

Warming^{UP}GOO

Geothermie & Opslag Opschaling

HTO verkenning Rijnland

door

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

Februari 2025

HTO verkenning Rijnland



Firan



TNO

Deltares

KWR

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

Kwaliteitsborger(s)

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

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

Projectnummer

PR09967

Keywords

Ondergrondse warmteopslag, HTO

Jaar van publicatie

2025

Meer informatie

Rob Kleinlugtenbelt

T +31 6 11 78 14 69

E r.kleinlugtenbelt@iftechnology.nl

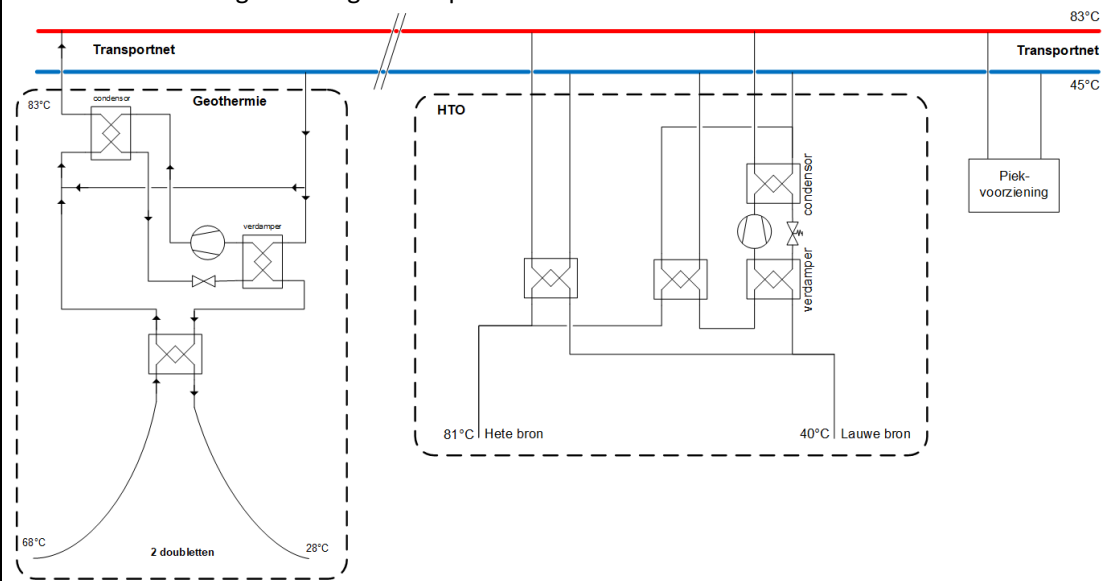
02/2025 ©

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

Managementsamenvatting

<p style="color: red; margin: 0;">Warming^{UP}GOO</p> <p style="color: red; margin: 0;">Verkenning ondergrondse warmteopslag 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). Rijnland is één van deze drie locaties. De potentie van seizoensopslag is hier verkend voor het warmtenet waar naar toe wordt gewerkt voor Noordwijk en Katwijk. Dit warmtenet moet van warmte voorzien gaan worden door geothermiedoubletten. De verkenning dient daarnaast ook als vergelijking met de andere verkenningen binnen Warming^{UP}GOO.</p> <p>In de verkenningen zijn meerdere systeemconcepten beschouwd. Twee energieconcepten zijn volledig uitgewerkt tot en met de businesscase, zodat inzichtelijk wordt hoe HTO op deze locatie zou kunnen worden ingepast. We merken daarbij op dat de uitgewerkte systeemconcepten schetsontwerpen zijn: verdere optimalisatie valt buiten de scope van deze verkenningen. De in deze managementsamenvatting gepresenteerde uitgangspunten en resultaten hebben betrekking tot energieconcept 1 (inpassing bij piekvoorziening), gezien deze financieel meer haalbaar bleek dan energieconcept 2 (inpassing bij tuinbouwgebied).</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 geothermiebronnen altijd draaien in combinatie met een warmtepomp om de temperatuur van geothermische warmte uit te koelen.</p> <p>Warmtenet:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Aanvoertemperatuur</td> <td style="padding-left: 20px;">83 °C (winter) en 76 °C (zomer)</td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Retourtemperatuur</td> <td style="padding-left: 20px;">50 °C</td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Totaal warmtevraag</td> <td style="padding-left: 20px;">240.000 MWh_{th}</td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Piekvermogen</td> <td style="padding-left: 20px;">119 MW_{th}</td> </tr> </table> <p>Warmtebronnen:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Geothermie (+ warmtepomp)</td> <td style="padding-left: 20px;">41,6 MW (2 x 20,8 MW_{th})</td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Piekvoorziening</td> <td></td> </tr> </table> <p>HTO:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Injectie-, afkap- en retourtemperatuur</td> <td style="padding-left: 20px;">81 – 50 – 40 °C</td> </tr> </table>	Aanvoertemperatuur	83 °C (winter) en 76 °C (zomer)	Retourtemperatuur	50 °C	Totaal warmtevraag	240.000 MWh _{th}	Piekvermogen	119 MW _{th}	Geothermie (+ warmtepomp)	41,6 MW (2 x 20,8 MW _{th})	Piekvoorziening		Injectie-, afkap- en retourtemperatuur	81 – 50 – 40 °C	<p>a</p>
Aanvoertemperatuur	83 °C (winter) en 76 °C (zomer)														
Retourtemperatuur	50 °C														
Totaal warmtevraag	240.000 MWh _{th}														
Piekvermogen	119 MW _{th}														
Geothermie (+ warmtepomp)	41,6 MW (2 x 20,8 MW _{th})														
Piekvoorziening															
Injectie-, afkap- en retourtemperatuur	81 – 50 – 40 °C														

