

Warming^{UP}GOO

Geothermie & Opslag Opschaling

HTO verkenning Schiebroek

door

Rob Kleinlugtenbelt (IF), Stijn Beernink (KWR), Dorien Dinkelman (TNO), Gilian Schout (KWR)

Februari 2025

HTO verkenning Schiebroek



if

TNO

Deltares

KWR

Rob Kleinlugtenbelt (IF), Stijn Beernink (KWR), Dorien Dinkelman (TNO), Gilian Schout (KWR)
Februari 2025

Kwaliteitsborger(s)

Mariëlle Koenen (TNO), Ivo Pothof (Deltares), Niels Hartog (KWR)

De werkzaamheden voor dit rapport zijn uitgevoerd als onderdeel van het project WarmingUP Geothermie en Opslag Opschaling (Warming^{UP}GOO). Dit is mede mogelijk gemaakt door subsidie van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) in het kader van de subsidieregeling Missiegedreven Onderzoek, Ontwikkeling en Innovatie (MOOI), bij RVO bekend onder projectnummer MOOI322012. Warming^{UP}GOO geeft invulling aan MOOI-missie B *Gebouwde Omgeving* en levert een bijdrage aan innovatiethema *Duurzame collectieve warmtevoorziening*.

Projectnummer
PR09967

Keywords
Ondergrondse warmteopslag, HTO

Jaar van publicatie
2025

Meer informatie
Rob Kleinlugtenbelt
T +31 6 11 78 14 69
E r.kleinlugtenbelt@iftechnology.nl

02/2025 ©

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.

Managementsamenvatting

<p style="color: red; margin: 0;">Warming^{UP}GOO</p> <p style="color: red; margin: 0;">Verkenning ondergrondse warmteopslag Schiebroek</p>	Beoordeling (zie toelichting onderaan)														
<p>Over deze verkenning (hoofdstuk 1)</p> <p>In het onderzoeksprogramma Warming^{UP}GOO zijn voor drie locaties verkenningen uitgevoerd naar de haalbaarheid van ondergrondse warmteopslag (Hoge Temperatuur Opslag - HTO). Schiebroek is één van deze drie locaties. De potentie van seizoensopslag is verkend voor het warmtenet dat ontwikkeld wordt voor Schiebroek (noord, midden en zuid), 110-morgen, Business park Zestienhoven en later wellicht Overschie. Dit warmtenet moet van warmte voorzien gaan worden door een geothermiedoublet en twee datacentra. De verkenning dient daarnaast ook als vergelijking met de andere verkenningen binnen Warming^{UP}GOO.</p> <p>In de verkenningen zijn meerdere systeemconcepten beschouwd. Eén systeemconcept is volledig uitgewerkt tot en met de businesscase, zodat inzichtelijk wordt hoe HTO op deze locatie zou kunnen worden ingepast. Hierbij dient opgemerkt te worden dat het uitgewerkte systeemconcept een schetsontwerp is: verdere optimalisatie is nodig in een vervolgtraject.</p>															
<p>Uitgangspunten en systeemconcept (hoofdstuk 2 & 3)</p> <p>Het warmtenet en de geothermie bronnen moeten nog ontwikkeld worden op deze locatie. De gehanteerde uitgangspunten voor het systeem en het doorgerekende systeemconcept zijn opgesteld in samenspraak met alle betrokken partners.</p> <p>Warmtenet:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Aanvoer- en retourtemperaturen</td> <td style="text-align: right;">75 – 35 °C</td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Totaal warmtevraag</td> <td style="text-align: right;">131.000 MWh_{th}</td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Piekvermogen</td> <td style="text-align: right;">≥ 50 MW_{th}</td> </tr> </table> <p>Warmtebronnen:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Geothermie</td> <td style="text-align: right;">15,7 MW_{th}</td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Datacentra</td> <td style="text-align: right;">13,2 MW_{th}</td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Piekvoorziening (lucht-water warmtepomp)</td> <td></td> </tr> </table> <p>HTO:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Injectie-, afkap- en retourtemperatuur</td> <td style="text-align: right;">76 – 46 – 36 °C</td> </tr> </table>	Aanvoer- en retourtemperaturen	75 – 35 °C	Totaal warmtevraag	131.000 MWh _{th}	Piekvermogen	≥ 50 MW _{th}	Geothermie	15,7 MW _{th}	Datacentra	13,2 MW _{th}	Piekvoorziening (lucht-water warmtepomp)		Injectie-, afkap- en retourtemperatuur	76 – 46 – 36 °C	a
Aanvoer- en retourtemperaturen	75 – 35 °C														
Totaal warmtevraag	131.000 MWh _{th}														
Piekvermogen	≥ 50 MW _{th}														
Geothermie	15,7 MW _{th}														
Datacentra	13,2 MW _{th}														
Piekvoorziening (lucht-water warmtepomp)															
Injectie-, afkap- en retourtemperatuur	76 – 46 – 36 °C														

<p>Schematische weergave energieconcept:</p>																																	
<p>Ondergrond (hoofdstuk 4)</p> <table border="0"> <tr> <td>Potentieel geschikte bodemlagen:</td> <td>Maassluis - ondiep 1</td> <td>Maassluis - ondiep 2</td> <td rowspan="4" style="text-align: center; vertical-align: middle;">1 b</td> </tr> <tr> <td>Diepte opslag:</td> <td>112 - 137 m-mv</td> <td>112 - 175 m-mv</td> </tr> <tr> <td>Effectieve dikte aquifer:</td> <td>25</td> <td>55</td> </tr> <tr> <td>Proefboring:</td> <td>aangeraden</td> <td></td> </tr> </table>		Potentieel geschikte bodemlagen:	Maassluis - ondiep 1	Maassluis - ondiep 2	1 b	Diepte opslag:	112 - 137 m-mv	112 - 175 m-mv	Effectieve dikte aquifer:	25	55	Proefboring:	aangeraden																				
Potentieel geschikte bodemlagen:	Maassluis - ondiep 1	Maassluis - ondiep 2	1 b																														
Diepte opslag:	112 - 137 m-mv	112 - 175 m-mv																															
Effectieve dikte aquifer:	25	55																															
Proefboring:	aangeraden																																
<p>Juridische haalbaarheid (hoofdstuk 4)</p> <table border="0"> <tr> <td>Provinciaal beleid</td> <td>Toepassing HTO niet strijdig met beleid</td> <td rowspan="3" style="text-align: center; vertical-align: middle;">2</td> </tr> <tr> <td>Zoet of zout grondwater:</td> <td>Zout grondwater</td> </tr> <tr> <td>Stakeholders ondergrond:</td> <td>Bij de inpassing moet rekening gehouden worden met de ligging van bestaande bodemenergiesystemen. In de business case is hiermee rekening gehouden door het meenemen van extra leidingwerkkosten, omdat de HTO bronnen op voldoende afstand geplaatst moeten worden.</td> </tr> </table>		Provinciaal beleid	Toepassing HTO niet strijdig met beleid	2	Zoet of zout grondwater:	Zout grondwater	Stakeholders ondergrond:	Bij de inpassing moet rekening gehouden worden met de ligging van bestaande bodemenergiesystemen. In de business case is hiermee rekening gehouden door het meenemen van extra leidingwerkkosten, omdat de HTO bronnen op voldoende afstand geplaatst moeten worden.																									
Provinciaal beleid	Toepassing HTO niet strijdig met beleid	2																															
Zoet of zout grondwater:	Zout grondwater																																
Stakeholders ondergrond:	Bij de inpassing moet rekening gehouden worden met de ligging van bestaande bodemenergiesystemen. In de business case is hiermee rekening gehouden door het meenemen van extra leidingwerkkosten, omdat de HTO bronnen op voldoende afstand geplaatst moeten worden.																																
<p>Systeemprestaties & duurzaamheid (hoofdstuk 5 & 6)</p> <table border="0"> <thead> <tr> <th></th> <th style="text-align: center;"><u>Jaar 3</u></th> <th style="text-align: center;"><u>Jaar 10</u></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Opslagvolume</td> <td style="text-align: center;">560.000 m³</td> <td style="text-align: center;">560.000 m³</td> <td rowspan="3" style="text-align: center; vertical-align: middle;">3</td> </tr> <tr> <td>Systeemrendement</td> <td style="text-align: center;">56%</td> <td style="text-align: center;">68%</td> </tr> <tr> <td>Cumulatief systeemrendement</td> <td></td> <td style="text-align: center;">57%</td> </tr> <tr> <td>Cumulatieve onbalans</td> <td></td> <td style="text-align: center;">175%</td> <td rowspan="4" style="text-align: center; vertical-align: middle;">4</td> </tr> <tr> <td>Dekkingsgraad¹</td> <td style="text-align: center;">13% (18.000 MWh_{th})</td> <td style="text-align: center;">13% (20.000 MWh_{th})</td> </tr> <tr> <td>Reductie inzet piekvoorziening²</td> <td style="text-align: center;">74%</td> <td style="text-align: center;">66%</td> </tr> <tr> <td>Verdringing geothermie²</td> <td style="text-align: center;">4%</td> <td style="text-align: center;">3%</td> </tr> <tr> <td>CO₂-intensiteit HTO+WP bij gebruiker</td> <td></td> <td style="text-align: center;">3,4 kg CO₂/GJ</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Referentie: emissie warmtelevering gasketel 62 kg CO₂/GJ</p> <p>Referentie: in 2030 doelstelling warmtenetten 18,9 kg CO₂/GJ</p> <p>¹Aandeel door de HTO+WP geleverde warmte</p> <p>²T.o.v. doorgerekende referentie zonder HTO</p>			<u>Jaar 3</u>	<u>Jaar 10</u>		Opslagvolume	560.000 m ³	560.000 m ³	3	Systeemrendement	56%	68%	Cumulatief systeemrendement		57%	Cumulatieve onbalans		175%	4	Dekkingsgraad ¹	13% (18.000 MWh _{th})	13% (20.000 MWh _{th})	Reductie inzet piekvoorziening ²	74%	66%	Verdringing geothermie ²	4%	3%	CO ₂ -intensiteit HTO+WP bij gebruiker		3,4 kg CO ₂ /GJ		
	<u>Jaar 3</u>	<u>Jaar 10</u>																															
Opslagvolume	560.000 m ³	560.000 m ³	3																														
Systeemrendement	56%	68%																															
Cumulatief systeemrendement		57%																															
Cumulatieve onbalans		175%	4																														
Dekkingsgraad ¹	13% (18.000 MWh _{th})	13% (20.000 MWh _{th})																															
Reductie inzet piekvoorziening ²	74%	66%																															
Verdringing geothermie ²	4%	3%																															
CO ₂ -intensiteit HTO+WP bij gebruiker		3,4 kg CO ₂ /GJ																															

Business case (hoofdstuk 7)			
Investering (geïndexeerd)	6,3 M€		
Investering bronnen	2,1 M€	33%	
Investering warmtepomp	1,4 M€	22%	
Investering overig	2,8 M€	45%	
Operationele kosten (geïndexeerd)			
Inkoop opgeslagen warmte ¹	2,1 M€/jaar	70%	
Kosten elektriciteit	0,53 M€/jaar	18%	
Kosten overig	0,37 M€/jaar	12%	
Kostprijs geleverde warmte (incl. inkoop warmte)	52,6 €/GJ		c
Kostprijs geleverde warmte (inkoop warmte tegen marginale kosten)	31,1 €/GJ		
Referentie: maximale warmtetarief volgens de ACM in 2024 bedroeg 38,42 €/GJ_{th}			
¹ Bij de andere verkenningen was het uitgangspunt dat de warmte niet hoeft te worden ingekocht maar tegen marginale kosten kan worden opgeslagen.			
Conclusies (hoofdstuk 8)			
De toepassingsmogelijkheden van HTO op deze locatie wordt op basis van deze verkenning als positief beoordeeld. Er zijn echter wel een aantal aandachtspunten, zie hieronder.			
Opmerking: HTO als techniek is nog in ontwikkeling. Er bestaan nog technische, juridische en financiële onderzoeksvragen, en de conclusie moet gezien worden binnen het kader van een techniek-in-ontwikkeling, met grotere risico's ten opzichte van bewezen technieken.			
<i>Positieve aspecten van deze locatie voor toepassing HTO:</i>			
1	Op basis van beschikbare data wordt de Formatie van Maassluis geschikt geacht voor HTO.		
2	Risico's met betrekking tot de vergunbaarheid in het kader van de Waterwet worden klein ingeschat. Er zijn nabijgelegen OBES systemen, maar hier kan bij het ontwerp rekening mee gehouden worden om negatieve beïnvloeding te voorkomen.		
3	Het doorgerekende systeemconcept heeft een geschat systeemrendement van 68% in jaar 10. Het cumulatief systeemrendement van 57% is hoger dan de gewenste 50% na 10 jaar bij recente vergunningstrajecten.		
4	De totale hoeveelheid geleverde duurzame warmte neemt toe en de benodigde inzet van de piekvoorziening daalt met 66% in jaar 10.		
<i>Nadelen van deze locatie voor toepassing HTO:</i>			
a	Het warmteaanbod en de warmtevraag moeten nog ontwikkeld worden, en dus is er risico op vertraging.		
b	De formatie van Maassluis lijkt geschikte opslaglagen te bevatten maar er is onzekerheid over de aanwezigheid, dikte en diepteligging van de kleilagen/kleilenzen. Een proefboring is nodig om uitsluitsel te geven.		
c	Indien de opgeslagen warmte niet tegen marginale kosten kan worden ingekocht en opgeslagen is de berekende kostprijs voor de geleverde warmte hoger dan het ACM-tarief.		

Inhoudsopgave

Managementsamenvatting	3
Inhoudsopgave	6
1 Inleiding	8
1.1 Achtergrond	8
1.2 Doelstelling	8
2 Inventarisatie en uitgangspunten	10
2.1 Situatieschets	10
2.2 Warmtevraag	11
2.3 Bronnen	13
2.4 Regelstrategie	16
2.5 Overige uitgangspunten	17
3 Systemconcepten	18
3.1 Base case energieconcept	18
3.2 Gevoeligheidsanalyses	19
3.3 KPI's bij analyses	20
4 Geologische haalbaarheid	22
4.1 Hydrogeologische analyse	22
4.1.1 Criteria voor toepassing HTO	22
4.1.2 Gebruikte ondergrond informatie	23
4.1.3 Beschrijving regionale geologie	26
4.1.4 Bodemopbouw en potentiële opslagpakketten op de voorkeurslocatie	34
5 Thermische rendementssimulaties	38
5.1 Opzet en uitgangspunten model	38
5.1.1 Beschrijving modelopzet	38
5.1.2 Berekening thermisch terugwinrendement	39
5.2 Scenario's	40
5.2.1 Ondergrond uitgangspunten	40
5.2.2 Operationele uitgangspunten	40
5.2.3 Resulterende scenario's	41
5.3 Resultaten	42
5.3.1 Base case	42

5.3.2	Scenario's	44
6	Energetische en duurzaamheidsanalyses	46
6.1	Modellering en analyses	46
6.2	Inzet HTO Base Case	46
	Vergelijking met systeem zonder HTO (referentie case)	48
6.3	Dimensionering Base Case	49
6.4	Energetische en duurzaamheidsanalyse Base Case	50
6.5	Gevoeligheidsanalyses	52
7	Financiële analyses	54
7.1	Investeringskosten Base Case	54
7.2	Exploitatiekosten Base Case	55
7.3	Business case Base Case	56
7.4	Gevoeligheidsanalyses	57
8	Discussie, conclusies & vervolg	59
8.1	Discussie	59
8.2	Conclusies	60
8.3	Vervolg	61
	Referenties	63
	Bijlage 1 – Doorontwikkeling methodiek Verkenning HTO	64
	Bijlage 2- Criteria tabel	66

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

HTO (hoge temperatuur opslagsysteem) is een vorm van grootschalige warmteopslag in de ondergrond. Deze techniek maakt gebruik van een open bodemenergiesysteem met tenminste twee bronnen (brondoublet). Het wordt gezien als een belangrijke schakel in de warmtetransitie. Deze techniek maakt het mogelijk om overschotten aan duurzame warmte, zoals uit geothermie, zon en wind, in tijden van overvloed (voornamelijk 's zomers) op te slaan en deze op een later moment (voornamelijk 's winters) weer te gebruiken.

Sinds 2018 is, in het kader van de energietransitie, de interesse in deze techniek toegenomen. Dit heeft geresulteerd in de realisatie van een HTO-systeem in 2021 voor Ennatuurlijk in Middenmeer (voorheen ECW) onder het onderzoeksprogramma HEATSTORE. In diverse opvolgende onderzoeken zijn de mogelijkheden voor HTO verder onderzocht. In WarmingUP fase 1 (WINDOW-programma) zijn vijf HTO verkenningen uitgevoerd. Drie van deze verkenningen zijn verder onderzocht in WarmingUP Fase 2, namelijk HTO voor Rotterdam Nesseland, de TU Delft en voor het warmtenet in Leeuwarden. Bij een positief investeringsbesluit is de volgende stap om deze HTO systemen in detail te ontwerpen en te realiseren.

Deze HTO verkenning is uitgevoerd in het kader van het WarmingUP GOO onderzoeksproject (WarmingUP Geothermie en Opslag Opschaling). Het WarmingUP GOO onderzoek is een volgende stap in de ontwikkeling van HTO in combinatie met geothermie. Doordat geothermie constant warmte kan leveren, en HTO seizoensmatig warmte op grote schaal kan opslaan, kan de combinatie een waardevolle bijdrage leveren aan het verduurzamen van warmtenetten. Binnen WarmingUP GOO worden drie HTO verkenningen uitgevoerd. Naast deze HTO verkenning, zijn soortgelijke verkenningen uitgevoerd voor Capelle en Rijnland.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van deze verkenning is tweeledig. Ten eerste dient de verkenning bij te dragen aan de overall doelstellingen van het gehele WarmingUP GOO onderzoeksprogramma. Voor HTO is de doelstelling:

- Opschaling van HTO door het opdoen van ervaring, kennisontwikkeling en kennisdeling.

Binnen de verkenningen wordt doorontwikkeld op de opgebouwde kennis van HTO. In bijlage 1 is een korte toelichting hierop gegeven.

Aanvullend heeft deze verkenning zelf ook een aantal doelstellingen:

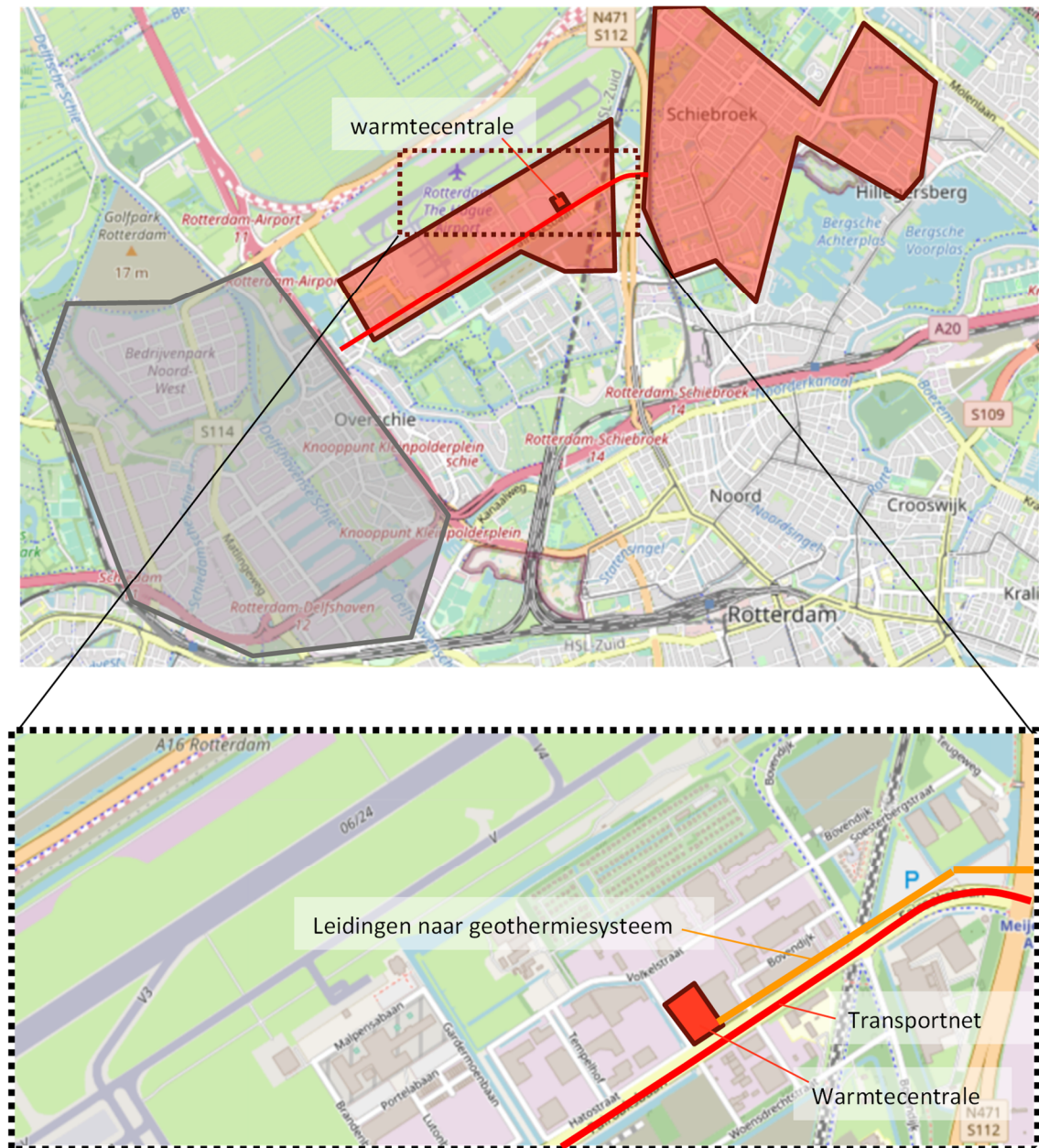
- De verkenning dient inzicht te geven in de haalbaarheid van HTO op de projectlocatie. Hiertoe dient bepaald te worden of en welke lagen van de bodem potentie hebben, of het technisch mogelijk is om HTO in te passen en wat de financiële en juridische haalbaarheid is.
- De resultaten van het onderzoek moeten vergeleken kunnen worden met de resultaten van de twee andere HTO-verkenningen. Voor één van de drie HTO verkenningen is

namelijk een budget beschikbaar voor het uitvoeren van een proefboring. In overleg met alle stakeholders dient een onderbouwde keuze gemaakt te kunnen worden welk project hier het beste voor in aanmerking komt.

2 Inventarisatie en uitgangspunten

2.1 Situatieschets

De projectlocatie ligt ten zuiden van vliegveld Rotterdam – Den Haag. Een globale situatieschets is gegeven in Figuur 2-1.



Figuur 2-1 Globale situatieschets, rode vlakken: gebied uitrol warmtenet, grijs vlak: potentiële toekomstige uitbreiding warmtenet.

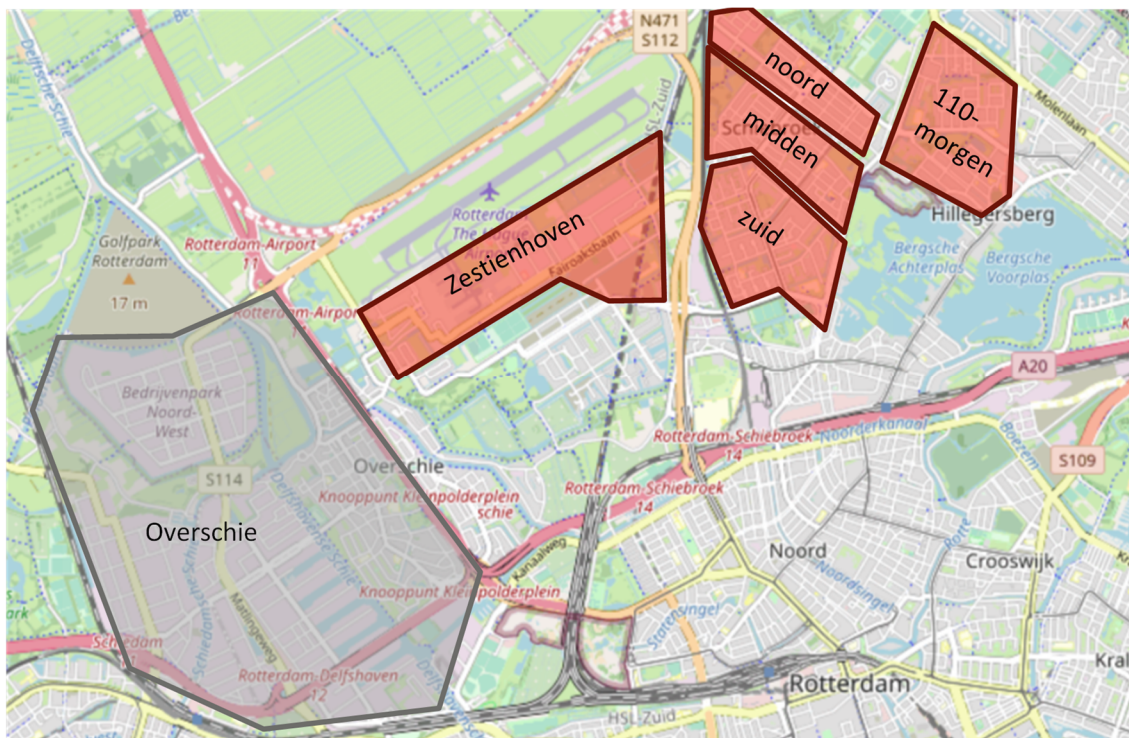
In de ontwikkeling “Rotterdamse Warmte” wordt toegewerkt naar de uitrol van een duurzaam warmtenet, bestaande uit circa 20.000 woningequivalenten (zie paragraaf 2.2). Het warmtenet zal voorzien worden van duurzame warmte. De voornaamste bronnen die voorzien zijn, zijn een geothermie-systeem en twee datacenters (zie paragraaf 2.3).

Koppelkansen

Naast de hierboven genoemde bronnen zijn er nog een tal van koppelkansen, zoals asfaltcollectoren, productie van waterstof, ombouwen van PT panelen naar PVT-panelen, een grootschalige elektrische accu en een elektrische boiler. In dit onderzoek vallen de koppelkansen buiten beschouwing. De focus ligt op integratie van de eerdergenoemde warmtebronnen, warmtevraag en een HTO-systeem.

2.2 Warmtevraag

In de eerste fase richt de ontwikkeling zich op de uitrol van een warmtenet in de deelgebieden Schiebroek (noord, midden en zuid), 110-morgen en Business park Zestienhoven (zie Figuur 2-2). Later vindt wellicht uitbreiding plaats richting Overschie. Deze laatste is in deze studie buiten beschouwing gelaten.

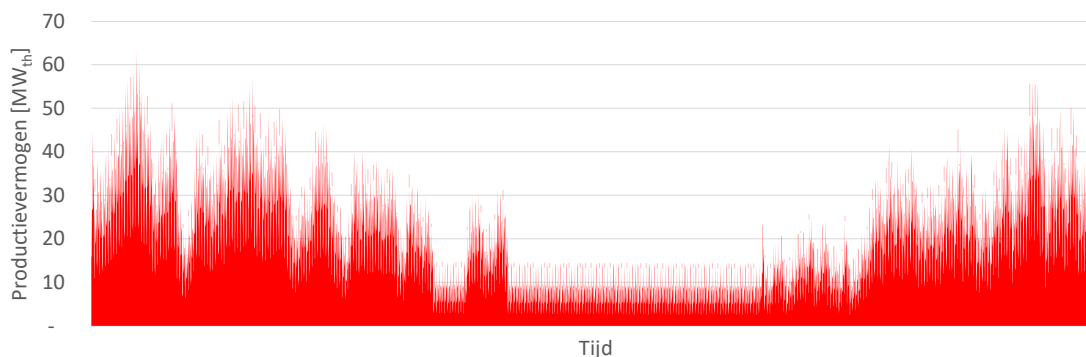


Figuur 2-2 Deelgebieden warmtenet

De belangrijkste uitgangspunten van het warmtenet zijn hieronder samengevat:

- Aantal woningen: 11.000 woningen
- Aantal bedrijven: 367
- Totale omvang: 20.000 woningequivalenten
- Totale warmtevraag: 131.000 MWh_{th} (470.000 GJ_{th}) per jaar
- Piekvermogen warmtevraag: ≥ 50 MW_{th}
- Warmteverlies in warmtenet: 15%
- Totale productie: 154.000 MWh_{th} (553.000 GJ_{th}) per jaar
- Aanvoertemperatuur warmtenet: 75°C (einde leiding, constant)
- Retourtemperatuur warmtenet: 35°C (constant)

Op basis van een standaard jaarprofiel voor een warmtenet is een inschatting gemaakt van de benodigde warmteproductie op uurbasis (zie Figuur 2-3).



