

Warming^{UP}GOO

Geothermie & Opslag Opschaling

HTO verkenning Capelle

door

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

Februari 2025

HTO verkenning Capelle



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

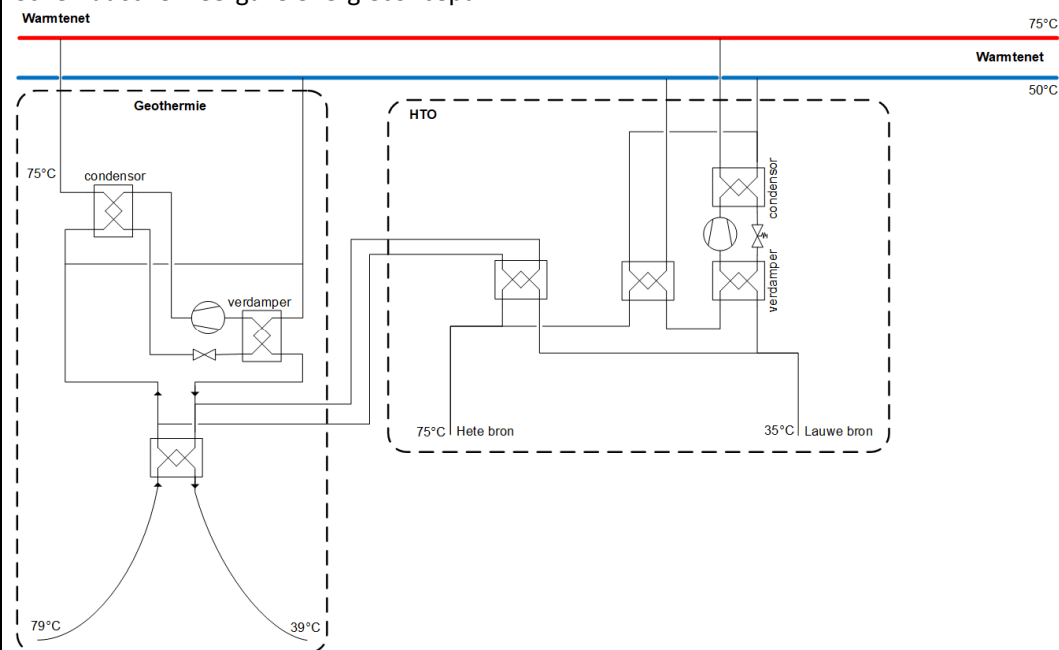
02/2025 ©

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veeleenvoudigd, 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;">Warming^{UP}GOO Verkenning ondergrondse warmteopslag Capelle</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). Capelle is één van deze drie locaties. De potentie van seizoensopslag is hier verkend voor het warmtenet waar naar toe wordt gewerkt voor de gebieden Prinsenland, Het Lage Land en de Florabuurt in Capelle aan den IJssel. Dit warmtenet moet van warmte voorzien gaan worden door een geothermiedoublet. 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. Er is vanuit gegaan dat de geothermiebron altijd draait in combinatie met een warmtepomp om de temperatuur van geothermische warmte uit te koelen.</p> <p>Warmtenet:</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Aanvoer- en retourtemperaturen</td> <td style="text-align: right;">75 – 50 °C</td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Totaal warmtevraag</td> <td style="text-align: right;">106.000 MWh_{th}</td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Piekvermogen</td> <td style="text-align: right;">58 MW_{th}</td> </tr> </table> <p>Warmtebronnen:</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Geothermie (+ warmtepomp)</td> <td style="text-align: right;">15,9 MW_{th}</td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Piekvoorziening</td> <td></td> </tr> </table> <p>HTO:</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Injectie-, afkap- en retourtemperatuur</td> <td style="text-align: right;">75 – 45 – 35 °C</td> </tr> </table>	Aanvoer- en retourtemperaturen	75 – 50 °C	Totaal warmtevraag	106.000 MWh _{th}	Piekvermogen	58 MW _{th}	Geothermie (+ warmtepomp)	15,9 MW _{th}	Piekvoorziening		Injectie-, afkap- en retourtemperatuur	75 – 45 – 35 °C	a
Aanvoer- en retourtemperaturen	75 – 50 °C												
Totaal warmtevraag	106.000 MWh _{th}												
Piekvermogen	58 MW _{th}												
Geothermie (+ warmtepomp)	15,9 MW _{th}												
Piekvoorziening													
Injectie-, afkap- en retourtemperatuur	75 – 45 – 35 °C												

Schematische weergave energieconcept:



Ondergrond (hoofdstuk 4)

Potentieel geschikte bodemlagen:	Maassluis - ondiep 1	Maassluis - ondiep 2	1 b
Diepte opslag:	85 – 120 m-mv	85 - 140 m-mv	
Effectieve dikte aquifer:	25	40	
Proefboring:	aangeraden		

Juridische haalbaarheid (hoofdstuk 4)

Provinciaal beleid	Toepassing HTO niet strijdig met beleid.	c
Zoet of zout grondwater:	Zout grondwater.	
Stakeholders ondergrond:	De ondiepe ligging van de beoogde opslaglagen is een aandachtspunt voor thermische effecten en omgevingsbelangen.	

Systeemprestaties & duurzaamheid (hoofdstuk 5 & 6)

	<u>Jaar 3</u>	<u>Jaar 10</u>	
Opslagvolume	500.000 m ³	500.000 m ³	2
Systeemrendement	58%	70%	
Cumulatief systeemrendement		57%	3
Cumulatieve onbalans		175%	
Dekkingsgraad ¹	15% (17.000 MWh _{th})	15% (21.000 MWh _{th})	
Reductie inzet piekvoorziening ²	68%	55%	
Verdringing geothermie + WP ²	4%	3%	
CO ₂ -intensiteit HTO+WP bij gebruiker		5,0 kg CO ₂ /GJ	

Referentie: emissie warmtelevering gasketel 62 kg CO₂/GJ

Referentie: in 2030 doelstelling warmtenetten 18,9 kg CO₂/GJ

¹Aandeel door de HTO (+ warmtepomp) geleverde warmte

²T.o.v. doorgerekende referentie zonder HTO

Business case (hoofdstuk 7)			
Investering (geïndexeerd)	7,5 M€		
Investering bronnen	2,0 M€	27%	
Investering warmtepomp	2,6 M€	35%	
Investering overig	2,8 M€	39%	
Operationele kosten (geïndexeerd)	1,2 M€/jaar		
Kosten elektriciteit	0,77 M€/jaar	64%	
Kosten overig	0,43 M€/jaar	36%	
Kostprijs geleverde warmte	31,1 €/GJ		4
Referentie: maximale warmtetarief volgens de ACM in 2024 bedroeg 38,42 €/GJ_{th}			
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	Het doorgerekende systeemconcept heeft een geschat systeemrendement van 70% in jaar 10. Het cumulatief systeemrendement van 57% is hoger dan de gewenste 50% na 10 jaar bij recente vergunningstrajecten.		
3	De totale hoeveelheid geleverde duurzame warmte neemt toe en de benodigde inzet van de piekvoorziening daalt met 55% in jaar 10.		
4	De berekende kostprijs voor de geleverde warmte (31,1 €/GJ) ligt ruim onder het maximale warmtetarief volgens de ACM in 2024 (38,42 €/GJ)		
<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	Er is onzekerheid over de aanwezigheid, eigenschappen en dikte van de beoogde opslaglagen. Een proefboring is nodig om hier uitsluitsel over te geven over.		
c	Door de ondiepe ligging moet het effect van warmteuitstraling richting het oppervlak door langdurige toepassing van HTO nog verder te worden uitgezocht.		

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	10
2.3 Bronnen	12
2.4 Regelstrategie	14
2.5 Overige uitgangspunten	15
3 Systeemconcept	16
3.1 Base case energieconcept	16
3.2 Gevoeligheidsanalyses	17
3.3 KPI's bij analyses	18
4 Geologische haalbaarheid	19
4.1 Hydrogeologische analyse	19
4.1.1 Criteria voor toepassing HTO	19
4.1.2 Gebruikte ondergrond informatie	20
4.1.3 Beschrijving regionale geologie	22
4.1.4 Bodemopbouw en potentiële opslagpakketten op de voorkeurslocatie	30
5 Thermische rendementssimulaties	34
5.1 Opzet en uitgangspunten model	34
5.1.1 Beschrijving modelopzet	34
5.1.2 Berekening thermisch terugwinrendement	35
5.2 Scenario's	36
5.2.1 Ondergrond uitgangspunten	36
5.2.2 Operationele uitgangspunten	36
5.2.3 Resulterende scenario's	37
5.3 Resultaten	38
5.3.1 Base case	38
5.3.2 Scenario's	40
6 Energetische en duurzaamheidsanalyses	41

6.1	Modellering en analyses	41
6.2	Inzet HTO Base Case	41
	Vergelijking met systeem zonder HTO (referentie case)	43
6.3	Dimensionering Base Case	44
6.4	Energetische en duurzaamheidsanalyse Base Case	44
6.5	Gevoeligheidsanalyses	46
7	Financiële analyses	48
7.1	Investeringskosten	48
7.2	Exploitatiekosten	49
7.3	Business case	50
7.4	Gevoeligheidsanalyses	51
8	Discussie, conclusies & vervolg	53
8.1	Discussie	53
8.2	Conclusies	54
8.3	Vervolg	55
	Referenties	56
	Bijlage 1 – Doorontwikkeling methodiek Verkenning HTO	58
	Bijlage 2 – Criteria tabel	60
	Bijlage 3 - CAP-01 boring	63

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 voor de locatie Capelle, zijn soortgelijke verkenningen uitgevoerd voor de locaties Rijnland en Schiebroek.

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:

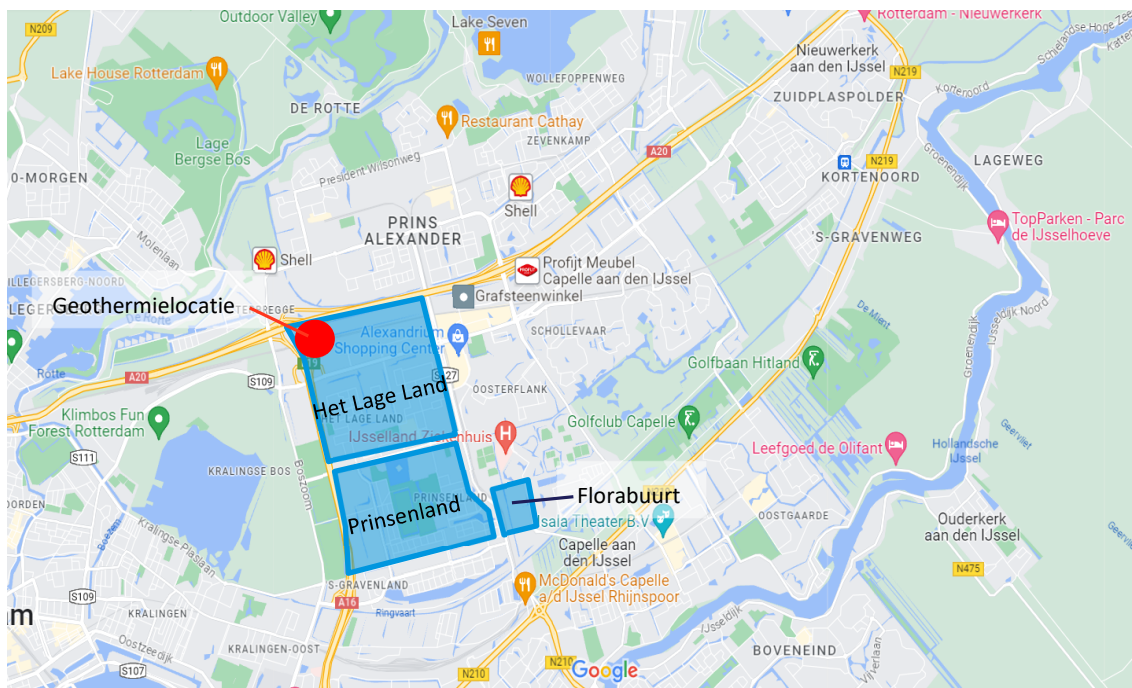
- De verkenning dient inzicht te geven in de haalbaarheid van HTO op de projectlocatie. Hiertoe dient bepaald te worden of en welke lagen van de bodem potentie hebben, of het technisch mogelijk is om HTO in te passen en wat de financiële en juridische haalbaarheid is.
- De resultaten van het onderzoek 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 in het oosten van de gemeente Rotterdam op de grens met Capelle aan de IJssel aan. Een globale situatieschets is gegeven in Figuur 2-1.



Figuur 2-1 Globale situatieschets met in blauw de verschillende deelgebieden

In de gebieden Prinsenland, Het Lage Land en de Florabuurt (PLF) wordt toegewerkt naar de uitrol van een duurzaam warmtenet, bestaande uit circa 12.000 woningequivalenten (zie paragraaf 2.2). Het warmtenet zal voorzien worden van duurzame warmte door geothermie (zie paragraaf 2.3). De eerste twee geothermie doubletten worden waarschijnlijk gerealiseerd op de locatie van de rode stip in Figuur 2-1.

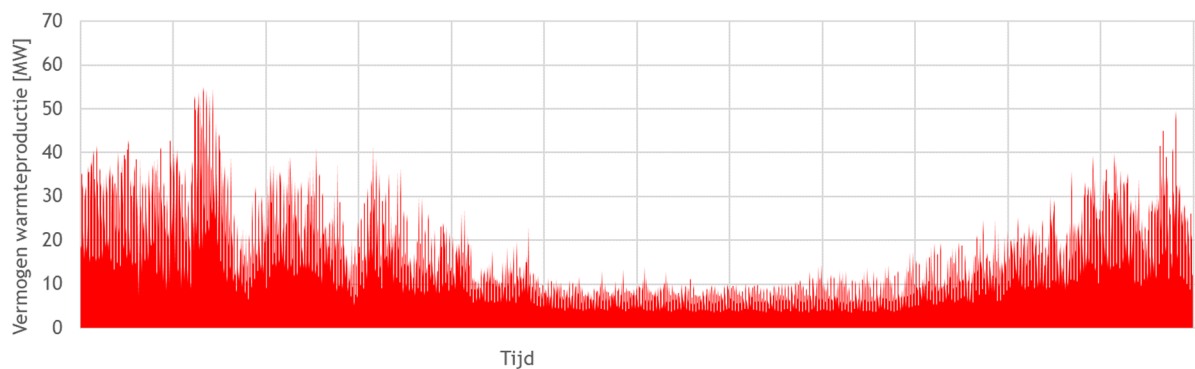
2.2 Warmtevraag

De ontwikkeling van het warmtenet staat gepland voor de gebieden Prinsenland, Het Lage Land en de Florabuurt (PLF, zie Figuur 2-1). Later vindt wellicht nog uitbreiding plaats richting het zuiden, maar dat is nog erg onzeker. Deze laatste ontwikkeling is in deze studie buiten beschouwing gelaten. Bij de aanleg van het warmtenet wordt ingezet op een 70/40 °C warmtenet. Om dit te bereiken is een productietemperatuur van 75 °C gewenst om aan alle woningen 70 °C te kunnen leveren. Uit ervaring blijkt dat een retourtemperatuur van 40 °C meestal niet gehaald wordt dus in de basis wordt in dit onderzoek uitgegaan van 50 °C retourtemperatuur. Als gevoeligheid wordt het effect van een retourtemperatuur van 40 °C onderzocht.

De belangrijkste uitgangspunten van het warmtenet zijn hieronder samengevat:

- Omvang: 12.000 woningequivalenten
- Totale warmtevraag: 106.000 MWh_{th} (383.000 GJ_{th}) per jaar
- Warmteverlies in warmtenet: 20%
- Totale warmteproductie: 133.000 MWh_{th} (478.000 GJ_{th}) per jaar
- Piekmogelijk productie: 58 MW_{th}
- Aanvoertemperatuur wijknet: 75°C (constant)
- Retourtemperatuur wijknet: 50°C (constant)

Eneco heeft een jaarprofiel voor het warmtenet aangeleverd met daarin de geschatte benodigde warmteproductie per uur (zie Figuur 2-2).

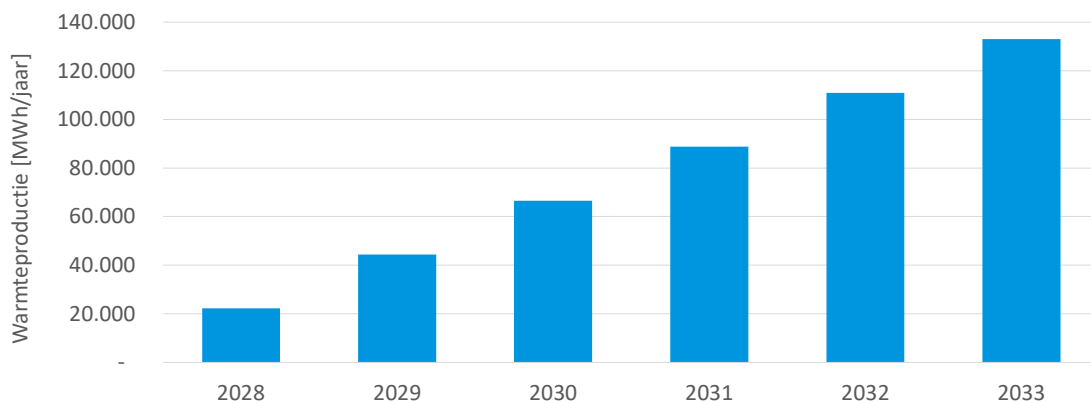


Figuur 2-2 Productieprofiel warmtenet bij een productievraag van 133.000 MWh_{th}.

