlorideconcentraties op basis van alle beschikbare waterkwaliteitsdata (DINOLOKET) in nabijheid van de 5 pilot locaties. Doorzichtig ingekleurde zones geven de diepte en het deel van de betreffende formatie weer welke voor iedere locatie verkend worden. De verticale gestreepte lijnen geven de grens tussen zoet en brakwater weer (150 mg/l Cl) en brak en zoutwater (19.400 mg/l)

In Figuur 8. zijn de chloride en natrium gehalte in de watermonsters tegen elkaar uit gezet. Voor alle monsters geldt dat de Na/Cl verhouding rond die van zeewater ligt. Dit toont aan dat de grondwaters zoals verwacht uit verschillende verhoudingen tussen zeewater en zoet grondwater bestaan, maar bovenal geeft het enige mate van vertrouwen in de kwaliteit van de data, ondanks dat deze in sommige gevallen al bijna 100 jaar oud is (oudste monster is uit 1925, zie Tabel 5-II. Volledige waterkwaliteitsdataset gebruikt voor de voorverkenning).

Te zien is verder dat de monsters in de Formatie van Maassluis en Oosterhout enigszins afwijken van de op basis van menging met zeewater te verwachte lijn, met lagere Na/Cl ratio's. Dit is een indicator voor het optreden van verzilting van het grondwater: bij verdringing van zoet grondwater met zout water wisselt het in het zoute zeewater dominante kation natrium namelijk uit met het aan het sediment geadsorbeerde calcium. Voor de monsters waarvoor naast natrium concentraties ook magnesium en kalium data beschikbaar was is ook de Base Exchange Index (BEX) berekend (volgens Stuyfzand, 1993, zie Tabel 5-II. Volledige waterkwaliteitsdataset gebruikt voor de voorverkenning). 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 9. Chloride versus natrium concentraties. Grijze 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.

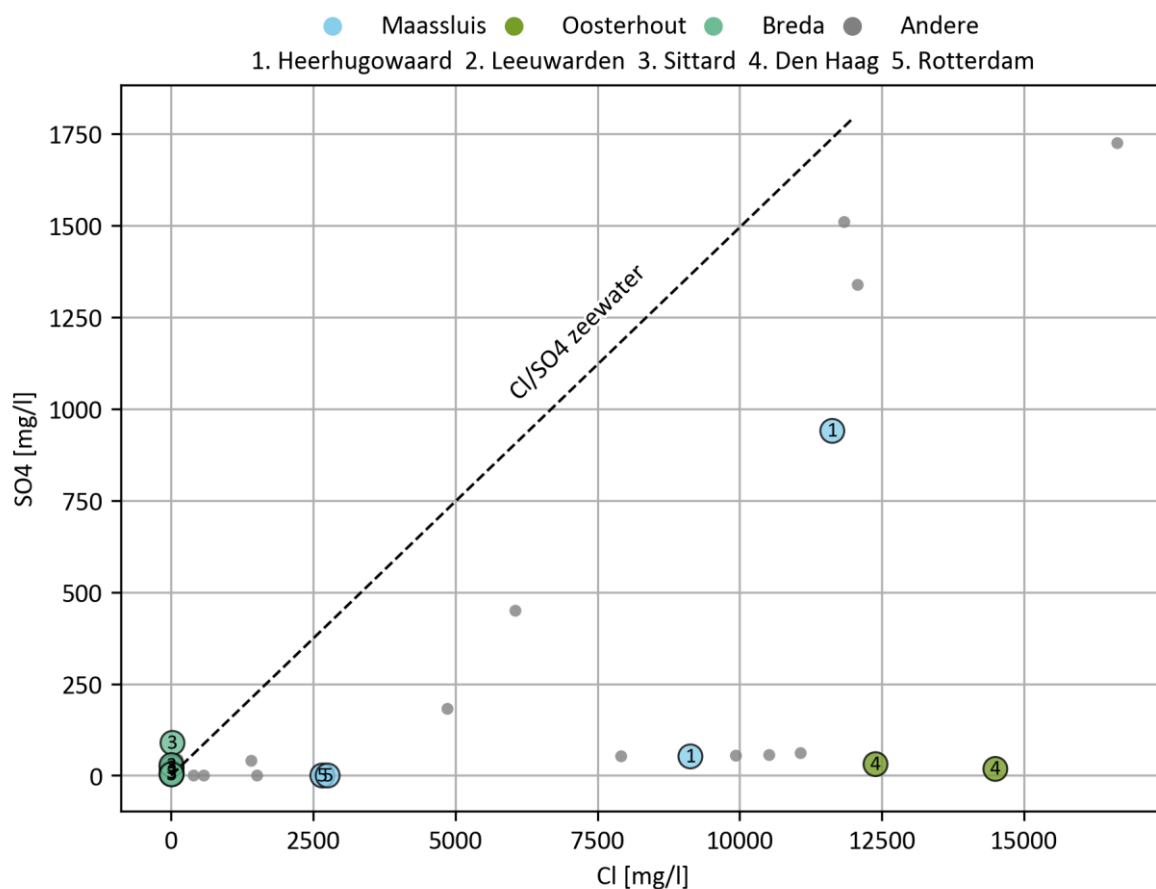
5.3.2 Verwachte invloed temperatuur op redox chemie en microbiologie

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-II. 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	B1180023	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	B1180023	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	B1180023	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	B1180023	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				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 oxisch of ijzerreducerend grondwater naar methanogeen bij zo'n 25°C en naar sulfaatreducerend bij nog hogere temperaturen (Bonte et al., 2013; Jesužek et al., 2013). De data van de locaties laat zien dat er weinig of geen sulfaat in het grondwater aanwezig is in de voor HTO beschouwde lagen, met SO₄/Cl verhoudingen ver onder dat van zeewater (Figuur 10. Chloride versus sulfaat concentraties. Grijs punten zijn monsters uit de verzamelde putten maar uit bovenliggende formaties. Gestreepte lijn geeft de chloride/sulfaat verhouding in zeewater weer.). Dit toont aan dat het natuurlijke milieu dus waarschijnlijk al sulfaat reducerend is, of dat het aanwezige sulfaat reeds is weg gereduceerd. Bij toepassing van HTO mag dus worden verwacht het nog aanwezige sulfaat relatief snel weg reduceert. Bij sulfaat reductie komt H₂S vrij, wat niet wenselijk is vanwege corrosieve en verstoppingsreacties, bijvoorbeeld door neerslag met ijzer en het vormen van pyriet. Tegelijk kunnen bij deze neerslag sporenelementen als arseen worden opgenomen, waardoor eventuele mobilisatie hiervan beperkt kan blijven (Van Breukelen & Bonte, 2016).