Figuur 2-3 Productieprofiel warmtenet bij een productievraag van 154.000 MWh (2035)

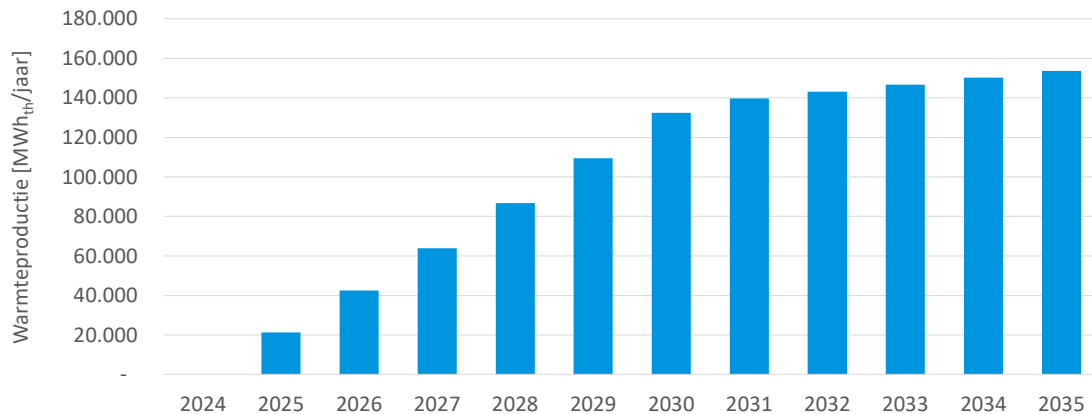
Enkele kengetallen vanuit het jaarprofiel zijn:

- Piekvermogen: 63 MW_{th}
- Gemiddeld vermogen: 17,5 MW_{th}
- Equivalente vollasturen: 2.400 h/a

Het piekvermogen ligt hoger dan opgegeven door EnerTrans. Dit komt mogelijk doordat het gehanteerde productieprofiel afwijkt. Een ander productieprofiel is echter niet beschikbaar. In deze studie zal het productieprofiel zoals gegeven in Figuur 2-3 worden gebruikt. De geplande fasering en omvang per deelgebied is weergegeven in Tabel 2-1. Op basis hiervan is een groei van de benodigde productie ingeschat (zie Figuur 2-4). Na 2030 vlakt de snelheid van de groei af.

Tabel 2-1 Omvang en geplande fasering warmtenet

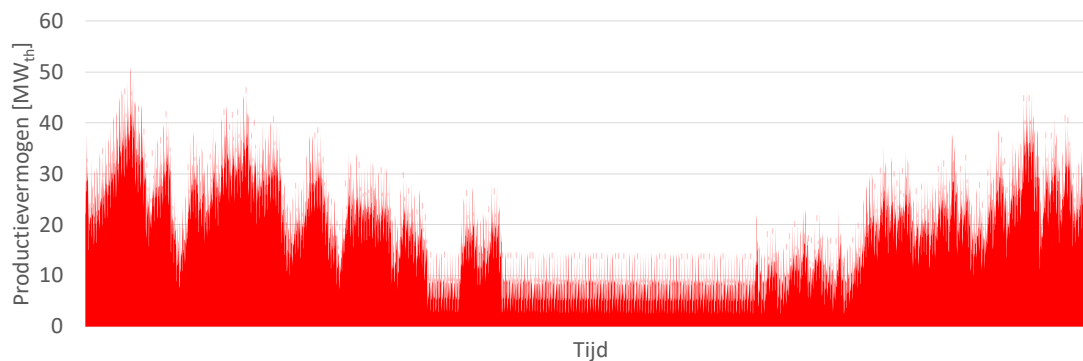
Deelgebied	Aantal woningen [weq]	Start	Einde
Zestienhoven	10.000	2025	2030
110-Morgen	2.100	2025	2030
Schiebroek zuid	3.500	2025	2031
Schiebroek midden	2.800	2025	2035
Schiebroek noord	1.600	2028	2035
Totaal	20.000		



Figuur 2-4 Geschatte ontwikkeling benodigde productie warmtenet

Toekomstbestendig warmtevraagprofiel

Deltares heeft in eerdere studies gekeken naar mogelijkheden om het warmtevraagprofiel meer uit te vlakken (Pothof et al., 2023). Door bijvoorbeeld minder nachtverlaging toe te passen, kan de ochtendpiek voor verwarming al flink gereduceerd worden. Dit leidt tot een meer toekomstbestendig warmtevraagprofiel. Deze is weergegeven in Figuur 2-5.



Figuur 2-5 Toekomstbestendig productieprofiel warmtenet bij een productievraag van 154.000 MWh_{th}. (2035)

Enkele kengetallen vanuit het jaarprofiel zijn:

- Piekvermogen: 51 MW_{th}
- Gemiddeld vermogen: 17,5 MW_{th}
- Equivalente vollasturen: 3.000 h/a

Het maximale vermogen ligt circa 20% lager dan bij het 'standaard' profiel. In de gevoeligheidsanalyses (zie paragraaf 6.5 en 7.4) is gekeken naar de effecten van een vlakker warmtevraagprofiel op de energetische bijdrage en business case van de HTO.

2.3 Bronnen

Geothermie

Samen met Shell wordt gekeken naar de mogelijkheden voor warmtelevering door geothermie. Shell heeft gekeken naar vier mogelijke locaties voor het realiseren van een geothermiesysteem (zie Figuur 2-6). Op het moment van schrijven gaat de voorkeur uit naar locatie 4. Vanuit deze

locatie komen er leidingen richting de warmtecentrale op locatie 1. In deze studie is aangenomen dat één geothermiedoublet wordt gerealiseerd welke operationeel is in 2028.

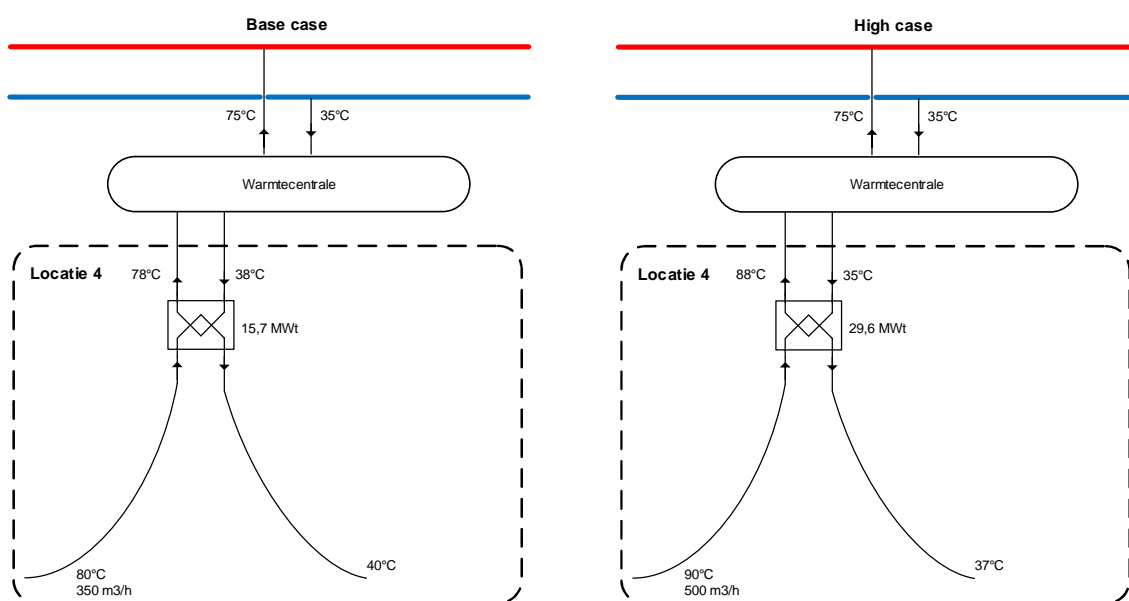


Figuur 2-6 Mogelijke locaties voor de realisatie van een geothermiesysteem.

Over de geothermische bron op locatie 4 is de volgende informatie aangeleverd:

Uitgangspunt	Locatie 4 – base case	Locatie 4 – high case
Productietemperatuur	80°C	90°C
Infiltratietemperatuur	40°C	37°C
Maximaal debiet	350 m ³ /h	500 m ³ /h
Geothermisch vermogen (direct)	15,7 MW _{th}	29,6 MW _{th}
SPF ESP + eventuele boosterpomp ¹	14	9

De inpassing van geothermie is schematisch weergegeven in Figuur 2-7.



Figuur 2-7 Principe inpassing geothermie

¹ Aanname constante waarde, ook bij deellast.

Gasbijvangst

In het geothermisch water is formatiegas opgelost. Momenteel is het plan om het formatiegas te injecteren in de injectieput. Er is echter nog niet bepaald op welke wijze. In deze studie is geen rekening gehouden met formatiegas.

SDE++

Geothermische warmte komt in aanmerking voor SDE++ subsidie. De volgende uitgangspunten zijn meegenomen in deze studie:

- | | |
|---------------------------|--|
| • SDE++ categorie: | Diepe geothermie (geen basislast) |
| • Thermisch vermogen: | 16/30 MW _{th} (base case/high case) |
| • Max. vollasturen SDE++: | 3.500 h/jaar |
| • Basisbedrag: | 0,124 €/kWh _{th} |
| • Correctiebedrag: | 0,0588 €/kWh _{th} |

Geothermische warmte die wordt opgeslagen in de HTO, komt ook in aanmerking voor SDE++ subsidie. De hoeveelheid die wordt toegekend aan de HTO is als volgt bepaald:

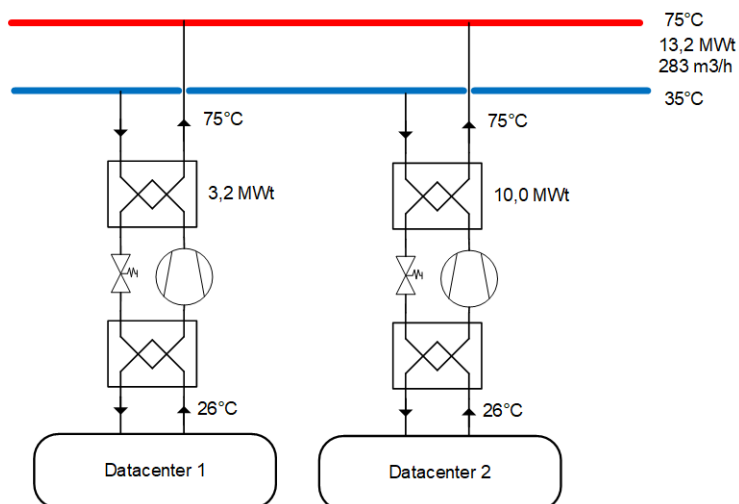
- Van de referentiesituatie (project zonder HTO) is berekend hoeveel SDE++ wordt toegekend aan de geothermische installatie. Hierbij is bepaald hoeveel geothermische warmte wordt geleverd in de eerste 16 jaar (15 jaar SDE++ looptijd + 1 jaar mogelijke uitloop).
- De beschikbare SDE++ die nog kan worden toegekend aan HTO is het verschil tussen de maximale totale SDE++ subsidie, minus de hoeveelheid geleverde geothermische warmte in de referentiesituatie.
- Per jaar dat de HTO actief is, wordt bepaald hoeveel warmte wordt opgeslagen. SDE++ subsidie wordt toegekend tot een maximum van de beschikbare SDE++ subsidie.

Datacenters

- Het project wil gebruik maken van restwarmte uit twee datacenters. Restwarmte vanuit datacenters is (nagenoeg) constant en permanent beschikbaar. De restwarmte wordt opgewaardeerd met een warmtepomp naar de gewenste productietemperatuur (75°C). Aanvullend is de volgende data bekend: Temperatuur restwarmte:
26°C
- Productievermogen datacenter 1: 3,2 MW_{th}
- Productievermogen datacenter 2: 10 MW_{th}

De temperatuur van restwarmte is te laag om direct op te slaan in de HTO. Warmte zou in de zomer wel opgewaardeerd kunnen worden met een warmtepomp om het daarna op te slaan in de HTO (power-to-heat). Dit is in de zomer mogelijk interessant wanneer de elektriciteitsprijzen laag zijn op momenten dat veel duurzame elektriciteit wordt geproduceerd. Dit is in deze studie echter niet onderzocht. In deze studie is het uitgangspunt dat de datacenters alleen warmte produceren voor het warmtenet en dat de HTO geladen zal worden met geothermische warmte. Een interactie met de HTO is beperkt tot de regelstrategie (zie paragraaf 2.4).

De uitgangspunten voor de datacenters zijn schematisch weergegeven in Figuur 2-8. Een verdere detaillering hiervan is vanwege de beperkte interactie met de HTO in deze studie niet noodzakelijk.



Figuur 2-8 Schematische weergave warmteproductie door datacenters

2.4 Regelstrategie

Voor de inpassing van de HTO en de modellering zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd met betrekking tot de regelstrategie:

- De volgende merit order wordt toegepast:
 - Datacenter 1
 - Geothermie
 - HTO
 - Datacenter 2
 - Piekvoorziening (lucht-water warmtepompen)
- Het aantal schakelmomenten van de HTO is zo beperkt mogelijk. Tijdens operatie draait de HTO tussen de 20 en 100% (regelbereik). In basis zijn er vier perioden, waarvan twee optioneel, namelijk:
 - Laadperiode
 - Rustperiode (optioneel)
 - Terugleverperiode
 - Rustperiode (optioneel)
- Het geothermiesysteem draait continu en heeft een regelbereik tussen de 20 en 100%.
- Het geothermiesysteem draait zoveel mogelijk op vollast.
- Voor zover nodig en mogelijk toert het geothermiesysteem iets af zodat de HTO bij het terugleveren van warmte ook kan voldoen aan een minimale deellast van 20%.
- De injectietemperatuur in de lauwe bron van de HTO wordt constant gehouden. Hiervoor is een warmtepomp nodig.
- Bij de interactie tussen HTO en geothermie wordt de injectietemperatuur in de geothermiebron constant gehouden.
- In de eerste twee jaar wordt zoveel mogelijk warmte geladen omdat de omgeving nog opgewarmd moet worden. Ook is er dan nog veel warmte beschikbaar voor opslag omdat de warmtevraag van het warmtenet dan nog relatief beperkt is. Vanaf jaar drie wordt gestuurd op een balans, waarbij wel rekening wordt gehouden met de optredende opslagverliezen in de HTO.

2.5 Overige uitgangspunten

Aanvullend zijn voor de financiële analyse en duurzaamheidsanalyse nog een aantal uitgangspunten gebruikt. Deze zijn hieronder genoemd.

Financieel

• Aandeel eigen vermogen:	30%
• Aandeel vreemd vermogen:	70%
• Rendement op eigen vermogen:	15%
• Rente op lening:	6%
• WACC ² (zonder belasting):	8,7%
• Projectrendement:	8,7% (gelijk aan WACC)
• Looptijd:	15 jaar
• Gemiddelde elektriciteitsprijs in laadperiode:	83 ³ €/MWh _e
• Gemiddelde elektriciteitsprijs in terugleverperiode:	110 ³ €/MWh _e
• Kosten voor opslag van warmte:	57,6 €/MWh _{th}
• Kosten WP:	470 €/kW _{th}
• Indexatie kosten:	2%
• Indexatie inkomsten:	2%

Duurzaamheid

• CO ₂ -uitstoot opgeslagen warmte:	n.v.t. ⁴
• Gemiddelde CO ₂ uitstoot elektriciteit huidig:	0,214 ⁵ kg CO ₂ /MWh _e
• Gemiddelde CO ₂ uitstoot elektriciteit 2030:	0,092 ⁶ kg CO ₂ /MWh _e
• Gemiddelde CO ₂ uitstoot elektriciteit 2050:	0,0 kg CO ₂ /MWh _e

² Weighted Average Cost of Capital: dit geeft de gemiddelde kosten van de financiering aan. Deze is opgebouwd uit een deel eigen vermogen en een deel vreemd vermogen.

³ Inclusief energiebelasting, exclusief BTW. Prijs ligt lager in laadperiode/zomerperiode dan in leverperiode/winterperiode.

⁴ Berekend is hoeveel extra elektriciteitsverbruik nodig is om geothermische warmte op te slaan in de HTO. De CO₂-uitstoot hiervan is meegenomen door het extra elektriciteitsverbruik toe te kennen aan de HTO.

⁵ Nationaal Energie Dashboard

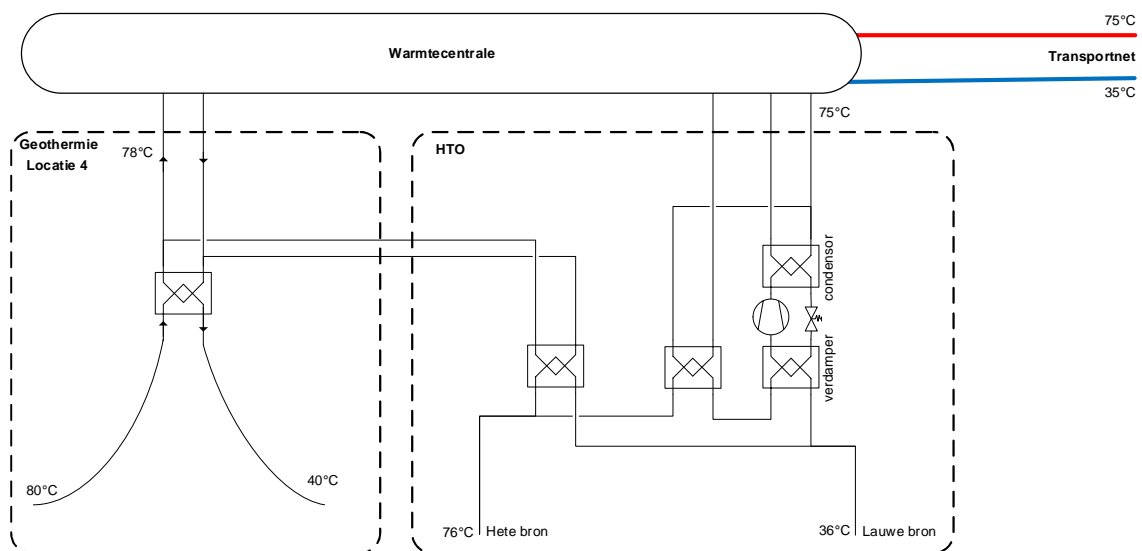
⁶ Emissiefactor elektriciteit uit fossiele bronnen, Voor compensatieregeling IKC-ETS, CE Delft, 2021

3 Systeemconcepten

In deze studie is gekeken naar de wijze van inpassing van HTO. Voor dit systeemconcept is een base case opgesteld. Deze is beschreven in paragraaf 3.1. Aanvullend op de analyses voor de base case zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd. Welke gevoeligheidsanalyses zijn uitgevoerd, zijn beschreven in paragraaf 3.2. Bij de analyses is gekeken naar een aantal Key Performance Indicators (KPI) op basis waarvan het systeemconcept beoordeeld zal worden. Deze zijn beschreven in paragraaf 3.3.

3.1 Base case energieconcept

Het energieconcept is schematisch weergegeven in Figuur 3-1. Onder het figuur zijn een aantal zaken nader toegelicht die relevant zijn voor de base case van dit energieconcept. In dit energieconcept is het uitgangspunt dat een geothermie systeem wordt gerealiseerd op locatie 4 en dat er leidingwerk vanaf deze locatie naar de warmtecentrale wordt gelegd.



Figuur 3-1 Schematische weergave energieconcept met een geothermie systeem op locatie 4.

- **Laden:**
In de laadperiode wordt geothermische warmte op directe wijze via twee warmtewisselaars opgeslagen in de HTO. Op deze wijze kan de hete bron van de HTO geladen worden op een temperatuur van 76°C. Tijdens het laden wordt ervoor gezorgd dat de injectietemperatuur van het geothermiesysteem constant op 40°C wordt gehouden.
- **Terugleveren:**
In de terugleverperiode levert de HTO warmte aan het warmtenet. Een warmtepomp is nodig om de warmte uit de HTO op te waarden naar de gewenste productietemperatuur van 75°C. Tijdens het terugleveren wordt de lauwe bron geladen met een constante temperatuur van 36°C.
- **Locatie:**
De HTO wordt ingepast bij de warmtecentrale (zie Figuur 2-1). Mocht ruimtelijke inpassing bij de warmtecentrale niet mogelijk zijn, dan kan dit concept ook worden ingepast bij de locatie van het geothermiesysteem. Nadeel is echter dat er dan wel een aparte technische ruimte dient te komen voor de HTO en dat deze niet gecombineerd kan worden met de Warmtecentrale.

3.2 Gevoeligheidsanalyses

Gestandaardiseerde case

Naast deze HTO studie zijn nog twee andere verkenningen uitgevoerd voor HTO, namelijk HTO Capelle en HTO Rijnland. Vanuit de begeleidingscommissie is de wens uitgesproken om ook een situatie door te rekenen waarin de uitgangspunten, voor zover mogelijk, gelijk zijn. Hierdoor kunnen de drie verschillende HTO locaties beter met elkaar vergeleken worden bij, zoveel mogelijk, gelijke uitgangspunten. Dit wordt de “gestandaardiseerde case” genoemd. In de gestandaardiseerde case zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- **Projectrendement:** het gewenste projectrendement wordt gelijk gesteld aan de WACC, namelijk 8,7%.
- **Kosten opgeslagen warmte:** de kosten voor de opgeslagen warmte zijn gelijk aan de kosten voor het extra elektriciteitsverbruik dat nodig is voor het geothermiesysteem om de warmte op te slaan in de HTO (marginale kosten). Dit wijkt af van de kosten voor opgeslagen warmte in de base case (57,6 €/MWh_{th}).
- **Retourtemperatuur:** de retourtemperatuur van het warmtenet is 50°C. Dit wijkt af van de retourtemperatuur in de base case (35°C). De temperaturen van de hete en lauwe bron veranderen niet. Die zijn in de gestandaardiseerde case gelijk aan de base case. Een hogere retourtemperatuur heeft dus als gevolg dat de HTO meer moet worden uitgeoeld met de warmtepomp. In deze case neemt het vermogen van de warmtepomp dus toe.

Aanvullende gevoeligheidsanalyses

Op de base cases zijn een aantal gevoeligheidsanalyses uitgevoerd. Deze zijn hieronder kort omschreven.

- **Variatie in warmtevraag:** de ontwikkeling van de warmtevraag kent een grote mate van onzekerheid. Onderzocht wordt wat de invloed is van een lagere en hogere warmtevraag in de eindsituatie. Uitgangspunt hierbij is dat de omvang van de HTO gelijk is aan de base case. Hierdoor worden de gevolgen inzichtelijk gemaakt van een veranderende warmtevraag wanneer eenmaal gekozen en geïnvesteerd is in een HTO-systeem.
- **Variatie in vraagprofiel:** door ander stookgedrag en/of het toepassen van lokale buffervaten zal het maximale verwarmingsvermogen dalen. Hierdoor kan ook het

opgestelde vermogen aan bronnen omlaag. Onderzocht wordt wat de effecten zijn van een aangepast warmtevraagprofiel met een lager maximaal vermogen (toekomstbestendige profiel). De totale warmtevraag blijft gelijk.

- Variatie in geothermie: Een andere onzekerheid is het vermogen en de temperatuur van de geothermiebron. Gekeken zal worden naar het effect van wanneer wordt uitgegaan van de high case voor geothermie.
- Kosten elektriciteit: de elektriciteitskosten zullen een belangrijk onderdeel vormen van de exploitatiekosten. De elektriciteitsmarkt is sterk volatiel. Onderzocht zal worden wat het effect is van een scenario waarin de elektriciteitsprijzen langzaam stijgen (1%) en een scenario waarin de elektriciteitsprijzen sterk stijgen (5%).
- Projectrendement: in de uitgangspunten is gekozen voor een projectrendement van 8,7% over een looptijd van 15 jaar. Aanvullend zal onderzocht worden wat het effect is van een projectrendement van 7% en van 10%.
- Geen SDE++: gekeken wordt naar de gevoeligheid in de situatie dat geen SDE++ wordt toegekend aan de HTO.
- Aantal bronnen: er is onzekerheid in de bodemopbouw en daarmee onzekerheid in het maximale debiet. Er is een inschatting gemaakt van het haalbare onttrekkings- en infiltratiedebiet per bron. Bij het bepalen van het maximale debiet is een maximale overschrijding van de NVOE-norm van factor 2 aangehouden. Als gevoeligheid is ook gekeken naar de situatie waarin meer of minder bronnen nodig zijn dan momenteel ingeschat.

3.3 KPI's bij analyses

Voor de base case en de gevoeligheidsanalyses is gekeken naar diverse KPI's. Deze geven een eerste beeld van de haalbaarheid van HTO en kunnen tevens gebruikt worden voor een vergelijking met de andere uitgevoerde HTO verkenningen (HTO Rijnland en HTO Capelle).

- Bodem: Gekeken wordt naar de geohydrologische geschiktheid van de bodem. Via modelberekeningen wordt het verwachte systeemrendement van het HTO systeem bepaald. Dit is de verhouding tussen de hoeveelheid teruggeleverde warmte en de hoeveelheid opgeslagen warmte in de HTO. Een hoog systeemrendement is wenselijk omdat hierdoor zo effectief mogelijk gebruik wordt gemaakt van de opgeslagen warmte en omdat dit de effecten naar de omgeving zal minimaliseren. Het systeemrendement wordt beïnvloed door de efficiëntie van de opslag in zowel de hete bron (hete bronrendement) en de warme bron (warme bronrendement). Er is nog geen regelgeving over welke waarden acceptabel zijn. In deze studie wordt 50% als ondergrens aangehouden (in jaar 10), maar er is een voorkeur voor een systeemrendement van 70% of meer.
- Business case: een goede business case is belangrijk voor de (financiële haalbaarheid van een project. Gekeken wordt naar de volgende parameters:
 - CAPEX: De CAPEX zijn de investeringskosten die nodig zijn tot realisatie en inbedrijfstellen van de HTO. De hoogte hiervan zal van invloed zijn bij het nemen van een investeringsbesluit.
 - Specifieke kostprijs geproduceerde warmte: dit is de prijs die betaalt zou moeten worden voor de warmte die vanuit de HTO wordt geleverd aan het warmtenet, zodanig dat wordt voldaan aan het gewenste projectrendement. Deze prijs (in €/GJ) kan vergeleken worden met de kosten die in de markt gangbaar zijn.
- CO₂-intensiteit bij de klant: Dit is de CO₂ uitstoot van de warmte die vanuit de HTO wordt geleverd aan de klant (in kg CO₂/GJ). Dit is de verhouding van alle CO₂ uitstoot in een jaar

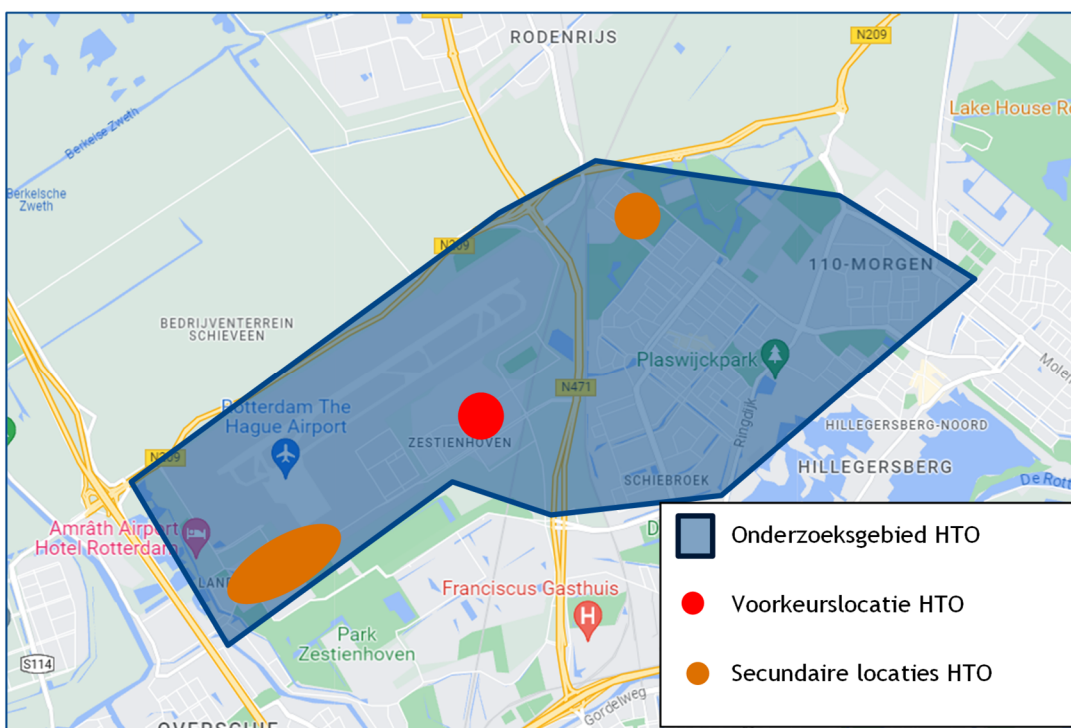
van het HTO-systeem (zowel bij laden als bij terugleveren) en de totaal geleverde hoeveelheid warmte per jaar aan de klant. Warmteverliezen in het warmtenet zijn hierin verdisconteerd. Deze waarde kan vergeleken worden met andere duurzame bronnen en met duurzaamheidsrichtlijnen (bv klimaatakkoord of warmtewet).