Enkele kengetallen vanuit het jaarprofiel zijn:

- Piekmogelijk: 58 MW_{th}
- Gemiddeld vermogen: 15,2 MW_{th}
- Equivalente vollasturen: 2.300 h/a

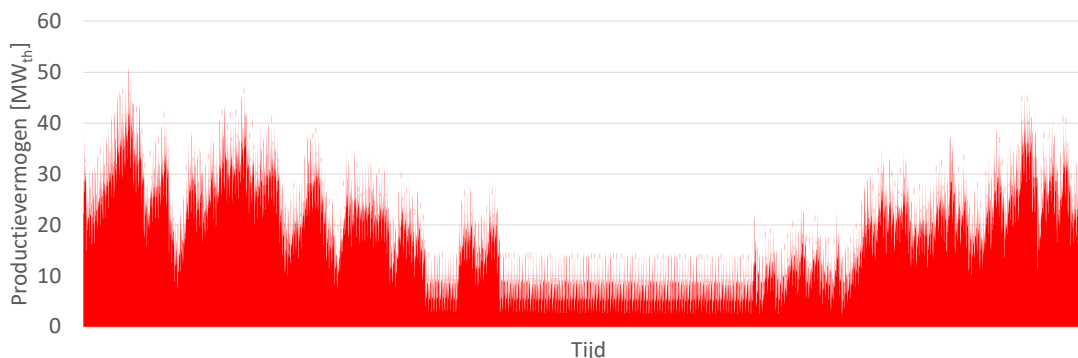
De fasering van het project is momenteel onbekend. In deze studie is aangenomen dat realisatie start in 2028 en dat alle woningen in 2033 zijn aangesloten. Dit komt overeen met 2.000 woningen per jaar. Op basis van deze aannames is een groei van de benodigde productie ingeschat (zie Figuur 2-3).



Figuur 2-3 Aangenomen 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 2-4.



Figuur 2-4 Toekomstbestendig productieprofiel warmtenet bij een productievraag van 154.000 MWh_{th}.(2035)

Enkele kengetallen vanuit het jaarprofiel zijn:

- Piekvermogen: 43,3 MW_{th}
- Gemiddeld vermogen: 15,2 MW_{th}
- Equivalente vollasturen: 3.100 h/a

Het maximale vermogen ligt circa 25% 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 onderzoekt de mogelijkheden voor het realiseren van een geothermiedoublet met warmtecentrale op de locatie zoals aangegeven in Figuur 2-1. Mogelijk komt er een tweede doublet op dezelfde locatie en twee tot vier doubletten elders in het opsporingsgebied. In deze studie is als uitgangspunt genomen dat één geothermiedoublet wordt gerealiseerd welke in 2028 operationeel is.

Over de geothermische bron is de volgende informatie aangeleverd:

- Productietemperatuur geothermie: 79 °C
- Injectietemperatuur geothermie: 39°C
- Productietemperatuur warmtepomp: 75 °C
- Debiet: 350 m³/h
- SPF¹: 11

Bij warmtelevering draait de geothermiebron altijd in combinatie met een warmtepomp. Dit is nodig om de temperatuur van geothermische warmte uit te koelen (39°C).

¹ Aanname constante waarde, ook bij deellast.

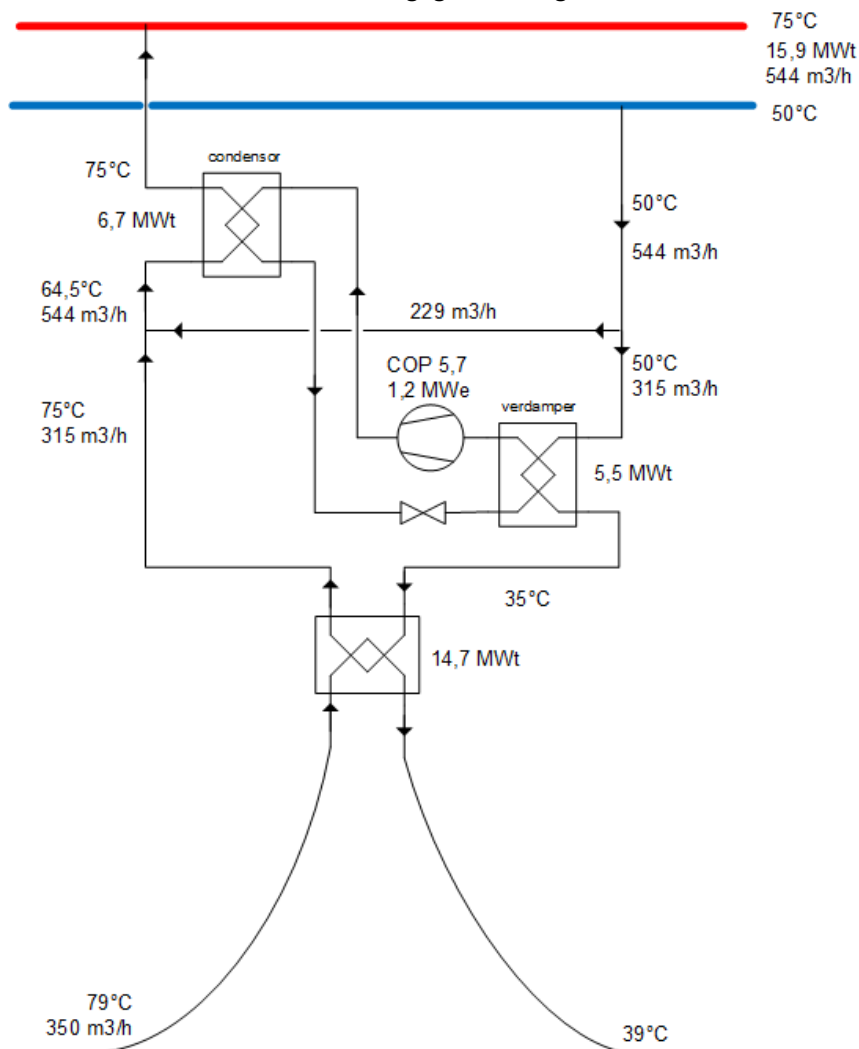
Aanvullend zijn de volgende aannames gemaakt:

- Aantal warmtewisselaars warmtenet: 2
- LMTD warmtewisselaars warmtenet: 2°C
- LMTD warmtewisselaars warmtepomp: 2,5°C
- Aantal trappen warmtepomp: 3
- Systeemrendement warmtepomp: 60%

Op basis van bovenstaande zijn de volgende waarden berekend:

- Maximaal vermogen warmtelevering geothermie: 14,7 MW_{th}
- Maximaal vermogen geothermie + warmtepomp: 15,9 MW_{th}
- COP Warmtepomp: 5,7
- Vermogen condensor: 6,7 MW_{th}
- Vermogen verdampers: 5,5 MW_{th}
- Elektrisch vermogen: 1,2 MW_e

Bovenstaande is schematisch weergegeven in Figuur 2-5.



Figuur 2-5 Principe geothermie plus warmtepomp

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++

Voor geothermische warmte is een SDE++ subsidie aangevraagd, welke is verleend in februari 2023. De volgende uitgangspunten worden meegenomen in deze studie:

- SDE++ categorie: Diepe geothermie, middenlast
- Thermisch vermogen: 20 MW_{th}
- Max. vollasturen SDE++: 5.000 h/jaar
- Basisbedrag: 0,0974 €/kWh_{th}
- Max. subsidiebedrag op warmte opgeslagen in HTO: 0,0539² €/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 in de eerste 16 jaar.
- 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.

2.4 Regelstrategie

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

- 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 op 39°C.

² In principe is het subsidiebedrag dat beschikbaar is het verschil tussen het basisbedrag en het correctiebedrag. Het correctiebedrag wordt per jaar vastgesteld op basis van de TTF-gasprijs. In overleg met de opdrachtgever is bepaald om in deze studie uit te gaan van een vast subsidiebedrag op de warmte die wordt opgeslagen in de HTO van 0,0539 €/kWh_{th}.

- In de eerste twee jaar wordt zoveel mogelijk warmte geladen omdat de ondergrond 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 ³ (zonder belasting): | 8,7% |
| • Projectrendement: | 8,7% (gelijk aan WACC) |
| • Looptijd: | 15 jaar |
| • Gemiddelde elektriciteitsprijs in laadperiode: | 83 ⁴ €/MWh _e |
| • Gemiddelde elektriciteitsprijs in terugleverperiode: | 110 ⁴ €/MWh _e |
| • Kosten voor opslag van warmte: | n.v.t. ⁵ |
| • Kosten WP: | 470 €/kW _{th} |
| • Indexatie kosten: | 2% |
| • Indexatie inkomsten: | 2% |

Duurzaamheid

- | | |
|---|---|
| • CO ₂ -uitstoot opgeslagen warmte: | n.v.t. ⁵ |
| • Gemiddelde CO ₂ uitstoot elektriciteit huidig: | 0,214 ⁶ kg CO ₂ /MWh _e |
| • Gemiddelde CO ₂ uitstoot elektriciteit 2030: | 0,092 ⁷ kg CO ₂ /MWh _e |
| • Gemiddelde CO ₂ uitstoot elektriciteit 2050: | 0,0 kg CO ₂ /MWh _e |

³ 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.

⁴ Inclusief energiebelasting, exclusief BTW. Prijs ligt lager in laadperiode/zomerperiode dan in leverperiode/winterperiode.

⁵ Berekend is hoeveel extra elektriciteitsverbruik nodig is om geothermische warmte op te slaan in de HTO. De kosten hiervoor en CO₂-uittstoot hiervan zijn meegenomen door het extra elektriciteitsverbruik toe te kennen aan de HTO.

⁶ Nationaal Energie Dashboard

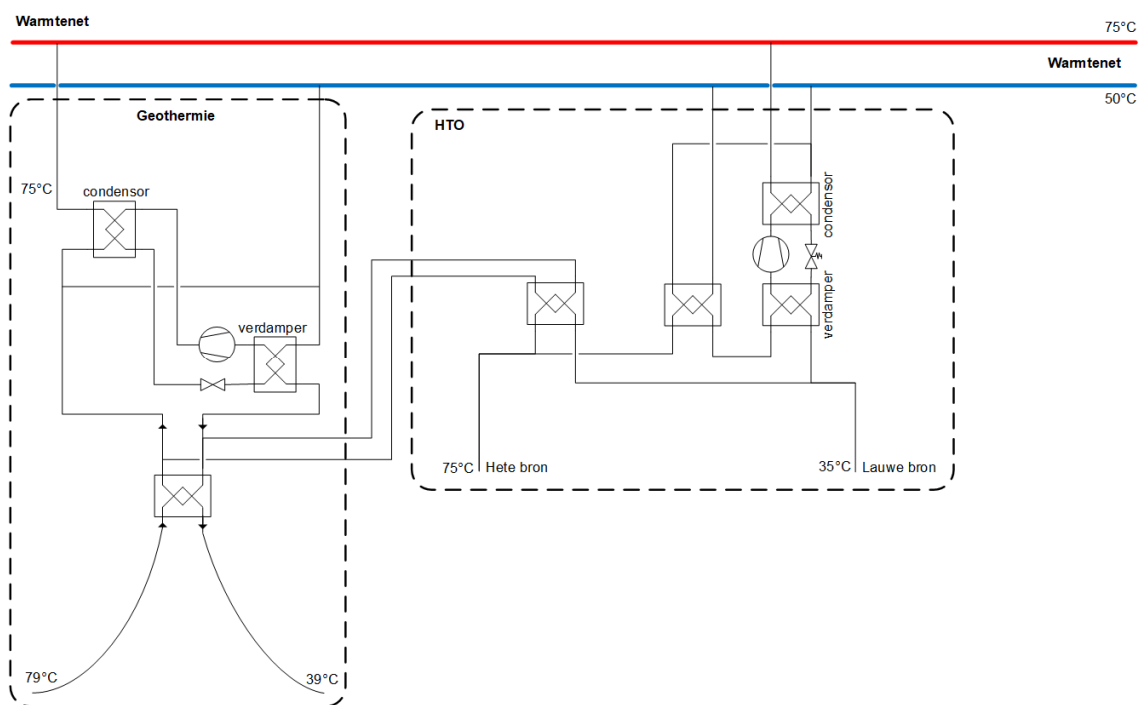
⁷ Emissiefactor elektriciteit uit fossiele bronnen, Voor compensatieregeling IKC-ETS, CE Delft, 2021

3 Systeemconcept

In deze studie is gekeken naar de inpassing van HTO, het zogenaamde energieconcept. Voor het energieconcept 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. De resultaten van de uitgevoerde analyses zijn te lezen in de opvolgende hoofdstukken. Bij de analyses is gekeken naar een aantal Key Performance Indicators (KPI) op basis waarvan de systeemconcepten beoordeeld kunnen worden. Deze zijn beschreven in paragraaf 3.3.

3.1 Base case energieconcept

Het energieconcept is schematisch weergegeven in Figuur 3-1. Onder de grafiek zijn een aantal zaken nader toegelicht die relevant zijn voor de base case van dit energieconcept.



Figuur 3-1 Schematische weergave energieconcept

- **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 75°C. Tijdens het laden wordt ervoor gezorgd dat de injectietemperatuur van het geothermiesysteem constant op 39°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 35°C.

- **Locatie:**
De HTO wordt ingepast bij de geothermielocatie (zie Figuur 2-1).

3.2 Gevoeligheidsanalyses

Gestandaardiseerde case

Naast deze HTO studie zijn nog twee andere verkenningen uitgevoerd voor HTO, namelijk HTO Rijnland en HTO Schiebroek. 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 met elkaar vergeleken worden bij , zoveel mogelijk, gelijke uitgangspunten. Dit wordt de “gestandaardiseerde case” genoemd. In de gestandaardiseerde case worden 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).
- Retourtemperatuur: de retourtemperatuur van het warmtenet is 50°C.

Merk op dat in deze verkenning de base case gelijk is aan de gestandaardiseerde case. Bij de andere verkenningen (Rijnland en Schiebroek) is dit niet het geval.

Aanvullende gevoeligheidsanalyses

Op de base cases worden 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 (+/- 20%). 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 (piekvraag) 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. De totale warmtevraag blijft gelijk.
- Variatie in retourtemperatuur: het warmtenet wordt ontworpen op een retourtemperatuur van 40°C. In deze studie is gerekend met een meer conservatieve waarde van 50°C. Het effect van een retourtemperatuur van 40°C wordt onderzocht.
- Variatie in opslagtemperatuur lauwe bron: gekeken zal worden naar het effect van een lagere opslagtemperatuur in de lauwe bron van 25°C (10°C lager). Een lagere opslagtemperatuur geeft een hoger systeemrendement. Er is echter ook een grotere warmtepompvermogen voor nodig en de warmtepomp zal meer elektriciteit verbruiken.
- 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

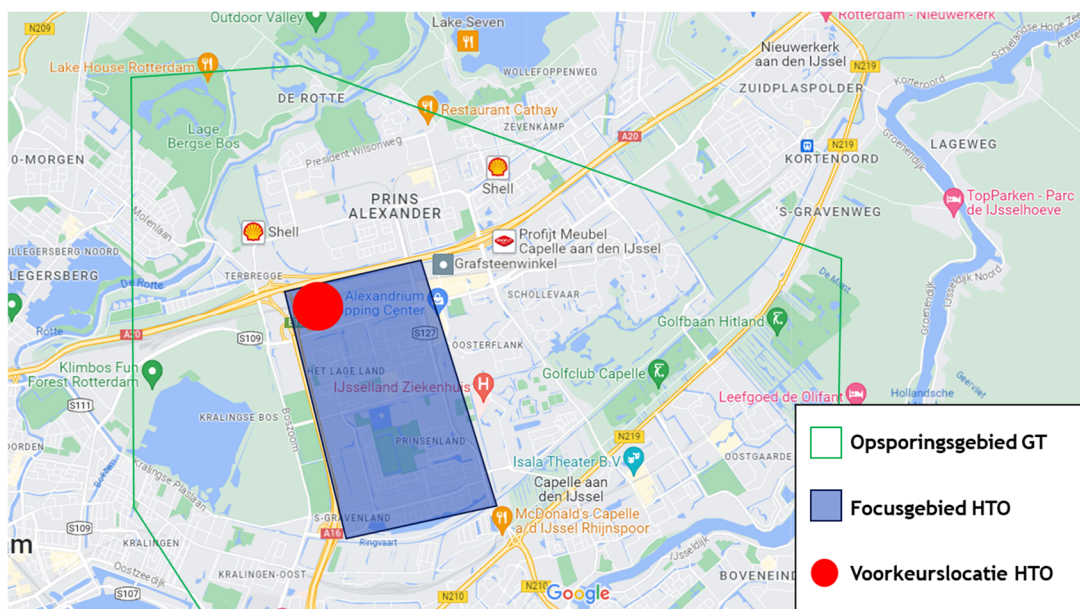
Voor een vergelijking tussen de energieconcepten en de gevoeligheidsanalyses is gekeken naar de volgende KPI's:

- 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 terug geleverde 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 een systeemrendement van 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 (8,7% na 15 jaar). Deze prijs (in €/GJ) kan vergeleken worden met de kosten van andere duurzame warmtebronnen voor een afweging van de financiële haalbaarheid.
- 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 de omgeving Capelle (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 Capelle en mogelijke locaties voor HTO. GT = geothermie.