Figuur 10. 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.

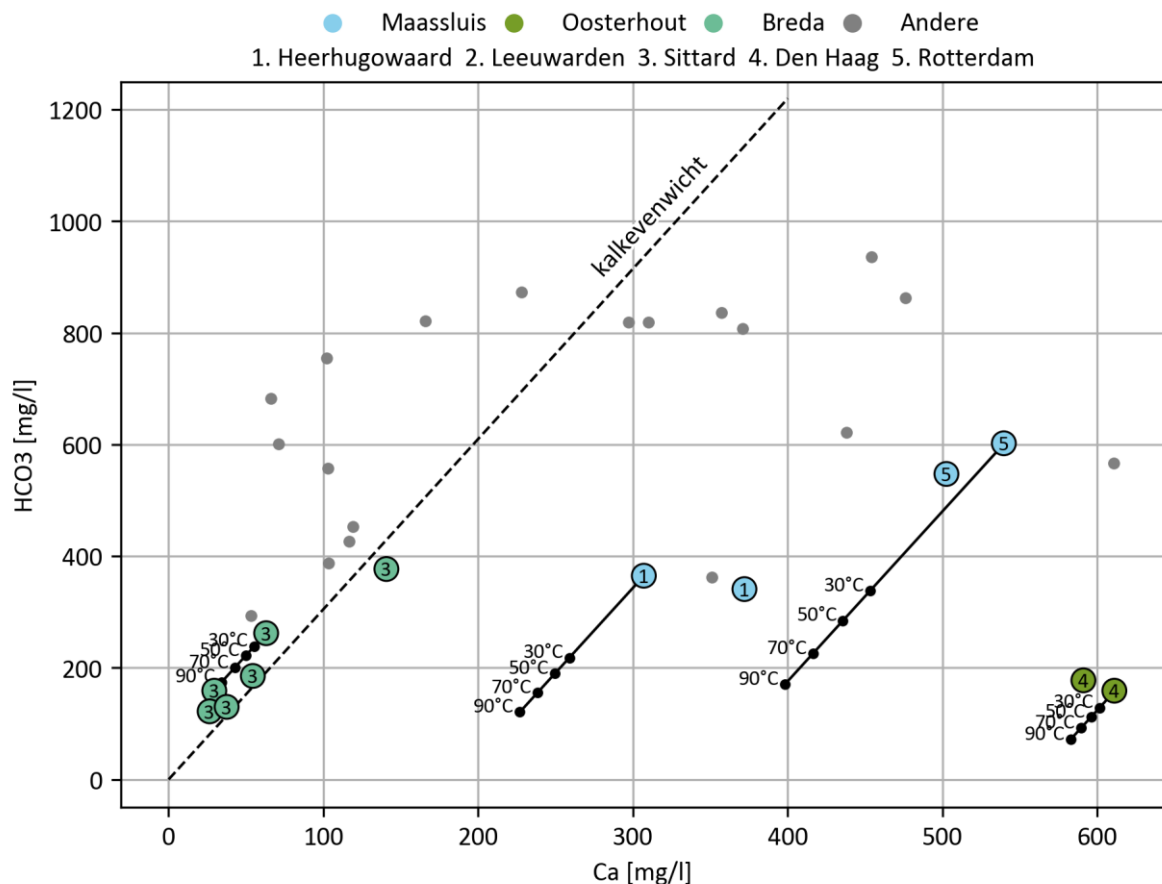
5.3.3 Verwachte invloed op kalkchemie en carbonaatneerslag

In Figuur 11. Calcium en bicarbonaat concentraties in grondwatermonsters. Gestreepte zwarte lijn geeft de theoretische Ca/HCO_3 verhouding weer bij kalkevenwicht, puur als functie van CO_2 spanning. De vier doorgetrokken zwarte lijnen geven de met PHREEQC berekende verschuiving weer in de concentraties als gevolg van een temperatuurstijging in 4 stappen naar 90°C , berekend voor de pH, Ca, en HCO_3 van één grondwatermonster uit elk van de 4 'clusters' aan datapunten in de figuur. Zie de Appendix bij dit hoofdstuk voor de exacte chemische samenstelling van deze monsters. zijn de concentraties aan calcium en bicarbonaat (HCO_3) weergegeven. Voor de Formatie van Breda in Sittard is te zien dat de verhouding tussen deze twee goed te verklaren valt door kalkevenwicht puur op basis van de CO_2 spanning. Voor de andere locaties geldt dat de calcium concentraties verhoogd zijn – wat goed te verklaren valt door de waargenomen verzilting, waarbij Ca vrijkomt en de Ca/HCO_3 verhouding verschuift.