- Juridisch: in een juridische scan zal een eerste inschatting gemaakt worden van de juridische haalbaarheid. Hierbij wordt gekeken naar nabijgelegen open- en gesloten bodemenergiesystemen en diverse aandachtsgebieden zoals waterwingebieden, natuurgebieden en gebieden met archeologische waarde.

4 Geologische haalbaarheid

4.1 Hydrogeologische analyse

Voor de analyse van de geschiktheid van de ondergrond in het zoekgebied (Figuur 4-1), is gebruikt gemaakt van de openbare modellen en datasets (DGM/REGIS II v2.2.1, NLOG, DINO, grondwatertools, WKOtool), aangevuld met boorbeschrijvingen van lokale boringen en/of informatie van open bodemenergiesystemen en seismiek, indien beschikbaar en goed interpreteerbaar. TNO en IF Technology hebben deze informatie verzameld en geïnterpreteerd. Ook is gekeken naar de informatie die al bekend was vanuit het WINDOW project (verkenning locatie Rotterdam Nesselande) en andere relevante studies.



Figuur 4-1 Overzicht van zoekgebied Schiebroek en mogelijke locaties voor HTO.

4.1.1 Criteria voor toepassing HTO

In WINDOW fase 1 (WarmingUP) zijn criteria ontwikkeld voor het beoordelen van de beschikbare aquifers voor HTO toepassing op een specifieke locatie. Een aangepaste en verbeterde versie hiervan is te zien in Tabel 4-1. In deze verkenning is nog onderscheid gemaakt tussen de hydraulische en thermische afsluitende eigenschappen van de kleilaag boven het pakket. Ook is een criterium toegevoegd met de eerste inschatting van het rendement op basis van een snelle analytische berekening, dit criterium is echter niet gebruikt als potentiële showstopper. Zie Bijlage 20 voor gedetailleerde uitleg over de criteria.

Tabel 4-1 Criteria welke zijn gebruikt voor de selectie van de meest geschikte opslagpakketten.

Criterion	Eenheid	Opslag temperatuur	Showstopper	Risico	Goed
Lithologie	-		silt/klei	zand-kalk, glauconiet	zand
Diepte top aquifer	m-mv		Nooit een showstopper	< 50	≥ 50
Totale dikte opslagpakket	m		< 15	15 – 20	≥ 20
Effectieve dikte opslagpakket	m		< 15	15 – 20	≥ 20
Hydraulische afsluiting kleilaag bovenzijde ⁽¹⁾	m		< 4	4 - 8	≥ 8
Thermische afsluiting kleilaag bovenzijde ⁽²⁾	m		< 10	10 - 15	≥ 15
Afsluitende laag onderzijde ⁽³⁾	m		Nooit een showstopper	< 5	≥5
Doorlaatvermogen opslagpakket	m ² /d	80 – 90 °C	< 100	100 – 250 en > 600	250 – 600
		70 – 80 °C	< 100	100 – 250 en > 800	250 – 800
		60 - 70 °C	< 100	100 – 250 en > 1000	250 – 1000
Aanvullend: inschatting opslagrendement ⁽⁴⁾	%		Nooit een showstopper	<60%	>60%
Omgevingsbelangen ⁽⁵⁾			< 300 m afstand	300-500 m afstand	>500 m afstand

(1) aantal meter klei in de 15 m direct boven het opslagpakket

(2) totaal aantal meter klei in de 30 m direct boven opslagpakket

(3) aantal meter klei in de 10 m direct onder het opslagpakket

(4) o.b.v. Schout et al. (2014)

(5) afstand van OBES, GBES, grondwateronttrekking in dezelfde laag t.o.v. locatie HTO systeem

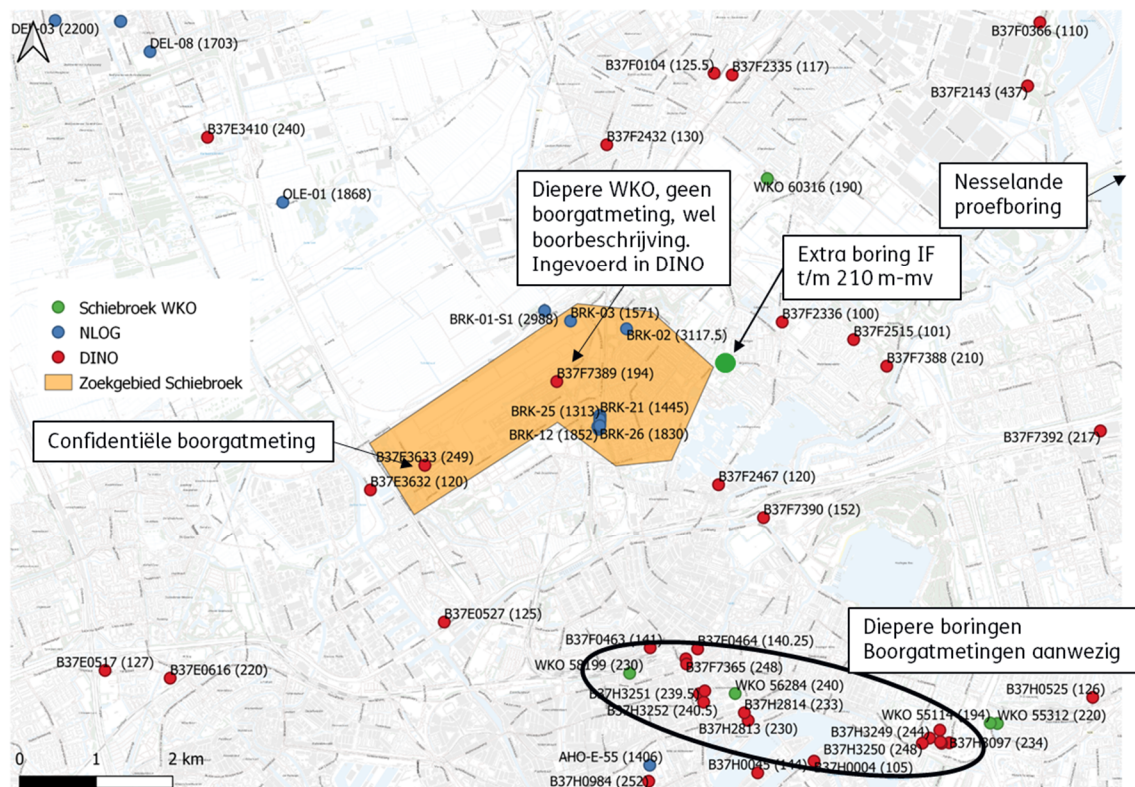
4.1.2 Gebruikte ondergrond informatie

REGIS II v2.2

Het REGIS II v2.2 geologische model is gebruikt als basis. De ondergrond in de omgeving van Rotterdam Capelle bestaat uit een opeenvolging van verschillende formaties, die in het REGIS II model zijn opgesplitst in verschillende deellagen (hydrogeologische eenheden). Hierbij moet opgemerkt worden dat het relevante diepte interval (~100 – 500m) van dit model gebaseerd is op interpolatie van een *zeer beperkt aantal boringen*, waardoor de onzekerheid in de bodemopbouw die volgt uit dit model relatief groot is.

Boringen

Voor aanvullende informatie over de ondergrond is gekeken naar boringen in de omgeving (Figuur 4-2).



Figuur 4-2 Overzicht boringen rondom de locatie Schiebroek, achter de naam van de boring staat de einddiepte in m-mv (DINO en WKO) en m-NAP (nlog) tussen haakjes. De DINO boringen (rood) zijn gefilterd op diepte > 100m. De extra WKO boringen (groen) komen uit de database van IF Technology en zijn in DINO ingevoerd. De blauwe stippen zijn de diepere boringen uit NLOG.

In eerste instantie is gekeken naar boringen uit de DINO database met een diepte van > 100 m (rode punten in Figuur 4-2). Acht boringen met een diepte van 100 tot 130 m (top Formatie van Maassluis) liggen in een straal van ~4 km van het zoekgebied, en twee diepere boringen van ~250 m ongeveer 4 km ten zuiden van het zoekgebied.

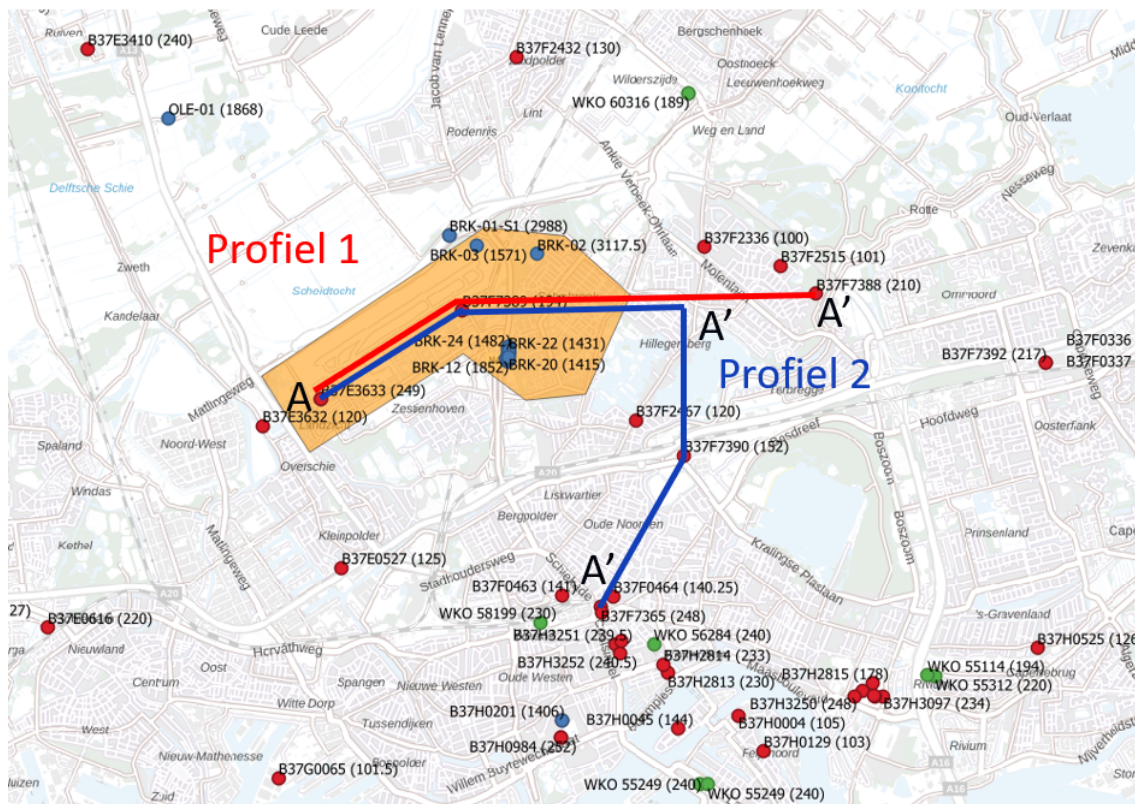
Boring B37E3633 doorboort heel de Maassluis Fm tot een diepte van 249 m en heeft een boorbeschrijving, maar geen publieke boorgatmeting. De proefboring van de HTO in Nesselande is de diepste boring (350 m) in de omgeving, maar deze ligt 10 km ten oosten van de beoogde HTO locatie in Schiebroek.

Boorstaten van publieke WKO systemen uit de database van IF Technology (groene punten in Figuur 4-2) zijn verzameld en ingevoerd in de DINO database. Deze boringen hebben enkel een boorbeschrijving en géén boorgatmeting. Confidentiële boringen uit de database van IF Technology zijn meegenomen tijdens de besprekingen en meegenomen in de analyse, maar zijn niet weergegeven in dit rapport.

Er ligt een aantal diepere olie en gas boringen in het zoekgebied, de genummerde BRK-xx boringen (blauwe stippen in Figuur 4-2), dit zijn boringen uit de NLOG database. Helaas is de kwaliteit van de beschrijving en boorgatmeting (gamma ray) voor het relevante diepte interval niet voldoende voor interpretatie van zand en kleilagen. Dit komt omdat bij olie en gasboringen de eerste 500-1000 meter vaak slecht gelogd is omdat dit interval niet interessant was voor die toepassing.

Twee REGIS profielen zijn gemaakt in en rondom het zoekgebied (Figuur 4-3), waar de beschikbare boringen uit DINO en uit de database van IF Technology op geplot zijn. Profiel 1 is gemaakt met de

REGIS/DINOloket tool, profiel 2 met de tool van IF Technology, waarbij in de lithologie van de boringen ook een codering is opgenomen voor bijmenging van klei⁷ als dat is aangegeven in de boorbeschrijving.



Figuur 4-3 Overzicht van twee profielen gemaakt bij het zoekgebied Schiebroek.

Omdat in de nabije omgeving van het zoekgebied geen boordata beschikbaar is van boringen die reiken tot in de Formatie van Oosterhout en Breda is een derde profiel gemaakt aan de hand van een aantal diepere boringen op grotere afstand van het gebied.

Breuken

Voor de risico's gerelateerd aan het voorkomen van breuken in de regio is gebruik gemaakt van de Breukenkaart v3.2.

Zoet-zout grens

Grondwatertools.nl is gebruikt om te kijken hoe diep de zoet-zout grens ligt vanwege drinkwaterbelangen en juridische beperkingen.

Seismiek

De beschikbare 2D en 3D seismiek in de regio is geëvalueerd voor toepassing op het relevante diepte interval en waar mogelijk gebruikt om trends uit te halen.

Potentieelstudie RES regio Rotterdam Den Haag

⁷ In een WKO boorbeschrijving wordt eerst de hoofd lithologie aangegeven, bijvoorbeeld 'zand'. Daarachter staat vervolgens nog meer informatie over de lithologie, zoals 'kleilig', 'zwak siltig' of 'kleibrokjes'. Het verschil tussen kleihoudend zand en zandige klei is niet altijd duidelijk, waardoor de hoofdlithologie niet altijd een goed beeld geeft van de bruikbaarheid. Vandaar dat het goed is om naast de hoofdlithologie, ook de bijmenging mee te nemen voor een volledig beeld.

In de studie van Oerlemans et al. (2023) is gekeken naar het potentieel van de Formatie van Maassluis in de RES regio Rotterdam Den Haag. Hierbij zijn, naast de boringen uit de DINO database, ook de WKO boringen vanuit de interne (confidentiële) database van IF Technology meegenomen bij het inschatten van het potentieel voor HTO. De resultaten van deze studie zijn meegenomen in de evaluatie van de ondergrond in de regio Rijnland.

4.1.3 Beschrijving regionale geologie

Figuur 4-4 toont twee doorsnedes uit het REGIS II v2.2 geohydrologische model, waaruit de opeenvolging van de verschillende geologische formaties (en hun deellagen) voor deze regio inzichtelijk wordt. De formaties zijn hieronder beschreven.

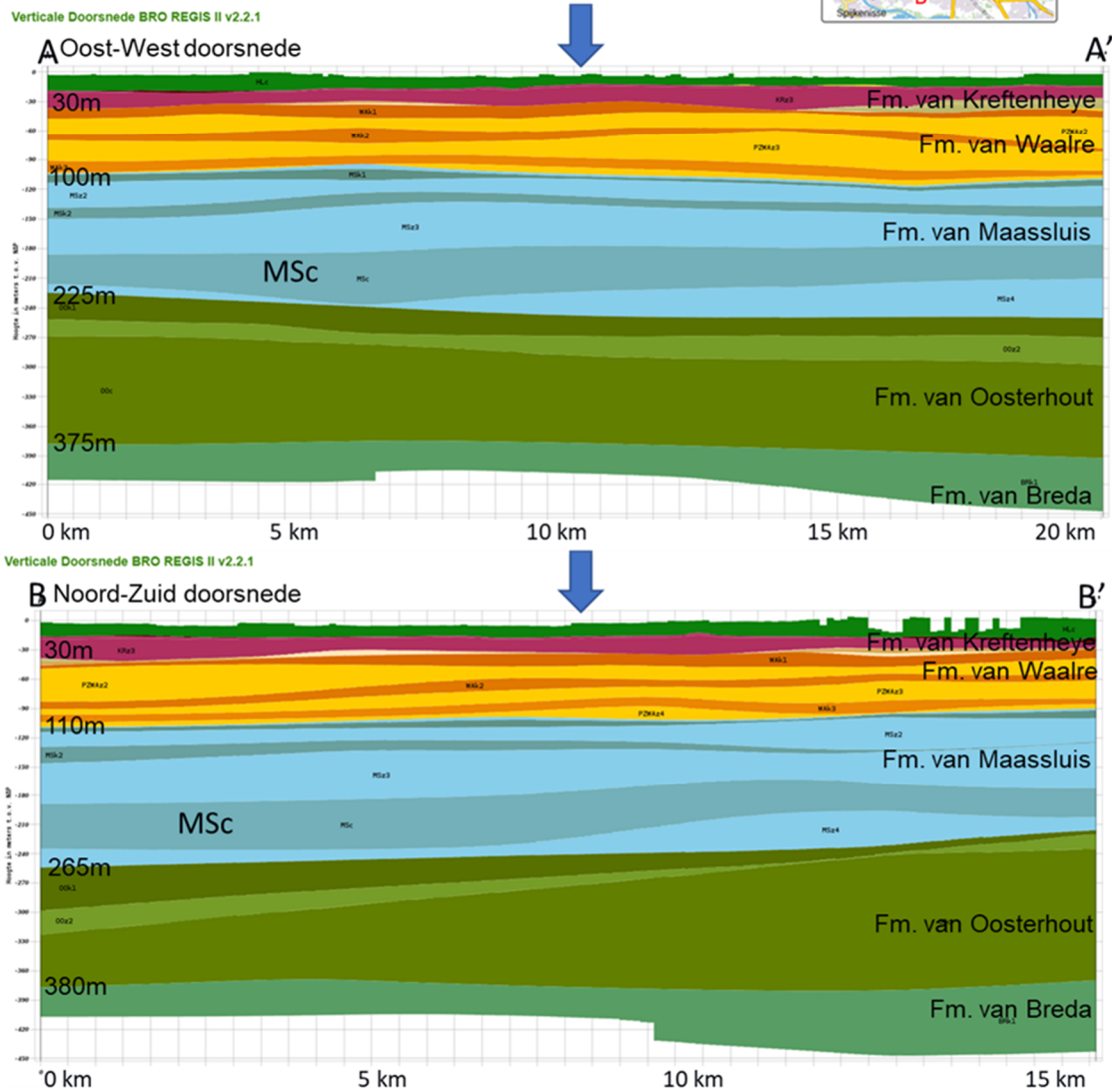
De **Formatie van Kreftenheye** bestaat uit fluviatiele afzettingen. Rondom Rotterdam bestaat de formatie uit grof zand op een diepte van 10-30 m-mv en bevat de formatie methaanrijk grondwater.

De **Formatie van Waalre** bestaat uit rivierafzettingen van de Rijn en ligt in de omgeving van Schiebroek op een diepte van ~30-100/110 m-mv. Dunne kleilagen wisselen de zandlagen van Waalre af in gestapelde fining-upward sequenties. De zandlagen zijn over het algemeen matig grof. De kleilagen zijn vaak sterkt zandig tot zwak siltig.

De **Formatie van Maassluis** bestaat uit fijn tot matig grove ondiepe mariene zanden afgewisseld met (al dan niet doorlopende) kleilagen of kleilagen en een dikkere 'complexe' laag (MSc in Figuur 4-4). Rondom de locatie Schiebroek ligt de formatie op een diepte van ongeveer 110-250 m-mv. De formatie wordt, door de gunstige combinatie van doorlatendheid, diepteligging en de afwisseling van zand en kleilagen, gezien als de meest interessante formatie voor HTO op deze locatie.

De **Formatie van Oosterhout** bestaat over het algemeen uit matig fijne tot fijne zanden en klei en zandige klei, uit een ondiep marien/deltaïsch afzettingsmilieu. Deze formatie is in Zuid-Holland over het algemeen kleiig/siltig ontwikkeld, met soms een zandlaag van hooguit enkele meters dikte bestaande uit fijn zand met glauconiet en schelpenresten. In de HTO proefboring van Rotterdam Nesseland (uitgevoerd tot 350 m diepte) is alleen klei (geen zand) aangetroffen in de Formatie van Oosterhout.

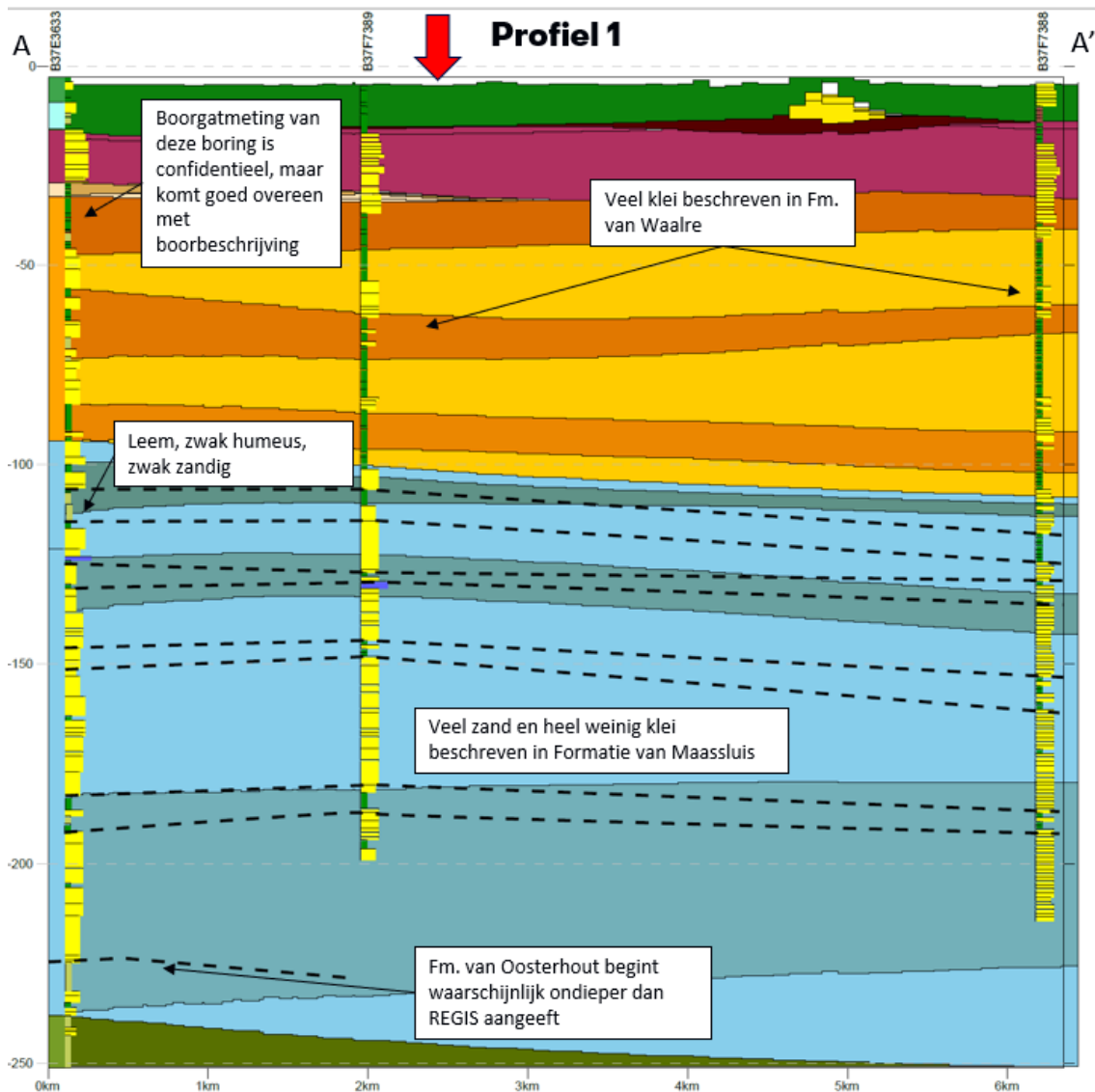
Onder de Formatie van Oosterhout bevindt zich de **Formatie van Breda**. Op basis van de beschikbare informatie is de verwachting dat deze formatie ook zeer kleiig is in deze omgeving. Daaronder ligt de **Rupel Formatie** (Boomse klei), een mariene kleilaag. Daaronder liggen formaties (zoals de **Formatie van Ommelanden**) uit het Krijt tijdperk, en deze bevatten krijtmergel en krijtgesteente (sedimentair gesteente bestaande uit kleine kalkskeletjes van algen en andere fauna).



Figuur 4-4 Oost-West en Noord-Zuid doorsnede van de ondergrond rondom Rotterdam Schiebroek (REGIS II v2.2.1). De blauwe pijl geeft het zoekgebied Schiebroek aan.