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 sedimenten 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 2 voor gedetailleerde uitleg over de criteria.

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

criterium	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

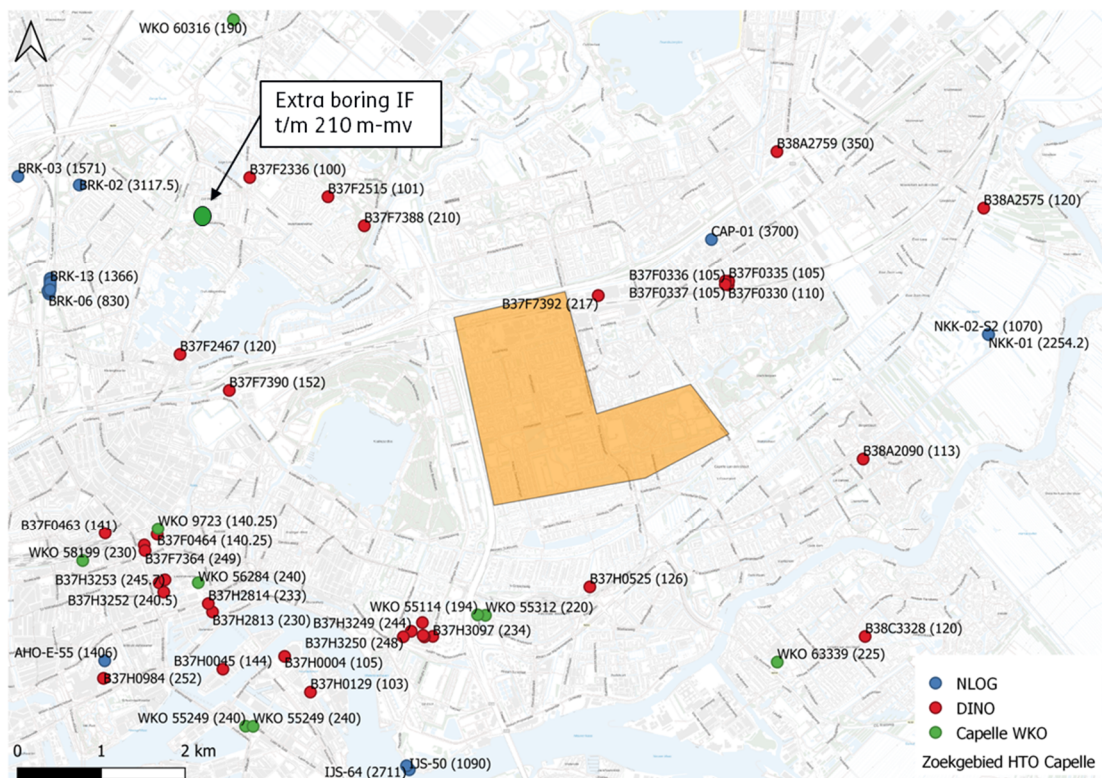
(3) aantal meter klei in de 10 m direct onder het opslagpakket

(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

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.



Figuur 4-2 Overzicht boringen rondom de locatie Capelle, 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.

Voor aanvullende informatie over de ondergrond is gekeken naar boringen in de omgeving (Figuur 4-2). In eerste instantie is gekeken naar boringen uit de DINO database met een diepte > 100 m (rode punten in Figuur 4-2). De proefboring van de HTO in Nesseland is de diepste boring (350 m) in de omgeving. Deze ligt ~4 km ten noordoosten van de beoogde HTO locatie in Capelle en heeft een boorgatmeting. Op ~3 km afstand ten zuidwesten van de HTO locatie ligt ook nog een 5-tal diepere boringen van 230-240 m diepte. En verder naar het westen liggen nog 4 boringen van ~230 m diep. Verder zijn er boringen rond de 100-120 m diepte, waarin de top van de Formatie van Maassluis niet is aangeboord.

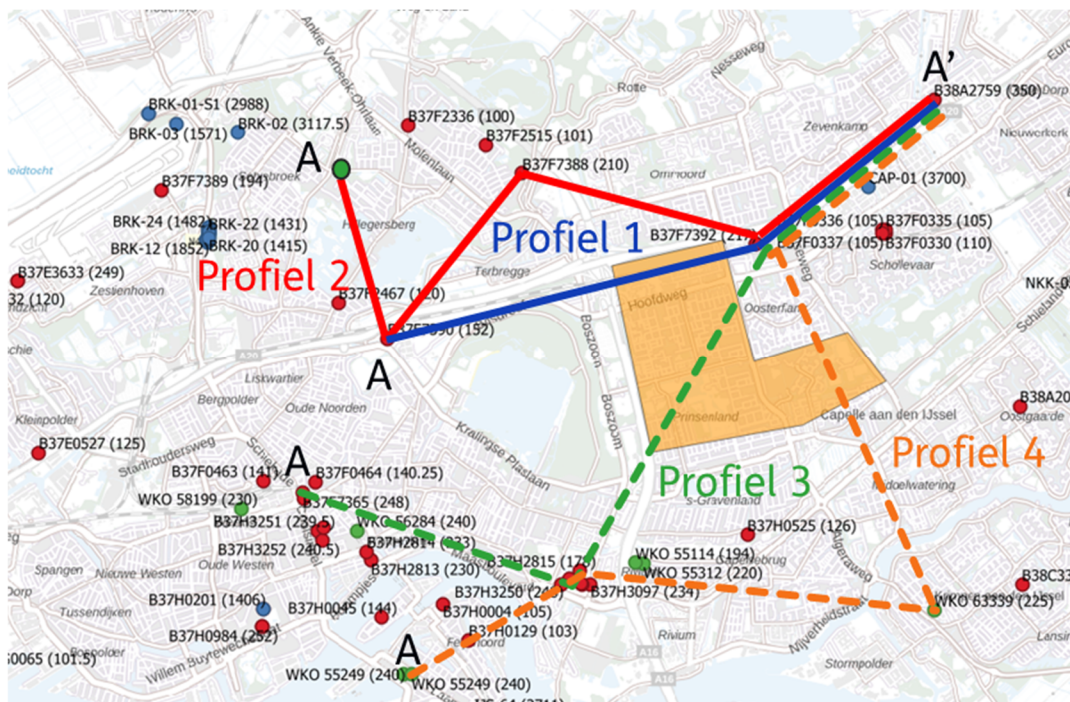
Ook zijn boorstaten van WKO systemen gebruikt om een beter beeld van de ondergrond te krijgen; de WKO boringen van het Eneco hoofdkantoor (WKO 58292, dit zijn twee boringen op een afstand van ~100 m van elkaar), liggen in het zoekgebied van Capelle. Van deze boringen is alleen een boorbeschrijving beschikbaar en geen boorgatmeting⁸. De boorbeschrijvingen van de twee boringen verschillen vrij sterk, ook al liggen ze dicht bij elkaar. Naast deze boring zijn ook acht andere WKO boringen in een straal van maximaal 6 km meegenomen in de analyse, de boringen variëren in diepte van 150-240 m. Confidentiële boringen uit de database van IF Technology zijn meegenomen tijdens de besprekingen en meegenomen in de analyse, maar kunnen niet worden weergegeven in dit rapport.

Er is een aantal diepere olie en gas boringen in de omgeving (blauwe stippen in Figuur 4-2, boringen uit de NLOG database), maar de kwaliteit van de beschrijving en boorgatmeting (gamma ray) van deze boringen is niet voldoende voor interpretatie van zand en kleilagen in de ondiepe ondergrond. 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. Dit is goed te zien in de boring het dichtst bij het zoekgebied, CAP-01, zie Bijlage 3.

In en rondom het zoekgebied zijn vier profielen gemaakt (Figuur 4-3), waar de beschikbare boringen uit DINO en uit de database van IF Technology op geplot zijn. Profiel 1 en 3 zijn gemaakt met de REGIS/DINOloket tool, profiel 2 en 4 met de tool van IF Technology, waarbij in de lithologie van de boringen ook een codering is opgenomen voor bijmenging van klei⁹ als dat is aangegeven in de boorbeschrijving.

⁸ Een boorbeschrijving is de beschrijving (vaak per meter) van het sediment dat omhoog is gekomen bij de boring. Door het omhoog pompen/zuigen van het sediment over een lange afstand kan het zijn dat sedimenten naar beneden vallen en ook stroomt het werkwater tijdens de boring langs de eerder doorboorde lagen waar soms nog wat materiaal van los kan komen. Hierdoor kan zijn dat het materiaal dat aan het maaiveld wordt opgevangen enigszins afwijkt van het materiaal op de diepte waar op dat moment wordt geboord. Bij een geofysische boorgatmeting worden met verschillende meetinstrumenten de eigenschappen van de bodemlagen gemeten in een open boorgat. Deze metingen zijn erg waardevol bij het bepalen van de lithologie (zand, klei) en bijvoorbeeld de kwaliteit van het grondwater (zoet, zout) op verschillende dieptes. De boorgatmeting geeft een betrouwbaar beeld van de variatie van de metingen met de diepte (en de metingen kunnen weer worden gebruikt om het type bodemmateriaal en/of grondwater af te leiden).

⁹ 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.



Figuur 4-3 Overzicht van de profielen gemaakt bij het zoekgebied Capelle. De mogelijke HTO locatie ligt in het noordwesten van het zoekgebied. Profiel 1 en 2 geven daar de meeste informatie en worden weergegeven in dit rapport. Ook zijn profielen gemaakt om het zuidelijk deel van het zoekgebied in kaart te brengen, echter lijkt dit toch geen optie te zijn voor HTO. Profielen 3 en 4 zijn daarom niet weergegeven in dit rapport.

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.

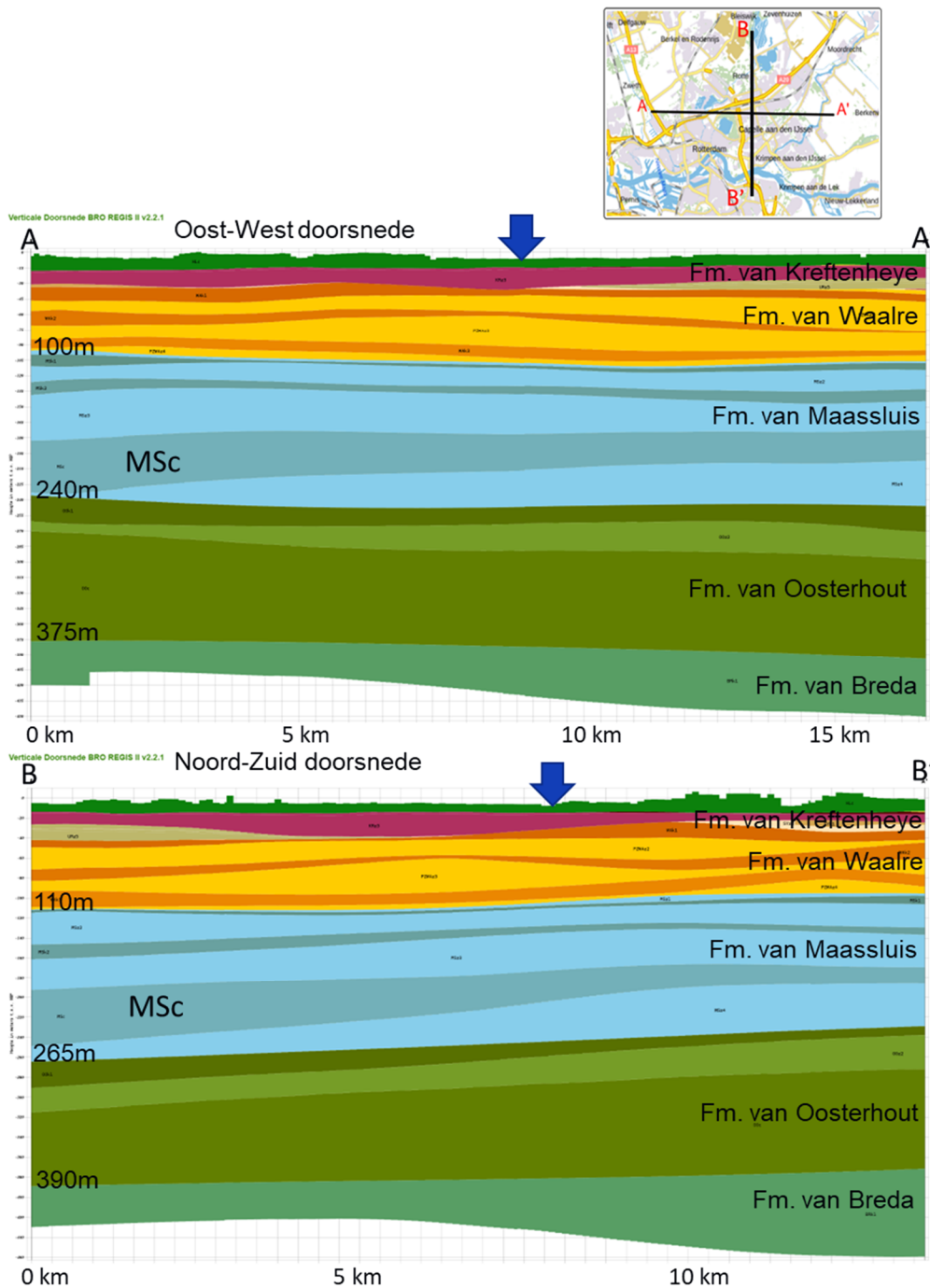
De **Formatie van Kreftenheye** bestaat uit fluviaatiele afzettingen. Rondom Rotterdam bestaat de formatie uit grof zand op een diepte van 10-30 m-mv en bevat de formatie methaanrijk grondwater.

De **Formatie van Waalre** bestaat uit rivierafzettingen van de Rijn en ligt in de omgeving van Rotterdam Capelle op een diepte van ~30-100/110 m-mv. Dunne kleilagen wisselen de zandlagen van de Formatie 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 kleilenzen en een dikkere 'complexe' laag (MSc in Figuur 4-4). Rondom de locatie Capelle 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 Nesselande (uitgevoerd tot 350 m diepte) is alleen klei (geen zand) aangetroffen in deze formatie.

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 kleilig is in deze omgeving. Daaronder ligt de **Rupel Formatie** (Boomse klei), een mariene kleilaag. Daaronder liggen formaties uit het Krijt tijdperk (zoals de **Formatie van Ommelanden**), en deze bevatten krijtmergel en krijtgesteente (sedimentair gesteende bestaande uit kleine kalkskeletjes van algen en andere fauna).