Een belangrijk risico bij HTO is dat de temperatuurverhoging neerslag van kalk veroorzaakt, met putverstopping tot gevolg. Om het risico hierop ondanks de beperkte databeschikbaarheid enigszins in te schatten is met behulp van het geochemisch modelleer programma PHREEQC voor de combinatie pH, Ca en HCO_3 van vier representatieve grondwatermonsters berekend wat het effect zou zijn een verhoging van temperatuur van 15 graden naar achtereenvolgens 30, 50, 70 en 90°C (Figuur 11. Calcium en bicarbonaat concentraties in grondwatermonsters. Gestreepte zwarte lijn geeft de theoretische Ca/HCO_3 verhouding weer bij kalkevenwicht, puur als functie van CO_2 spanning. De vier doorgetrokken zwarte lijnen geven de met PHREEQC berekende verschuiving weer in de concentraties als gevolg van een temperatuurstijging in 4 stappen naar 90°C , berekend

voor de pH, Ca, en HCO_3 van één grondwatermonster uit elk van de 4 'clusters' aan datapunten in de figuur. Zie de Appendix bij dit hoofdstuk voor de exacte chemische samenstelling van deze monsters.). De berekeningen laten best grote verschillen in potentiële neerslag zien, zoals geïllustreerd wordt door de mate waarin Ca en HCO_3 concentraties afnemen. Vooral voor de omstandigheden in de Formatie van Maassluis bij zowel Heerhugowaard als in Rotterdam is een aanzienlijke verlaging ten gevolge van kalkneerslag te zien.

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



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

5.3.4 Conclusies

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

verwachten temperatuur effecten ook (experimentele) karakterisatie van het sediment uit die lagen nodig.

Wel lijkt dat het risico op verzilting door vermenging over een chloride gradiënt verwaarloosbaar is, omdat de beoogde formaties zich in een dieptetraject vinden waar het grondwater ofwel volledig zout is of volledig zoet. Voor de locatie in Sittard is er een indicatie dat vermenging over een redox gradiënt een mogelijk risico op verstopping zou kunnen zijn, al is niet zeker of de aanwezigheid van nitraat hier berust op een meetfout of dat het echt zo is. Evenwel is het gebrek van data voor andere locaties natuurlijk geen indicatie dat daar geen redoxvermenging op kan treden.

Middels PHREEQC berekeningen is inzicht verkregen in de potentie tot carbonaatneerslag door verschuiving van het kalkevenwicht. De neerslagpotentie lijkt op basis van de beschikbare data het hoogst in de Formatie van Maassluis bij Rotterdam en Heerhugowaard. Bij een verdere beschouwing van verstoppingsrisico's zal dit risico verder geadresseerd moeten worden, samen met de noodzaak voor mitigerende maatregelen, zoals zoutzuur of CO₂ dosering.

5.4 Juridisch raamwerk

5.4.1 Wettelijk kader

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

Waterwet

WKO en HTO vallen onder de term 'open bodemenergiesystemen': systemen waarbij koude of warmte aan de bodem wordt onttrokken en waarbij grondwater wordt verplaatst. Het onttrekken en infiltreren van grondwater ten behoeve van een bodemenergiesysteem is vergunning plichtig 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 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 het wijzigingsbesluit niet beschreven en zal door het bevoegd gezag gedaan moeten worden (maatwerk).

5.4.2 BUM

Om de provincies te helpen bij de vergunningverlening rond open bodemsystemen is een zogenaamde BUM (Besluitvorming Uitvoerings Methode) ontwikkeld (SIKB, 2015). 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.

5.4.3 Vergunningsprocedure voor Heerhugowaard

HTO Heerhugowaard

Voor een HTO in Heerhugowaard dient een vergunning Waterwet aangevraagd te worden. Hiervoor dienen de effecten van het bodemenergiesysteem in een effectenstudie te worden gekwantificeerd. Het bevoegd gezag voor deze vergunning is de provincie Noord-Holland. Gedeputeerde Staten van de provincie Noord-Holland hebben de beoordeling van de Waterwet neergelegd bij de Omgevingsdienst Noordzeekanaalgebied. De proceduredtijd 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.

HTO Middenmeer

In 2018 is een vergunning Waterwet afgegeven voor een HTO-systeem in Middenmeer, in de Wieringermeerpolder. Deze vergunningsprocedure is tevens door de omgevingsdienst Noordzeekanaalgebied behandeld. Door dat traject heeft het bevoegd gezag ervaring opgedaan met het vergunnen van HTO-systemen en de afweging van specifieke overwegingen die daarbij een rol spelen binnen deze provincie. Naar verwachting is dit bevorderlijk voor de vergunningsprocedure, omdat het concept HTO bij de omgevingsdienst tot op zekere hoogte helder is.