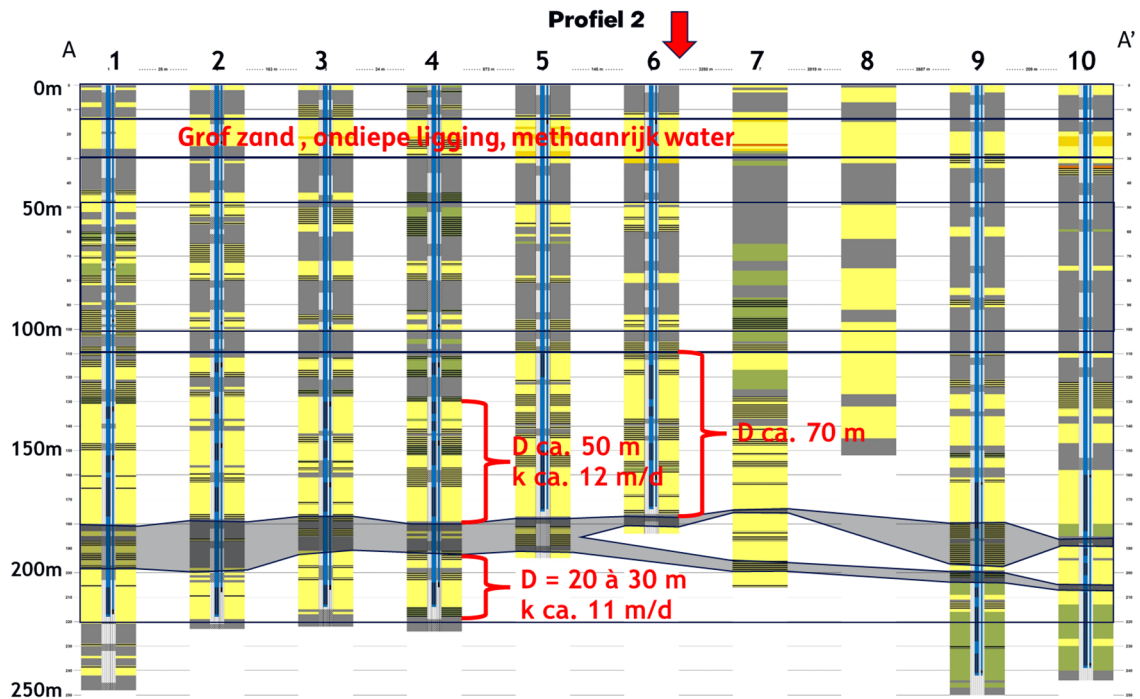
Figuur 4-5 laat profiel 1 uit Figuur 4-3 door het zoekgebied van Schiebroek zien. De voorkeurslocatie ligt iets ten oosten van de middelste boring. Uit de boorbeschrijvingen blijkt dat de Formatie van Kreftenheye heel zandig is. In de Formatie van Waalre komt veel klei voor in de rechter twee boringen. Volgens de boorbeschrijving van de linker boring is meer zand aangetroffen. De diepteligging en afwisseling van de zand en kleilagen zoals gedefinieerd in het REGIS model (achtergrond profiel in Figuur 4-5) komen slecht overeen met de boorbeschrijvingen, welke geen van allen zijn gebruikt voor REGIS vanwege het ontbreken van boorgatmetingen. De Formatie van Maassluis bestaat volgens alle drie de boorbeschrijvingen voor een belangrijk deel uit zand. Waar REGIS II v2.2 kleilagen van ~10-15 m dik in de Formatie van Maassluis laat zien, geven de boorbeschrijvingen een ander beeld. Kleilagen die door lijken te lopen tussen de boringen zijn ingetekend met een zwarte stippellijn, echter lijken deze dun.

De Formatie van Oosterhout begint op de linker boring op ongeveer 225 m diepte en bestaat vooral uit leem, en zeer fijn zand.

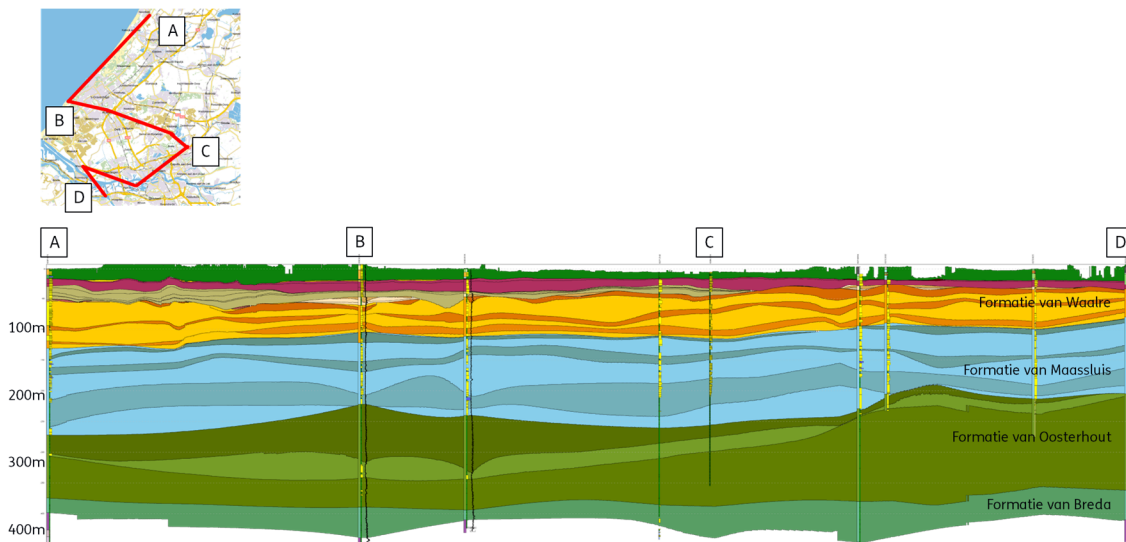


Figuur 4-5 Profiel 1. REGIS doorsnede van Oost naar West door het zoekgebied van Schiebroek. Drie boringen (alleen boorbeschrijvingen) uit DINOloket zijn op het profiel geplot. Formatie van Waalre in geel/oranje en Formatie van Maassluis in licht en donkerder blauw. De rode pijl geeft de voorkeurslocatie aan.

Profiel 2, ontwikkeld met de tool van IF Technology, is opgesteld aan de hand van 10 WKO boringen, waarin de beschreven kleibijmenging in zandlagen zichtbaar is gemaakt door een horizontale arcering toe te voegen, die uitgezoomd zichtbaar is als een aanpassing van de kleur van geel naar lichtgrijs (Figuur 4-6). De eerste zeven boringen komen qua ligging overeen met profiel 1, maar vanaf boring 8 loopt dit profiel naar het zuiden. Boring 5 komt overeen met de middelste boring in Figuur 4-5. Ook de boringen in dit profiel laten zien dat de Formatie van Waalre (~30-100 m-mv) zeer kleiig is ontwikkeld. De Formatie van Maassluis (~100-220 m-mv) bevat met name zand met enkele meters kleibijmenging. Rond 180-200 m-mv bevindt zich een (redelijk) continue kleilaag die naar het zuidoosten toe dunner wordt. De diepste boringen gaan tot 250 m-mv en laten vooral klei zien vanaf ~220 m-mv (in boringen 9 en 10 loopt het zand wat dieper door). Dit is waarschijnlijk de top van de Formatie van Oosterhout.



Figuur 4-6 Profiel 2. WKO boringen met zand (geel), klei (grijs) en kleibijmenging (horizontaal gestreept). In blauw in de boringen zijn de stijgbuizen van de putten en de stijgbuizen van de peilbuizen weergegeven, met in zwart het geplaatste bronfilter dan wel peilfilters (de peilbuizen en peilfilters zijn in de tekening uit praktische overwegingen gecombineerd in één buis, maar in de praktijk zijn dit allemaal separate buizen met elk hun eigen peilfilter). Enkele kleilagen zijn tussen de boringen geïnterpreteerd en doorgetrokken met een grijs vlak. De rode pijl geeft de ligging van de voorkeurslocatie aan.



Figuur 4-7 Profiel door Zuid-Holland. Van links naar rechts: van Noordwijk (A) naar Den Haag (B), Rotterdam Nesselande (C) en Rotterdam Botlek (D). Op de doorsnede staan de boorbeschrijvingen van diepe boringen tot de Oosterhout en Formatie van Breda in de omgeving weergegeven. De REGIS II v2.2 achtergrond laat een zandlaag zien in de Formatie van Oosterhout (lichtgroene laag), echter is deze in de boorbeschrijvingen niet, of slechts heel dun terug te zien.

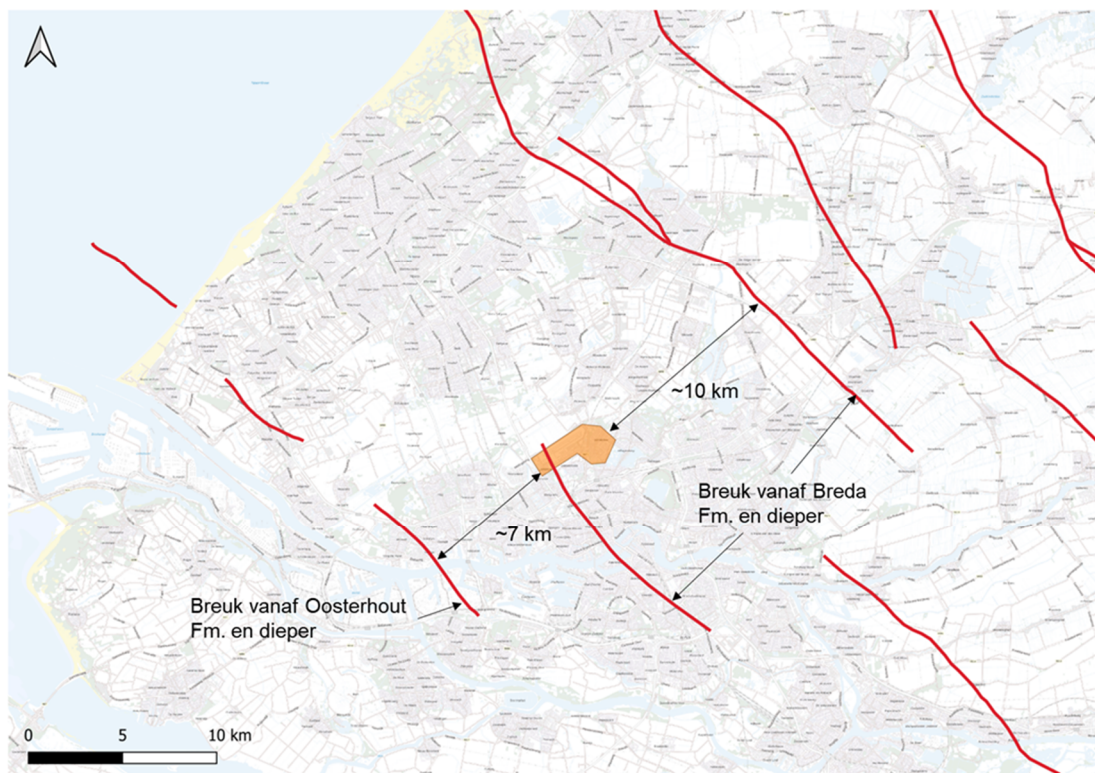
In Figuur 4-7 is een derde profiel te zien door heel Zuid-Holland, van Noordwijk naar Rotterdam Botlek, met boringen waarin de Formatie van Oosterhout en de Formatie van Breda zijn aangeboord. In een aantal boringen is enkele meters zand zichtbaar op verschillende dieptes in de

Formatie van Oosterhout, maar dit lijkt niet voldoende voor een goed HTO opslagpakket. Dit bleek ook uit de proefboring voor HTO Nesselande (einddiepte 350 m), waar in het diepte traject van de Formatie van Oosterhout alleen maar klei is aangetroffen. De Formatie van Breda lijkt in de boringen ook uit klei te bestaan. Dit is ook bevestigd in het WarmingUP project waarin de Formatie van Breda opnieuw is gekarteerd (Peters et al., 2022).

In de diepe BRK-02 boring, gelegen in het zoekgebied (Figuur 4-2), is op 442-475 m diepte de Formatie van Ommelanden geïdentificeerd. In de HTO proefboring in Delft (DAPGEO-02) is de Formatie van Ommelanden aangeboord met als doel om meer informatie over deze formatie te krijgen. Echter bevatte de formatie veel methaangas, waarna de boring is stopgezet. Er zijn daarom geen steekernen genomen en geen permeabiliteitstesten gedaan op deze formatie.

Breukenkaart

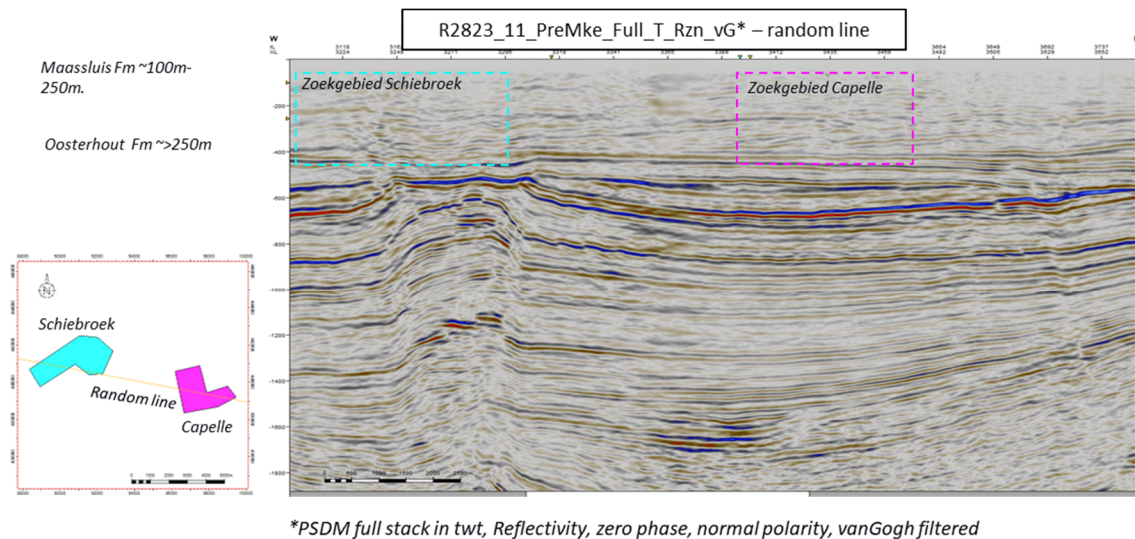
Er is gekeken naar de aanwezigheid van breuken in het zoekgebied. Het risico van het voorkomen van breuken in deze ongeconsolideerde sedimenten op de integriteit van het opslag systeem (lekkage van warm water naar bovenliggende aquifers) is niet goed bekend. In het WINDOW project is besproken dat een afstand van het HTO systeem tot een aanwezige breuk in het voorziene opslag pakket groter dan 1 km dient te zijn om risico's te mijden (Zwamborn et al., 2020; Dinkelman et al., 2020). Figuur 4-8 laat zien dat er een breuk loopt door het zoekgebied Schiebroek aan de ZW kant en twee breuken aanwezig zijn op 9 en 13 km afstand van het zoekgebied. Dit zijn diepe breuken vanaf de Formatie van Breda: ze lopen niet door in de ondieper gelegen formaties. In de studie van Hijma (2009) is aangegeven dat er een ondiepe breukzone loopt ten zuidwesten van het zoekgebied. Echter, deze bevindt zich ook op meer dan 1 km afstand van het zoekgebied.



Figuur 4-8 Breukenkaart v3.2. Deze breuken zijn in de REGIS modellering meegenomen en tonen alle breuken in het relevante diepte interval.

Seismiek

Er is gekeken naar de beschikbare 2D en 3D seismiek in de omgeving voor meer informatie over de continuïteit en dikte van de kleilagen in het relevante diepte interval. Zowel de data acquisitie als de processing zijn normaal gesproken toegespitst op de diepe ondergrond, voor de olie en gas productie. Voor de 2D seismiek is gekeken of (digitale) diepe seismische reflectie data gereprocessed (opnieuw geïnterpreteerd) kan worden voor de relatief ondiepe ondergrond. Helaas bleek zowel de 2D als de 3D seismiek van te lage kwaliteit in de ondiepe ondergrond. Zie Figuur 4-9 voor een voorbeeld van een 3D doorsnede uit de omgeving.



Figuur 4-9 Seismisch profiel door 3D seismische 'cube' (code R2823) door het zoekgebied van Schiebroek (blauwe stippelijijn in doorsnede). De datakwaliteit in het ondiepe deel is van lage kwaliteit.

Relevante aanpalende studies

Potentieelstudie RES regio Rotterdam Den Haag

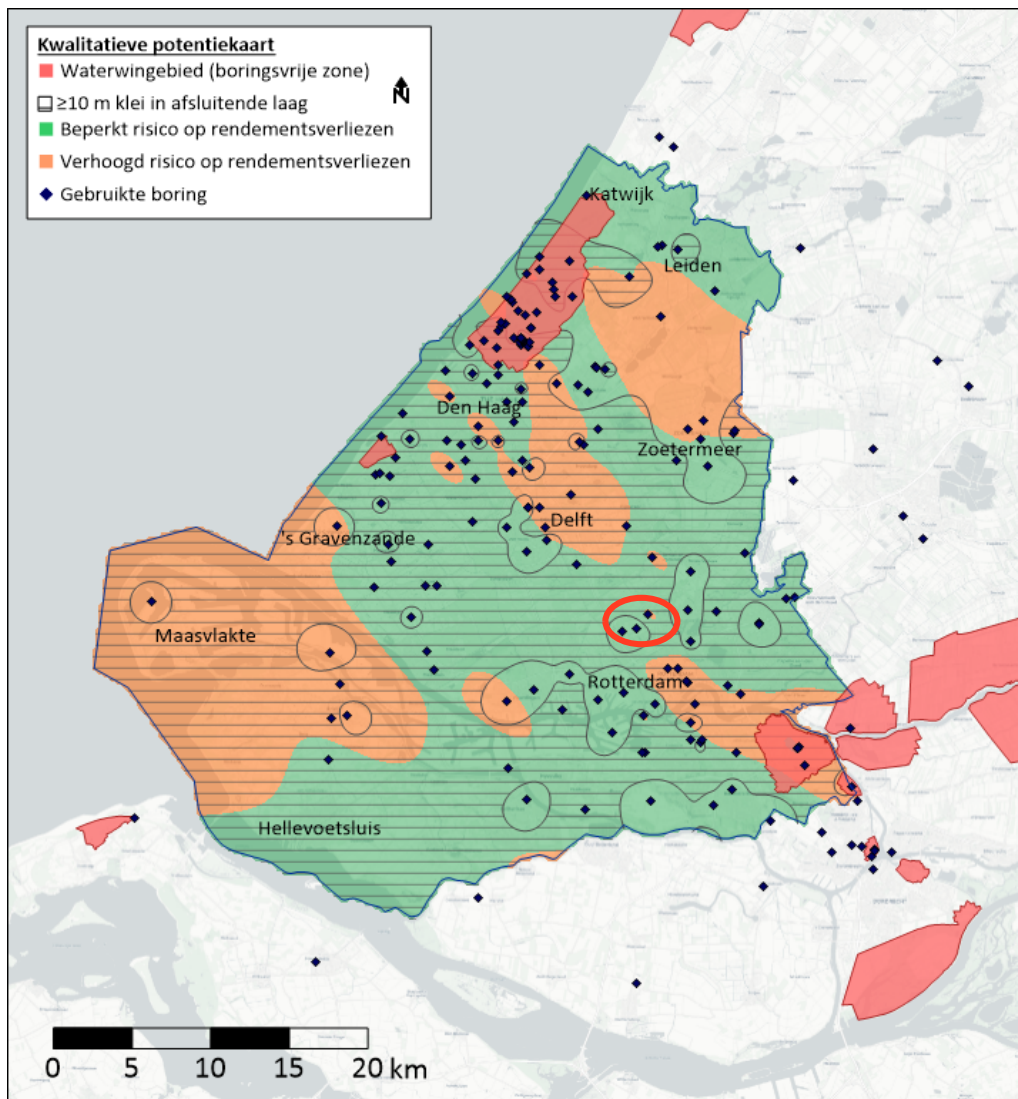
In de studie van Oerlemans et al. (2023) is gekeken naar het potentieel van de Formatie van Maassluis in de RES regio Rotterdam Den Haag. Hierbij zijn, naast de boringen uit de DINO database, ook de WKO boringen vanuit de interne (confidentiële) database van IF Technology meegenomen bij het inschatten van het potentieel voor HTO.

Over het Rotterdam gebied wordt gezegd:

“Het beeld uit de potentiekaart varieert rondom Rotterdam sterk: op een aantal plekken is de afsluitende kleilaag dik genoeg, maar dit geldt niet voor de gehele gemeente. Op plekken waar de kaart ‘gaten’ laat zien in de afsluitende kleilaag is de kleilaag niet volledig afwezig, maar heeft het een lager kleigehalte. Inzoomen op de boringen laat zien dat er tussen de 5 en 10 m klei boven de formatie wordt aangetroffen (overeenkomend met 25 – 50% klei in de lagen boven Maassluis). Aan de westkant van Rotterdam worden opslagpakketten gevonden met een optimale dikte, waardoor risico op rendementsverliezen kleiner lijken. Richting het oosten neemt de zanddikte toe en daarmee ook de debieten per doublet en het risico op grotere warmteverliezen. Boren is in het grootste gedeelte van de gemeente toegestaan, op een boringsvrije zone in het oosten na. Ook in Rotterdam geldt dat de variabiliteit en bijkomende onzekerheid voor de HTO-potentie aanleiding is om voor HTO-projecten meer locatie-specifiek onderzoek uit te

voeren.”

In Figuur 4-10 is te zien dat het gebied Schiebroek een beperkt risico op rendementsverliezen heeft, maar er is wel kans op afwezigheid van een goede afsluitende kleilaag (niet gearceerde gebied). De debietkaart in het rapport laat een haalbaar debiet van tussen de 150-250 m³/h zien, op basis van de NVOE onttrekkingsnorm en een doorlatendheid van 12 m/d.



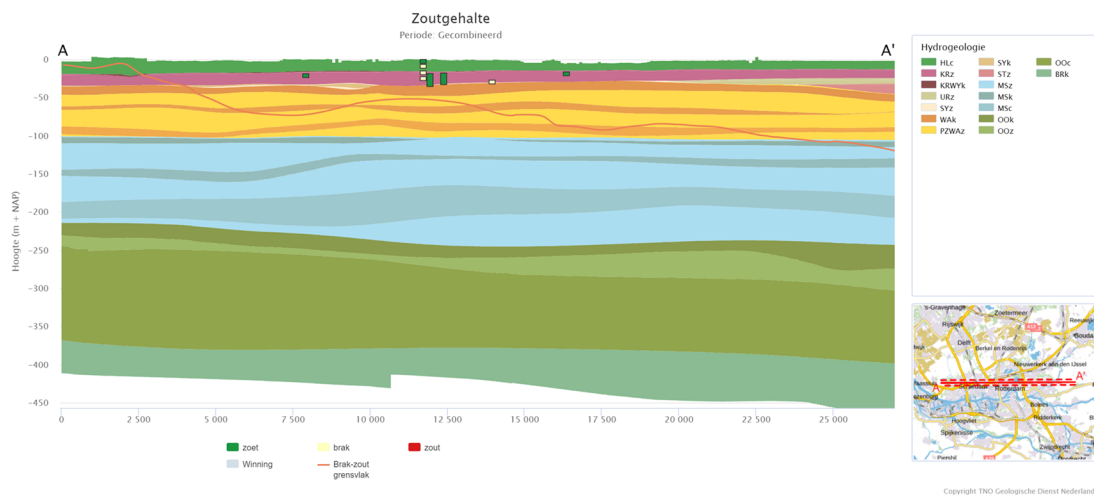
Figuur 4-10 Kwalitatieve potentiële kaart voor HTO in de Formatie van Maassluis. De rode cirkel geeft het zoekgebied van Schiebroek aan. Als er, gemeten vanaf de bovenkant van het opslagpakket, geen kleilaag in de boring werd aangetroffen die als onderliggende kleilaag kan dienen, dan loopt het opslagpakket net zo lang door totdat deze kleilaag wordt gevonden. Binnen de optimale range (15 – 30 m) scoort een opslagpakket groen op dit criterium, bij grotere diktes scoort deze oranje. Er zijn geen locaties gevonden waar de dikte van het opslagpakket kleiner was dan 15 m. In de niet gearceerde gebieden, bestaat de kans dat er geen, of een niet goed werkende afsluitende kleilaag aanwezig is. Bron: Oerlemans et al. (2023)

Juridische haalbaarheid

Zoet, brak en zout grondwater

Over het algemeen heeft het de voorkeur om HTO toe te passen in formaties met zout of brak grondwater, omdat die, in het kader van drinkwatervoorziening, van nature een lagere kwaliteit hebben vergeleken met zoet grondwater.

De overgang van zoet (< 150 mg Cl-/l) naar brak (150 - 1000 mg Cl-/l) grondwater bevindt zich op een diepte van ca. 10 m-mv. Figuur 4-11 laat de diepte van het brak-zout grensvlak in de regio zien op een Oost-West profiel. Het grensvlak bevindt zich op een diepte van ca. 30 tot 80 m-mv. Hier bevindt zich de Formatie van Waalre. Dat betekent dat het grondwater in de Formatie van Maassluis en op grotere dieptes zout (> 1000 mg Cl-/l) is.



Figuur 4-11 REGIS profiel door de regio met het brak-zout grensvlak. Het zoekgebied ligt ongeveer in het midden van het profiel. Van: www.grondwatertools.nl/gwatlas.

Behalve dat het water in het opslag pakket bij voorkeur niet zoet is is het ook niet wenselijk om HTO toe te passen in een zandlaag waarbinnen het zoutgehalte met de diepte flink toeneemt, omdat verzilting van grondwater tijdens pompactiviteit slechts is toegestaan wanneer dit niet tot benadeling van andere belangen leidt. Tijdens een proefboring zou het uitvoeren van chemische analyses op verschillende dieptes hier inzicht in kunnen geven.

Restrictiegebieden

Uit de WKOtool (wkotool.nl) blijkt dat de locatie voor het overgrote gedeelte niet is gelegen in een restrictiegebied voor bodemenergie zoals een boringsvrije zone of een grondwaterbeschermingsgebied. Wel ligt er in het westelijke gedeelte van het projectgebied een restrictiegebied ordening. In dit gebied is gesloten bodemenergie slechts toegestaan tot 80 m-mv. Dit vormt geen belemmering voor HTO. Wel dient in dit gebied de vergunning mogelijk aangevraagd te worden middels de uitgebreide procedure.

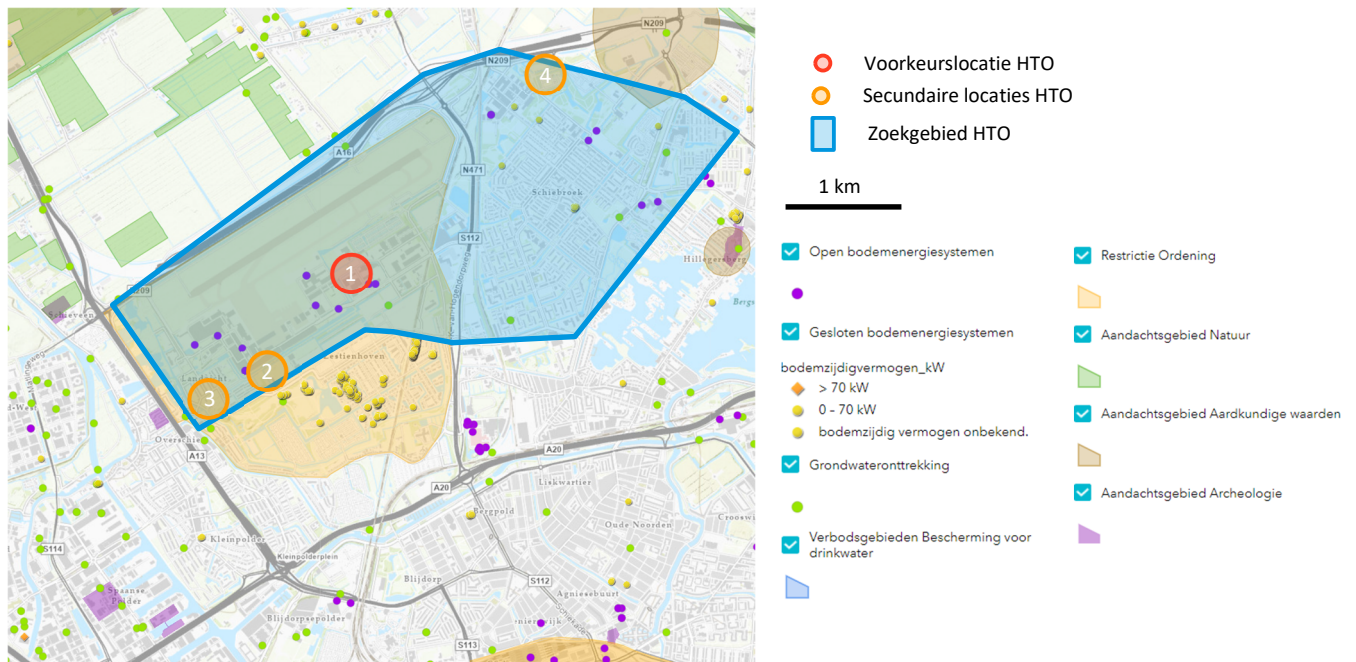
Aandachtsgebieden

Uit de WKOtool (wkotool.nl) blijkt dat de locatie voor het overgrote gedeelte niet is gelegen in een aandachtsgebied voor aardkundige of archeologische waarden. Wel ligt er een klein aandachtsgebied voor aardkundige waarden in het projectgebied. Bij voorkeur wordt het systeem buiten dit gebied gerealiseerd.