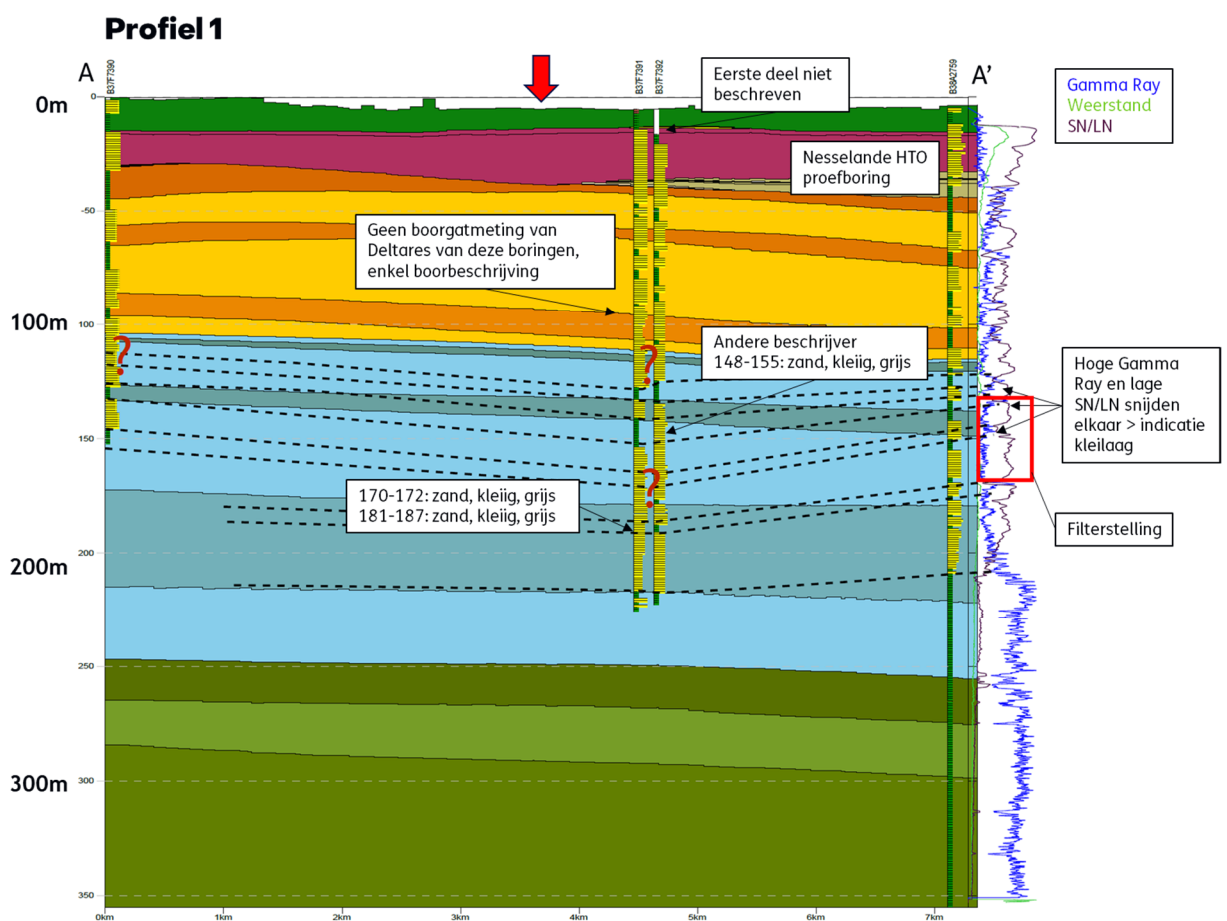


Figuur 4-4 Oost-West en Noord-Zuid doorsnede van de ondergrond rondom Rotterdam Capelle, volgens REGIS II v2.2.1. De blauwe pijl geeft de bovengrond locatie voor het zoekgebied Capelle aan.

Figuur 4-5 laat profiel 1 door het zoekgebied van Capelle zien. De voorkeurslocatie is aangegeven met de rode pijl. In de WKO boorbeschrijvingen lijkt de Formatie van Waalre een afwisseling van zand en kleilagen van zo'n 5-15 m dik.

De WKO boringen bij de zoeklocatie reiken tot halverwege de Formatie van Maassluis, de Nesselande boring (rechts) doorboort wel de gehele Formatie van Maassluis. Waar REGIS II v2.2 (achtergrond profiel) dikke zandpakketten laat zien in de Formatie van Maassluis, gescheiden door kleilagen van <5 tot maximaal 10 m dik en een complexe laag van ongeveer 40 m dik, geven de boorbeschrijvingen een ander beeld. Een poging is gedaan om het doorlopen van kleilagen tussen de boringen in te tekenen met zwarte stippellijnen. Echter, de variatie tussen de boorbeschrijvingen is groot waardoor de continuïteit van de kleilagen onzeker is.

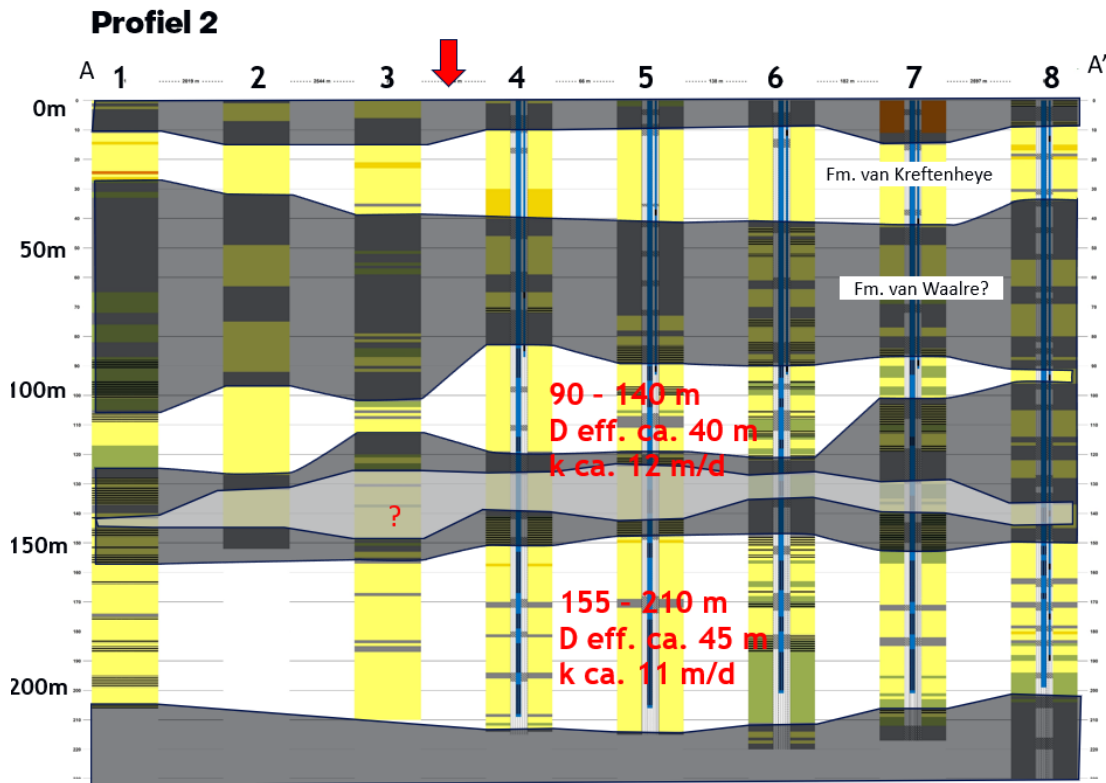
De Formatie van Oosterhout, alleen doorboord in de Nesselande boring, begint minder diep dan op REGIS II v2.2 staat aangegeven, rond 200-210 m-mv, en bestaat voornamelijk uit klei.



Figuur 4-5 Profiel 1. REGIS doorsnede van ZW-NO door het zoekgebied van Capelle. Vier boringen uit DINOloket zijn op het profiel geplot. Alleen voor de proefboring van Rotterdam Nesselande (rechts) is een boorgatmeting beschikbaar (blauw voor gamma ray, groen voor weerstand en paars voor Sonic log). 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, toont de aangetroffen bodemonsters per meter van 8 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 laat grote variatie tussen de beschrijvingen van de verschillende boringen zien. De Formatie van Waalre (~40-100 m-mv) laat een grote afwisseling van zand en kleilagen zien. De Formatie van Maassluis (~100-220 m-mv)

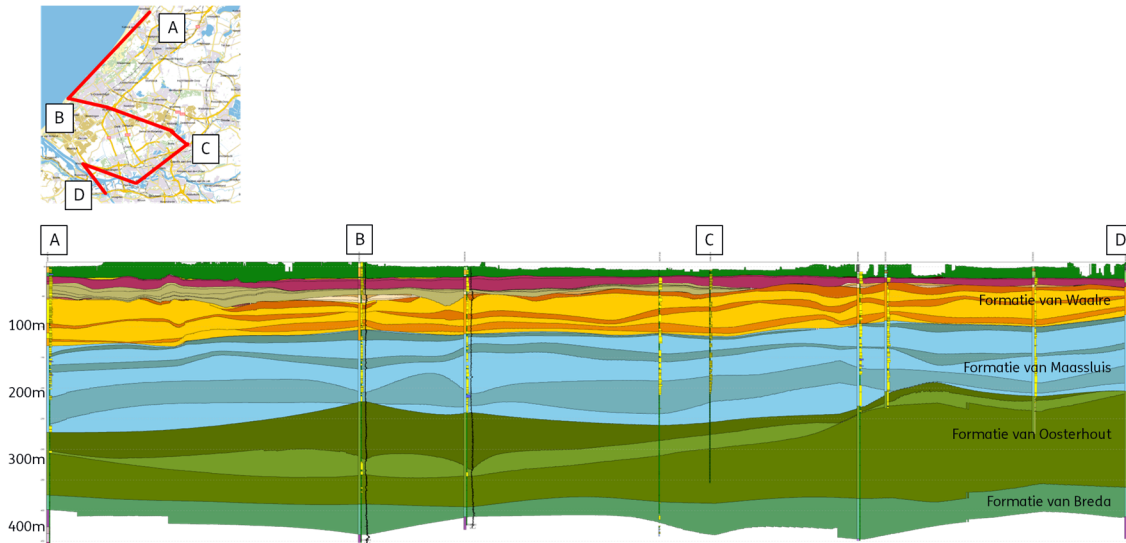
bevat zand met tussen circa 120 en 150 m-mv kleilagen met daartussen zand. De boringen reiken tot 200-210 m-mv. Aan de onderkant van de boringen lijkt klei aanwezig te zijn of wordt klei verwacht. Boring 8 laat onderin een dikke kleilaag van ten minste 25 m zien, vermoedelijk behorende tot het bovenste deel 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 zoeklocatie aan.

Omdat in de nabije omgeving van het zoekgebied geen boordata beschikbaar is van boringen die reiken tot ruim in de Formatie van Oosterhout en Breda, en dieper, is een profiel gemaakt door diepere boringen op grotere afstand van het gebied. In Figuur 4-7 is een 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, 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 slechts klei is aangetroffen (zie ook Figuur 4-5). 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).

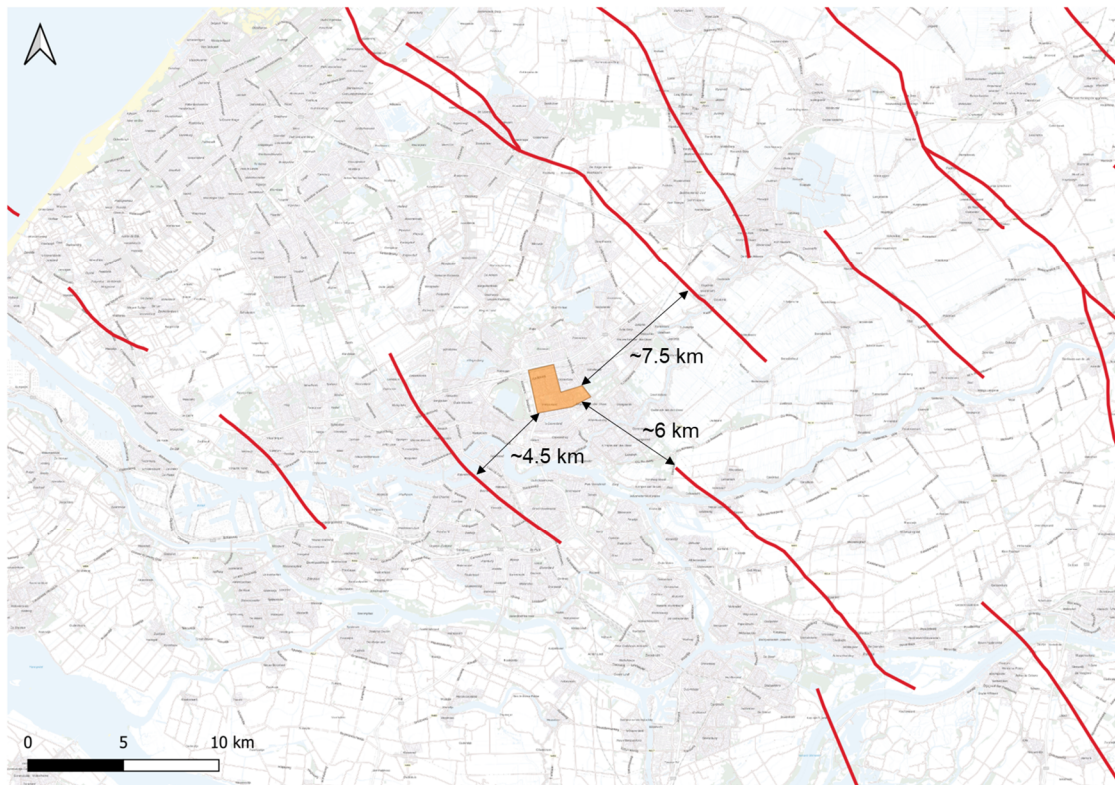
In de CAP-01 boring, ongeveer 2 km ten noordoosten van het zoekgebied (Figuur 4-2), is op 440-510 m diepte de Formatie van Ommelanden geïdentificeerd. In de HTO proefboring in Delft (DAPGEO-02) is de Formatie van Ommelanden aangeboord met als doel om meer informatie over deze formatie te krijgen. Echter bevatte de formatie veel methaangas, waarna de boring is stopgezet. Er zijn daarom geen steekkernen genomen en geen permeabiliteitstesten gedaan op de ze formatie.



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 Formatie van 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 op de boringen niet of heel dun te zien.

Breukenkaart

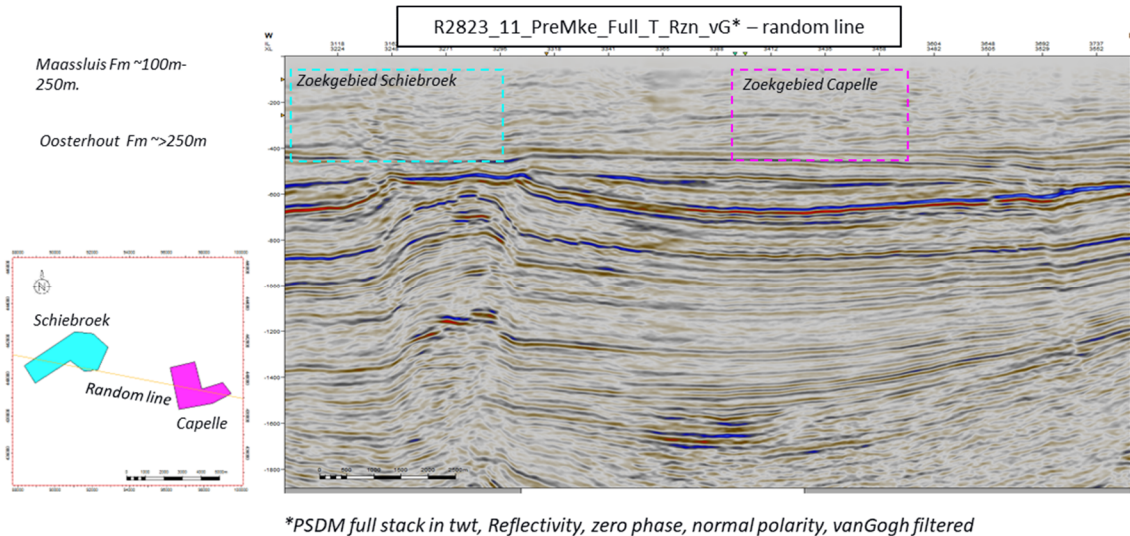
Er is gekeken naar de aanwezigheid van breuken in het zoekgebied. Het risico van het voorkomen van breuken in deze ongeconsolideerde sedimenten op de integriteit van het opslag systeem (lekkage van warm water naar bovenliggende aquifers) is niet goed bekend. In het WINDOW project is besproken dat een 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; Dinkelmann et al., 2020). Voor zover bekend zijn er 3 breuken op 4.5-7.5 km afstand van de locatie aanwezig (Figuur 4-8). 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 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 Capelle (roze stippellijn in doorsnede). De datakwaliteit in het ondiepe deel is van lage kwaliteit.