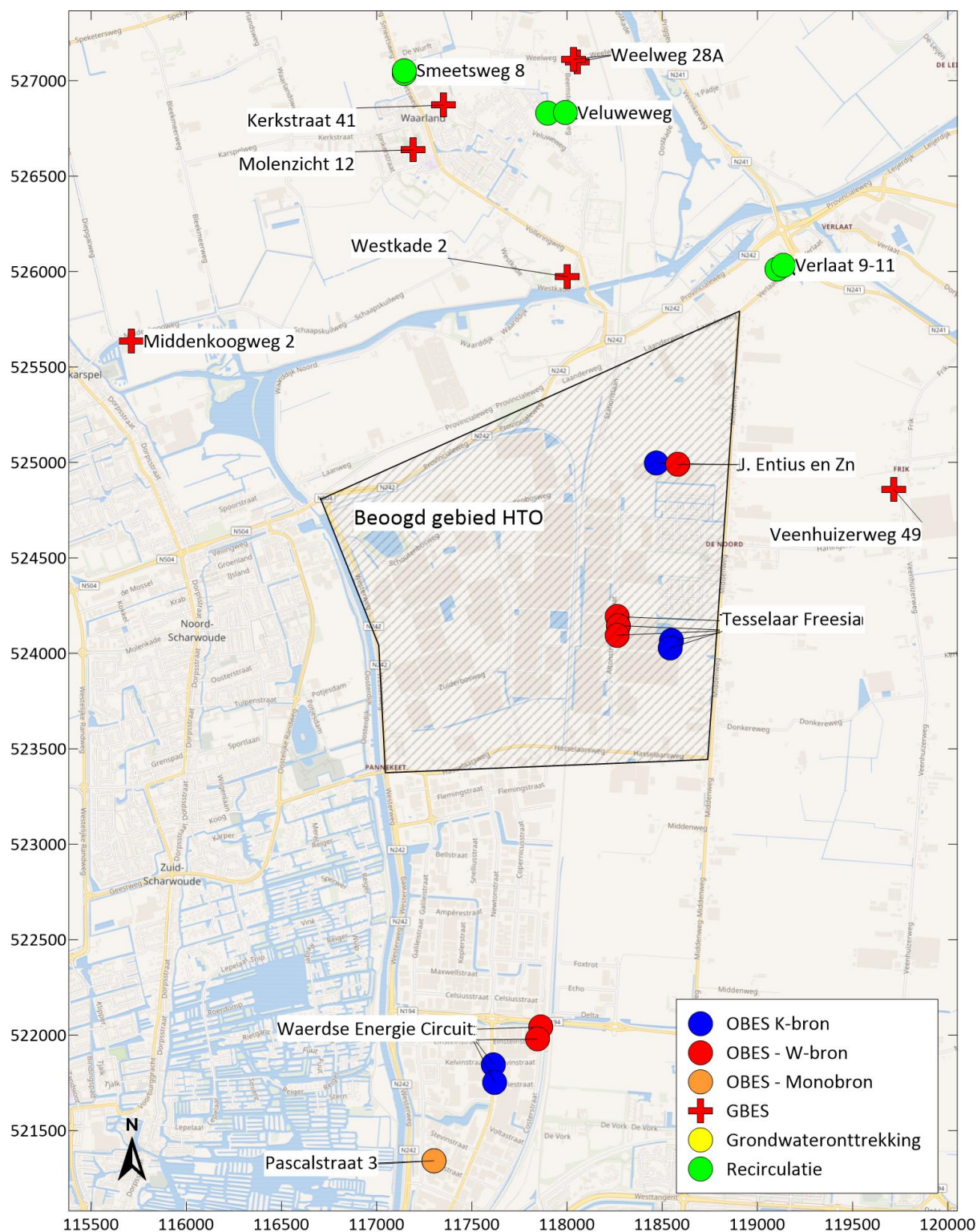
Vanwege de aanwezige ervaring omtrent HTO vergunningverlening bij bevoegd gezag, en de afwezigheid van nabijgelegen belangen in de (diepe) ondergrond, worden geen aanzienlijke drempels voor de juridische procedure (Waterwet) voorzien voor een HTO op deze locatie.

5.5 Omgevingsscan

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.

De aanwezige belangen nabij de projectlocatie zijn weergegeven in onderstaande Figuur 5-12. Voor dit project ligt de precieze bronlocatie nog niet vast, maar vermoedelijk worden de HTO-bronnen in het gearceerde gebied geplaatst. Er liggen een aantal WKO-systemen in het oosten van dit gebied. De systemen van 'J. Entius en Zn' en 'Tesselaar Freesia' zijn vergund op dieptes van respectievelijk 125 – 150 en 75 – 109 m-mv. Omdat de HTO aanzienlijk dieper beoogd wordt (vanaf 300 m-mv), hoeft de oostkant van het gearceerde gebied niet uitgesloten te worden voor HTO.



Figuur 5-12 Overzichtskartaal met bronlocaties nabijgelegen stakeholders van de ondergrond. Rijkdriehoekscoördinaten weergegeven in meters. OBES/GBES = Open/Gesloten BodemEnergieSystemen. De OBES in het oosten van het beoogde HTO-gebied liggen in een ondieper watervoerend pakket dan waar de HTO voorzien is.

Scan bovengrond

Technisch en financieel gezien heeft het de voorkeur de HTO dichtbij het transportnet te plaatsen. In onderstaande Figuur 5-13 is de omgeving weergegeven. Het gebied heeft veel tuinbouw en

weilanden. Er is voldoende open terrein beschikbaar om bronnen in te passen, maar hiervoor zullen wel afspraken gemaakt moeten worden met de grondeigenaar.



Figuur 5-13: Omgeving nabij het verdeelstation.

6 Risico inventarisatie en plan van aanpak vervolgstappen

6.1 Introductie

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

Risico's zijn onder te verdelen in:

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

Deze worden per categorie verder toegelicht in bijlage 5.

6.2 Inschatting relevantie van de projectrisico's

Een inschatting van de belangrijkste projectrisico's is weergegeven in Tabel 6-I. Hieruit komt naar voren welke risico's als belangrijkste projectrisico's worden gezien. De kans en het gevolg van project specifieke 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-I Overzicht projectrisico's (kans en gevolg relatief ingeschat t.o.v. andere verkenningen)

Algemene risico omschrijving				Locatie specifieke beoordeling (relatief t.o.v. andere verkenningen)		
Nr.	Risico	Gevolg	Beheersmaatregel	Kans	Gevolg	Opmerkingen
	Business case (commercieel/economisch)					
1	Hogere investeringskosten door marktdruk boorbedrijven	Hogere CAPEX	Aanbesteding tijdens crisis Voldoende ruimte inbouwen in planning om te kunnen boren op gunstig moment.	Groot	Gemiddeld	Kans hang af van de diepte van de bronnen. Hoe dieper de bronnen, hoe minder partijen in de markt in staat zijn dit technisch te boren. Gevolg op CAPEX van de bronnen.
2	Hogere investeringskosten of operationele kosten vanwege onvoldoende bewezen techniek	Hogere CAPEX/OPEX	Zoveel mogelijk aanhaken bij onderzoeksprojecten waarbij subsidie/leergeld beschikbaar is.	Groot	Groot	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.
3	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	Gemiddeld	Kans bepaald op basis van huidige aanbod en gewenste aanbod in eindsituatie. Gevolg afhankelijk van opslagvolume Kleiner opslagvolumes reageren gevoeliger dan grotere opslagvolumes.
4	Warmteafzet/ontwikkeling warmtenet blijft achter/ zachte winters	Lagere opbrengsten dan verwacht.	Robuuste operationele strategie voor verschillende stookseizoenen opstellen. Gefaseerd aanleggen bronnen Monitoren performance HTO	Gemiddeld	Gemiddeld	Kans bepaald op basis van huidige vraag en gewenste vraag in eindsituatie. Gevolg afhankelijk van opslagvolume Kleiner opslagvolumes reageren gevoeliger dan grotere opslagvolumes.
5	Warmteverlies in de ondergrond groter dan verwacht, opslagrendement lager dan verwacht.	Lager vermogen en temperatuurniveau aan het einde van het stookseizoen Lagere inkomsten en/of hogere operationele kosten Grotere thermische effecten (en daaraan gekoppelde	Proefboring om met grotere zekerheid de opbouw en eigenschappen van de ondergrond te bepalen Optimalisatie van het ontwerp om het opslagrendement te maximaliseren (b.v. verlagen afkaptemperatuur of aanpassen putconfiguratie)	Gemiddeld	Gemiddeld	In sterke samenhang met onzekerheid van de ondergrond. Ook bovengrondse inpassing is van invloed (wanneer bronnen niet optimaal geplaatst kunnen worden grotere verliezen). Hier is dat risico laag. Geohydrologische parameters zijn momenteel 'worst-case' ingeschat qua thermische verliezen, aannemelijke kans dat thermisch