Omgevingsbelangen

Er zijn enkele grondwateronttrekkingen en open en gesloten bodemenergiesystemen gerealiseerd in het projectgebied. Hier dient rekening mee gehouden te worden bij de inpassing van een HTO-systeem. De werking en exacte dieptes en locaties van deze systemen moeten in een vervolgfase opgevraagd worden bij het bevoegd gezag.

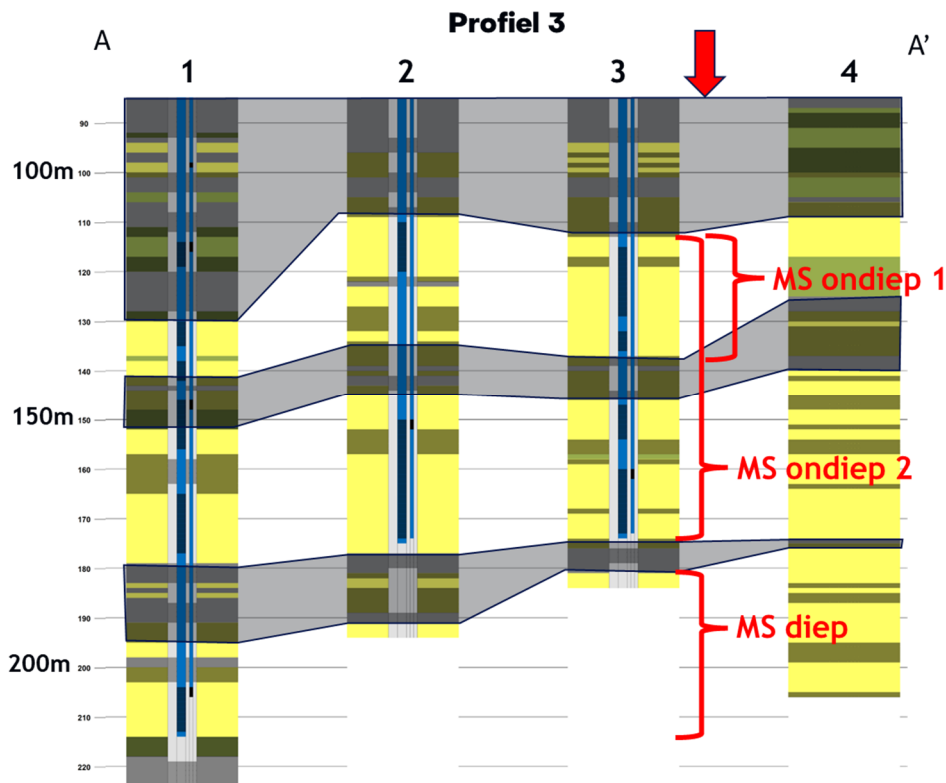
Voor alle locaties liggen er OBES systemen in de directe nabijheid, en in geval van locatie 4 ook een GBES systeem. De voorkeurslocatie (locatie 1) bevindt zich op een afstand van ca. 300 m t.o.v. een open bodemenergiesysteem. Deze afstand is relatief klein, waardoor mogelijk sprake is van ongewenste beïnvloeding. Een HTO op deze locatie wordt daardoor mogelijk niet vergund. Aangeraden wordt om de bronnen van de HTO op te schuiven naar het noordoosten, zodat deze op een afstand van ten minste 500 m t.o.v. de bestaande bodemenergiesystemen liggen. Dit is een eerste inschatting, of dit voldoende is om interferentie tegen te gaan dient verder uitgezocht te worden aan de hand van effectberekeningen en overleg met het bevoegd gezag voor de vergunningverlening.



Figuur 4-12 Omgevingsbelangen rondom de projectlocatie Schiebroek (rood). Locatie 1 is de primaire voorkeurslocatie, locaties 2, 3 en 4 zijn secundair. Bron: WKOtool.nl

4.1.4 Bodemopbouw en potentiële opslagpakketten op de voorkeurslocatie

Voor het beschrijven van de bodemopbouw en potentiële opslagpakketten op de voorkeurslocatie is een dwarsdoorsnede gemaakt door de WKO boringen dichtbij de voorkeurslocatie (Figuur 4-13). De boringen komen overeen met boringen 4 – 7 uit Figuur 4-6. Voor elk potentieel opslagpakket is gekeken in hoeverre het voldoet aan de gestelde criteria voor HTO toepassing, zie Tabel 4-2.



Figuur 4-13 Profiel 3. WKO boringen met zand (geel), klei (grijs) en kleibijmenging (lichtgrijs). In blauw zijn de stijpbuizen van de putten en de peilbuizen weergegeven, met in zwart de geplaatste bronfilters dan wel peilfilters (de peilbuizen en peilfilters zijn in de tekening uit praktische overwegingen gecombineerd in één buis, maar in de praktijk zijn dit allemaal separate buizen met elk hun eigen peilfilter). Enkele kleilagen zijn tussen de boringen geïnterpreteerd en doorgetrokken met grijs vlak. De doorsnede begint vanaf 85 m diepte. De rode pijl geeft de voorkeurslocatie aan. Drie mogelijke opslagpakketten zijn aangegeven in rood: Maassluis (MS) Formatie ondiep 1, 2 en diep.

De ondiepe ligging in combinatie met het grove zand en methaanrijke water maakt de Formatie van Kreftenheye ongeschikt voor HTO toepassing.

De Formatie van Waalre bestaat vooral uit klei en dunne kleiige zanden. Vanwege de afwezigheid van een zandlaag van voldoende dikte wordt deze formatie ongeschikt geacht voor de toepassing van HTO.

Binnen de Formatie van Maassluis zijn drie zandpakketten geïdentificeerd die mogelijk geschikt zijn voor het toepassen van HTO: MS ondiep 1 en 2 en MS diep. Elk zandpakket bevat ook enkele kleilagen/kleiige lagen of kleilenzen. De afsluitende kleilagen variëren in dikte en diepte. In Figuur 4-13 is tussen de vier boringen een interpretatie aangegeven, waarbij bepaalde kleilagen in het gebied tussen de boringen doorlopend aanwezig zijn. Ook in de boringen in Figuur 4-5 zijn deze kleilagen zichtbaar, echter lijken ze minder dik. In de omgeving Rotterdam volgt uit de beschikbare boorbeschrijvingen een sterke variatie in de aanwezigheid, dikte en diepteligging van de kleilagen/kleilenzen. Dit is ook te zien in de WKO boringen (Figuur 4-6) in de omgeving en bleek ook uit de HTO proefboring in Nesselande. Voor de twee ondiepe scenario's zou de klei onderin de Formatie van Waalre de afsluitende laag vormen. Zowel in Figuur 4-13 als in de boringen in Figuur 4-5 lijkt deze kleilaag voldoende dik en continu aanwezig. Voor het diepe scenario zou dit de onderste kleilaag in de Formatie van Maassluis zijn, waarvan de dikte en continuïteit onzeker is.

Vanwege de grote waarschijnlijkheid dat de Formaties van Oosterhout, Breda en Rupel geen (voldoende dikke) zandlaag bevatten vallen deze formaties af.

Van de krijt/kalk in de Formatie van Ommelanden, aanwezig op een diepte van ongeveer 442-475 m, is weinig bekend. De mogelijke aanwezigheid van gas, zoals aangetroffen in Delft, maakt opslag in deze formatie complex. Het doel van WarmingUP GOO is opschaling van HTO, terwijl opslag in de Ommelanden Formatie een nieuwe en onzekere onderzoeksvraag is, en dus een lager TRL. Om die reden is deze formatie in dit project niet geselecteerd als potentieel opslagpakket.

De Formatie van Maassluis wordt dus als enige potentieel geschikte formatie gezien, met voldoende dikke zandlagen voor de toepassing van HTO. Tabel 4-2 laat de ingevulde criteria tabel zien voor de drie mogelijke HTO opslagpakketten uit Figuur 4-13. Een rendement inschatting is gemaakt op basis van de methode uit Schout et al. (2014) voor verschillende varianten voor de infiltratietemperaturen in de bronnen. Hoewel in deze methode een aantal vereenvoudigende aannames zijn gedaan, waardoor de berekende rendementen slechts als een eerste indicatie moeten worden gezien, is deze methode wel bruikbaar voor een onderlinge vergelijking van de geschiktheid van de verschillende potentiële opslagpakketten en de invloed van de temperatuurniveaus van de bronnen.

De locatie Oost (zie Figuur 4-1) is als minder geschikt beoordeeld, vanwege de aanwezigheid van omgevingsbelangen, zie sectie 4.1.3. De locatie West biedt mogelijkheden, echter de locatie in het midden heeft ook vanuit de bovengrond de voorkeur. Naar aanleiding van de criteria tabel voor deze locatie (zie Tabel 4-2) zijn de volgende opmerkingen relevant:

- De twee ondiepe varianten zijn het meest positief beoordeeld. De dikte van de afsluitende kleilaag (onderkant van de Formatie van Waalre) is variabel in de nabije boringen en daardoor onzeker. Een proefboring zou hier zekerheid kunnen geven
- Variant 'ondiep 2' heeft een ingeschat doorlaatvermogen van 660 m²/d, waardoor grotere opdriving kan optreden en de efficiëntie omlaag gaat. De rendement inschatting geeft slechts beperkte rendement verlaging ten opzichte van de andere 2 varianten. De thermische berekeningen geven wellicht een betere inschatting van het effect van opdriving.
- De diepe variant heeft een dunne, en ook onzekere, afsluitende kleilaag aan de bovenkant, wat een risico vormt op warmteverliezen. De berekende rendementen van deze variant zijn relatief gezien positiever dan de ondiepe varianten, echter is in deze berekeningen uitgegaan van optimale afsluiting.
- De geschatte opslagrendementen zijn bij variant 2 (infiltratietemperaturen warme en lauwe bronnen respectievelijk 70 °C en 25 °C) het hoogst, gevolgd door variant 1 (70 °C en 30 °C) en het laagst bij variant 3 (85 °C en 40 °C). De volgende stap is het nauwkeuriger bepalen van de te verwachten opslagrendementen met behulp van thermische modelberekeningen. Merk op dat deze temperaturen afwijken van de uitgevoerde thermische rendementsberekeningen (zie hoofdstuk 5). Dit komt doordat lopende het project de uitgangspunten een aantal keren zijn aangepast.

Tabel 4-2 Ingevulde criteria tabel voor de mogelijke locaties in het westen, midden en oosten van het zoekgebied Schiebroek. MS = Formatie van Maassluis. Bij de rendementsinschatting zijn de volgende bovengrondse varianten voor netwerk aanvoer en retour temperatuur aangehouden: V1: 70°C/30°C, V2: 70°C/25°C en V3: 85°C/40°C.

Voorkeurslocatie bovengrond	West			Midden (voorkeur)			Oost		
	MS - ondiep 1	MS - ondiep 2	MS - diep	MS - ondiep 1	MS - ondiep 2	MS - diep	MS - ondiep 1	MS - ondiep 2	MS - ondiep 2 + diep
Naam opslag pakket									
Lithologie/opmerkingen		klei van ~140-145 m + kleibijmengingen			klei van 137-145 m. weerstand van kleilagen variëren	weerstand van kleilagen variëren	evenwel kleibijmenging?		kleilaag 2-5 m op 175 m-mv
Top Diepte (m-mv)	130	130	195	112	112	180	110	140	140
Bottom diepte (m-mv)	140	180	220	137	175	215	125	175	210
Totale dikte aquifer (m)	10	50	20	25	63	35	15	35	70
Effectieve dikte aquifer (m)	10	35	15	25	55	35	10	25	55
Doorlaatvermogen achtergrond T (m ² /d)	120	420	165	300	660	385	120	300	633
Hydraulische afsluiting (m)	10	10	5-20	8 (5-10)	8 (5-10)	5 (1-10)	1-5	5-15	5-15
Thermische afsluiting (m)	100	100	5-20	80	80	5 (1-10)	80	5-15	5-15
Dikte kleilaag onder aquifer (m)	1-10	5-20	>100	8 (5-10)	5 (1-10)	>100	5-15	2-10	>100
Rendement inschatting Var. 1/2 (%)	50 / 57 / 41 %	55 / 61 / 43 %	56 / 62 / 47 %	55 / 61 / 45 %	53 / 60 / 40 %	57 / 63 / 46 %	50 / 56 / 41 %	56 / 62 / 45 %	55 / 61 / 42 %
Omgevingsbelangen									
Beoogde opslag temperatuur (°C)	70-85	70-85	70-85	70-85	70-85	70-85	70-85	70-85	70-85
Filter lengte (m)	10	40	20	10-15	30	10-15	10	25	55
Kh (m/d)	12	12	11	12	12	11	12	12	11,5
Kv (m/d)	3,0	3,0	2,8	3,0	3,0	2,8	3,0	3,0	2,9
Totaal score									

5 Thermische rendementssimulaties

5.1 Opzet en uitgangspunten model

5.1.1 Beschrijving modelopzet

Om de potentie voor HTO op deze locatie te bepalen is op basis van de huidige informatie het thermische bronrendement berekend van de hete en warme bron voor een variatie aan ondergrond en operationele condities. Voor de simulaties is SEAWATv4 gebruikt met een aangepaste solver die zowel de niet-lineaire afhankelijkheid van dichtheid en viscositeit met temperatuur meeneemt. Het warmtetransport door advectie en convectie (stroming met het water mee), warmtegeleiding (conductie) en mechanische dispersie is beschouwd (Beernink et al., 2020). Eventueel warmtetransport door natuurlijke grondwaterstroming is in de simulaties niet meegenomen omdat het effect hiervan zeer klein wordt geacht omdat de ingeschatte jaarlijkse verplaatsing door natuurlijke achtergrondstroming in de potentiële opslagpakketten relatief klein is ten opzichte van de grootte van het jaarlijks opgeslagen thermische volume.

Deze simulaties houden rekening met de verliezen uit de opslag-aquifer naar de omliggende lagen in de ondergrond. In dit stadium zijn verliezen uit de putbuis door warmtegeleiding niet meegenomen. Voor deze relatief ondiepe systemen is dit effect relatief klein of te beperken ten opzichte van de verliezen uit het opslagpakket. Deze simulaties zijn niet gericht op het bepalen van de thermische effecten (verhoging temperatuur) in de omgeving van de opslag. De meegenomen ondergrondopbouw rondom het opslagpakket is dus beperkt tot een afsluitende laag van 20m, dit is voldoende dik om de warmteverliezen door deze lagen voor de gesimuleerde tijdsduur te berekenen. Voor de gehanteerde griddiscretisatie (celgroottes) voor de modellen van alle drie de verkenningslocaties is er een afweging gemaakt op basis van de benodigde rekentijd, het kunnen doorrekenen van meerdere scenario's per verkenningslocatie, en het beperken van de invloed van numerieke dispersie op de resultaten. Daarvoor is dicht bij de put een horizontale celgrootte van 0,25 m toegepast die vanaf 10 m radiale afstand geleidelijk toeneemt. De verticale celgrootte is gelijk voor het hele model en is 0.5m. Enkele ter controle uitgevoerde simulaties met een nog fijnere horizontale discretisatie (kleinere cellen over een grotere afstand) laten zien dat, ondanks de kleine celgroottes rond de put, numerieke dispersie nog merkbaar van invloed was op de berekende terugwinrendementen, maar dat de resulterende onderschatting van systeemrendementen toenam in de tijd tot maximaal 5-10% in jaar 10 ten opzichte van simulaties met een nog fijnere griddiscretisatie. Bij een eventuele verdere uitwerking van de te verwachten systeemprestaties kunnen deze meer gedetailleerdere locatie-specifieke modellen worden toegepast, wanneer er ook meer detailinformatie van de ondergrond in de modellen kan worden opgenomen (bijv. na uitvoeren proefboring).

De volgende uitgangspunten zijn toegepast in de modelopzet:

- Gebruik van axisymmetrische modellen: de hete en warme bron zijn los van elkaar gesimuleerd
- Simulatieperiode: er is een bedrijfsvoering van 10 jaar gesimuleerd
- Monitoringstijdstap van 1 dag: de flow en temperatuur is iedere dag berekend en gemonitord
- Modelschematisatie van de ondergrond: anisotrope ($K_h/K_v=4$) homogene aquifer(s) met 20m dikke afsluitende kleilagen aan de boven en onderkant van het opslagpakket, op basis van Figuur 4-13.

- Thermische eigenschappen van zand (aquifers) en klei (aquitards): constant en gelijk aan waarden gebruikt in WINDOW fase 1. De thermische eigenschappen van de afsluitende lagen aan de boven en onderkant zijn berekend als het gewogen gemiddelde van het aantal meters klei en zand in deze 20m (zie hoofdstuk 4.1).
- Plaatsing putfilter: In de gekozen aquifers is een volkomen putfilter gebruikt die 1m onder de bovenliggende kleilaag start en 1m boven de onderliggende kleilaag stopt.
- Flowverdeling over putfilter: vrije (automatische) verdeling a.d.h.v. variabele put druk en temperatuur van de aquifer. De onttrekkingstemperatuur van de put is berekend o.b.v. de temperatuur en het volume van het instromende water over de lengte van het putfilter (gewogen gemiddelde).

De volgende uitgangspunten zijn gevarieerd om het effect van variërende ondergrondkarakteristieken en operationele condities te bepalen (zie paragraaf 5.2 voor de gesimuleerde scenario's):

- Variatie parameters ondergrond
 - Dikte aquifer(s) [m]
 - K_h [m/d]
 - K_v [m/d]
- Variatie operationele parameters
 - Opslagvolume [m³/jaar]
 - Opslagtemperatuur (heet / warm) [°C]
 - Afkaptemperatuur [°C]

5.1.2 Berekening thermisch terugwinrendement

Deze modellen zijn beoordeeld op basis van de hoeveelheid energie die kan worden teruggewonnen na opslag. Voor een bron wordt het terugwinrendement berekend als:

$$\eta_{bron} = \frac{E_{uit}}{E_{in}} = \frac{\int V_{uit} \cdot (T_{uit} - T_{natuurlijk}) \cdot C_w \cdot \Delta t}{\int V_{in} \cdot (T_{in} - T_{natuurlijk}) \cdot C_w \cdot \Delta t} \quad (0.1)$$

Met $V_{uit/in}$ het debiet waarmee geïnjecteerd of onttrokken wordt, $T_{uit/in}$ de temperatuur uit/in de put, $T_{natuurlijk}$ de natuurlijke temperatuur van het grondwater (in dit geval 12 °C), C_w de volumetrische warmtecapaciteit van water en Δt de tijdstap (in dit geval 1 dag). Op basis van de simulaties is zowel het terugwinrendement van de hete en de warme bron berekend. De thermische verliezen tijdens opslag in de hete en de warme bron bepalen samen het terugwinrendement van het systeem, ook wel het systeemrendement genoemd, berekend als:

$$\eta_{systeem} = \frac{E_{leveren}}{E_{laden}} = \frac{\int V_{uit} \cdot (T_{heet} - T_{warm}) \cdot C_w \cdot \Delta t}{\int V_{in} \cdot (T_{heet} - T_{warm}) \cdot C_w \cdot \Delta t} \quad (0.2)$$

5.2 Scenario's

5.2.1 Ondergrond uitgangspunten

De HTO wordt beoogd op de voorkeurslocatie 'midden' (Tabel 4-2). Op deze locatie zijn twee potentiële filterstellingen gedefinieerd met een positieve score, en dus mogelijk geschikt voor HTO: MS ondiep 1, en MS ondiep 2. De bodemopbouw die is beschreven in hoofdstuk 4 wordt opgedeeld in een laagopbouw die 20m boven het opslagpakket begint. MS ondiep 1 heeft een 25m dikke aquifer (Tabel 5-1). MS ondiep 2 bestaat uit MS ondiep 1 + een extra zandlaag van 30m dikte (Tabel 5-2). MS ondiep 1 wordt gezien als de meest kansrijke opslag laag omdat deze laag ondieper is (goedkoper) en voor het te injecteren jaarlijkse volume tot een gunstigere geometrie van het thermische volume leidt om warmteverliezen door opdriving te minimaliseren (Beernink et al., 2024).

Tabel 5-1 Schematische weergave van de laagopbouw voor MS ondiep 1 en de daarbij horende horizontale (K_h) en verticale (K_v) doorlatendheden. De zwarte balk in kolom 2 is de diepte van het putfilter.

MS ondiep 1					
Laag	Top (m)	Onderkant (m)	K_h & K_v		Type laag
1	0	-20	0.01 & 0.0025		aquitard
2	-20	-45	12 & 3		aquifer
3	-45	-65	0.01 & 0.0025		aquitard

Tabel 5-2 Schematische weergave van de laagopbouw voor MS ondiep 2 (MS ondiep 1 + extra opslaglaag) en de daarbij horende horizontale en verticale doorlatendheden. De zwarte balken in kolom 2 geven de stelling van de putfilters weer.

MS ondiep 2					
Laag	Top (m)	Onderkant (m)	K_h & K_v		Type laag
1	0	-20	0.01 & 0.0025		aquitard
2	-20	-45	12 & 3		aquifer
3	-45	-55	0.01 & 0.0025		aquitard
4	-55	-85	12 & 3		aquifer
5	-85	-105	0.01 & 0.0025		aquitard

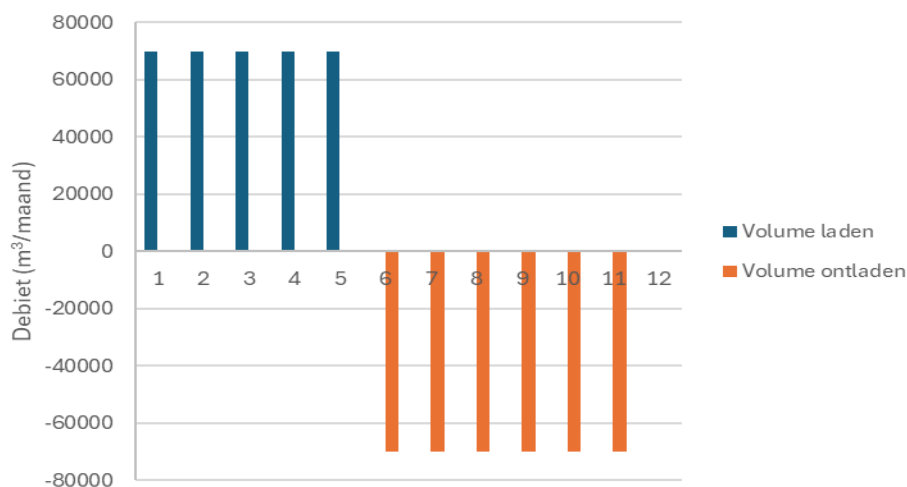
5.2.2 Operationele uitgangspunten

Qua operationele uitgangspunten zijn er vier varianten bepaald op basis van de informatie in hoofdstuk 2 en hoofdstuk 3 (Tabel 5-3). Het scenario met opslag op 76 °C en een laadvolume van 350,000 m³ per jaar is het base case scenario. De 3 andere scenario's variëren qua laadvolume (2 en 3) of opslagtemperatuur (4).

Tabel 5-3 Operationele scenario's, opgesteld op basis van de beschreven uitgangspunten in hoofdstuk 3

Afkorting		BC	Vmin	Vmax	GTmax
Scenario		Base Case	Volume min	Volume max	Geothermie maximaal
Locatie		Locatie 4	Locatie 4	Locatie 4	Locatie 4
Laden					
Injectietemperatuur hete bron	[°C]	76	76	76	86
Laadvolume	[m ³]	350,000	250,000	450,000	350,000
Duur laden	[m]	5	5	5	5
Leveren					
Afkaptemperatuur	[°C]	46	46	46	46
Injectietemperatuur lauwe bron	[°C]	36	36	36	36
Maximaal leverbolume	[m ³]	420,000	300,000	540,000	420,000
Duur leveren	[m]	6	6	6	6
Rustperiode					
Duur rustperiode	[m]	1	1	1	1

Voor de simulaties is een vast patroon en debiet gebruikt voor het laden (5 maanden) en ontladen (6 maanden) van de HTO. Voor de scenarios waar het maximale leverbolume wordt onttrokken (gedurende gehele ontladperiode wordt de afkaptemperatuur niet bereikt) is er 20% meer volume onttrokken uit de hete bron dan opgeslagen.



Figuur 5-1 Jaarlijks laad/ontladpatroon voor de thermische simulaties, gelijk aan 75000 m³/maand (97.2 m³/uur).

5.2.3 Resulterende scenario's

In totaal zijn er 6 simulaties uitgerekend om het thermische systeemrendement voor een variatie aan condities van de HTO locatie in kaart te brengen.

Base case scenario

Om de gevoeligheid van het thermische systeemrendement voor een variatie aan ondergrondparameters en operationele uitgangspunten inzichtelijk te maken is er een base case scenario opgesteld, en ten opzichte van dit scenario zijn uitgangspunten en parameters gevarieerd (Tabel 5-4). Het base case scenario is opgesteld uit de laagopbouw met de hoogste slagingskans

(MS ondiep 1, zie Tabel 5-1) en het meest relevante operationele scenario (Base case, zie Tabel 5-3).

Scenario's

Vijf aanvullende scenario's zijn berekend die qua ondergrond en/of operationele uitgangspunten van de base case afwijken. Scenario 2 en 3 zijn opgesteld met andere ondergrondcondities. In scenario 2 wordt de laagopbouw MS ondiep 2 gebruikt. In scenario 3 wordt een grotere anisotropie factor van 10 toegepast (t.o.v. 4) om het mogelijke effect van de kleiige laagjes die worden gevonden in deze laag op de verticale doorlatendheid mee te nemen (Figuur 4-13). Voor dit scenario is de verticale doorlatendheid van de zandlaag dus 1.2 m/d in plaats van 3 m/d. Voor scenario 4-6 zijn de variërende operationele uitgangspunten gebruikt die zijn beschreven in Tabel 5-3 (kleiner/groter laadvolume of hogere opslagtemperatuur) in combinatie met de ondergrondcondities die zijn toegepast in de base case (MS ondiep 1).

Tabel 5-4 Overzicht van gesimuleerde scenario's: de base case (1) en de vijf aanvullende varianten (2-6).