Relevante aanpalende studies

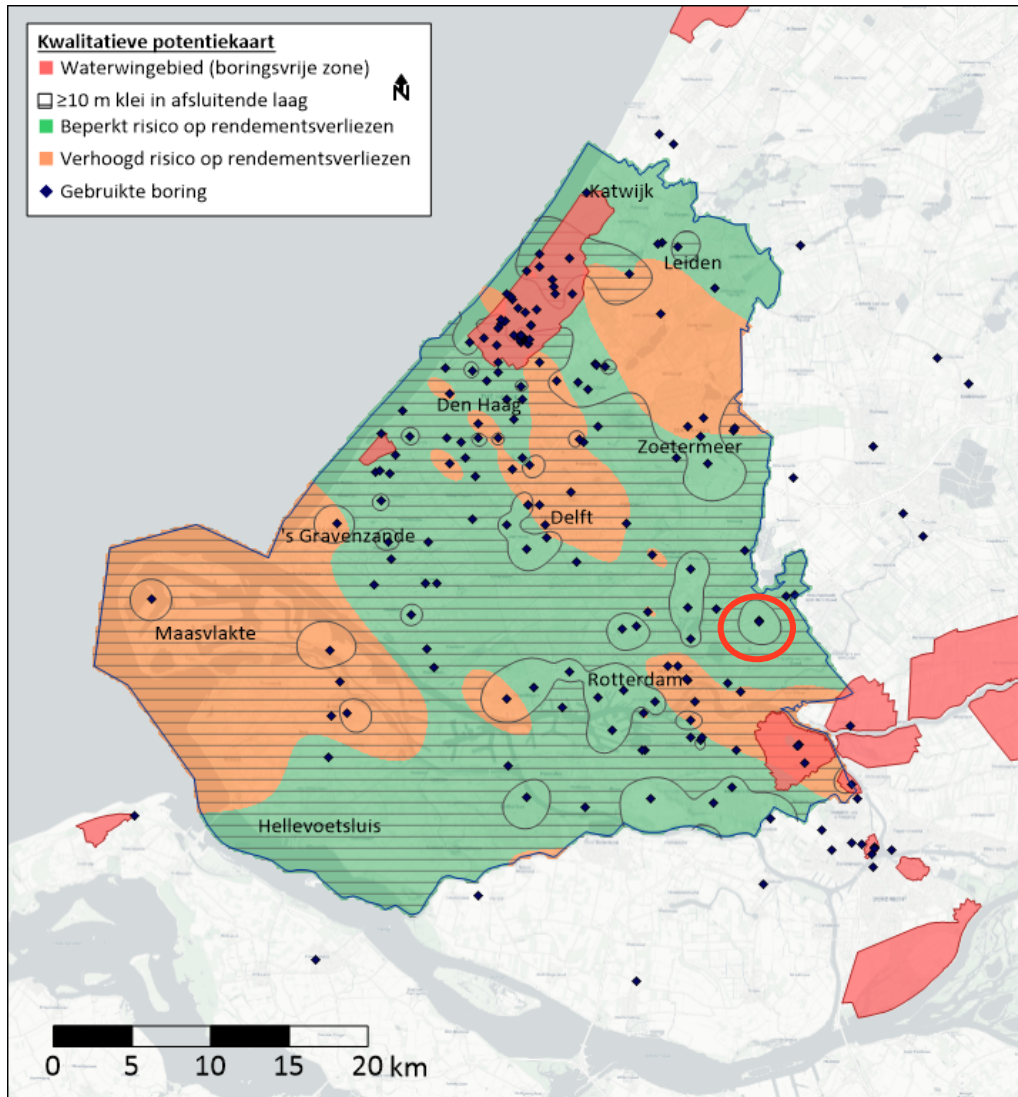
Potentieelstudie RES regio Rotterdam Den Haag

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 Capelle 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 potentiëkaart voor HTO in de Formatie van Maassluis. De rode cirkel geeft het zoekgebied van Capelle aan. Als er, gemeten vanaf de bovenkant van het opslagpakket, geen kleilagen 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. Als het gebied niet gearceerd is, is er mogelijk kans op minder goede afsluitende kleilaag (niet gearceerd gebied). 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. In de regio Capelle bevindt de overgang van zoet (< 150 mg Cl⁻/l) naar brak (150 - 1000 mg Cl⁻/l) grondwater zich op een diepte van ca. 30 m-mv. De overgang van brak naar zout (> 1000 mg Cl⁻/l) grondwater bevindt zich op een diepte van ca. 60 tot 90 m-mv. Dit is in de Formatie van Waalre. Dat betekent dat het grondwater in de Formatie van Maassluis en Oosterhout zout is.

Behalve dat het water in het opslag pakket niet zoet dient te zijn 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

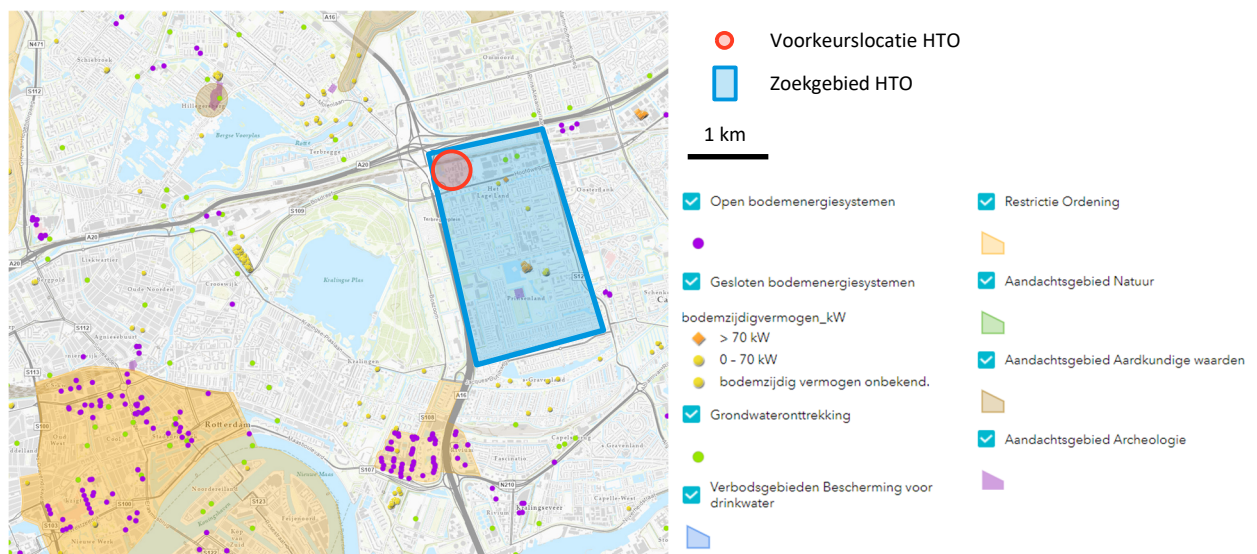
Uit de WKOtool (wkotool.nl) blijkt dat de locatie voor het overgrote gedeelte niet is gelegen in een restrictiegebied voor bodemenergie zoals een boringsvrije zone of een grondwaterbeschermingsgebied.

Aandachtsgebieden

Uit de WKOtool (wkotool.nl) blijkt dat de locatie voor het overgrote gedeelte niet is gelegen in een aandachtsgebied zoals voor aardkundige of archeologische waarden. Wel ligt er een klein aandachtsgebied voor archeologie in het projectgebied. Voor realisatie van een HTO in dit aandachtsgebied is een vergunning nodig.

Omgevingsbelangen

Er zijn enkele gesloten bodemenergiesystemen gerealiseerd in het projectgebied. Hier dient rekening mee gehouden te worden bij de inpassing van een HTO-systeem, maar dit vormt geen belemmering. Daarnaast zijn enkele grondwateronttrekkingen in het gebied aanwezig. Bij het bevoegd gezag dient in een vervolfase nagegaan te worden of dit permanente (diepe) industriële onttrekkingen zijn of tijdelijke (ondiepe) grondwateronttrekkingen.



Figuur 4-11 Omgevingsbelangen rondom de projectlocatie Capelle (rood). Bron: WKOtool.nl.

Voorkeurslocatie

De voorkeurslocatie bevindt zich op voldoende afstand van restrictiegebieden, aandachtsgebieden en omgevingsbelangen.

4.1.4 Bodemopbouw en potentiële opslagpakketten op de voorkeurslocatie

Figuur 4-12 laat opnieuw profiel 2 zien, waarop de potentiële opslagpakketten zijn aangegeven. De voorkeurslocatie bevindt zich tussen boring 3 en 4.

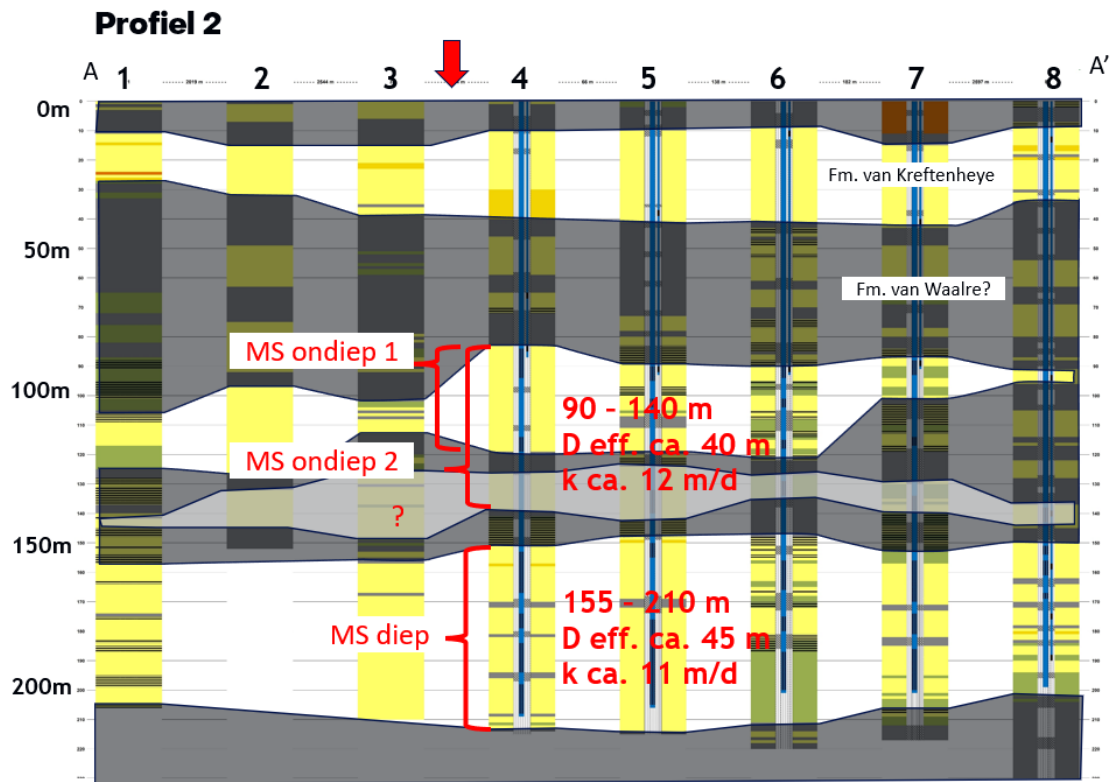
De ondiepe ligging in combinatie met het grove zand en methaanrijke water maakt de Formatie van Kreftenheye ongeschikt voor HTO toepassing.

De sterke afwisseling van zand en kleilagen en variabele opbouw van de Formatie van Waalre rondom de voorkeurslocatie maakt deze formatie minder geschikt. Als er zandlagen van wat grotere dikte worden aangetroffen, dan gaat het om relatief grove zanden wat tot verhoogde warmteverliezen door opdrijving leidt. Deze formatie wordt daarom ongeschikt geacht voor de toepassing van HTO.

De Formatie van Maassluis welke zich bevindt tussen de ~100 en 220 m, bestaat uit een afwisseling van klei en zandpakketten zien, waarvan de diktes sterk variëren tussen de boorbeschrijvingen. Ook boringen 3 en 4, waar de voorkeurslocatie zich tussen bevindt laat een sterke variatie zien. Binnen deze formatie zijn drie potentiële opslagpakketten geïdentificeerd die mogelijk geschikt zijn voor het toepassen van HTO: MS ondiep 1 en 2 en MS diep. Voor de twee ondiepe scenario's is de dikte van de zandpakketten onzeker, dan wel variabel. De totale, kleilig ontwikkelde Formatie van Waalre zou de afsluitende laag aan de bovenzijde vormen. De onderliggende afsluitende laag wordt in beide varianten gevormd door een relatief dunne kleilaag waarvan de dikte variabel en dus onzeker is. Ondanks dat de kleilagen in de figuur aan elkaar verbonden zijn, is het van belang om aan te geven dat dit slechts een interpretatie is en de continuïteit tot op zekere hoogte onzeker is, zoals ook geconcludeerd werd tijdens evaluatie van de resultaten van de proefboring in Rotterdam Nesseland. Variant MS diep beslaat een zandpakket dat in alle boringen voldoende dikte heeft. Hier wordt de bovenliggende afsluitende laag gevormd door de kleilaag waarvan dikte en continuïteit onzeker is. De afsluitende laag aan de onderkant betreft de klei van de Formatie van Oosterhout waarvan vrijwel zeker is dat deze dik en continu 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 440-510 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 de Formatie van Ommelanden in dit project niet geselecteerd als potentieel opslagpakket.



Figuur 4-12 Profiel 2. WKO boringen met zand (geel), klei (grijs) en kleibijmenging (horizontaal gearceerd). in blauw zijn de stijgbuizen 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 rode pijl geeft de ligging van de zoeklocatie aan. Drie mogelijke opslagpakketten zijn aangegeven in rood: Formatie van Maassluis (MS) ondiep 1, 2 en diep.

Tabel 4-2 Ingevulde criteria tabel voor de drie potentiële geologische scenario's op de voorkeurslocatie van het zoekgebied Capelle. MS = Formatie van Maassluis. Bij de rendementsinschatting zijn de volgende bovengrondse varianten voor netwerk aanvoer en retour temperatuur aangehouden: V1: 75°C/35°C, V2: 75°C/25°C.

Voorkeurslocatie bovengrond	Geobron Noord (voorkeur)		
Naam opslag pakket	MS - ondiep 1	MS - ondiep 2	MS - diep
Lithologie/opmerkingen		incl onderste deel, kleilaag van 2-5 m dik op ~120 m-mv	Kleilaagje op ~170 m-mv
Top Diepte (m-mv)	85	85	155
Bottom diepte (m-mv)	120	140	210
Totale dikte aquifer (m)	35	55	55
Effectieve dikte aquifer (m)	25	40	40
Doorlaatvermogen achtergrond T (m ² /d)	300	480	440
Hydraulische afsluiting (m)	8 (5-10)	8 (5-10)	5 (1-10)
Thermische afsluiting (m)	20-30	20-30	5 (1-10)
Dikte kleilaag onder aquifer (m)	5	5 (1-10)	>100
Rendement inschatting Var. 1/2 (%)	49 / 61 %	47 / 59 %	50 / 62 %
Omgevingsbelangen			
Beoogde opslag temperatuur (°C)	75	75	75
Filter lengte (m)	?	20	10-15
Kh (m/d)	12	12	11
Kv (m/d)	3.0	3.0	2.8
Totaal score			

De Formatie van Maassluis wordt dus als enige potentieel geschikte formatie gezien, met geschikte zandlagen voor de toepassing van HTO. Voor elk potentieel opslagpakket is gekeken in hoeverre het voldoet aan de gestelde criteria voor HTO toepassing. Tabel 4-2 laat de ingevulde criteria tabel zien voor de drie mogelijke HTO opslagpakketten uit Figuur 4-12.

Voor alle drie de potentiële opslagpakketten is de hydraulische afsluiting door de bovenliggende kleilaag een belangrijk risico. Voor MS-diep biedt ook de thermische afsluiting een risico vanwege een laag aantal meters aan klei in de 30 meter boven het opslag pakket. MS-ondiep 1 en 2 liggen slechts op een diepte van 85 m. Het effect van warmteuitstraling richting het oppervlak door langdurige toepassing van HTO dient in een volgende fase na het uitvoeren van de proefboring met thermische simulaties geëvalueerd te worden.

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 verschillen tussen de potentiële opslagpakketten zijn zeer klein, variant 2 geeft duidelijk een hogere inschatting van het rendement. De volgende stap is het nauwkeuriger bepalen van de te verwachten opslagrendementen met behulp van thermische modelberekeningen.

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
- Simulatieduur: 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 4-12.

- Thermische eigenschappen van zand (aquifers) en klei (aquitards): constant en gelijk aan waardes 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

De 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

Op locatie Capelle, ter plaatse van de voorkeurslocatie 'geobron noord', zijn 3 mogelijke opslagpakketten gedefinieerd, waarbij MS ondiep 1 en MS ondiep 2 de grootste potentie voor de HTO hebben. Van deze twee pakketten heeft MS ondiep 1 de voorkeur omwille van de ondiepere ligging (lagere boorkosten) en omdat voor het opslagvolume dit in een gunstigere geometrie van het thermisch volume geometrisch leidt om warmteverliezen te verkleinen. De representatieve anisotropie van de doorlatendheid in het opslagpakket (K_h/K_v) is onzeker, voor de base case is het ingeschat op een factor 4.

Tabel 5-1 laagopbouw voor pakket 'MS ondiep 1' het voorkeurspakket.

Laag	Top (model)	Bot (model)	K_h & K_v	Type laag
1	0	-20	0.01 & 0.0025	aquitard
2	-20	-55	12 & 3	aquifer
				aquifer
3	-55	-75	0.01 & 0.0025	aquitard

Tabel 5-2 laagopbouw voor pakket 'MS ondiep 2'.