		effecten op de grondwaterkwaliteit)	Putafwerking met isolerend materiaal en/of dikkere omstorting			rendement in later stadium hoger kan uitvallen. In vervolg stadium een gedetailleerder ontwerp maken.
6	Te hoge retourtemperatuur vanuit warmtenet	Bijdrage directe warmtelevering kleiner, lagere inkomsten	Afnemers stimuleren tot lagere retourtemperaturen Voldoende aandacht bij ontwerp/uitrol warmtenet Duurdere warmtepomp installeren. Hogere temperatuur lauwe bron toelaten	Klein	Gemiddeld	Retourtemperatuur is conservatief ingeschat. HVC kan tuinders in de omgeving nog contractueel houden aan lagere retourtemperaturen (37 °C in het warmtenet).
7	Bij toepassing warmtepomp: Aanvoertemperatuur in warmtenet hoger dan beoogd	Slechtere COP warmtepomp of naverwarming vanuit warmtenet of piekvoorziening noodzakelijk. Hogere opex.	Voldoende aandacht bij ontwerp/uitrol warmtenet Duurdere warmtepomp dimensioneren	Klein	Gemiddeld	Aanvoertemperatuur is conservatief ingeschat.
Juridische haalbaarheid en draagvlak						
8	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 beperkte impact op omgevingsbelangen en de bestaande ervaring van het bevoegd gezag met vergunningverlening voor HTO. Er is voldoende horizontale en verticale afstand tot andere grondwatersystemen. Wanneer vergunning niet verleend is heeft dat grote gevolgen, want zonder vergunning geen warmteopslag.
9	Maatschappelijk draagvlak ontbreekt	Vergunning wordt niet (tijdig) verleend	Voldoende tijdige communicatie richting stakeholders	Klein	Gemiddeld – groot (generiek)	Kans ingeschat n.a.v. gevoerde gesprekken consortiumleden en op basis van stedelijkheid omgeving.
Technisch en geohydrologisch						
10	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)	Gemiddeld	Gemiddeld	Er zijn geen diepe boringen in de nabije omgeving van de HTO locatie (dichtstbijzijnde op 10 km afstand). Op basis van de algemene hydrogeologische opbouw in de omgeving worden wel geschikte lagen aanwezig geschat, maar de diepte, dikte, kh-waarde van zand- en kleilagen zijn onzeker.

			Bij geringe dikte opslagpakket, opslag in meerdere lagen, indien mogelijk (voorbeeld concept ECW)			
11	Verstopping van warmtewisselaar en bronnen door o.a. scaling	Daling vermogen door lager debiet en slechtere warmteoverdracht. Hogere operationele kosten	Proefboring om geo-chemische eigenschappen van grondwater en doelpakket te analyseren en ontwerp daarop afstemmen (materialen en waterbehandeling) Gebruik waterbehandeling aanpassen Systeem reinigen gedurende operatie	Gemiddeld	Gemiddeld	De locatie-specifieke geochemische eigenschappen zijn in dit stadium nog niet goed genoeg in te schatten doordat er onvoldoende grondwaterkwaliteit/bodem data beschikbaar is. De proefboring biedt de mogelijkheid voor evaluatie van dit risico.
12	Storing(en) hoge temperatuur warmtepomp	Hoger stroomverbruik Hogere kosten onderhoud Gewenste temperatuur wordt niet gehaald	Ontwerpen op zo laag mogelijke temperatuur	Gemiddeld	Groot	Kans bepaald op basis van condensortemperatuur warmtepomp. Gevolg ingeschat op basis van omvang warmtepomp.
Milieu en veiligheid						
13	Onvoorziene impact op andere belangen	Vergunning wordt ingetrokken tijdens looptijd	-Zorgvuldige effectbeoordeling in ontwerpfase - Proefboring voor zekerheid bodemopbouw	Klein	Groot	Kans wordt bepaald door aanwezige omgevingsbelangen in ondergrond. Bij HTO verdienen temperatuur-gerelateerde processen en effecten daarvan op omgevingsbelangen extra aandacht. Meer inzicht in de eigenschappen van de ondergrond (proefboring) draagt bij aan een meer nauwkeurige inschatting van de impact op omgevingsbelangen.
14	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.
15	Verstoring bodemmilieu en integriteit in bovenliggende pakketten	Mogelijke operationele consequenties: verlagen debiet, verlagen temperatuur	Risicomanagement Systeem Monitoringsprogramma BRL gecertificeerde partijen	Gemiddeld - 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						
16	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.
17	Inpassing ruimtebeslag lastig door grote aantal bronnen	Vertraging bij vindengeschikte bron-locaties, mogelijk verder weg. Tijdvertraging en kostenverhogend. Geen geschikte locatie kunnen vinden. Stop zetten project.	Aantal bronnen minimaliseren door goed ruimte verhogen NVOE-normen te onderzoeken. Tijdig grondpositie nemen of in overleg gaan met grondeigenaren/gemeente	Gemiddeld	Groot	Kans ingeschat op basis van benodigd aantal bronnen in relatie tot stedelijkheid. Scores relatief t.o.v. ander verkenningen.