Nr.	Scenario naam	Ondergrond	Operationeel
1	Base case	MS ondiep 1	Base case
2	Extra filter	MS ondiep 2	Base case
3	Anisotropie 10	MS ondiep 1 [anisotropie = 10]	Base case
4	Vmin	MS ondiep 1	Vmin
5	Vmax	MS ondiep 1	Vmax
6	GTmax	MS ondiep 1	GTmax

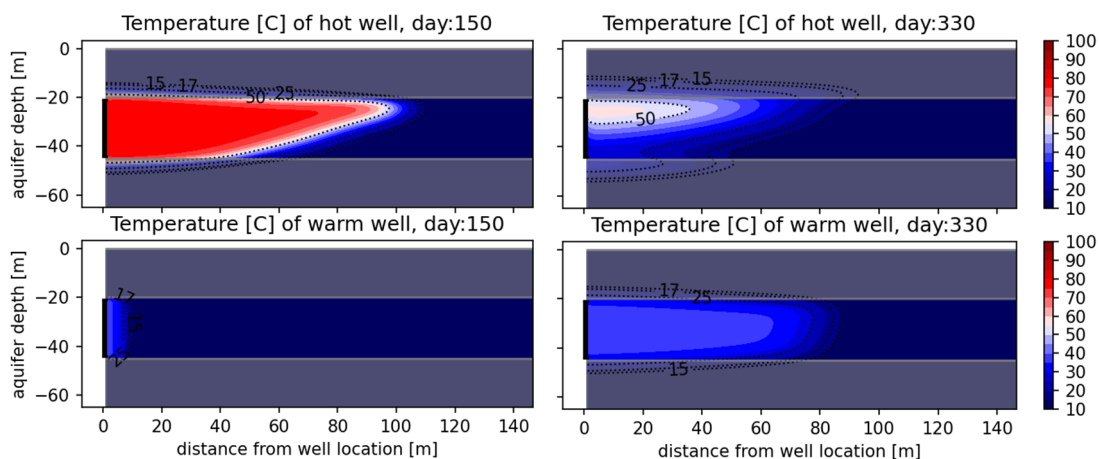
5.3 Resultaten

5.3.1 Base case

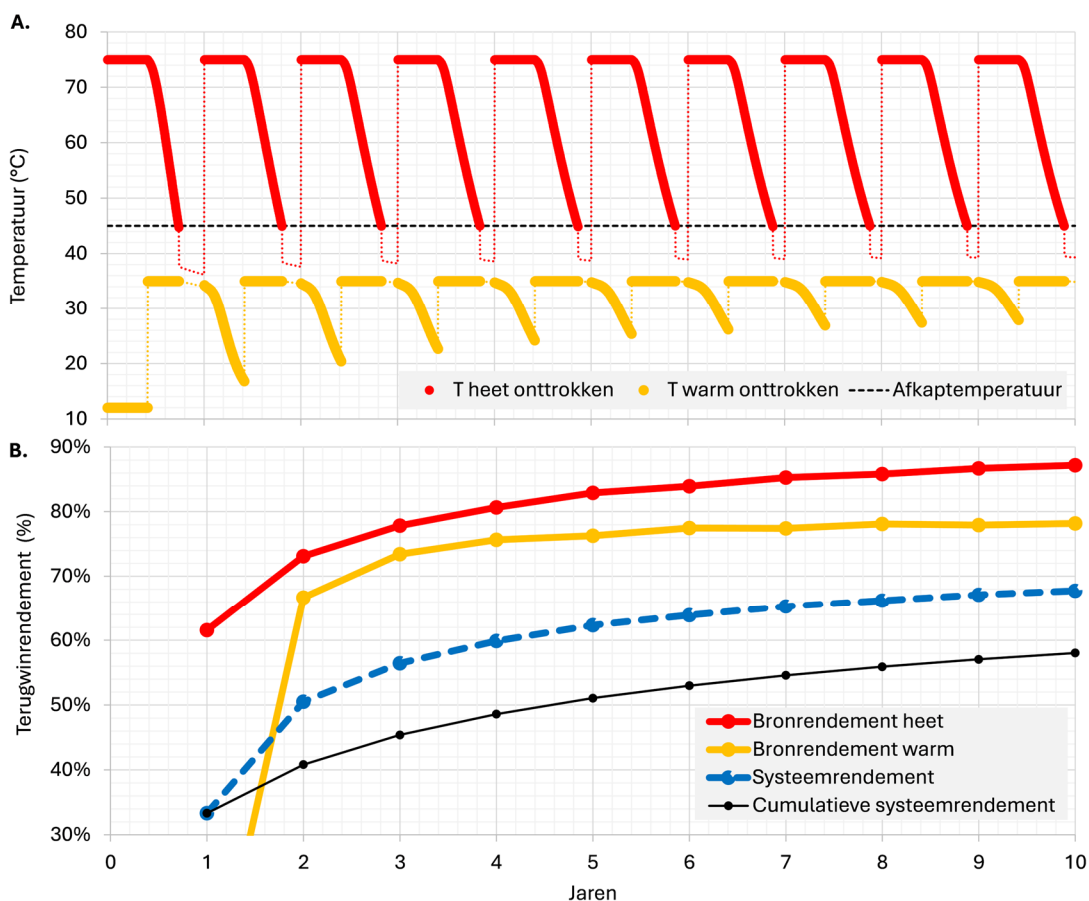
Voor het base case scenario is warmte opgeslagen in de hete bron met een temperatuur van 76 °C gedurende het laadseizoen van 150 dagen (Figuur 5-2). Tijdens ontladen is deze warmte onttrokken en het afgekoelde water opgeslagen in de warme bron op een temperatuur van 36 °C. Op het moment dat de afkaptemperatuur (46 °C) is bereikt stopt het ontladen (Figuur 5-3A). De achtergebleven warmte wordt in het volgende jaar deels weer teruggewonnen met als gevolg dat de temperatuurafname in zowel de hete en de warme bron ieder opvolgend jaar afneemt. Daardoor neemt ook de tijd totdat de afkaptemperatuur wordt bereikt toe, van 116 dagen in het eerste jaar tot 170 dagen in jaar 10, met als resultaat dat het systeem vanaf het vierde jaar meer volume onttrekt dan er wordt opgeslagen (Figuur 5-4). Samen resulteert dit erin dat de efficiëntie van het systeem met de jaren toeneemt van 32% in het eerste jaar tot 67% in het tiende jaar (Figuur 5-3B). Op basis van het jaarlijkse systeemrendement is het cumulatieve systeemrendement berekend dat laat zien hoe efficiënt het systeem cumulatief is sinds de ingebruikname van het systeem. In jaar tien is het cumulatieve systeemrendement 57% voor de base case.

(A)

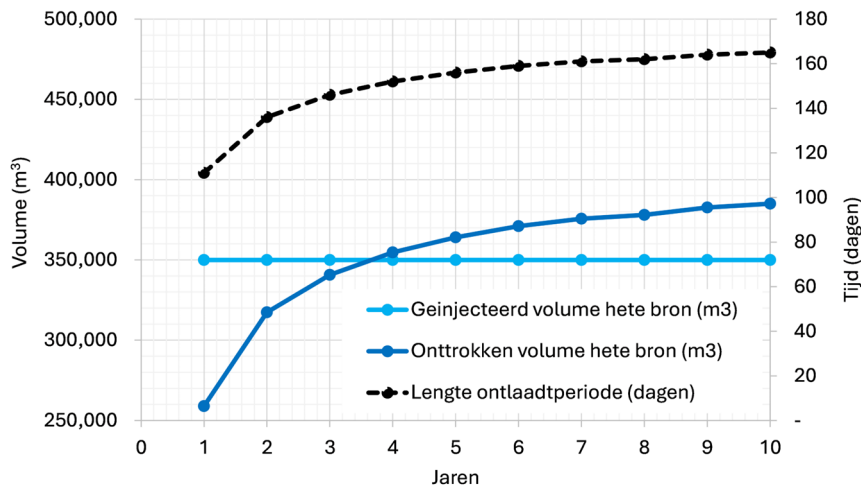
(B)



Figuur 5-2 Doorsnede van de temperatuurverdeling bij de hete bron (boven) en de warme bron (onder) gesimuleerd met het axisymmetrische model. A. Dag 150 (eind van laadperiode en start van ontladperiode) en B. dag 330 (eind van ontladperiode).



Figuur 5-3 Resultaten voor het base case scenario. A. De afkapt temperatuur en de temperatuur onttrokken uit de hete en warme bron. Tijdens stilstand (na bereiken afkapt temperatuur) is de gemiddelde temperatuur in het filtertraject van de bronnen gegeven (dunne stippellijn). B. Het jaarlijkse terugwinrendement van de hete bron, de warme bron, en het daaruit resulterende systeemrendement.



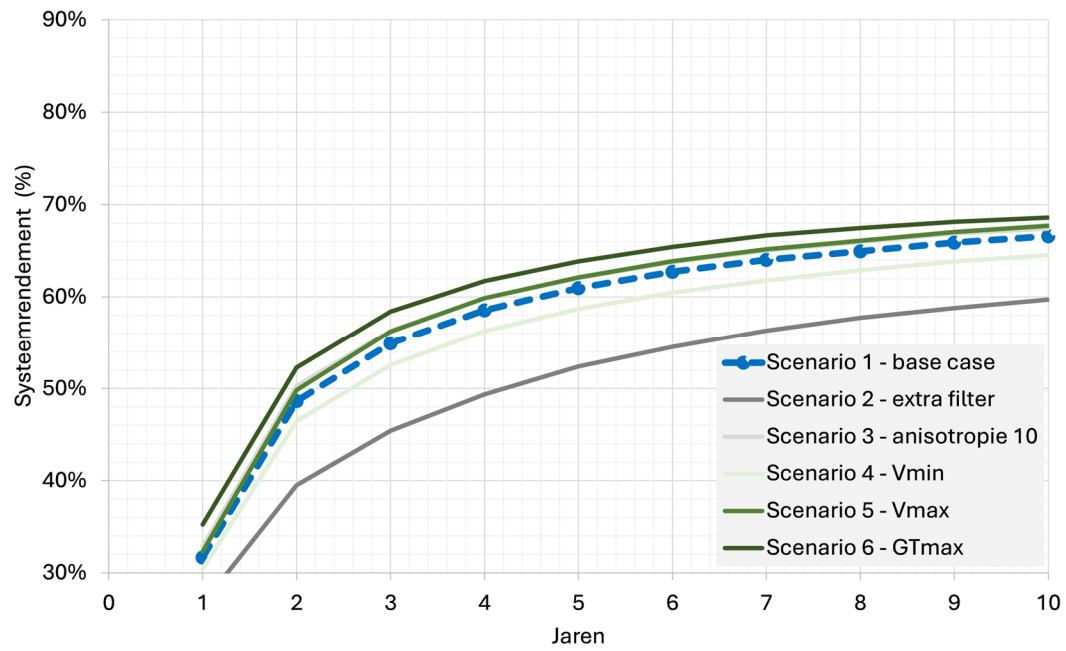
Figuur 5-4 Resultaten voor het base case scenario. Het jaarlijkse opgeslagen volume in de hete bron, de lengte van het ontladseizoen (tijd tot de afkaptemperatuur wordt bereikt) en de daaruit volgende totale onttrokken volume uit de hete bron.

5.3.2 Scenario's

De base case en de vijf gedefinieerde scenario's hebben in jaar tien een systeemrendement variërend tussen de 60% en 69%. De base case en scenario 3 t/m 6 liggen dicht bij elkaar. Een kleinere verticale doorlatendheid van het opslagpakket (aanname anisotropie 10 i.p.v. 4) zorgt voor een beperkte toename van het systeemrendement met 2% ten opzichte van de base case (scenario 3). De gevoeligheid van het HTO systeem voor een kleiner (scenario 4) of groter (scenario 5) opslagvolume is ook beperkt: -3% / +2% in jaar 10 ten opzichte van de base case.

In scenario 6 is uitgegaan van een hogere opslagtemperatuur van 86 °C in de hete bron, wat leidt tot een 10 °C groter temperatuurverschil met de warme bron ($\Delta T = 50$ °C) en een grotere acceptabele temperatuurafname tot de afkaptemperatuur wordt bereikt (ΔT 40 i.p.v. 30 °C). In dit scenario kan hierdoor het gehele jaar warmte worden geleverd met een temperatuur boven de afkaptemperatuur en kan er met een systeemrendement van 69% bijna 3 MWh per jaar meer warmte worden onttrokken dan in de base case in jaar 10.

Ten opzichte van de base case is het grootste effect op het systeemrendement te zien voor scenario 2 (-7%). In dit scenario is er extra filter gesteld in een 30m dikke aquifer gelegen onder een 10m dikke kleilaag onder het ondiepe opslagpakket (MS ondiep 2). Doordat het volume in dit scenario wordt opgeslagen in totaal 55m aquifer, t.o.v. 25m aquifer in de base case, is de thermische straal die ontstaat na de opslagperiode kleiner. Dit maakt het opslagvolume kwetsbaarder voor warmteverliezen door opdrijving met als gevolg dat het rendement in vooral de hete bron kleiner is t.o.v. de base case, met als resultaat een systeemrendement van 60% in jaar 10.



Figuur 5-5 Vergelijking van het systeemrendement van de verschillende scenario's van jaar 1 t/m 10. Scenario 3 (grijze lijn) valt samen met scenario 5 (groene lijn).

6 Energetische en duurzaamheidsanalyses

6.1 Modelleren en analyses

Voor het energieconcept zoals beschreven in hoofdstuk 3 is een model opgesteld. In dit model worden op uurbasis de thermische en elektrische vermogens, temperaturen en debieten door de verschillende componenten bepaald. In dit model is geen directe koppeling met een ondergronds model, maar is een andere werkwijze gevolgd. In hoofdstuk 5 staat een beschrijving van uitgevoerde thermische rendementssimulaties. De resultaten van deze thermische rendementssimulaties zijn deels in een database gestopt (zie paragraaf 6.2). Het energetisch model gebruikt deze database om het temperatuursverloop van de bronnen in te schatten door middel van interpolatie op basis van opslagvolume.

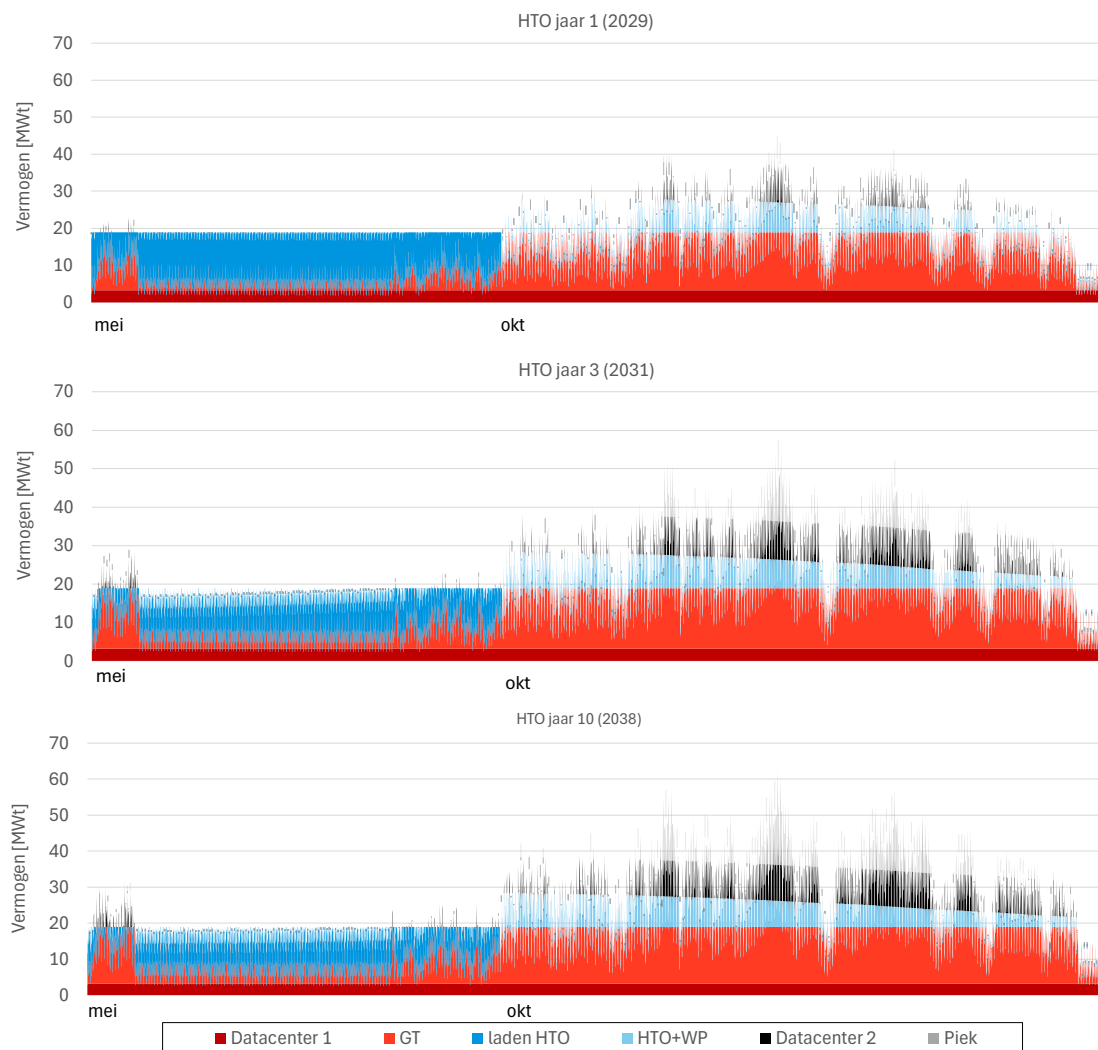
6.2 Inzet HTO Base Case

Voor de base case (paragraaf 3.1) is de inzet van de HTO bepaald. Hierbij is gebruik gemaakt van de resultaten uit de thermische rendementssimulaties (zie hoofdstuk 5) en de uitgangspunten (zie hoofdstuk 2). De thermische rendementssimulaties die gebruikt zijn voor de database, zijn 1: Base Case, 2: Minimale volume en 3: Maximale volume.

Het temperatuursverloop van de bronnen is ingeschat op basis van data uit de database. Hierbij wordt geïnterpoleerd op basis van opslagvolume. In deze studie is niet geëxtrapoleerd. Wanneer het opslagvolume groter is dan de simulatie met maximale volume (5), is gerekend met een systeemrendement gelijk aan de simulatie met maximale opslagvolume (5). In principe neemt het systeemrendement toe bij grotere opslagvolumes. Dit effect is echter beperkt en dempt ook steeds verder uit bij groter wordende opslagvolumes. In deze studie is het effect hiervan niet meegenomen.

De thermische rendementssimulaties zijn uitgevoerd voor een periode van 10 jaar. Te zien is dat met elk jaar het systeemrendement toeneemt, maar dat de toename afvlakt. Aangenomen is dat voor de jaren erna (11 tot en met 15) het systeemrendement van de HTO gelijk is aan jaar 10.

De inzet is voor de base cases grafisch weergegeven in Figuur 6.1. De weergegeven resultaten zijn voor de HTO jaren 1, 3 en 10. De hoeveelheden geproduceerde warmte zijn ook samengevat in Tabel 6-1.



Figuur 6.1 | Invulling van de warmtevraag en inzet van de HTO in jaar 1, 3 en 10. Merk op dat de HTO altijd op minimaal 20% deellast draait. Bij lage warmtevraag drukt in dat geval de HTO de geothermie deels weg. Dit is te zien aan de lichtblauwe korte lijntjes bovenop het rode vlak. Het wegdrukken van geothermie is beperkt (zie Tabel 6-3).

Op basis van de beschikbare bronnen en de groei van de warmtevraag is bepaald dat de HTO ingezet kan worden vanaf 2029. Voor die tijd is de warmtevraag beperkt en kan deze (nagenoeg) volledig worden ingevuld door datacenter 1 en het geothermiesysteem.

De grafieken in Figuur 6.1 beginnen met de laadperiode. Deze periode loopt van mei tot en met september. In deze periode wordt de benodigde warmte geleverd aan de warmtenetten door datacenter 1 en het geothermiesysteem. De resterende geothermische warmte wordt zoveel mogelijk op directe wijze via warmtewisselaars opgeslagen in de HTO. De hoeveelheid die kan worden opgeslagen wordt begrensd door het maximale debiet van de HTO tijdens laden. In het eerste jaar wordt bijna continue het hoogste laadvermogen bereikt. Dit komt doordat de bodem nog een natuurlijke grondwatertemperatuur heeft, waardoor het temperatuurverschil bij laden maximaal is. In latere jaren ligt het laadvermogen vaak lager. Dit komt doordat de temperatuur van de lauwe bron steeds verder toeneemt, waardoor bij het maximale HTO laaddebiet minder vermogen kan worden opgeslagen.

Van oktober tot en met april wordt warmte geleverd vanuit de HTO. In deze periode wordt eerst warmte geleverd door datacenter 1, gevolgd door de geothermie in combinatie met een

warmtepomp. Daarna wordt warmte geleverd door de HTO. Uitgangspunt hierbij is dat de HTO tenminste altijd op 20% draait. Dit is de minimale deellast van de HTO. Het kan hierbij voorkomen dat de HTO op momenten met beperkte warmtevraag daarmee de levering van geothermische warmte er (beperkt) uitdrukt. Het kan ook voorkomen dat zowel geothermie als de HTO op minder dan 20% deellast zouden moeten draaien. Op dat moment stijgt de injectietemperatuur in de lauwe bron van de HTO. Dit komt echter zeer sporadisch voor. Mocht dit in de praktijk vaker optreden, dan zou dit ondervangen kunnen worden door het toevoegen van een buffer. Door de jaren heen neemt de absolute hoeveelheid warmte die geleverd wordt door de HTO met warmtepomp steeds verder toe. Deels komt dit door de stijgende warmtevraag in het warmtenet en deels doordat het rendement van het HTO-systeem steeds meer toeneemt. De aandeel in warmtelevering van de HTO ligt door de jaren heen rond de 13%.

Tabel 6-1 | Hoeveelheden geproduceerde warmte in jaar 1, 3 en 10.

	HTO jaar 1 (2029)		HTO jaar 3 (2031)		HTO jaar 10 (2039)	
	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel
	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]
Datacenter 1	28.000	25%	28.000	20%	28.000	18%
Geothermie	67.000	61%	83.000	60%	89.000	58%
HTO + WP	13.000	12%	18.000	13%	20.000	13%
Datacenter 2	2.000	2%	9.000	6%	13.000	8%
Piek	-	0%	2.000	1%	3.000	2%
Totaal	110.000	100%	140.000	100%	154.000	100%

Vergelijking met systeem zonder HTO (referentie case)

Qua inzet van bronnen is ook een vergelijking gemaakt voor een situatie zonder HTO. In deze situatie wordt, na warmtelevering door datacenter 1, warmte zoveel mogelijk geleverd door het geothermiesysteem. De bijbehorende hoeveelheden geproduceerde warmte voor jaren 1, 3 en 10 zijn weergegeven in Tabel 6-2.

Tabel 6-2 | Hoeveelheden geproduceerde warmte in jaar 1, 3 en 10 voor concept zonder HTO (referentie case).

	2029		2031		2039	
	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel
	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]
Datacenter 1	28.000	25%	28.000	20%	28.000	18%
Geothermie	72.000	66%	86.000	62%	92.000	60%
Datacenter 2	9.000	8%	19.000	14%	24.000	16%
Piek	1.000	1%	6.000	4%	10.000	6%
Totaal	110.000	100%	140.000	100%	154.000	100%

Beide situaties (base case en referentie case) zijn met elkaar vergeleken. Hierbij is gekeken naar de omvang van de piek en naar de hoeveelheid verdringing van warmtelevering door geothermie aan het warmtenet. Doordat de HTO een minimale deellast heeft van 20%, wordt de warmtelevering door geothermie aan het warmtenet deels verdrongen. Merk op dat de warmtelevering door de HTO uiteindelijk ook als geothermische warmtelevering gezien kan worden. Alleen is dit levering op indirecte wijze, en gaat gedurende opslag een deel van de opgeslagen warmte verloren.

Door de inzet van HTO daalt de inzet van de piekvoorziening. In het eerste jaar is de relatieve daling bijna 100% maar in absolute zin beperkt tot 1% (van 1 naar 0%). In de loop van de tijd is de relatieve daling 66% en in absolute zin 4% (van 6 naar 2%). De hoeveelheid geleverde duurzame

warmte (geothermie met warmtepomp en HTO met warmtepomp) neemt toe door het toevoegen van een HTO-systeem, maar het effect is in absolute zin beperkt. Dit komt door de aanwezigheid van de vele duurzame bronnen (twee datacenters en een geothermiesysteem).

De verdringing van de levering van geothermische warmte met een warmtepomp aan het warmtenet is in het eerste jaar beperkt tot 7% relatief en 5% absoluut. Op termijn is de verdringing beperkt tot 3% relatief en absoluut 2%. De HTO heeft een beperkte invloed op de directe warmtelevering van geothermie met warmtepomp aan het warmtenet.

Tabel 6-3 | vergelijking base case en referentie case in jaar 1, 3 en 10.

	2029		2031		2039	
	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel
	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]
Inzet piek referentie case	1.000	1%	6.000	4%	10.000	6%
Inzet piek base case	-	0%	2.000	1%	3.000	2%
Reductie inzet piek absoluut	1.000	1%	4.000	3%	7.000	4%
Reductie inzet piek relatief		94%		74%		66%
Geothermie referentie case	72.000	66%	86.000	62%	92.000	60%
Geothermie base case	67.000	61%	83.000	60%	89.000	58%
Verdringing geothermie abs.	5.000	5%	3.000	2%	3.000	2%
Verdringing geothermie rel.		7%		4%		3%

6.3 Dimensionering Base Case

Vanuit de inzetberekeningen van de HTO volgt de dimensionering van de HTO. De waarden zijn samengevat in Tabel 6-4 voor de base case.

Tabel 6-4 | Dimensionering HTO voor de base case.

Onderdeel		Base Case
Max. debiet laden	[m ³ /h]	200
Max. debiet leveren	[m ³ /h]	200
Ontwerpdebiet	[m ³ /h]	200
Aantal hete bronnen	[-]	2
Aantal lauwe bronnen	[-]	2
Diepte bronnen	[m-mv]	137
Afstand bronclusters	[m]	250
Capaciteit warmtepomp	[MW _{th}]	2,8

Op basis van de bodemeigenschappen is ingeschat dat per bron circa 100 m³/h gehaald kan worden. Hierbij is rekening gehouden met de maximale injectiedruk en onttrekkingsnorm. Bij de onttrekkingsnorm is aangenomen dat de deze met maximaal factor twee mag worden overschreden. Bij het bepalen van de inzet van de HTO (zie vorige paragraaf) is gekeken naar een HTO systeem van 200 m³/h en van 300 m³/h. In deze situatie sluit een debiet van 200 m³/h beter aan bij het vraag- en aanbodprofiel. Met name de geothermiebron heeft te weinig vermogen om een HTO van 300 m³/h effectief te kunnen laden.

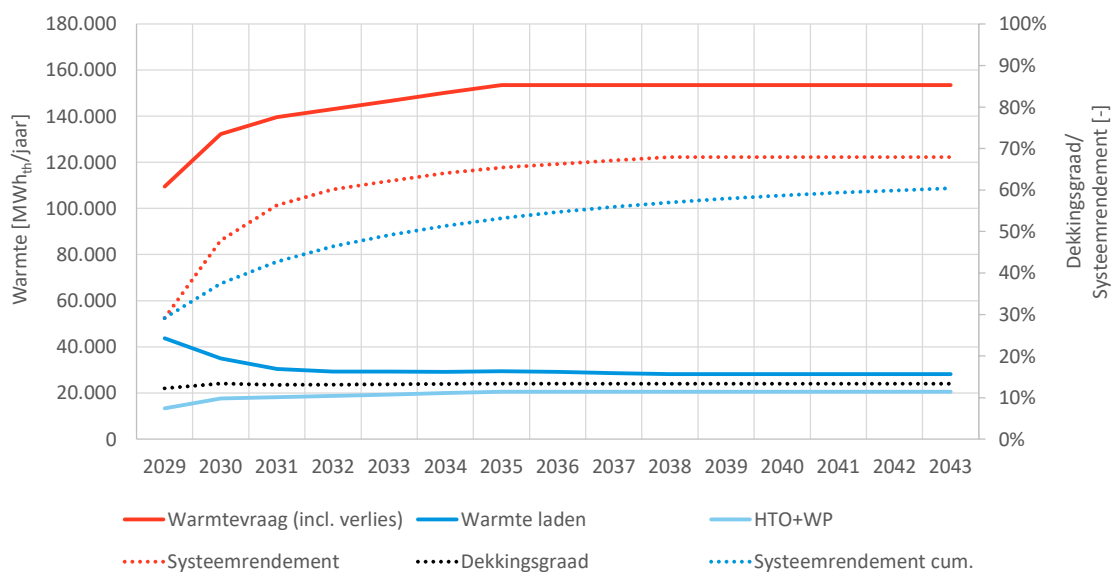
6.4 Energetische en duurzaamheidsanalyse Base Case

Voor de base case is een energetische analyse uitgevoerd voor de HTO jaren 1 tot en met 15. In de energetische analyse is op basis van de temperaturen in de hete en lauwe bron bepaald hoeveel warmte kan worden opgeslagen in de HTO en hoeveel warmte kan worden geleverd (inclusief de warmtepomp). Het temperatuurverloop van de bronnen is ingeschat op basis van de thermische rendementssimulaties. Op basis van de geleverde en opgeslagen hoeveelheden warmte is per component het elektriciteitsverbruik berekend.