Laag	Top (model)	Bot (model)	K_h & K_v	Type laag
1	0	-20	0.01 & 0.0025	aquitard
2	-20	-55	12 & 3	aquifer
				aquifer
3	-55	-60	0.01 & 0.0025	aquitard
4	-60	-75	12 & 3	aquifer
5	-75	-95	0.01 & 0.0025	aquitard

5.2.2 Operationele uitgangspunten

Qua operationele uitgangspunten zijn er 2 concepten gedefinieerd (1a en 1b). Het verschil tussen deze concepten zit hem in de grootte van de warmtepomp die zal worden toegepast op het systeem. Bij een grotere warmtepomp is een sterkere uitkoeling mogelijk, en heeft de lauwe bron temperatuur (en de afkaptemperatuur) dus een lagere waarde (in dit geval 10 °C verschil). Ondanks dat een grotere ΔT gunstig is voor het systeemrendement, is concept 1a (met hogere lauwe bron temperatuur) het voorkeursconcept (gebruikt in de basecase, zie Tabel 5-3) omdat is ingeschat dat de lagere kosten van de kleinere warmtepomp in dit geval opwegen tegen de verbeterde efficiëntie van de HTO door het verder kunnen uitkoelen van de retourstroom.

Tabel 5-3 Beschrijving van de gevarieerde operationele condities.

Afkorting	C1a_BC	C1a_Vmin	C1a_Vmax	C1b_BC
Concept	Concept 1a	Concept 1a	Concept 1a	Concept 1b
Scenario	Base Case	Volume min	Volume max	Base Case
Locatie	GT-locatie	GT-locatie	GT-locatie	GT-locatie
Laden				
Injectietemperatuur hete bron [°C]	75	75	75	75
Laadvolume [m3]	400.000	300.000	550.000	400.000
Duur laden [m]	5	5	5	5
Leveren				
Afkapt temperatuur [°C]	45	45	45	35
Injectietemperatuur lauwe bron [°C]	35	35	35	25
Maximale leverbolume [m3]	480.000	360.000	660.000	480.000
Duur leveren [m]	6	6	6	6
Rustperiode				
Duur rustperiode [m]	1	1	1	1

5.2.3 Resulterende scenario's

In totaal worden 6 simulaties uitgerekend om het te verwachten systeemrendement voor de HTO locatie in kaart te brengen (Tabel 5-4).

Base case scenario

Om de gevoeligheid van het systeemrendement voor een beperkte 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. Het base case scenario is opgesteld uit de laagopbouw met de meest geschikte laagopbouw (MS ondiep 1) en het meest relevante operationele scenario (C1a_BC).

Scenario's

Vijf aanvullende scenario's zijn daarnaast gesimuleerd waarbij de ondergrond is aangepast in het model (2 en 3) of de operationele inpassing zijn aangepast (4 t/m 6).

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

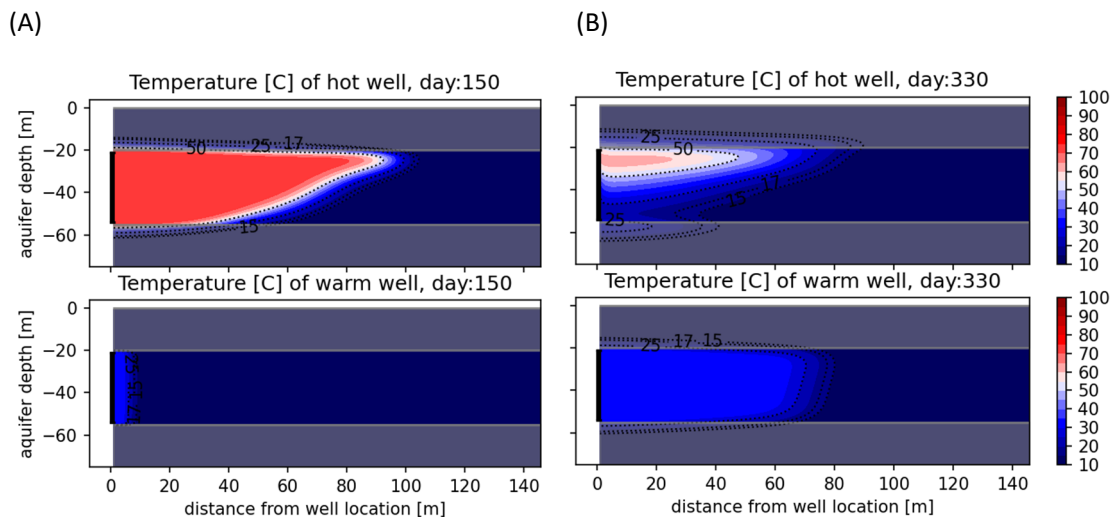
Nr.	Scenario naam	Ondergrond	Operationeel
1	Base case	MS ondiep 1	C1a_BC
2	MS ondiep 2	MS ondiep 2	C1a_BC
3	Anisotropie 10	MS ondiep 1 [anisotropie = 10]	C1a_BC
4	Vmin	MS ondiep 1	C1a_Vmin
5	Vmax	MS ondiep 1	C1a_Vmax
6	Concept B	MS ondiep 1	C1b_BC

5.3 Resultaten

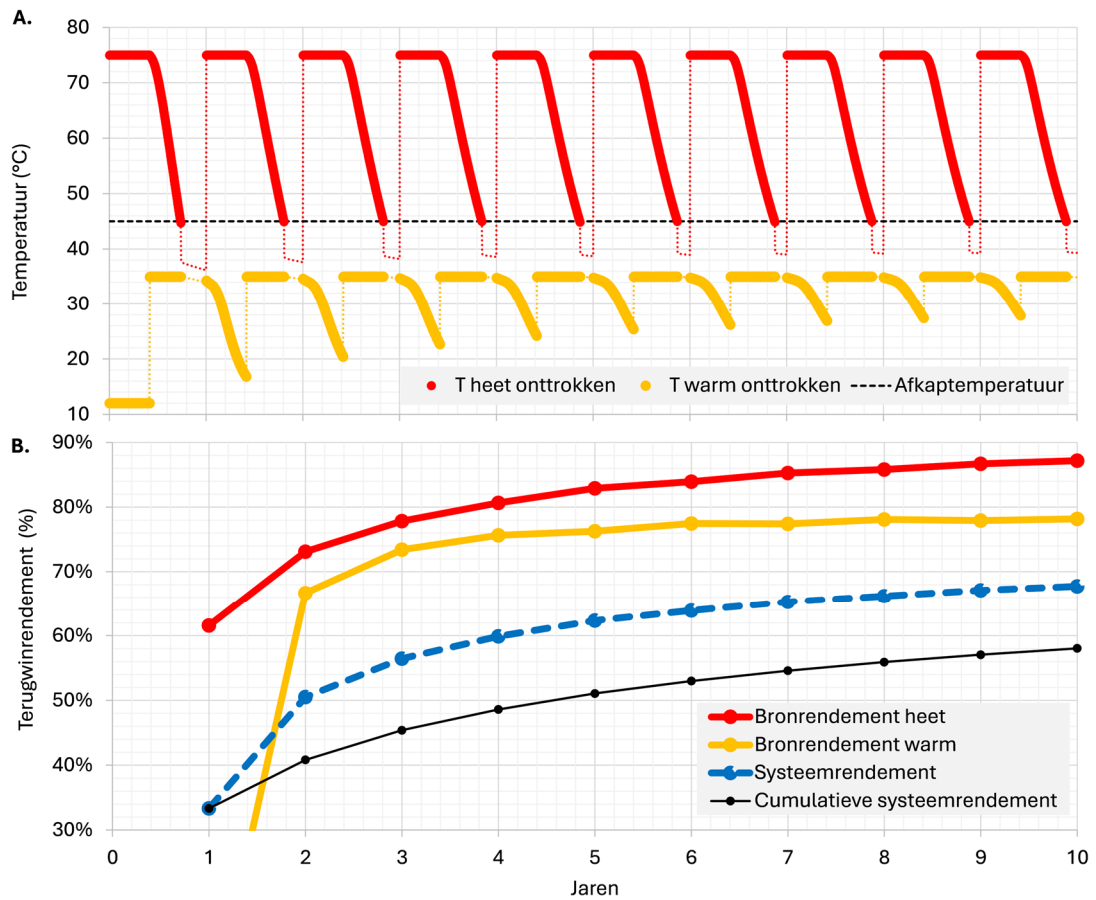
5.3.1 Base case

Voor het base case scenario is warmte opgeslagen in de hete bron met een temperatuur van 75 °C gedurende het laadseizoen van 150 dagen (Figuur 5-1). Tijdens ontladen is deze warmte onttrokken en het afgekoelde water opgeslagen in de warme bron op een temperatuur van 35 °C. Op het moment dat de afkaptemperatuur (45 °C) is bereikt stopt het ontladen (Figuur 5-2A). 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.

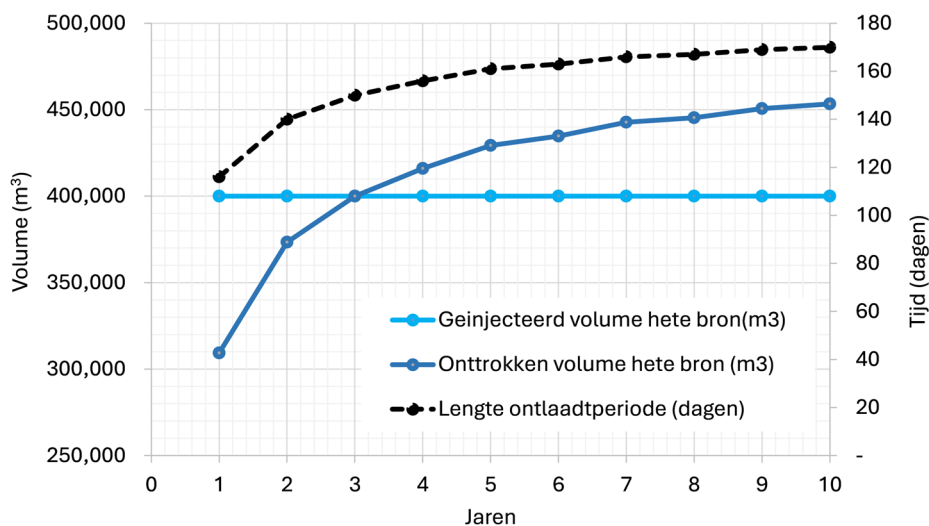
Daardoor neemt ook de tijd totdat de afkaptemperatuur bereikt is toe, van 116 dagen in het eerste jaar tot 170 dagen in jaar 10, met als resultaat dat het systeem na jaar 2 meer volume onttrekt dan er wordt opgeslagen (Figuur 5-3). Samen resulteert dit erin dat de efficiëntie van het systeem, het systeemrendement, met de jaren toeneemt van 33% in het eerste jaar tot 68% in het tiende jaar (Figuur 5-2B). 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 58% voor de base case.



Figuur 5-1 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). Zwarte verticale balk geeft de diepte van de bron weer, grijze horizontale balken (tussen 0 en -20 m en -60 en -80 m) de diepte van de afsluitende kleilagen boven en onder de opslaglaag.



Figuur 5-2 Resultaten voor het base case scenario. A. De afkaptemperatuur en de temperatuur onttrokken uit de hete en warme bron. Tijdens stilstand (na bereiken afkaptemperatuur) is de gemiddelde temperatuur in de bron gegeven (dunne stippellijn). B. Het jaarlijkse terugwinrendement van de hete bron, de warme bron, en het daaruit resulterende systeemrendement.

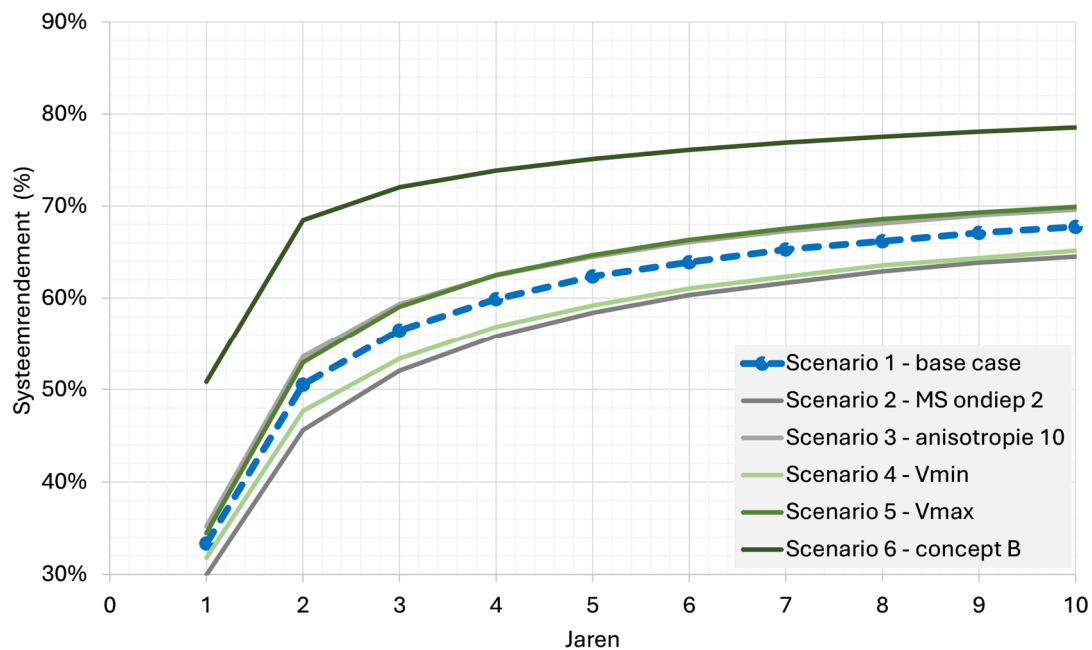


Figuur 5-3 Resultaten voor het base case scenario. Het jaarlijkse opgeslagen volume in de hete bron, de lengte van het ontladseizoen (tijd tot de afkaptemperatuur wordt bereikt) en de daaruit volgende totale onttrokken volume uit de hete bron.

5.3.2 Scenario's

De base case en de vijf gedefinieerde scenario's hebben in jaar tien een systeemrendement variërend tussen de 65% en 79%. De base case, en scenario 2 t/m 5 liggen dicht bij elkaar. Het stellen van 15m extra stuk filter in een dieper gelegen aquifer (scenario 2) heeft een relatief klein negatief effect op het systeemrendement van -3% in jaar 10 ten opzichte van de base case. Wanneer de verticale doorlatendheid van het opslagpakket wordt verkleint (aanname anisotropie 10 i.p.v. 4) neemt het systeemrendement beperkt toe met 2% ten opzichte van de base case (scenario 3).

De gevoeligheid van het systeem voor een groter (scenario 5) of kleiner (scenario 4) opslagvolume is relatief beperkt: +2% / -3% in jaar 10 ten opzichte van de base case. Het grootste effect op het rendement van het systeem is te zien voor scenario 6, waarbij de warme bron temperatuur en de afkaptemperatuur met 10 °C zijn verlaagd. Voor dit scenario is het rendement 79% in jaar 10, 11% hoger dan het base case scenario.



Figuur 5-4 Vergelijking van het jaarlijks systeemrendement van de verschillende scenario's van jaar 1 t/m 10.

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. Het energetisch model gebruikt deze database om het temperatuursverloop van de bronnen in te schatten door middel van interpolatie op basis van opslagvolume.

In deze studie is gekozen om de filters te plaatsen in Maassluis Ondiep 1. Deze laag geeft een hoger bronrendement dan Maassluis Ondiep 2. De thermische rendementssimulaties die gebruikt zijn voor de database, zijn simulatie 1 (Base Case), simulatie 4 (minimale volume) en simulatie 5 (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, is gerekend met een systeemrendement gelijk aan de simulatie met maximale opslagvolume. 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.