6.3 Plan van aanpak voor het vervolg

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

- **Go/No Go:** besluit, door de relevante stakeholders, op basis van resultaten WINDOW Fase 1 om al dan niet verder te gaan met de ontwikkeling van HTO. Welke projecten doorgaan in WINDOW fase 2 onder het programma WarmingUP wordt door het consortium als geheel bepaald, waarbij het schrijfteam in overleg met de adviescommissie een voorstel voorbereidt. 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 mer-beoordelingsnotitie worden opgesteld en afgestemd met het bevoegd gezag. De operator/opdrachtgever dient zelf de vergunning aan te vragen. Om de totale doorlooptijd zo kort mogelijk te houden, kan deze stap parallel worden uitgevoerd met de proefboring en het voorontwerp. In dat geval worden de voorbereidende studies gebaseerd op een zo goed mogelijke inschatting van de omvang van het beoogde HTO-systeem. Mogelijk moet na het definitief ontwerp een wijziging worden ingediend.
- Proefboring
Een proefboring geeft wezenlijk inzicht in de lokale bodemopbouw en haalbare debiet. De proefboring zal na afloop worden omgebouwd tot monitoringsput. De volgende stappen worden uitgevoerd:
 - Locatie bepaling
 - Ontwerp en aanbesteding proefboring
 - Realisatie proefboring
 - Uitvoeren van boorgatmetingen, grondmechanische testen en grondwater-, gas en bodemanalyse.
 - Uitvoeren van onttrekkingstesten en bepalen van het doorlaatvermogen.
Aangeraden wordt om ook onttrekkingstesten uit te voeren die de huidige NVOE-norm overschrijden om zodoende te bepalen of en op welk moment zandlevering optreedt.
- **Go/No Go:** Het schrijfteam 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 Conclusies

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.

- Op basis van de algemene hydrogeologische opbouw in de omgeving worden geschikte lagen aanwezig geschat in de Formatie van Maasluis en evt. Oosterhout. De diepte, dikte, kh-waarde van zand- en kleilagen zijn onzeker door het geringe aantal diepe boringen in de omgeving. Een proefboring wordt aangeraden. De onzekerheid van de ondergrond is hier dus gemiddeld (t.o.v. andere locaties), de onzekerheid van de ondergrond kan een negatief effect hebben op het rendement dat behaald kan worden met de HTO.
- De wijze van inpassing van de HTO die wordt voorzien is een koppeling aan het transportnet, gescheiden door een warmtewisselaar. HTO wordt in de zomer geladen via het transportnet op een temperatuur van 88°C met warmte uit de biomassacentrale. Hierdoor kan de biomassacentrale ook in de zomer optimaal draaien.
- Om warmte in de winter te leveren aan het transportnet is een hoge temperatuur warmtepomp nodig om de warmte uit de HTO op te waarden naar de gewenste temperatuur (95°C).
- De kostprijs van geleverde warmte uit de HTO is ingeschat op 14,7€/GJ. Dit is hoger dan wanneer dezelfde warmte met een gasketel zou worden geleverd (10 – 12 €/GJ).
- Het systeemrendement van de HTO na 10 jaar is ingeschat op 73% en na 50 jaar op 81%.
- Warmte geleverd door de HTO i.c.m. een warmtepomp reduceert de CO₂ uitstoot met circa 70% ten opzichte van warmte geleverd door een gasketel.
- Er liggen goede kansen om rond de streefprijs voor warmte uit te komen door een combinatie van maatregelen, zoals het verder optimaliseren van het ontwerp, het gedeeltelijk verhogen van de NVOE-normen (minder bronnen), het opslaan van geothermische warmte in de nabije toekomst (deze heeft een hoger subsidiebedrag) en, indien mogelijk, gebruik te maken van een DEI investeringssubsidie.
- Geadviseerd wordt om een proefboring uit te voeren. De kosten hiervoor zijn ingeschat op € 250.000,-. Dit is € 70.000,- 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:
 - De HTO heeft een grote omvang. Dit is gunstig voor de uiteindelijke prijs voor warmte, maar ook zal de prijs minder gevoelig reageren op eventuele wijzigingen in omvang. Dit zorgt ook voor een laag risico voor tegenvallend thermisch rendement.
 - Zowel het aanbod aan warmte, als een groot deel van de vraag is reeds gerealiseerd. Hierdoor is de kans groot dat de beoogde eindsituatie haalbaar is.
 - Het beoogde gebied heeft een relatief lage stedelijkheid, wat gunstig is voor de inpassing.
 - De juridische haalbaarheid wordt positief ingeschat. Dit heeft enerzijds te maken met de kennis en ervaring die bij de provincie Noord-Holland aanwezig is op het gebied van vergunningverlening voor HTO (vanwege het HTO-project in

Middenmeer), en anderzijds met het feit dat er geen negatieve beïnvloeding van omgevingsbelangen in de ondergrond wordt verwacht. Ook is er bovengronds veel ruimte (weilanden).

- 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 volgende punten hebben een hoger risicoprofiel dan gemiddeld:

- De temperatuur van de beoogde warmtepomp is met 95°C hoger dan gemiddeld. Dit kan leiden tot hogere kosten door hoger elektriciteitsgebruik en onderhoudskosten. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat met de 95°C qua temperatuur gekozen is voor een robuuste inpassing. Deze zou bij een optimalisatie nog naar beneden bijgesteld kunnen worden.
- De bronnen liggen diep, waardoor de kosten voor de realisatie van de bronnen gevoeliger zijn voor marktwerking.
- De ontwikkeling van de geothermiebron duurt nog enkele jaren.
- De diepte van en het aantal bronnen geven een groter risico op verstoring van het bodemmilieu in de bovenliggende pakketten door zowel uitstraling van warmte vanuit de put als door de kans op lekkage.
- Het risico op scaling (verstopping van de bronnen en/of de warmtewisselaar door inorganische 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 inorganische componenten.
- De proefboring biedt de mogelijkheid om de condities in de aquifer te analyseren, het risico op verstopping te evalueren en het design van het HTO op af te stemmen (bijvoorbeeld door waterbehandeling toe te passen om kalkneerslag te beperken/voorkomen en een monitoringsysteem te ontwerpen).
- De volgende analyses dienen te worden uitgevoerd: water compositie, gas compositie en partiele drukken en eventueel de mineralogische samenstelling van de aquifer.