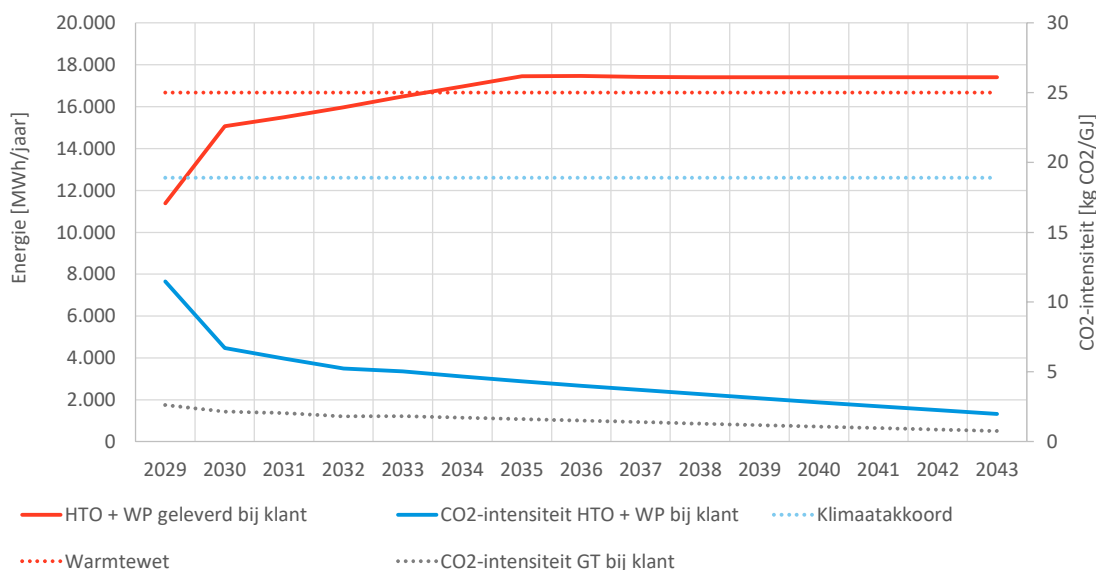
Voor de duurzaamheidsanalyse is gekeken naar de volgende parameters:

- **Systeemrendement** : dit is de verhouding tussen de hoeveelheid warmte die geleverd wordt vanuit de HTO en de hoeveelheid warmte die is opgeslagen in de HTO.
- **Specifieke CO₂-uitstoot**: dit is de verhouding tussen de totale CO₂-uitstoot van het HTO systeem en de hoeveelheid geleverde warmte door het HTO systeem (inclusief eventuele warmtepomp) bij de klant. Hierin is dus ook het verlies tijdens transport meegenomen. Hiervoor is gekozen zodat de berekende waarde vergeleken kan worden met de waarden die genoemd worden in het klimaatakkoord en de warmtewet. Deze gaan beide namelijk ook uit van de CO₂-intensiteit per GJ die geleverd wordt aan de klant. In deze studie is de CO₂-uitstoot een gevolg van het elektriciteitsverbruik. Deze neemt door de jaren heen af (zie paragraaf 2.5). Formatiegas is buiten beschouwing gelaten.

De resultaten van beide analyses zijn opgenomen in Figuur 6.2 en Figuur 6.3.



Figuur 6.2 | Kentallen HTO-systeem voor de base case



Figuur 6.3 | CO₂-intensiteit van geleverde warmte bij de klant in de base case voor HTO+WP, geothermie, klimaatakkoord en warmtewet. Bij de CO₂-intensiteit van HTO + WP gaat het alleen om de CO₂-uitstoot die gekoppeld is aan warmte afkomstig uit de HTO in combinatie met de warmtepomp. De CO₂-intensiteit van de piekvoorziening is hierin niet meegenomen. Dit is ook het geval voor de CO₂-intensiteit van geothermie. Voor een vergelijking met de waarden uit het klimaatakkoord en de warmtewet dient later nog wel naar de CO₂-intensiteit van het hele systeem gekeken te worden. De hoeveelheid warmte die geleverd wordt door de HTO + WP aan de klant is ook weergegeven.

Het systeemrendement van de HTO is in de eerste jaren vrij laag. In jaar 1 (2029) bedraagt het systeemrendement 29%⁸. Er moet veel warmte in de bodem gestopt worden om deze op te warmen. Bij warmtelevering zakt de temperatuur snel in, waardoor nog relatief weinig warmte geleverd kan worden. In de eerste jaren stijgt het systeemrendement snel. In jaar 3 (2032) is het systeemrendement gestegen naar 56%. Met elk opvolgend jaar hoeft steeds minder warmte in de HTO geladen te worden, terwijl de hoeveelheid geleverde warmte toeneemt. Op de langere termijn stijgt het systeemrendement naar 68%. Het cumulatieve systeemrendement ligt na 15 jaar op 60%. In jaar 10 bedraagt het cumulatieve systeemrendement 56%. Vanuit juridisch oogpunt is het advies om te ontwerpen op een cumulatief systeemrendement van 50% in jaar 10. Hier wordt aan voldaan.

De CO₂-intensiteit ligt, met een waarde van circa 11 kg CO₂/GJ_{th} direct vanaf jaar 1 onder de waarden zoals genoemd in het klimaatakkoord en de warmtewet. Door de jaren heen daalt de CO₂ intensiteit verder, door stijgend systeemrendement en doordat aangenomen is dat de elektriciteitsvoorziening in Nederland steeds verder verduurzaamt (zie uitgangspunten in paragraaf 2.5). Na 15 jaar (2044) is de CO₂-intensiteit gedaald tot circa 2 kg CO₂/GJ_{th}. Merk op dat voor een goede vergelijking met de Warmtewet en Klimaatakkoord gekeken moet worden naar de CO₂-intensiteit van het gehele systeem. In deze studie is alleen gekeken naar de CO₂-intensiteit van de warmte uit de HTO met warmtepomp. Wanneer deze onder de waarden uit het klimaatakkoord en warmtewet liggen, biedt dit wel een goed uitgangspunt om hieraan te kunnen voldoen.

Ter vergelijking is ook de CO₂-intensiteit van de geothermie opgenomen. Deze ligt lager dan de CO₂-intensiteit van HTO met warmtepomp. De CO₂ intensiteit daalt van circa 3 kg CO₂/GJ naar circa 1 kg CO₂/GJ. De CO₂-intensiteit ligt bij HTO hoger door de opslagverliezen en doordat bij

⁸ Deze waarde ligt lager dan uit de simulaties volgt. Dit komt door de regelstrategie. In de eerste twee jaar wordt ingezet op maximaal warmte laden. Hierdoor wordt meer warmte opgeslagen dan waarmee in de simulaties is gerekend. Hierdoor valt het systeemrendement lager uit in de eerste twee jaar.

geothermie geen gebruik wordt gemaakt van een warmtepomp. Omdat de geleverde warmte vanuit de geothermie duurzamer is dan vanuit de HTO, dient verdringing van geothermische warmte (zie Tabel 6-3) door de HTO tot het minimum beperkt te worden.

6.5 Gevoeligheidsanalyses

In deze studie zijn diverse gevoeligheidsanalyses uitgevoerd, welke in paragraaf 3.2 zijn benoemd. Gevoeligheidsanalyses die invloed hebben op de energiestromen zijn:

- Gestandaardiseerde case: hierin is gerekend met een retourtemperatuur in het warmtenet van 50°C. Voor de kosten van de opgeslagen warmte is gerekend met de extra marginale kosten van de opgeslagen warmte.
- Warmtevraag: hierin is gerekend met een 20% grotere en een 20% kleinere warmtevraag.
- Vraagprofiel: hierin is gerekend met een vlakker, toekomstbestendige warmtevraagprofiel.
- High Case geothermie: hierin is gerekend met een hogere potentieel voor de geothermiebron. Uit een eerste energetische analyse volgt dat het vermogen van de geothermiebron in de High Case ten opzichte van de warmtevraag dusdanig groot is, dat HTO geen zinnvolle bijdrage levert. De warmtevraag dient groter te zijn voor toepassing van HTO. Deze gevoeligheidsanalyse is in deze studie verder buiten beschouwing gelaten.

In de energetische gevoeligheidsanalyses is gekeken naar de volgende KPI's:

- Systeemrendement : de verhouding tussen de hoeveelheid geleverde en opslagen warmte in de HTO.
- CO₂-intensiteit: de hoeveelheid CO₂ die wordt uitgestoten per GJ aan warmte die bij de klant wordt geleverd.

Aanvullend is ook gekeken naar:

- Opslagvolume: het opslagvolume van de HTO
- Dekkingsgraad: het percentage van de totale warmtevraag (inclusief verliezen) die wordt geleverd door de HTO i.c.m. de warmtepomp.

De waarden voor HTO jaar 10 (2039) zijn bekeken en vergeleken met de standaard case. De resultaten staan in

Tabel 6-5.

Tabel 6-5 | Resultaten energetische gevoeligheidsanalyses

Case	Opslagvolume (HTO jaar 10)	Systeemrendement (HTO jaar 10)	Cum. syst. rendement (HTO jaar 10)	Dekkingsgraad (HTO jaar 10)	CO ₂ -intensiteit HTO+WP bij klant (HTO jaar 10)
	[m ³]	[-]		[-]	[kg CO ₂ /GJ]
Base Case	560.000	68%	57%	13%	3,4
Gestandaardiseerde case	520.000	68%	56%	13%	4,6
Vraag +20%	530.000	68%	58%	10%	3,4
Vraag -20%	410.000	67%	50%	12%	3,5
Vraagprofiel	590.000	68%	57%	14%	3,4

Bij de gestandaardiseerde case is een hogere CO₂-intensiteit te zien ten opzichte van de Base Case. Doordat de retourtemperatuur in de gestandaardiseerde case is verhoogd van 35 naar 50°C, is een grotere warmtepomp nodig. In zowel de base case als in de gestandaardiseerde case wordt water

in de lauwe bron geïnjecteerd met een temperatuur van 36°C. In de gestandaardiseerde case dient het water uit de HTO dus meer uitgeoeld te worden dan in de base case. Dit zorgt voor een toename in elektriciteitsverbruik, en daarmee hogere CO₂-intensiteit.

Zowel bij een grotere als bij een kleinere warmtevraag dalen het opslagvolume en de dekkinggraad. Bij een grotere warmtevraag vormt de opslag een limiterende factor. Er is in de zomer minder warmte beschikbaar om op te slaan. Bij een kleinere warmtevraag vormt de afzet een belemmering. Er kan dan in de winter onvoldoende warmte worden afgezet. De grootste daling treedt op in het opslagvolume bij een kleinere warmtevraag. Het effect op het systeemrendement is echter beperkt.

Wanneer het warmtevraagprofiel vlakker is, stijgen het opslagvolume en de dekkinggraad. De HTO kan gemiddeld op een hogere deellast draaien als gevolg van de vlakkere profielen.

7 Financiële analyses

7.1 Investeringskosten Base Case

De investeringskosten voor de base case zijn op haalbaarheidsniveau geraamd. De geraamde kosten exclusief BTW zijn weergegeven in Tabel 7-1. Dit is gedaan voor zowel de kosten op het huidige prijspeil (2024), als voor de situatie waarin alle investeringskosten zijn geïndexeerd naar het jaar van investering. Een korte toelichting op de onderdelen is gegeven na de tabel. Deze waarden zijn gebaseerd op projectervaring met ECW waarbij IF Technology betrokken was, prijsopgaven van diverse onderdelen en diverse gesprekken die gevoerd zijn met opdrachtgevers van verschillende projecten.

Tabel 7-1 | Geraamde investeringskosten HTO base case.

Onderdeel		Base Case (prijspeil 2024)	Base Case (geïndexeerd)
Proefboring	[€]	120.000	120.000
Bronnen	[€]	1.900.000	2.100.000
Leidingwerk in veld	[€]	400.000	430.000
Warmtepomp	[€]	1.300.000	1.400.000
Technische ruimte	[€]	900.000	1.000.000
Subtotaal	[€]	4.700.000	5.100.000
Onvoorzien	[€]	470.000	510.000
Ontwerp, advies en vergunningen	[€]	700.000	700.000
Totaal	[€]	5.800.000	6.300.000

- **Proefboring:** Om een goed ontwerp te kunnen maken van de HTO, wordt bij HTO 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. Het gaat om de kosten van de proefboringzelf. Kosten voor vergunning en advies zijn opgenomen in de post "Ontwerp, advies en vergunningen".
- **Bronnen:** deze post omvat de hete bron en lauwe bron, putbehuizing, bronpompen en techniek in de putbehuizing. Kosten voor het realiseren van de bronnen, zoals o.a. het boren, de stijgbuis, een wikkeldraadfilter en het afwerken zijn hierbij inbegrepen. Aangenomen is dat de bronpompen eens per vijf jaar vervangen dienen te worden.
- **Leidingwerk in terrein:** Deze post omvat het leidingwerk van de bronnen naar de technische ruimte, inclusief voedings-, stuur- en signaalkabels. Uit de check op de juridische haalbaarheid volgt dat er op ca 300 meter afstand een ander open bodemenergiesysteem aanwezig is. Mogelijk moeten de bronnen wat verder van de warmtecentrale gerealiseerd worden. Om hier rekening mee te houden is gerekend met 400 meter extra aan leidingwerk in het veld.
- **Warmtepompen:** De investeringskosten voor een hoge temperatuur warmtepomp (geïnstalleerd) zijn ingeschat op 470 €/kWth.
- **Techniek in technische ruimte:** Deze post omvat de componenten in de technische ruimte, welke grofweg bestaat uit leidingen/kleppen/appendages, warmtewisselaars, koppellend leidingwerk met het warmtenet en regeling en elektra. Deze post omvat ook waterbehandeling en een stikstofinstallatie. Deze post is exclusief kosten voor het gebouw en exclusief een elektriciteitsaansluiting. De omvang van het gebouw is in deze studie nog

niet bekeken. Uit andere studies wordt ingeschat dat de omvang hiervan tussen de 100 en 200 m² ligt.

- Onvoorzien: Op de geraamde kosten is een opslag van 10% toegevoegd voor onvoorziene kosten.
- Ontwerp, advies en vergunningen: de ontwerp-, advies- en vergunningskosten zijn ingeschat op 15% van de investeringskosten. De vergunningen omvatten de diverse vergunningen die nodig zijn voor de realisatie en exploitatie van een HTO-systeem.

7.2 Exploitatiekosten Base Case

De jaarlijkse exploitatiekosten voor de base cases zijn op haalbaarheidsniveau geraamd. De exploitatiekosten variëren per jaar. Doordat het systeemrendement door de jaren heen toeneemt, hoeft elk opvolgend jaar steeds minder warmte opgeslagen te worden, terwijl elk jaar steeds iets meer warmte terug geleverd kan worden. De geraamde exploitatiekosten exclusief BTW zijn voor jaar 10 weergegeven in Tabel 7-2 voor de base case, zowel voor prijspeil 2024 als geïndexeerd naar het jaar van exploitatie. Een korte toelichting op de onderdelen is gegeven na de tabel.

Tabel 7-2 | Geraamde exploitatiekosten jaar 10 HTO base case.

Post		Base Case (Prijspeil 2024)	Base Case (geïndexeerd)
Opslag warmte	[€/jaar]	1.500.000	2.100.000
Elektriciteitsverbruik	[€/jaar]	360.000	530.000
Onderhoud en beheer - warmtepomp	[€/jaar]	50.000	80.000
Onderhoud en beheer - overig	[€/jaar]	3.000	4.000
Waterbehandeling	[€/jaar]	27.000	39.000
Monitoring en BRL	[€/jaar]	60.000	87.000
Personeelskosten	[€/jaar]	54.000	78.000
Subtotaal	[€/jaar]	2.000.000	2.900.000
Onvoorzien	[€/jaar]	60.000	80.000
Totaal	[€/jaar]	2.100.000	3.000.000

- Inkoop opgeslagen warmte: dit zijn de kosten voor de warmte die wordt opgeslagen in de HTO. In het energetisch model wordt het extra elektriciteitsverbruik van het geothermiesysteem voor het opslaan van de warmte meegenomen. De daaraan gekoppelde marginale kosten zijn in mindering gebracht om dubbeling te voorkomen.
- Elektriciteitsverbruik: De warmtepomp, en diverse componenten zoals pompen, kleppen, regeling e.d. verbruiken elektriciteit. Het elektriciteitsverbruik volgt uit de energetische analyse. De kosten zijn vervolgens bepaald op basis van de aangenomen elektriciteitsprijs.
- Onderhoud en beheer warmtepompen: Voor de warmtepomp is gerekend met 4% van de investeringskosten.
- Onderhoud en beheer overig: gerekend is een jaarlijkse post voor kalibratie van alle sensoren. Overig onderhoud en beheer is verdisconteerd in de personeelskosten.
- Waterbehandeling: om kalkneerslag te voorkomen dient het water aangezuurd te worden. Uitgangspunt is aanzuring met CO₂. De hoeveelheid van de kosten schaalst met de hoeveelheid opgeslagen volumes.
- Monitoring en BRL inspecties: In deze post zijn de kosten opgenomen voor jaarlijkse monitoring, interpretatie en de jaarlijkse BRL check.
- Personeelskosten: Voor regulier onderhoud en beheer is personeel nodig. Bij HTO is gerekend met 0,5 f.t.e. en opleiding en bijscholingskosten van gemiddeld € 4.000 per jaar.

- Onvoorzien: Op de geraamde kosten is, met uitzondering van de kosten voor warmte en elektriciteit, een opslag van 10% toegevoegd voor onvoorziene kosten.

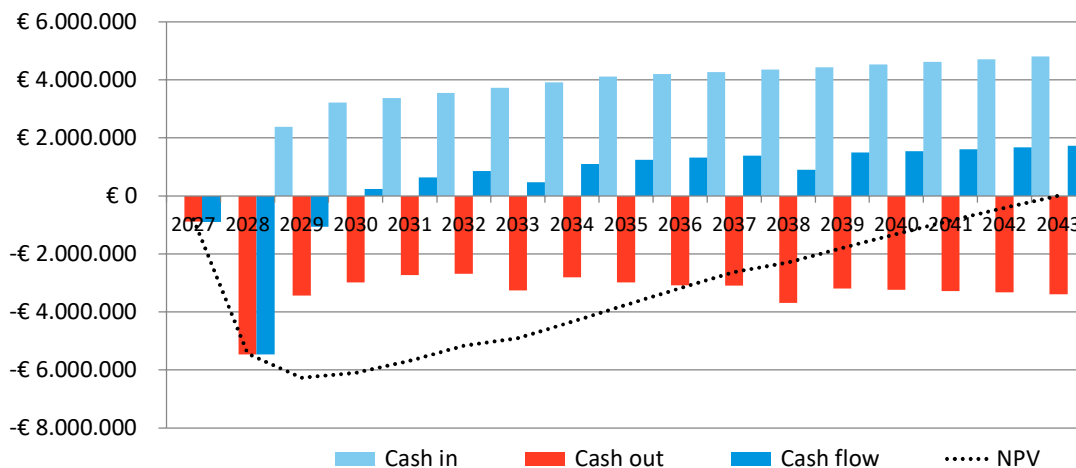
7.3 Business case Base Case

In de business case is in deze studie gekeken naar de kostprijs voor warmte vanuit de HTO die nodig is, zodanig dat op projectniveau wordt voldaan aan het gewenste projectrendement. Dit is het geval wanneer de netto contante waarde in jaar 15 gelijk is aan nul.

In de business case is rekening gehouden met de volgende punten:

- De HTO wordt in twee jaar gerealiseerd. In 2027 bestaan de investeringskosten uit een proefboring en kosten voor ontwerp, advies en vergunningen. In 2028 wordt de gehele HTO gerealiseerd.
- Vanaf 2029 is de HTO operationeel.
- Alle kosten zijn geïndexeerd t.o.v. prijspeil 2024 met 2% indexatie per jaar.
- Herinvesteringen van de pompen zijn meegenomen. Aangenomen is dat deze een levensduur hebben van 5 jaar. De overige componenten hebben een levensduur van 15 jaar of meer. Herinvesteringen hiervoor zijn niet meegenomen. Klein onderhoud en beheer is verdisconteerd in de personeelskosten.
- Eventuele restwaarde is niet meegenomen.
- Per jaar zijn de energiestromen (thermisch en elektrisch) anders, door veranderende warmtevraag en het systeemrendement van de HTO. De input hiervoor volgt uit de energetische analyses (zie paragraaf 6.4).

In Figuur 7.1 zijn de kasstromen en netto contante waarde (NCW) gegeven voor de base cases.



Figuur 7.1 Kasstromen en netto contante waarde (NCW) van de base case.

Om een netto contante waarde van nul te halen na 15 jaar exploitatie (2043), is de LCOH (Levelized Cost of Heat) voor warmte 44,7 €/GJ_{th} (prijspeil 2024). Het gaat hier om de warmte die door de HTO, inclusief warmtepomp, wordt geleverd aan het warmtenet. Wanneer rekening wordt gehouden met verliezen in het warmtenet (15%), wordt de LCOH geleverd aan de klant € 52,6 per GJ. De transportkosten naar de klant dienen hierbij nog opgeteld te worden.

Het huidige maximale warmtetarief volgens de ACM bedraagt in 2024 38,42 €/GJ_{th} (excl. BTW). De kostprijs ligt boven het ACM tarief. De hoge kosten voor de warmte worden grotendeels veroorzaakt doordat voor de opgeslagen warmte een tarief van € 16 per GJ in rekening worden gebracht (informatie vanuit opdrachtgever, zie uitgangspunten in paragraaf 2.5). Dit wordt nog eens versterkt door de verliezen die optreden tijdens opslag in de HTO en tijdens transport in het warmtenet.

7.4 Gevoeligheidsanalyses

In deze studie zijn diverse gevoeligheidsanalyses uitgevoerd, welke in paragraaf 3.2 zijn benoemd. Van alle gevoeligheidsanalyses zijn de effecten op de business case onderzocht, met uitzondering van de High Case voor geothermie. In deze case is het vermogen van de geothermiebron ten opzichte van de warmtevraag dusdanig groot, dat HTO geen zinvolle bijdrage levert.

In de financiële gevoeligheidsanalyses is gekeken naar de volgende parameters:

- Investeringskosten: de totale investeringskosten
- Exploitatiekosten: de jaarlijkse exploitatiekosten, in HTO jaar 10 (2039)
- LCOH_{HTO+WP}: de prijs die voor warmte uit de HTO + WP moet worden betaald om te voldoen aan het gestelde projectrendement in 15 jaar.

De waarden zijn bepaald en vergeleken met de standaard case. De resultaten staan in Tabel 7-3.

Tabel 7-3 | Resultaten financiële gevoeligheidsanalyses

Case	Investeringskosten (geïndexeerd)		Exploitatiekosten (HTO jaar 10, geïndexeerd)		LCOH _{HTO+WP} bij klant (excl. transportkosten)	
	[€]	t.o.v. BC	[€/jaar]	t.o.v. BC	[€/GJ]	t.o.v. BC
Base case (BC)	6.300.000	-	3.000.000	-	52,6	-
Gestandaardiseerde case	7.600.000	121%	1.200.000	40%	31,1	59%
Warmtevraag +20%	6.300.000	100%	2.800.000	93%	53,2	101%
Warmtevraag -20%	6.300.000	100%	2.300.000	77%	63,8	121%
Vraagprofiel	6.300.000	100%	3.100.000	103%	52,5	100%
Elektriciteit +1%	6.300.000	100%	2.900.000	97%	52,0	99%
Elektriciteit +5%	6.300.000	100%	3.400.000	113%	54,9	104%
Projectrendement 7%	6.300.000	100%	3.000.000	100%	50,9	97%
Projectrendement 10%	6.300.000	100%	3.000.000	100%	53,9	102%
Geen SDE++	6.300.000	100%	3.000.000	100%	52,6	100%
Meer bronnen (heet 5, lauw 6)	5.800.000	92%	3.000.000	100%	51,5	98%
Minder bronnen (heet 3, lauw 4)	6.800.000	108%	3.000.000	100%	53,6	102%

De gestandaardiseerde case heeft de laagste levelized cost of heat. Hoewel de investeringen toenemen doordat een grotere warmtepomp nodig is, dalen de exploitatiekosten doordat voor de kosten van opgeslagen warmte gerekend is met de marginale kosten van de opgeslagen warmte (in plaats van 16 € per GJ, zie voor uitgangspunten gestandaardiseerde case paragraaf 3.2). De LCOH bij de klant bedraagt 31,1 €/GJ. Dit is nog exclusief transportkosten. Deze waarde ligt onder de huidige maximale warmtetarief volgens de ACM (38,42 €/GJ_{th} (excl. BTW)), en biedt dus kansen voor een financieel haalbaar project. Vanuit organisatorisch oogpunt heeft het de voorkeur dat zowel de HTO als de geothermiebron eigendom zijn van dezelfde partij. Wanneer het eigendom gesplitst is, zullen er afspraken gemaakt moeten worden tussen de eigenaar van de HTO en de

eigenaar van het geothermiesysteem over de kosten van de opgeslagen warmte. De kosten hiervoor mogen niet te hoog zijn, omdat het dan niet mogelijk is om de HTO kostenefficiënt te exploiteren.

Net als bij de energetische gevoeligheidsanalyse is ook in de financiële gevoeligheidsanalyse te zien dat zowel bij het verhogen als bij het verlagen van de warmtevraag de haalbaarheid slechter wordt. De verhouding tussen vraag en aanbod in de base case is optimaal. De financiële haalbaarheid verslechtert met name bij een kleinere warmtevraag. Bij een grotere warmtevraag stijgt de LCOH, maar het effect is, binnen de onderzochte bandbreedte, beperkt. Er dient bij de ontwikkeling van het project voldoende aandacht te zijn voor de totale omvang van de warmtevraag. Deze dient tenminste gelijk te zijn aan de ingeschatte waarde. Wanneer de warmtevraag heel veel groter wordt dan ingeschat, zal opnieuw gekeken moeten worden naar de gevolgen hiervoor op het HTO-systeem.

Te zien is dat, wanneer geen SDE++ subsidie wordt meegenomen, er geen effect is op de LCOH. Dit komt doordat alle SDE++ reeds wordt toegekend aan het geothermiesysteem. Extra opslag van warmte in de HTO levert daarmee geen extra inkomsten op vanuit SDE++ subsidie. Merk op dat er nog geen SDE++ beschikking is voor dit project. In deze studie is de SDE++ beschikking (nagenoeg) gelijk gesteld aan het verwachte vermogen. In de praktijk komt het vaak voor dat de beschikking wat hoger ligt dan het daadwerkelijk vermogen, bijvoorbeeld doordat het vermogen in de praktijk net wat lager uitvalt dan ingeschat. Wanneer het daadwerkelijk vermogen lager uitvalt dan aangevraagd, kan toevoegen van de HTO een positief effect hebben op de LCOH.

Alle andere onderzochte gevoeligheden hebben direct effect op de LCOH maar het effect blijft beperkt tot enkele procenten.

Investeringsubsidies

In deze studie is nog niet gekeken naar de gevoeligheid van investeringssubsidies. Mogelijk bieden hier de EIA (energie-investeringsaftrek, ca 10%) en de Demonstratie Energie en Klimaatinnovatie (DEI+) kansen. De DEI+ biedt de mogelijkheid van een investeringssubsidie aan demonstratieprojecten van innovatieve technieken die bijdragen aan CO₂-reductie. Het percentage van de subsidie hangt af onder welke categorie het project kan worden ondergebracht. Bij "Hernieuwbare energie" komt 45% van de investeringskosten in aanmerking voor subsidie.

8 Discussie, conclusies & vervolg

8.1 Discussie

Het eerste doel van deze studie is om inzicht te geven in de mogelijkheden en haalbaarheid van HTO. Dit wordt gedaan aan de hand van een aantal KPI's (zie paragraaf 3.3 voor toelichting). De score per KPI in Tabel 8.1 kort samengevat. Dit is gedaan voor de Base Case en voor de gestandaardiseerde Case. Merk op dat er nog een mate van onzekerheid is van de diktes en eigenschappen van de ondergrond. Hierdoor geven de resultaten momenteel een eerste inschatting.