6.2 Inzet HTO Base Case

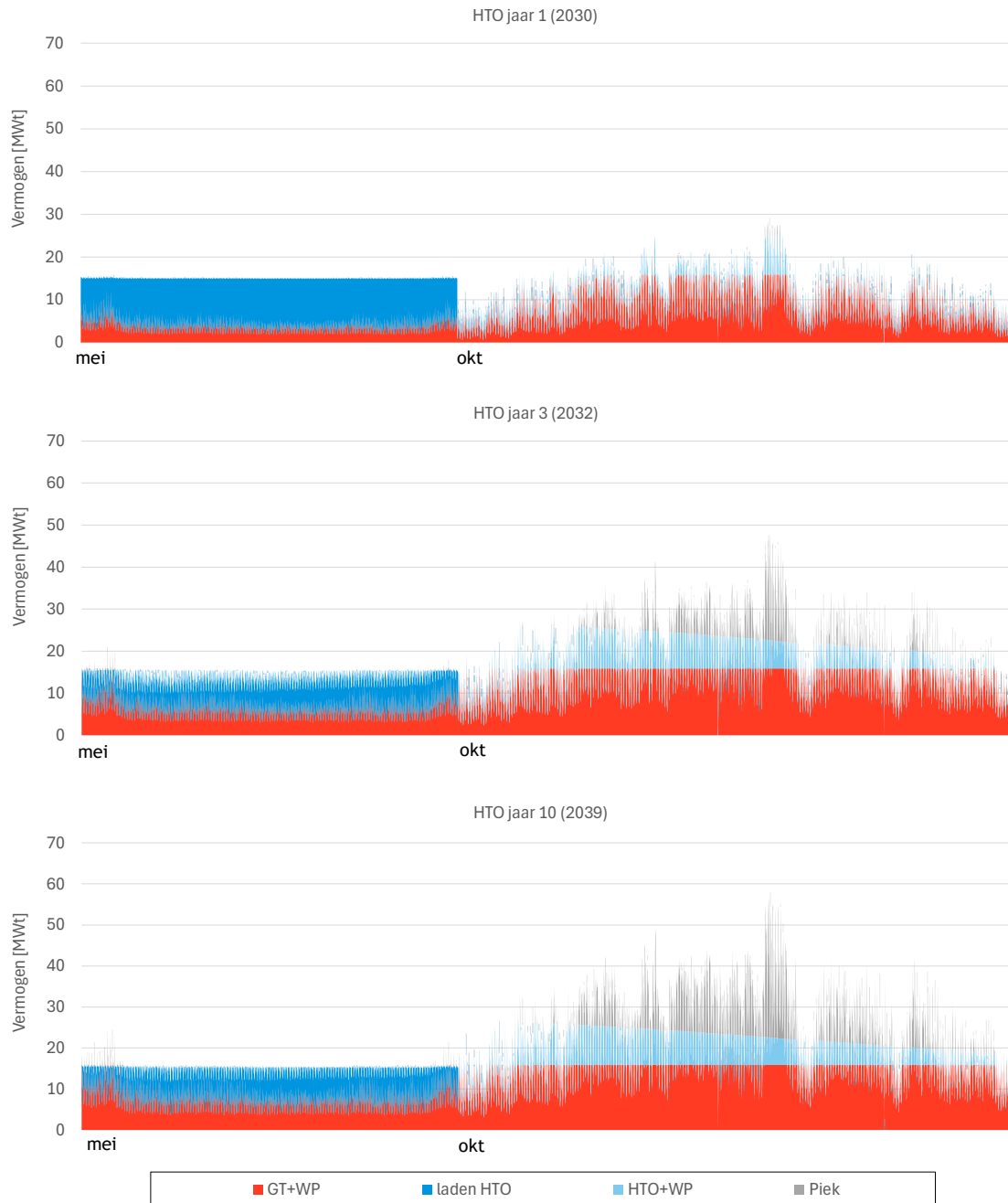
Voor de base case (paragraaf 3.1) is de inzet van de HTO bepaald. Hierbij is gebruik gemaakt van de resultaten uit de thermische rendementssimulaties (zie hoofdstuk 5) en de uitgangspunten (zie hoofdstuk 2). De thermische rendementssimulaties zijn uitgevoerd voor een periode van 10 jaar. Te zien is dat 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 gelijk is aan jaar 10.

De inzet is voor de base case grafisch weergegeven in Figuur 6-1. De weergegeven resultaten zijn voor de HTO jaren 1, 3 en 10. De warmtehoeveelheden zijn ook samengevat in Tabel 6-1.

Op basis van de beschikbare bronnen en de groei van de warmtevraag is bepaald dat de HTO ingezet kan worden vanaf 2030. Voor die tijd is de warmtevraag beperkt en kan deze (nagenoeg) volledig worden ingevuld door 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 het geothermiesysteem in combinatie met de warmtepomp. De resterende geothermische warmte wordt zoveel mogelijk opgeslagen in de HTO. De hoeveelheid die kan worden opgeslagen wordt begrensd door het maximale debiet van de HTO tijdens laden (max. 200 m³/h, zie Tabel 6-4). In het eerste jaar kan alle resterende geothermische warmte worden opgeslagen. De capaciteit van de

HTO hiervoor is voldoende. Vanaf jaar 3 wordt niet meer alle beschikbare geothermische warmte opgeslagen. Er wordt vanaf dat moment namelijk gezocht naar een balans tussen warmteopslag en de hoeveelheid warmte die in de winter geleverd kan worden met de HTO.



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 Tabel 6-3).

Van oktober tot en met april wordt warmte geleverd vanuit de HTO. In deze periode wordt eerst warmte geleverd door de geothermie in combinatie met de warmtepompcentrale. 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. Dit heeft als gevolg dat wanneer de totale warmtevraag lager is dan het vermogen van het geothermiesysteem (inclusief warmtepompcentrale) de

geothermiebron iets terug zal toeren, zodat ook de HTO op minimale deellast door kan blijven draaien tijdens levering. 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 procentuele warmtelevering van de HTO ligt door de jaren heen rond de 16%.

Tabel 6-1 | Hoeveelheden geproduceerde warmte in jaar 1, 3 en 10 van de base case.

	HTO jaar 1 (2030)		HTO jaar 3 (2032)		HTO jaar 10 (2039)	
	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel
	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]
Geothermie + WP	56.000	84%	88.000	79%	98.000	74%
HTO + WP	11.000	16%	17.000	15%	21.000	15%
Piek	-	0%	6.000	5%	14.000	11%
Totaal	67.000	100%	111.000	100%	133.000	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 warmte zoveel mogelijk geleverd door geothermie in combinatie met de warmtepomp. De bijbehorende warmtehoeveelheden 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).

	2030		2032		2039	
	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel
	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]
Geothermie + WP	65.000	97%	92.000	83%	101.000	76%
Piek	2.000	3%	19.000	17%	32.000	24%
Totaal	67.000	100%	111.000	100%	133.000	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 en de warmtepomp aan het warmtenet. Doordat de HTO een minimale deellast heeft van 20%, wordt de warmtelevering door geothermie en de warmtepomp aan het warmtenet deels verdrongen. Merk op dat de warmteproductie 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.

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

	2030		2032		2039	
	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel
	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]
Inzet piek referentie case	2.000	3%	19.000	17%	32.000	24%
Inzet piek base case	-	0%	6.000	6%	14.000	11%
Reductie inzet piek absoluut	2.000	3%	13.000	12%	18.000	13%
Reductie inzet piek relatief		98%		68%		55%
Geothermie + WP referentie case	65.000	97%	92.000	83%	101.000	76%
Geothermie + WP base case	56.000	84%	88.000	79%	98.000	74%
Verdringing geothermie+WP abs.	9.000	13%	4.000	4%	3.000	2%
Verdringing geothermie+WP rel.		13%		4%		3%

Door de inzet van HTO daalt de inzet van de piekvoorziening. In het eerste jaar is de relatieve daling bijna 100% en in absolute zin 3% (van 3 naar 0%). In de loop van de tijd is de relatieve daling 55% en in absolute zin 13% (van 24 naar 11%). De hoeveelheid geleverde duurzame warmte (geothermie met warmtepomp en HTO met warmtepomp) neemt toe door het toevoegen van een HTO-systeem.

De verdringing van de levering van geothermische warmte met een warmtepomp aan het warmtenet is in het eerste jaar relatief hoog (13% relatief en absoluut), maar op termijn neemt dit sterk af. Uiteindelijk 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.

6.3 Dimensionering Base Case

Vanuit de inzet 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]	120
Afstand bronclusters	[m]	250
Capaciteit warmtepomp	[MW _{th}]	5,1

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. Zowel bij laden (beperkt vermogen geothermiebron) als bij levering (onvoldoende resterende vraag) treed dan een beperking op, waardoor een HTO met een debiet van 300 m³/h niet effectief is.

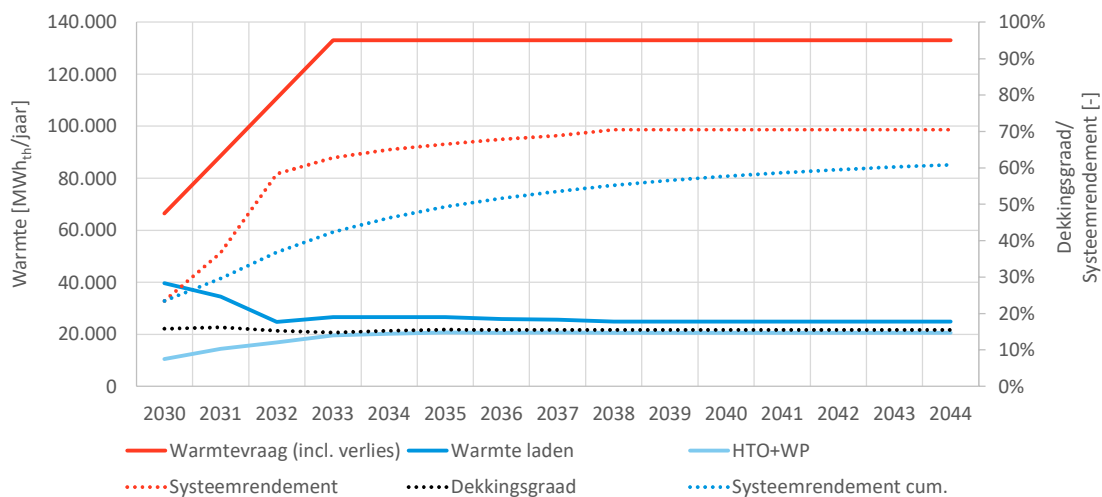
6.4 Energetische en duurzaamheidsanalyse Base Case

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.

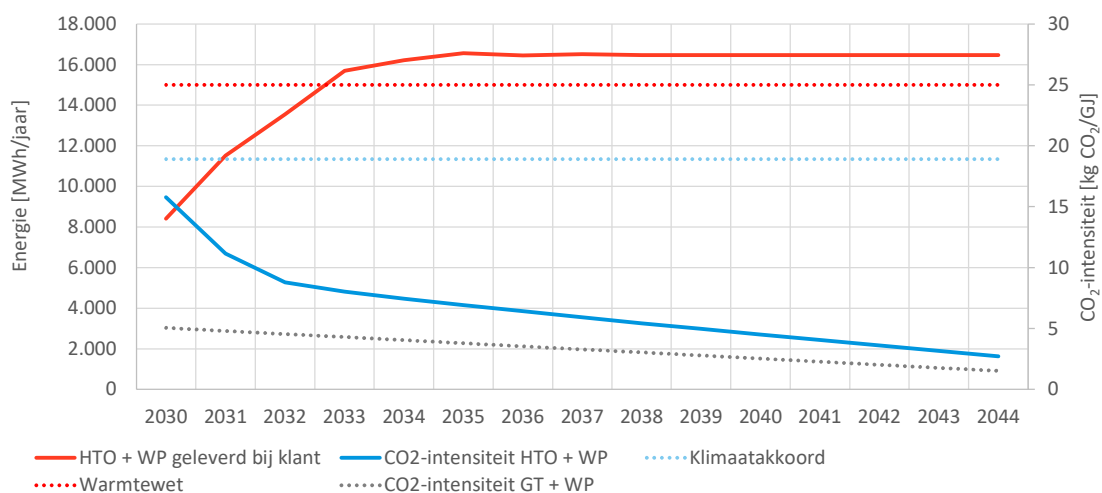
Voor de duurzaamheidsanalyse is gekeken naar de volgende parameters:

- **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.
- **CO₂-intensiteit:** 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 dan beter 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 + WP, 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 + WP. 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 (2030) bedraagt het systeemrendement 23%¹⁰. 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 58%. 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 70%. Het cumulatieve systeemrendement ligt na 15 jaar op 61%. In jaar 10 bedraagt het cumulatieve systeemrendement 57%. 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 16 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, doordat aangenomen is dat de elektriciteitsvoorziening in Nederland steeds verder verduurzaamt (zie uitgangspunten paragraaf 2.5). Na 15 jaar (2044) is de CO₂-intensiteit gedaald tot circa 3 kg CO₂/GJ_{th}. De besparing ten opzichte van warmte uit aardgas is fors. Bij aardgas ligt de CO₂-intensiteit bij de klant namelijk rond de 64 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 met warmtepomp opgenomen. Deze ligt lager dan de CO₂-intensiteit van HTO met warmtepomp. De CO₂ intensiteit daalt van circa 5 kg CO₂/GJ naar circa 2 kg CO₂/GJ. De CO₂-intensiteit ligt bij HTO hoger door de opslagverliezen en doordat de COP van de HTO warmtepomp lager ligt dan de COP van de geothermie 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: deze case wordt gebruikt voor een vergelijking met de andere verkenningen (Rijnland en Schiebroek). In deze studie is deze gelijk aan de base case.
- Retourtemperatuur warmtenet: hierin is gekeken naar een retourtemperatuur van 45°C.
- Warmtevraag: hierin is gerekend met een 20% grotere en een 20% kleinere warmtevraag.
- Vraagprofiel: hierin is gerekend met een vlakker, toekomstbestendige warmtevraagprofiel. Door het vlakkere vraagprofiel schuift de inzet van de HTO op in tijd. In plaats van in 2030 wordt de HTO pas ingezet vanaf jaar 2031.
- Lagere temperatuur lauwe bron: Er is momenteel één thermische rendementssimulatie uitgevoerd op een lagere lauwe brontemperatuur. Dit heeft duidelijk een positief effect op

¹⁰ 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.

het systeemrendement (zie Figuur 5-4, scenario 6). Te zien is dat echter ook het opslagvolume een redelijk groot effect heeft op het rendement. Hierdoor is het lastig om een inschatting te maken op basis van één simulatie. Deze gevoeligheidsanalyse is daarom niet uitgevoerd.

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)	Systeem- rendement (HTO jaar 10)	Cum. Systeem- rendement (HTO jaar 10)	Dekkingsgraad (HTO jaar 10)	CO ₂ -intensiteit bij klant (HTO jaar 10)
	[m ³]	[-]	[-]	[-]	[kg CO ₂ /GJ]
Base Case (+gestandaardiseerd)	500.000	70%	57%	15%	5,0
Retourtemperatuur	510.000	70%	57%	15%	4,1
Vraag +20%	450.000	68%	57%	11%	5,1
Vraag -20%	400.000	68%	51%	15%	5,1
Vraagprofiel	550.000	70%	60%	17%	4,5
Lagere temp. lauwe bron	500.000	70%	65%	19%	5,1

Zowel bij een grotere als bij een kleinere warmtevraag daalt het opslagvolume. 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 systeemrendement daalt ook, maar het effect is beperkt.

Wanneer het warmtevraagprofiel vlakker is, stijgen het opslagvolume en de dekkingsgraad. De HTO kan gemiddeld op een hogere deellast draaien als gevolg van het vlakkere warmtevraagprofiel. De piekvoorziening kan hierdoor kleiner gedimensioneerd worden, waardoor de CO₂-intensiteit en investeringskosten voor de piekvoorziening dalen. Dit valt in deze studie buiten de demarcatie, maar dient bij een vervolgstudie wel integraal meegenomen te worden.

Bij een lagere retourtemperatuur (van het warmtenet) kan gebruik worden gemaakt van een kleinere warmtepomp. Daardoor daalt het elektriciteitsverbruik, en daarmee ook de CO₂-intensiteit.

7 Financiële analyses

7.1 Investeringskosten

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	[€]	100.000	110.000
Bronnen	[€]	1.800.000	2.000.000
Leidingwerk in veld	[€]	190.000	200.000
Warmtepomp	[€]	2.400.000	2.600.000
Technische ruimte	[€]	950.000	1.000.000
Subtotaal	[€]	5.500.000	6.000.000
Onvoorzien	[€]	550.000	600.000
Ontwerp, advies en vergunningen	[€]	820.000	890.000
Totaal	[€]	6.800.000	7.500.000

- 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.
- 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, koppeland 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

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]	-	-
Elektriciteitsverbruik	[€/jaar]	570.000	770.000
Onderhoud en beheer - warmtepomp	[€/jaar]	95.000	128.000
Onderhoud en beheer - overig	[€/jaar]	3.000	3.000
Waterbehandeling	[€/jaar]	27.000	36.000
Monitoring en BRL	[€/jaar]	60.000	81.000
Personeelskosten	[€/jaar]	54.000	73.000
Subtotaal	[€/jaar]	810.000	1.100.000
Onvoorzien	[€/jaar]	81.000	110.000
Totaal	[€/jaar]	890.000	1.200.000

- Inkoop opgeslagen warmte: de kosten voor de warmte die wordt opgeslagen zijn verwerkt in het elektriciteitsverbruik.
- 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.