Referenties

Brons, H. J., Griffioen, J., Appelo, C. A. J., & Zehnder, A. J. B. (1991). (Bio) geochemical reactions in aquifer material from a thermal energy storage site. *Water research*, 25(6), 729-736.

Ghabezloo S., Sulem J. (2010) Temperature induced pore fluid pressurization in geomaterials, Italian *Geotechnical Journal*, 1/2010, 29-43.

Roelofsen, F., & Goorden, N. (2008). Grondwatereffecten aan de oppervlakte (gebracht): Onderzoek naar effecten van stopzetting grondwaterontrekking DSM Delft-Technisch rapport.
<http://resolver.tudelft.nl/uuid:439d4a1d-74b2-4647-9d7e-65f4f51b88f7>

Van Dalen, W. (1984). Tijdelijke warmte-opslag in ondergrondse watervoerende lagen. Een beschrijving van de fysische principes. *Rijks Geologische Dienst*, OS 84-21.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Bijlagen

Bijlage I. Ontwerpnorm bronnen

NVOE norm WKO

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

Onttrekkingsnorm

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

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

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

infiltratienorm

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

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

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

De afleiding van deze ontwerpnorm is beschreven in IF Technology (2001). Als geen MFI bekend is kan voor energieopslag (waarbij grondwater wordt geïnfiltreerd, en geen oppervlaktewater) uitgegaan worden van een MFI van 2. In de meeste gevallen is de MFI van grondwater dat onttrokken wordt aan goed schoon gepompte bronnen lager dan 2. Incidenteel worden hogere MFI-waarden gemeten (3 tot 4). In dat geval zou iets vaker onderhoud plaats moeten vinden. Voorgesteld wordt om als standaard toegelaten verstoppingssnelheid een waarde van 0,1 m/jaar

aan te nemen. Indien gewenst kunnen hogere of lagere verstoppingssnelheden worden aangehouden, dit vertaalt zich dan in een infiltratiebron met een kleinere respectievelijk grotere diameter (als wordt uitgegaan van hetzelfde debiet en dezelfde filterlengte).

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

Kans voor ruimere normen

1. Hogere hydrologische conductiviteit

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

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

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

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

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

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

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

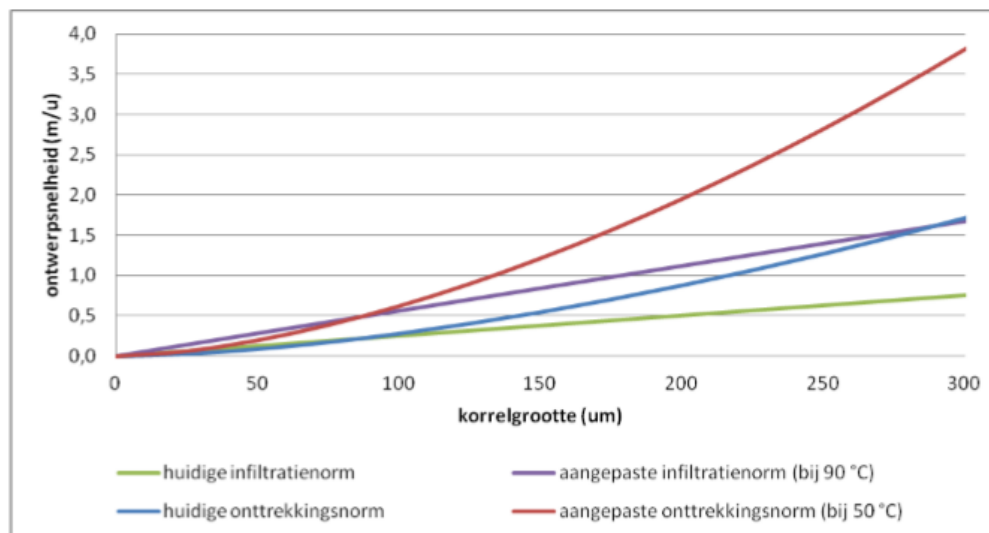
Als de invloed van de temperatuur op de doorlatendheid meegenomen wordt, ziet de infiltratienorm er als volgt uit (IF Technology, 2012):

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

v_{max}	=	ontwerpsnelheid op de boorgatwand bij infiltratie [m/uur]
ρ_f	=	dichtheid van de vloeistof [kg/m ³]
g	=	de valversnelling [9,8 m/s ²]
μ	=	dynamische viscositeit van de vloeistof [Pa*s]
K_i	=	de intrinsieke permeabiliteit [m ²]
v_v	=	specifieke verstoppingssnelheid [m/jaar]
MFI	=	MFI [s/l ²]
U_{eq}	=	aantal equivalente vollasturen per jaar [uur]

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

In onderstaande Figuur II-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 ontwerpsnelheid ruim twee keer zo groot mag zijn in vergelijking met de huidige ontwerpnormen.



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

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

Van enkele bronnen is bekend dat er zandlevering optreedt. De oorzaak van deze zandlevering hoeft niet direct te liggen bij het overschrijden van de ontwerpnormen. Mogelijke oorzaken kunnen ook zijn een verkeerde keuze van filtergrind en -spleten, grote variatie in korrelgrootte, filters in kalksteen en scheve debietverdeling over het filtertraject of een combinatie van deze oorzaken.

Een directe relatie tussen het overschrijden van de norm en zandlevering is (nog) niet gevonden (IF Technology en Universiteit Utrecht, 2012).