Tabel 8-1 | Score KPI's Base Case en Gestandaardiseerde case

Thema	KPI	Base Case	Gestandaardiseerde case
Bodem	Cum. systeemrendement (jaar 10)	57%	56%
Business case	CAPEX (geïndexeerd)	€ 6.300.000	€ 7.600.000
Business case	LCOH _{HTO+WP} bij klant	52,6 €/GJ	31,1 €/GJ
Duurzaamheid	CO ₂ -intensiteit bij klant (jaar 10)	3,4 kg CO ₂ /GJ	4,6 kg CO ₂ /GJ
Juridisch	Inpassing	Aandachtspunt: OBES op 300 m	Aandachtspunt: OBES op 300 m

Het cumulatieve systeemrendement voldoet aan de gewenste waarde van 50% in jaar 10 (57%). Er is een relatief grote onzekerheid in de bodemopbouw, waardoor de uiteindelijke waarde zal afwijken van hetgeen hier berekend is. Op basis van de huidige informatie wordt ingeschat dat de bodem zeker potentie laat zien voor de toepassing van HTO. De uiteindelijke inpassing kan het rendement van de HTO sterk beïnvloeden.

Voor de investeringskosten zijn geen voorwaarden opgesteld. De hoogte van de benodigde investering kan mogelijk wel van invloed zijn op het investeringsbesluit. De investeringskosten liggen in de gestandaardiseerde case hoger dan bij de base case. Dit komt doordat in de gestandaardiseerde case gerekend is met een retourtemperatuur van 50°C i.p.v. 35°C. Hierdoor moet meer worden uitgeoeld om de injectietemperatuur in de lauwe bron te halen. Hierdoor is een grotere warmtepomp nodig.

De LCOH van de HTO plus warmtepomp bij de klant ligt in de base case hoger dan het ACM tarief voor consumenten (€ 38,42/GJ). De base case is financieel niet haalbaar. Dit komt doordat in de base case voor de opgeslagen warmte in de HTO 16 €/GJ aan kosten in rekening worden gebracht. In de gestandaardiseerde case wordt gerekend met de extra elektriciteitskosten van het geothermiesysteem die gemaakt worden om de warmte op te slaan in de HTO (marginale kosten). In dat geval daalt de LCOH naar 31,1 €/GJ. Deze waarde biedt wel uitzicht op een positieve business case. Bij voorkeur zijn zowel het geothermiesysteem als het HTO systeem in eigendom van dezelfde partij.

De duurzaamheid van de warmte die de HTO (inclusief warmtepomp) levert bij de klant liggen ver onder de waarden zoals vermeld in het klimaatakkoord (18,9 kg CO₂/GJ) en warmtewet (25 kg CO₂/GJ). Duidelijk is dat HTO kan bijdragen aan de verdere verduurzaming van het warmtenet.

Vanuit juridisch oogpunt is de inpassing een aandachtspunt. Op 300 meter afstand van de warmtecentrale ligt een bestaand open bodemenergiesysteem. Deze mag niet negatief beïnvloedt

worden. De bronnen kunnen opgeschoven worden naar het noordoosten om voldoende afstand te creëren. Hoever de bronnen opgeschoven dienen te worden, zal in een vervolgstap in meer detail bekeken moeten worden. Een gevolg is wel dat de bronnen wellicht niet op het eigen terrein kunnen worden gerealiseerd. Een oplossing zou in dat geval kunnen zijn om bronnen, in overleg, op gemeentelijke grond te plaatsen.

8.2 Conclusies

Bodem en juridisch

- Op basis van de huidige informatie is de Formatie van Maassluis de enige potentieel geschikte formatie voor toepassing van HTO.
- De twee ondiepe varianten zijn het meest positief beoordeeld. De dikte van de afsluitende kleilaag (onderkant van de Formatie van Waalre) is variabel in de nabije boringen en daardoor onzeker.
- Variant 'ondiep 2' maakt gebruik van 30m extra filter in een dieper gelegen watervoerend pakket heeft. Door het gebruik van een dikker opslagpakket is het thermisch volume vatbaarder voor verliezen door opdrijving. Uit de simulaties, uitgaande van de aanwezigheid van de twee opslagpakketten zoals gedefinieerd in Tabel 4-2, blijkt dat het systeemrendement in jaar 10 daardoor 7% lager is dan voor de base case filterstelling. Echter, door het gebruik van het extra watervoerende pakket wordt het doorlaatvermogen groter (ingeschat op 660 m²/d). Dit betekent dat er mogelijk minder bronnen nodig zijn voor het HTO systeem en er dus kosten kunnen worden bespaard. Het cumulatieve systeemrendement is 57% in jaar 10 voor de base case.
- De HTO kan het beste worden ingepast ten noordoosten van de warmtecentrale. Op deze locatie kan het beste afstand worden gecreëerd tussen de HTO en de bestaande bodemenergiesystemen.
- De onzekerheid van de ondergrond is sterk te verkleinen door middel van een lokale proefboring. In een eventueel vervolg kunnen een gedetailleerder inzicht in de ondergrond in combinatie met gedetailleerdere modellen worden gebruikt om het thermische terugwinrendement grondiger te bepalen. Een aandachtspunt bij deze variant is dat het onzeker is hoe dik de afsluitende kleilaag is, wat een risico vormt op warmteverliezen.

Systeemconcept, energetisch en duurzaamheid

- Met een HTO systeem van 200 m³/h is het mogelijk om de warmteproductie en warmtevraag beter aan elkaar te koppelen door het seizoensmatig opslaan van warmte. Geothermische warmte wordt opgeslagen in de HTO op 76°C. Een warmtepomp is nodig om de opgeslagen warmte op te waarden en verder te uit te koelen.
- Door het toevoegen van HTO neemt de totale hoeveelheid geleverde duurzame warmte toe. De inzet van de piekvoorziening daalt in HTO jaar 10 relatief met 66% en absoluut met 4% (van 6% in de situatie zonder HTO naar 2% in de situatie met HTO). De reductie van inzet van de piekvoorziening is in absolute zin beperkt. Dit komt doordat er door de vele aanwezige duurzame bronnen (geothermie en twee datacenters) de inzet van de piek sowieso laag is.
- Bij de High Case van geothermie is bij de ingeschatte warmtevraag toepassing van HTO niet interessant. De warmtevraag is te klein. Mogelijk is na uitbreiding van het warmtenet met de buurt Overschie de warmtevraag wel voldoende groot voor een combinatie met HTO, maar dat valt buiten de scope van deze studie.

Financieel en organisatorisch

- Een HTO biedt financieel perspectief, wanneer er voor de opgeslagen warmte alleen marginale kosten in rekening worden gebracht. In dat geval is een LCOH bij de klant (31,1 €/GJ, nog exclusief transportkosten) lager dan het ACM tarief (38,42 €/GJ).
- De eigenaar van het geothermiesysteem is bij voorkeur ook eigenaar van het HTO-systeem. Dit maakt interne verrekening mogelijk tegen marginale kosten van de opgeslagen warmte eenvoudiger.
- De business case is gevoelig voor een lagere warmtevraag. Wanneer deze met 20% daalt, stijgt de LCOH met circa 20%.
- De business case reageert ook op een hogere warmtevraag. De LCOH stijgt licht wanneer de warmtevraag toeneemt. De reden hiervoor is dat bij een grotere warmtevraag in de zomer minder warmte beschikbaar is om op te slaan. Hierdoor daalt ook de afzet, en daarmee de inkomsten, in de winter. Het effect is tot en met 20% toename in warmtevraag echter beperkt (toename LCOH van 1%). Maar mogelijk wordt het effect wel groter wanneer de warmtevraag nog verder toe zou nemen.
- In deze studie is de SDE++ beschikking (nagenoeg) gelijk gesteld aan het verwachte vermogen. In de praktijk komt het voor dat de beschikking wat hoger ligt dan het daadwerkelijk vermogen, bijvoorbeeld doordat het vermogen in de praktijk net wat lager uitvalt dan ingeschat. Wanneer het daadwerkelijk vermogen lager uitvalt dan aangevraagd,, kan toevoegen van de HTO een positief effect hebben op de LCOH.

8.3 Vervolg

Er is een vrij grote onzekerheid in de lokale bodemopbouw. Dit werkt door op het te verwachten systeemrendement en de broncapaciteit, en daarmee ook op de haalbaarheid van het systeem. De onzekerheid in de bodemopbouw is sterk te verkleinen door het ter plaatse uitvoeren van een proefboring. Dit was bij het opstellen van het onderzoeksvoorstel al voorzien. Daarom is binnen dit project een budget beschikbaar voor het uitvoeren van één proefboring. Er zijn naast deze verkenning echter nog twee locaties waar ook een HTO verkenning voor wordt uitgevoerd. In een vervolgstap zullen alle projecten aan de hand van de KPI's tegen elkaar worden afgewogen om te bepalen op welke locatie het beste een proefboring kan worden uitgevoerd. Dit zal gebeuren in samenspraak met de betrokken stakeholders van alle drie de locaties. Naast de KPI's zoals behandeld in deze verkenning zal daarnaast ook gekeken worden naar status van het project en commitment van de stakeholders.

Niet gekwantificeerde waarde van HTO

Een ander onderwerp dat ook nog besproken dient te worden met alle betrokken stakeholders is de niet gekwantificeerde waarde van HTO. In deze verkenning is de haalbaarheid van een HTO systeem voor locatie Schiebroek in kaart gebracht. Echter, de inpassing van een HTO systeem brengt aanvullende voordelen en waarde in het gehele warmtesysteem die in deze verkenning voor een deel niet gekwantificeerd zijn. Bij de keuze om HTO wel/niet te ontwikkelen is het belangrijk om deze wel in ogenschouw te nemen. Hieronder wordt een opsomming gedaan van de mogelijke onderdelen waar HTO waarde heeft maar die tot nu toe niet gekwantificeerd zijn of niet goed gekwantificeerd kunnen worden.

- Invulling piekvraag: geen fossiel, hoe vergelijkt HTO met lucht-water warmtepomp/boiler
- Netcongestie: verplaatsen piek stroomgebruik van winter naar zomer t.o.v. andere techniek

- Gebruik duurzame stroom warmtepomp: HTO (extra) laden met 'gratis/groene' stroom in zomer
- HTO als back-up wanneer geothermiesysteem niet werkt (bijv. tijdens jaarlijkse onderhoud)

Referenties

- Beernink, S., Hartog, N., Vardon, P. J., & Bloemendal, M. (2024). Heat losses in ATEs systems: The impact of processes, storage geometry and temperature. *Geothermics*, 117, 102889. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102889>
- Dinkelman et al. (2020). B2 Potentieel en toepassingscondities. Geologisch model, temperatuurmodel voor de ondiepe ondergrond en potentieelkaarten voor HTO in Nederland. <https://www.warmingup.info/documenten/window-fase-1---b2---potentieel-en-toepassingscondities.pdf>
- Hijma (2009). From river valley to estuary the early mid Holocene transgression of the Rhine Meuse valley The Netherlands. https://www.researchgate.net/publication/40434920_From_river_valley_to_estuary_the_early_mid_Holocene_transgression_of_the_Rhine-Meuse_valley_The_Netherlands
- Oerlemans, P., Borst, L., Schutte, C., Kleinlugtenbelt, R. (2023). HTO Potentie voor de RES Rotterdam – Den Haag en Leidse regio. <https://www.ebn.nl/feiten-en-cijfers/kennisbank/potentiestudie-hoge-temperatuur-opslag-hto-res-rotterdam-den-haag-leidse-regio/>
- Peters, Foeken, Geel & Veldkamp (2022). Characterization of and production from the Breda Formation in de Roer Valley Graben. WarmingUP. https://www.warmingup.info/documenten/breda-report_20230120_final_hr.pdf
- Pothof, I., Vreeken, T., Meerkerk, van M. (2023), Data-driven method for optimized supply temperatures in residential buildings, *Energy* 284, dec 2023, 129183. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129183>
- Schout, G., Drijver, B., Gutierrez-Neri, M., & Schotting, R. (2014). Analysis of recovery efficiency in high-temperature aquifer thermal energy storage: a Rayleigh-based method. *Hydrogeology Journal*, 22(1), 281.
- Zwamborn et al. (2020). A1 Notitie vergelijking en selectie locaties voor ondergrondse warmteopslag.

Bijlage 1 – Doorontwikkeling methodiek Verkenning HTO

In het onderzoeksprogramma WINDOW (WarmingUP fase 1) is een methodiek opgezet voor de uitvoer van HTO verkenningen. In deze verkenning zijn een aantal aanpassingen gemaakt in de methodiek om de verkenning beter en efficiënter uit te kunnen voeren. In deze bijlage zijn de wijzigingen beknopt toegelicht.

Interactie tussen ondergronds en bovengronds model

In de verkenning worden twee modellen gebruikt, één voor het bovengronds deel (warmtenet), en één voor het ondergronds deel (HTO systeem). Beide modellen zijn in de verkenning niet direct aan elkaar gekoppeld. In de WINDOW-verkenningen is een iteratief proces toegepast. Eerst is een inschatting gemaakt van het systeemrendement van de HTO toepassing, op basis van een versimpeld Rayleigh-model. Op basis hiervan zijn berekeningen uitgevoerd met het bovengronds model. Een uitkomst van het bovengronds model zijn de hoeveelheden opgeslagen en geleverde volumes en temperaturen van de HTO. Deze zijn vervolgens gesimuleerd in het ondergronds model. De resultaten van deze ondergrondse simulaties zijn vervolgens gebruikt voor nieuwe analyses met het bovengronds model. Dit kan herhaald worden totdat het resultaat is geconvergeerd.

In de huidige verkenning is op basis van de uitgangspunten een inschatting gemaakt van de verwachte volumes voor opslag en levering, bij een gegeven hete en lauwe brontemperatuur. Dit is gedaan voor situaties met een laag en hoog bronrendement. Hierdoor ontstaat een beeld van de te verwachten volumes voor opslag en levering. Op basis hiervan zijn drie berekeningen uitgevoerd in het ondergronds model. Eén bij een klein volume, één bij een gemiddeld volume en één bij een maximaal volume. De resultaten van deze drie simulaties voor de temperatuur evolutie tijdens ontladen zijn in een database gestopt, welke is geïntegreerd in het bovengronds model. Dit maakt het mogelijk om binnen het bovengronds model te interpoleren naar de te verwachten volumes voor opslag en levering. Een iteratie met het ondergronds model is dan niet meer nodig, wat tijd bespaart.

De beste resultaten worden verwacht met een gekoppeld model. Op dat moment is iteratie en interpolatie niet meer nodig. Het doorrekenen van het ondergronds model kost echter veel tijd. Het voordeel van een niet gekoppeld model is dat binnen de database snel geïnterpoleerd kan worden met het bovengronds model, bijvoorbeeld wanneer het systeemconcept, regelstrategie of een van de uitgangspunten wijzigt. Interpolatie is mogelijk, zolang de hete bron temperatuur en lauwe brontemperatuur gelijk blijven en de volumes binnen de uitgevoerde ondergrondse simulaties blijven. Vanwege de snelheid van de methode zoals gehanteerd in WarmingUP GOO is de voorgestelde werkwijze om dit in de verkennende fase te blijven gebruiken en om, in de verdiepende fase de meest kansrijke opties door te laten rekenen met een gekoppeld model.

Financiële analyse

In de WINDOW-verkenning is op vereenvoudigde wijze rekening gehouden met het verloop van de warmtevraag en de toenemende inzet van HTO door de jaren heen. De energiestromen voor warmte en elektriciteit zijn met het bovengronds model in detail bepaald voor jaar 10 bij de totale warmtevraag. De energiestromen van de andere jaren zijn vervolgens ingeschat op basis van de

systeemrendementen door de jaren die volgen uit de ondergrondse berekeningen. Dit zal in de eerste jaren leiden tot het laden van meer warmte en het leveren van minder warmte. Hierbij is aangenomen dat alle warmte geladen en geleverd kan worden met de HTO.

In deze verkenning is per jaar een energetische analyse uitgevoerd met het bovengronds model van jaar 1 tot en met jaar 10. Hierbij is rekening gehouden met de warmtevraag en systeemrendement van de HTO van dat jaar. Hierdoor is het gedrag van de HTO nauwkeuriger te bepalen. Er is nog geen vergelijking gemaakt tussen beide varianten. Hiervoor is het nodig dat ook een analyse wordt uitgevoerd van deze verkenning met de methodiek die is gebruikt van WINDOW. Dit past niet binnen de scope van dit onderzoek, maar is wel interessant om uit te voeren. De methode die nu is gehanteerd kost namelijk wel meer tijd. Het is interessant om te kijken of en welke afwijkende resultaten deze methode oplevert.

Bijlage 2- Criteria tabel

In deze bijlage wordt toelichting gegeven op de gekozen criteria voor de toepassing van HTO (Tabel 8-2).

Tabel 8-2 Criteria welke zijn gebruikt voor de selectie van de meest geschikte opslagpakketten.

Criterion	Eenheid	Opslag temperatuur	Showstopper	Risico	Goed
Lithologie	-		silt/klei	zand-kalk, glauconiet	zand
Diepte top aquifer	m-mv		Nooit een showstopper	< 50	≥ 50
Totale dikte opslagpakket	m		< 15	15 – 20	≥ 20
Effectieve dikte opslagpakket	m		< 15	15 – 20	≥ 20
Hydraulische afsluiting kleilaag bovenzijde ⁽¹⁾	m		< 4	4 - 8	≥ 8
Thermische afsluiting kleilaag bovenzijde ⁽²⁾	m		< 10	10 - 15	≥ 15
Afsluitende laag onderzijde ⁽³⁾	m		Nooit een showstopper	< 5	≥ 5
Doorlaatvermogen opslagpakket	m ² /d	80 – 90 °C	< 100	100 – 250 en > 600	250 – 600
		70 – 80 °C	< 100	100 – 250 en > 800	250 – 800
		60 - 70 °C	< 100	100 – 250 en > 1000	250 – 1000
Aanvullend: inschatting opslagrendement ⁽⁴⁾	%		Nooit een showstopper	<60%	>60%
Omgevingsbelangen ⁽⁵⁾			< 300 m afstand	300-500 m afstand	>500 m afstand

(1) aantal meter klei in de 15 m direct boven het opslagpakket

(2) totaal aantal meter klei in de 30 m direct boven opslagpakket

(3) aantal meter klei in de 10 m direct onder het opslagpakket

(4) o.b.v. Schout et al. (2014)

(5) afstand van OBES, GBES, grondwateronttrekking in dezelfde laag t.o.v. locatie HTO systeem

Lithologie

Lithologie heeft betrekking op het type sediment/gesteente, korrelgrootte, aanwezigheid van mineralen (zoals glauconiet) en schelpen(resten) etc. Voor HTO worden klei en siltige lagen als showstopper gezien i.v.m. extreem lage doorlatendheid. Daarnaast kan zeer fijn zand, of uiterst fijn zand, een operationeel risico op zandlevering geven. Te grof zand geeft weer risico op thermische opdrijving, maar deze eigenschappen worden doormiddel van de 'doorlaatvermogen' en 'rendement inschatting' criteria ondervangen.

De aanwezigheid van glauconiet in een formatie maakt deze niet direct ongeschikt voor toepassing van HTO. Er is een aantal WKO systemen gerealiseerd in glauconietrijke zanden (zoals de Formatie van Oosterhout) en daar zijn geen negatieve ervaringen bekend. Echter is de invloed van verhoogde temperaturen op glauconiet onzeker en valt het daarom onder 'risico'.

De aanwezigheid van schelpen(resten) kan bij verhoogde temperaturen lijden tot mogelijke kalkreacties (oplossing en neerslag) en wordt daarom gezien als (operationeel) risico.

Diepte top aquifer

Het criterium voor diepte is op 50 m-mv gezet, met als reden dat ondieper dan 50 m-mv de kans op uitstraling van warmte naar de ondieper gelegen lagen en de oppervlakte een omvang aanneemt die lastig verenigbaar is met de belangen aldaar.

Totale en effectieve dikte opslagpakket

De dikte van de zandlaag kan van plek tot plek variëren. De kans bestaat dat de dikte van de zandlaag op locatie enkele meters afwijkt van de verwachting. Bij een verwachte dikte van de zandlaag <15 m zou een afname van de dikte met enkele meters een aanzienlijke procentuele afname van de totale dikte betekenen en dat levert een groot risico op voor de capaciteit van de

HTO-bronnen. Let op: bij grote dikte van het opslagpakket wordt het HTO-systeem mogelijk ook gevoeliger voor warmteverliezen door opdrijving. Dit aspect wordt meegenomen in criterium 'doorlaatvermogen' en 'rendement inschatting'. Bij een opeenvolging van zandlaagjes, waarvan er één of meer een dikte hebben van <15 m, gescheiden door dunne kleilaagjes, kan de combinatie van die verschillende zandlaagjes mogelijk als één opslagpakket worden beschouwd. Meerdere zandlaagjes van <15 m kunnen zodoende ook een potentieel opslagpakket vormen. Aandachtspunt is dan wel dat de filterlengte die kan worden geplaatst tenminste 10 meter bedraagt, en de 'effectieve dikte' kleiner is dan de 'totale dikte'.

Hydraulische afsluiting kleilaag bovenzijde

Een hydraulisch afsluitende kleilaag aan de bovenzijde van het opslagpakket is een vereiste voor succesvolle toepassing van HTO. In de eerste plaats voorkomt die afsluiting dat het geïnfiltreerde hete water direct naar ondiepere lagen kan stromen. De afsluitende laag voorkomt/minimaliseert daarnaast warmteverliezen door dichtheid gedreven stroming (opgeslagen warme water heeft door de lagere dichtheid de neiging om zich in opwaartse richting te verplaatsen en wordt tegen gehouden door de afsluitende kleilaag). Voor de scoring van dit criterium geldt dat er minimaal 4 m klei in de 15 m direct boven het opslag pakket moet zitten, anders is sprake van een showstopper. Een totale dikte tussen 4 en 8 m geldt als risico. Vanaf 8 m is sprake van een goede hydraulische afsluiting.

Thermische afsluiting kleilaag bovenzijde

Naast de barrière voor directe stroming van heet water naar bovenliggende pakketten, is de dikte van de kleilaag (of meerdere kleilaagjes met tussenliggende dunne zandlagen) ook van belang voor de thermische uitstraling naar bovenliggende lagen. Idealiter is er een dikke kleilaag aanwezig tussen het aangewezen opslagpakket en het eerstvolgende ondieper gelegen watervoerende pakket. In realiteit is er vaak een sterke afwisseling van veelal dunne klei- en zandlaagjes in de boorbeschrijvingen en zijn er grote verschillen tussen de boorbeschrijvingen in de regio waardoor het definiëren van doorlopende watervoerende pakketten en tussenliggende afsluitende lagen onmogelijk is. Om die reden is een pragmatische definitie gekozen voor dit criterium. Het totaal aan meter klei in de 30 m boven het opslag pakket dient minimaal 10 m te zijn. Zo niet dan geldt dit als showstopper. Een dikte tussen 10 en 15 m geldt als risico. Vanaf 15 m is sprake van een goede thermische afsluiting.

Doorlaatvermogen opslagpakket

Het doorlaatvermogen (m^2/d) is de doorlatendheid (m/d) over de effectieve dikte van de aquifer (m). Het debiet van een HTO wordt in de praktijk bepaald door het doorlaatvermogen op de diepte van de bronfilters. De waarde van $100 m^2/d$ komt bij volledige filterstelling ongeveer overeen met een debiet van ongeveer $20 m^3/$ uur per bron (gebaseerd op de NVOE-onttrekkingsnorm en onttrekking met de natuurlijke grondwatertemperatuur). Doordat de filterlengte altijd wat kleiner is dan de dikte van het opslagpakket, is het bruikbare doorlaatvermogen ook altijd wat lager dan het doorlaatvermogen van het gehele opslagpakket. Daardoor komt het debiet volgens de onttrekkingsnorm bij een doorlaatvermogen van het opslagpakket van $100 m^2/d$ nog wat lager uit dan $20 m^3/$ uur. Daar staat tegenover dat het doorlaatvermogen bij hogere (onttrekkings)temperaturen hoger wordt (lagere viscositeit van het water), waardoor hogere debieten mogelijk worden. Het debiet kan nog verder worden opgehoogd door te kiezen voor overschrijding van de NVOE-onttrekkingsnorm. Daar zijn positieve ervaringen mee bij de HTO in Middenmeer (onderbouwing door middel van vooraf uit te voeren testen in een proefbron worden daarbij als noodzakelijk gezien). Voor een groene score is als minimale waarde een doorlaatvermogen van $250 m^2/d$ gehanteerd. Dit is gebaseerd op de HTO in Middenmeer, waar het

doorlaatvermogen van het opslagpakket circa 300 m²/d was en waar een debiet van 150 m³/uur is gerealiseerd (mede door overschrijding NVOE-onttrekkingsnorm).

Bij te hoge doorlaatvermogens (grotere diktes en/of grotere doorlatendheden) kan het proces van opdrijving leiden tot relatief grote warmteverliezen, waardoor het opslagrendement te laag wordt. De bovengrens van het groene gebied is voor de categorie 75-85°C gebaseerd is op de case Rotterdam Nesseland waar het doorlaatvermogen van de gehele zandlaag 660 m²/d bedroeg en waar uiteindelijk te lage opslagrendementen werden verkregen vanwege te grote verliezen door opdrijving (opslag temperatuur 86 °C). Aangezien de verliezen door opdrijving onder dezelfde omstandigheden kleiner worden bij lagere opslag temperaturen, zijn voor de bovengrens van de categorie groen verschillende waarden voor verschillende temperaturen aangehouden. De waarde van 600 m²/d die is toegepast voor 80-90 °C is voor lagere opslag temperaturen verhoogd op basis van de verhouding tussen de dichtheidsverschillen met het natuurlijke grondwater (~ 15 °C).

Afsluitende laag onderzijde

De thermische simulaties voor de pilot in Rotterdam Nesseland hebben laten zien dat het ontbreken van een goed afsluitende kleilaag aan de onderkant van het opslagpakket ongunstig is voor het opslagrendement (15-18% lager opslagrendement met matige of geen afsluitende kleilaag). Dit heeft te maken met het aantrekken van dieper gelegen, kouder grondwater, indien die onderliggende kleilaag afwezig is. Daarom is dit criterium opgenomen in de scoretabel. Echter, dit criterium kan niet leiden tot een showstopper omdat de impact van de aan- of afwezigheid van deze onderliggende kleilaag in relatie moet worden gezien met andere factoren (zoals filterstelling en opslagtemperatuur).

Inschatting opslagrendement

Eerste schatting opslagrendement is gemaakt met de methodiek van Schout et al. (2014). Dit is een snelle analytische berekening gebaseerd op het Rayleigh nummer, en geldt voor temperaturen tussen de 50-90 °C. Input parameters zijn: aquifer dikte, horizontale en verticale doorlatendheid, injectie volume, injectie temperatuur en achtergrond temperatuur. Deze methode houdt geen rekening met een afkaptemperatuur, de aanname is dat de hoeveelheden geïnjecteerd en geproduceerd water gelijk zijn. De output geeft thermische opslag rendementen in jaar 4. Output geeft slechts indicatie, maar is wel bruikbaar om de geschiktheid van verschillende potentiële opslagpakketten onderling af te wegen.

Omgevingsbelangen

Er is gekeken of er geen open- of gesloten bodemenergiesystemen binnen een straal van 500 m van de beoogde HTO locatie liggen, dan is de kans op nadelige beïnvloeding minimaal en wordt het juridische risico van de vergunbaarheid ook als minimaal ingeschat. Bij aanwezigheid van andere systemen binnen 300-500 m afstand is er wel een risico dat ongewenste effecten optreden (aangenomen dat die systemen dezelfde laag gebruiken) en zal nader onderzocht moeten worden in hoeverre de HTO vergunbaar is. In geval van andere systemen binnen 300 m is de kans op ongewenste effecten groot (aangenomen dat die systemen dezelfde laag gebruiken), waardoor de kans dat deze situatie niet vergunbaar is ook groot is.

Warming^{UP}GOO

Geothermie & Opslag Opschaling

Adres

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht

Postadres

Postbus 80015
3508 TA Utrecht

Telefoon

088 866 42 56

E-mail

contact@warmingup.info

Website

www.warmingup.info