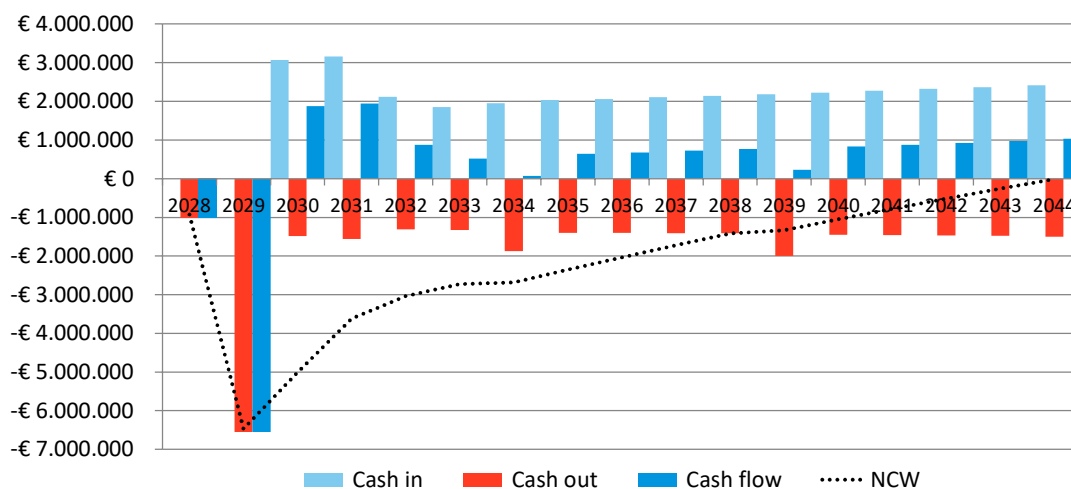
7.3 Business case

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 2028 bestaan de investeringskosten uit een proefboring en kosten voor ontwerp, advies en vergunningen. In 2029 wordt de gehele HTO gerealiseerd.
- Vanaf 2030 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.
- Eventuele restwaarde is niet meegenomen.
- Per jaar zijn de energiestromen (thermisch en elektrisch) anders, door veranderende warmtevraag en thermisch gedrag 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 (2044), is de LCOH (levelized cost of heat) voor warmte 21,9 €/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 (20%), wordt de LCOH geleverd aan de klant € 27,4 per GJ. De transportkosten 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 onder het ACM tarief. Of de kosten acceptabel zijn, hangt af van de transportkosten die in rekening worden gebracht. Deze mogen niet hoger zijn dan € 11,0 per GJ.

De eerste jaren is er een forse netto positieve cash flow te zien. Dit komt doordat de HTO in de eerste jaren maximaal geladen wordt. Dit geeft ook extra opbrengsten in de vorm van (geothermie) SDE++ subsidie. Elke 5 jaar is er hogere “cash out” als gevolg van herinvestering in de pompen.

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 variatie van de lauwe brontemperatuur. Voor deze variant is onvoldoende data beschikbaar voor het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse.

In de financiële gevoeligheidsanalyses is gekeken naar de volgende parameters:

- Investeringskosten: de totale investeringskosten
- Exploitatiekosten: de jaarlijkse exploitatiekosten, in HTO jaar 10
- LCOH_{HTO+WP}: de prijs die voor warmte uit de HTO + WP bij de klant moet worden betaald om te voldoen aan het gestelde projectrendement in 15 jaar. Transportkosten zijn hierin nog niet meegenomen. De transportkosten mogen niet hoger zijn dan het verschil met het ACM tarief (€ 38,42/GJ) voor een financieel haalbare case.

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) + gestandaardiseerd	7.500.000	-	1.200.000	-	27,4	-
Retourtemperatuur	6.400.000	84%	1.000.000	83%	20,5	75%
Warmtevraag +20%	7.500.000	100%	1.100.000	92%	37,0	135%
Warmtevraag -20%	7.500.000	100%	1.000.000	84%	19,9	73%
Vraagprofiel	7.700.000	103%	1.300.000	108%	32,5	119%
Lagere temperatuur lauwe bron	9.400.000	125%	1.500.000	125%	29,8	109%
Elektriciteit +1%	7.500.000	100%	1.100.000	92%	26,3	96%
Elektriciteit +5%	7.500.000	100%	1.600.000	135%	31,8	116%
Projectrendement 7%	7.500.000	100%	1.200.000	100%	26,3	96%
Projectrendement 10%	7.500.000	100%	1.200.000	100%	28,4	104%
Meer bronnen (heet 2, lau 3)	8.000.000	107%	1.200.000	100%	28,5	104%
Minder bronnen (heet 1, lau 2)	7.000.000	93%	1.200.000	100%	26,4	96%
Geen SDE++	7.500.000	100%	1.200.000	100%	34,6	126%

De LCOH reageert sterk op de omvang van de warmtevraag. Wanneer de warmtevraag toeneemt, stijgt de LCOH sterk (35%). Wanneer de warmtevraag afneemt, daalt de LCOH sterk (27%). Dit wordt veroorzaakt door de hoeveelheid SDE++ subsidie die wordt toegekend aan de HTO. Bij een toename in warmtevraag wordt meer SDE++ toegekend aan het geothermiesysteem, en dus minder aan de HTO. Bij een kleinere warmtevraag is dit precies omgekeerd. Eenzelfde effect is ook te zien bij het vraagprofiel. Ondanks dat door het vlakkere vraagprofiel de inzet van de HTO toeneemt, stijgt toch de LCOH. Dit komt ook doordat meer SDE++ wordt toegekend aan het geothermiesysteem, en daarmee minder aan de HTO. De extra inkomsten vanuit de SDE++ hebben

dus een grote impact op de uiteindelijke LCOH. Wanneer geen SDE++ wordt toegekend aan de HTO, dan stijgt de LCOH met 26%.

Een andere parameter die grote impact heeft, is de retourtemperatuur van het warmtenet. Wanneer de retourtemperatuur daalt van 50 naar 40°C, kan een kleinere warmtepomp worden gebruikt. Hierdoor dalen zowel de investeringskosten als de exploitatiekosten. Hierdoor ligt de LCOH aanzienlijk lager (25%).

Bij een indexatie van de elektriciteitskosten van 5% (ipv 2%) is een sterke toename te zien van de LCOH (116%). Het grootste deel van het elektriciteitsverbruik komt door de inzet van de warmtepomp die de HTO verder uitkoelt. De kosten voor elektriciteit zijn hierdoor verreweg het grootste deel van de totale exploitatiekosten (zie Tabel 7-2).

Het gewenste projectrendement heeft 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 op de locatie Capelle. Dit wordt gedaan aan de hand van een aantal KPI's (zie paragraaf 3.3 voor toelichting). De score per KPI is in Tabel 8.1 kort samengevat. Dit is gedaan voor de Base Case en voor de gestandaardiseerde Case. In deze verkenning is de gestandaardiseerde case gelijk aan de base case. In andere de verkenningen (Schiebroek en Rijnland) is dit niet het geval. De gestandaardiseerde case maakt een betere vergelijking tussen de verschillende verkenningen bij vergelijkbare uitgangspunten mogelijk. 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 (gelijk aan gestandaardiseerde case)
Bodem	Cumulatief systeemrendement (jaar 10)	57%
Business case	CAPEX (geïndexeerd)	7.500.000
Business case	LCOH _{HTO+WP} bij klant	27,4
Duurzaamheid	CO ₂ -intensiteit bij klant (jaar 10)	5,0
Juridisch	Inpassing	Inpassing mogelijk

Het cumulatieve systeemrendement voldoet aan de gewenste waarde van 50% in jaar 10 (58%). De bodemopbouw is door de beperkte lokale ondergrondinformatie best onzeker, 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 investering kan mogelijk wel van invloed zijn op het investeringsbesluit.

De LCOH van de HTO plus warmtepomp bij de klant dient onder het ACM tarief voor consumenten (€ 38,42/GJ) te liggen voor een haalbare business case. De LCOH in de base case ligt hieronder. Echter zullen er ook nog transportkosten gemaakt worden, welke nog niet zijn meegenomen in het berekende tarief. De transportkosten mogen niet hoger zijn dan 11,0 €/GJ voor een financieel haalbare case.

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). HTO kan bijdragen aan de verdere verduurzaming van het warmtenet.

In de quickscan voor de inpassing zijn geen directe juridische belemmeringen naar voren gekomen. Inpassing op de gewenste locatie lijkt mogelijk.

8.2 Conclusies

Bodem en juridisch

- De formatie van Maassluis lijkt op basis van de huidige informatie de enige formatie te zijn met geschikte lagen die kunnen dienen als HTO opslagpakket.
- Door de verwachte transmissiviteit en de aanwezigheid van een afsluitende kleilaag hebben de ondiepe zandpakketten in de formatie van Maassluis (85 tot 140m diepte) de grootste potentie. Echter, de relatief ondiepe ligging van deze pakketten is een aandachtspunt voor thermische effecten en omgevingsbelangen. De diepere zandlaag in Maassluis is waarschijnlijk minder geschikt doordat een afsluitende kleilaag zeer onzeker is. Een proefboring kan deze onzekerheid sterk verkleinen.
- De berekende systeemrendementen, uitgaande van de aanwezigheid van de twee opslagpakketten zoals gedefinieerd in Tabel 4-2, zijn relatief hoog en liggen voor de verschillende varianten tussen de 67 en 79% in jaar 10. Cumulatief is het systeemrendement in jaar 10 voor de basecase 58%. In het eventuele vervolg zullen gedetailleerdere modellen, in combinatie met gedetailleerdere ondergrondgegevens (proefboring resultaten) een grondigere bepaling van het systeemrendement geven.
- Op basis van een omgevingscheck lijken er geen juridische obstakels te zijn voor de inpassing van een HTO in het plangebied. Een aandachtspunt is de aanwezigheid van een aantal GBES systemen.

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 75°C. Een warmtepomp is nodig om de opgeslagen warmte op te waarden en verder te uit te koelen (naar 35°C).
- HTO draagt bij aan de verduurzaming van de warmtevoorziening doordat:
 - De totale hoeveelheid geleverde duurzame warmte toeneemt. De inzet van de piekvoorziening daalt in HTO jaar 10 (2039) van 24% (situatie zonder HTO) naar 11% (situatie met HTO). HTO draagt dus bij aan het terugdringen van het gasverbruik door het wegdrukken van de piekvoorziening.
 - De warmte die geleverd wordt door de HTO met warmtepomp heeft een lage CO₂-intensiteit. Deze daalt van 16 kg CO₂/GJ in 2030 naar 3 kg CO₂/GJ in 2044. De CO₂-uitstoot ligt onder de waarde uit de warmtewet (25 kg CO₂/GJ) en het klimaatakkoord (18,9 kg CO₂/GJ).

Financieel en organisatorisch

- Een HTO heeft financieel perspectief. De LCOH bij de klant ligt met € 27,4 per GJ onder het maximale ACM tarief (€ 38,42 per GJ). Transportkosten zijn nog niet meegenomen in de berekende LCOH.
- Zonder HTO blijft een deel van de SDE++ subsidie onbenut. Het geothermiesysteem kan onvoldoende vollasturen draaien. Door toevoegen van een HTO stijgt het aantal geothermische vollasturen, en daarmee ook de hoeveelheid toegekende SDE++ subsidie. De LCOH van de HTO reageert sterk op deze hoeveelheid extra SDE++ subsidie. Dit is terug te zien in de gevoeligheidsanalyse waarin de warmtevraag wordt gevarieerd en in de gevoeligheidsanalyse met een ander vraagprofiel. Fluctuaties in de LCOH lopen op tot 35%.

- De LCOH reageert sterk op de retourtemperatuur in het warmtenet. Door het verlagen van de retourtemperatuur van 50 naar 40°C daalt de LCOH met 25%. Dit komt doordat de warmtepomp kleiner kan worden uitgevoerd.
- De LCOH reageert sterk op een hogere indexatie van de elektriciteitsprijs. Bij een indexatie van 5% (ipv 2%), stijgt de LCOH met 16%. Elektriciteitskosten vormen het grootste deel van de totale exploitatiekosten. In deze studie is met constante elektriciteitsprijzen gerekend. Wel is in de zomer een lager tarief gehanteerd dan in de winter. Gezien de grote gevoeligheid wordt geadviseerd om een analyse uit te voeren met variabele elektriciteitsprijzen.
- Voor de warmte die wordt opgeslagen in de HTO zijn in deze studie alleen de marginale kosten in rekening gebracht. Tevens is er een sterke samenhang tussen HTO, geothermie en de daarbij behorende SDE++ subsidie. Vanuit organisatorisch perspectief heeft het de voorkeur dat de eigenaar van het geothermiesysteem ook de eigenaar is van het HTO-systeem. Dit maakt interne verrekening van de kosten en opbrengsten eenvoudiger.

8.3 Vervolg

Door de beperkte beschikbaarheid en kwaliteit van ondergrondinformatie is er onzekerheid in de bodemopbouw. Dit heeft effect op het eventuele rendement en broncapaciteit van de putten, en daarmee ook op de haalbaarheid van het HTO systeem. De onzekerheid in de bodemopbouw is te verkleinen door het 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 Capelle 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 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., Bloemendal, M., & Hartog, N. (2020). *Prestaties en thermische effecten van ondergrondse warmteopslagsystemen | WINDOW fase 1, werkpakket C2*. Retrieved from Nieuwegein: <https://www.warmingup.info/documenten/window-fase-1---c2---prestaties-en-thermische-effecten.pdf>
- 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 gedrag van de bodem tijdens 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 systeemrendement. 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 0-1).

Tabel 0-1 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

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 geïnfilterde 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 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 de groene gebieden zijn gebaseerd op berekeningen en ervaringen bij recente HTO-projecten. Zo bedroeg bij de recente casus Rotterdam Nesseland het doorlaatvermogen van de gehele zandlaag 660 m²/d en met de bijbehorende opslagtemperatuur van 75-85 °C werden daar erg lage opslagrendementen verkregen, vanwege grote mate van opdrijving en de daaraan gerelateerde warmteverliezen. 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 opslagtemperaturen 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).

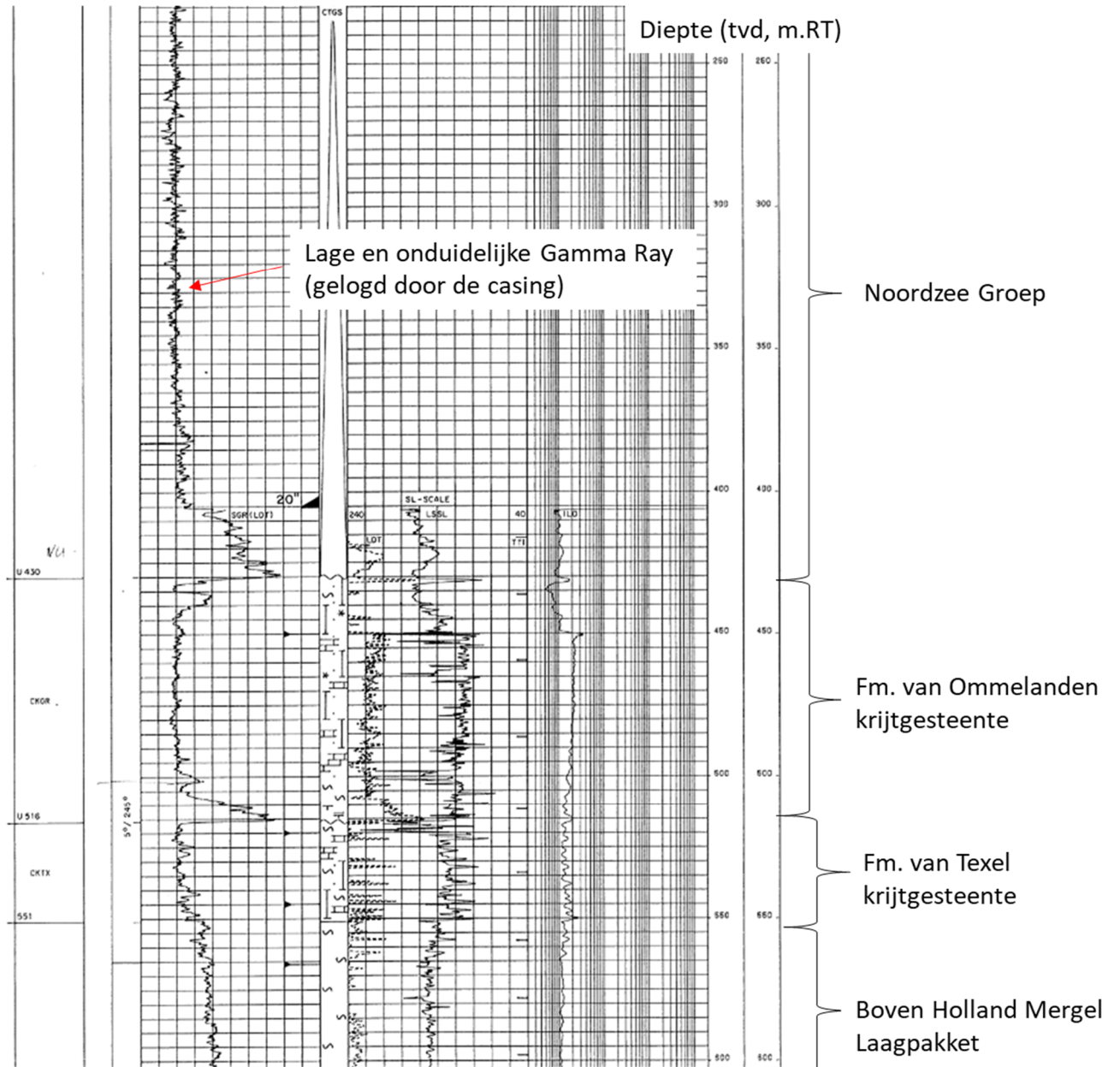
Inschatting opslagrendement

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. 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 open- of gesloten bodemenergiesystemen binnen een straal van 500 m van de beoogde HTO locatie liggen. Indien dit niet zo is, 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.

Bijlage 3 - CAP-01 boring



Figuur 0-1 CAP-01 boring. Bron: nlog.nl

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