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

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

Praktijktesten ECW (Wieringermeer)

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

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

Door de relatief hoge stroomsnelheden in de directe omgeving van de onttrekkingsput worden deeltjes in de aquifer gemobiliseerd en meegevoerd met het grondwater dat in de richting van de put stroomt. Bij hoge stroomsnelheden (hoger dan waar tot op heden ervaring mee is bij open

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

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

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

Bijlage II. Brontechniek

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

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



Figuur II-1: Boorstelling zuigboren

De bronnen worden geboord met een diameter van 800 mm. De warme bronnen krijgen een GVK stijgbuis en RVS wikkeldraad filter; de temperatuur in de lauwe bronnen blijft onder de 60 °C vandaar dat stijgbuis en filter in PVC kunnen worden uitgevoerd. Hierbij moeten er beveiligingen worden ingebouwd om te voorkomen dat er ooit water van meer dan 60°C in de koude bronnen komt. De lauwe bronnen worden aan maaiveld afgewerkt met een half bovengrondse putbehuizing (2x2 m, zie Figuur II-2 **Error! Reference source not found.**). 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.

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 **Error! Reference source not found.**). 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-3 Afwerking bron met half-bovengrondse putbehuizing

Waterbehandeling

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

De sterke en zwakke punten en de kansen en bedreigingen van de verschillende technieken zijn opgesomd in Tabel II-0-I.

Tabel II-0-I Afweging waterbehandelingstechnieken

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

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

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

Transportleiding en technische ruimte

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

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

Bijlage III. Beschrijving numerieke model SEAWATv4

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

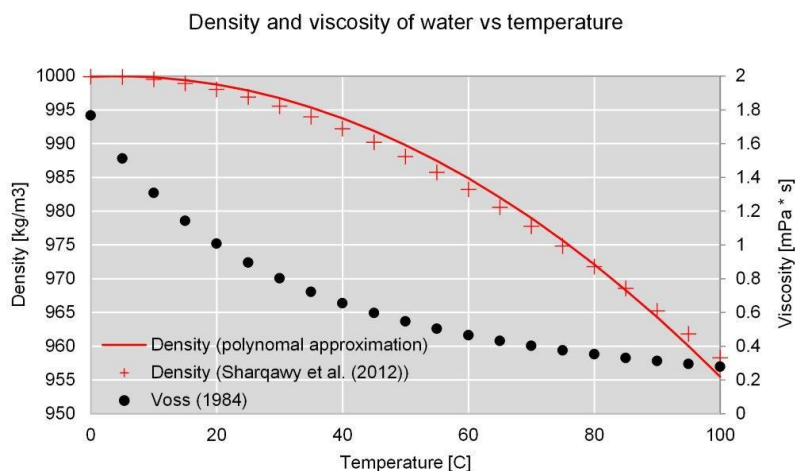
Viscositeit is berekend volgens is (Langevin, 2009):

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

De dichtheidsverandering van water bij oplopende temperaturen is berekend volgens:

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

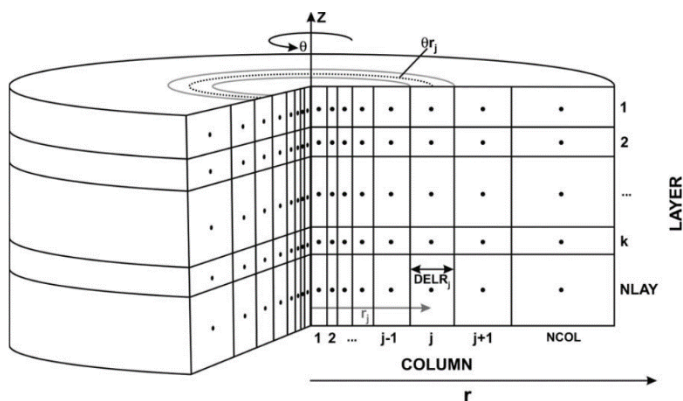
Dit is een benadering van de vergelijking opgesteld door Sharqawy et al. (2012) waarbij ook verschil in zoutconcentratie wordt meegenomen. Bij deze simulaties wordt er vanuit gegaan dat er geen water wordt gemengd van verschillende kwaliteiten (e.g. uit verschillende grondwaterpakketten). Daardoor is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



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

Axisymmetrisch model

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



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

Discretisatie en randvoorwaarden

Voor zowel het axisymmetrisch model als het 3D model is een vaste discretisatie gebruikt voor de simulaties, Tabel III.1 Discretisatie Axisymmetrische- en 3D-modellen Het grid bestaat rondom de putten uit cellen met dezelfde grootte (Min horizontaal), vanaf een bepaalde afstand (min afstand linear) vanaf de putten worden de cellen logaritmisch 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 -> logaritmisch)	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. We variëren hier alleen tussen zandig (aquifer) en kleiig materiaal (aquitard). De volgende aannames worden gedaan:

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

Tabel III-2: geohydrologische parameters SEAWATv4 model

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

* Dit is specifiek voor iedere laag in het model

Bijlage IV. Grond mechanische processen

Algemeen

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

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

Grond mechanische processen: invloed grondwaterstijghoogteverandering

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

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

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

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

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

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

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

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

Grond mechanische processen: invloed temperatuur

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

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

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

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

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

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

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

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

Samenvatting

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

Aanbeveling

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

Bijlage V. Generieke risico-inventarisatie voor HTO

Introductie

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

Risico's zijn onder te verdelen in:

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

Deze worden per categorie hieronder toegelicht.

Commerciële en economische risico's

De belangrijkste commerciële en economische projectrisico's zijn:

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

Ad A) Een van de belangrijkste risico 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 dicht bij elkaar plaatsen van de warme en koude bron. Hierdoor worden de drukken verder uitgevlakt. Te dicht bij elkaar plaatsen kan echter leiden tot thermische kortsluiting en verlaging van rendement.
- Het verlagen van het maximale debiet.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Milieu- en veiligheidsrisico's

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

De belangrijkste aandachtspunten in de vergunningverlening zijn:

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

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

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

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

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

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

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

Organisatorische risico's

A. Ontbreken of onvoldoende commitment stakeholders

B. Inpassing systeem lastig of niet mogelijk

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

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

**Eindredactie van dit
deelrapport door KWR**

Adres
Groningenhaven 7

Postadres
Postbus 1072
3430 BB Nieuwegein