Schematische weergave energieconcept:



Ondergrond (hoofdstuk 4)

Potentieel geschikte bodemlagen:	Maassluis - midden	Maassluis - diep	b
Diepte opslag:	175 – 200 m-mv	260 – 270 m-mv	
Effectieve dikte aquifer:	10 – 15	10 – 15	
Proefboring:	Aangeraden		

Juridische haalbaarheid (hoofdstuk 4)

Provinciaal beleid	Toepassing HTO niet strijdig met beleid.	1
Zoet of zout grondwater:	Zout grondwater.	
Stakeholders ondergrond:	De ondiepe ligging van deze pakketten is een aandachtspunt voor thermische effecten en omgevingsbelangen. Verwacht wordt dat voldoende ruimte beschikbaar is voor de toepassing van HTO.	

Systeemprestaties & duurzaamheid (hoofdstuk 5 & 6)

	<u>Jaar 3</u>	<u>Jaar 10</u>	c
Opslagvolume	950.000 m ³	950.000 m ³	
Systeemrendement	48%	61%	
Cumulatief systeemrendement		50%	
Cumulatieve onbalans		200%	
Dekkingsgraad ¹	11% (26.000 MWh _{th})	13% (34.000 MWh _{th})	
Reductie inzet piekvoorziening ²	75%	63%	2
Verdringing geothermie + WP ²	5%	3%	
CO ₂ -intensiteit HTO+WP bij gebruiker		4,0 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)			3
Investering (geïndexeerd)	17,1 M€		
Investering bronnen	5,6 M€	33%	
Investering warmtepomp	4,0 M€	23%	
Investering overig	7,5 M€	44%	
Operationele kosten (geïndexeerd)	2,7 M€/jaar		
Kosten elektriciteit	2,00 M€/jaar	74%	
Kosten overig	0,70 M€/jaar	26%	
Kostprijs geleverde warmte	37,9 €/GJ		
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	De totale hoeveelheid geleverde duurzame warmte neemt toe en de benodigde inzet van de piekvoorziening daalt met 63% in jaar 10.		
3	De berekende kostprijs (nog exclusief transportkosten) voor de geleverde warmte (37,9 €/GJ) ligt onder het maximale warmtetarief volgens de ACM in 2024 (38,42 €/GJ). Wel is de 'speelruimte' beperkt. Er zijn optimalisatiemogelijkheden (b.v. aandacht voor een lagere retourtemperatuur of het toestaan van een hoger debiet per bron)		
<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	Het cumulatief systeemrendement in jaar 10 voldoet precies aan de bij recente vergunningstrajecten gewenste 50%, dit is echter dus wel een aandachtspunt voor verder onderzoek in een volgende fase.		

Inhoudsopgave

Managementsamenvatting	3
Inhoudsopgave	6
1 Inleiding	8
1.1 Achtergrond	8
1.2 Doelstelling	8
2 Inventarisatie en uitgangspunten	10
2.1 Situatieschets	10
2.2 Warmtevraag	11
2.3 Bronnen	15
2.4 Regelstrategie	17
2.5 Overige uitgangspunten	18
3 Systeemconcepten	19
3.1 Base case energieconcept 1 – inpassing bij piekvoorziening	19
3.2 Base case energieconcept 2 – inpassing bij tuinbouwgebied	20
3.3 Gevoeligheidsanalyses	21
3.4 KPI's bij analyses	22
4 Geologische haalbaarheid	23
4.1 Hydrogeologische analyse	23
4.1.1 Criteria voor toepassing HTO	23
4.1.2 Gebruikte ondergrond informatie	23
4.1.3 Beschrijving regionale geologie	26
4.1.4 Bodemopbouw en potentiële opslagpakketten op de tuinbouwlocatie	34
5 Thermische rendementssimulaties	39
5.1 Opzet en uitgangspunten model	39
5.1.1 Beschrijving modelopzet	39
5.1.2 Berekening thermisch terugwinrendement	40
5.2 Scenario's	41
5.2.1 Ondergrond uitgangspunten	41
5.2.2 Operationele uitgangspunten	41
5.2.3 Resulterende scenario's	42
5.3 Resultaten	43
5.3.1 Base case	43
5.3.2 Scenario's	45

6	Energetische en duurzaamheidsanalyses	47
6.1	Modellering en analyses	47
6.2	Inzet HTO Base Case	47
6.2.1	Energieconcept 1	47
6.2.2	Energieconcept 2	50
6.3	Dimensionering Base Case	51
6.3.1	Energieconcept 1	51
6.3.2	Energieconcept 2	53
6.4	Energetische en duurzaamheidsanalyse Base Case	53
6.4.1	Energieconcept 1	53
6.4.2	Energieconcept 2	55
6.5	Gevoeligheidsanalyses	56
7	Financiële analyses	58
7.1	Investeringskosten	58
7.2	Exploitatiekosten	59
7.3	Business case	60
7.3.1	Energieconcept 1	60
7.3.2	Energieconcept 2	61
7.4	Gevoeligheidsanalyses	62
8	Discussie, conclusies & vervolg	65
8.1	Discussie	65
8.2	Conclusies	66
8.3	Vervolg	67
9	Referenties	69
	Bijlage 1 – Doorontwikkeling methodiek Verkenning HTO	70
	Bijlage 2 – Criteria tabel	72

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

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

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

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

1.2 Doelstelling

De doelstelling van deze verkenning is tweeledig. Ten eerste dient de verkenning bij te dragen aan de overal 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:

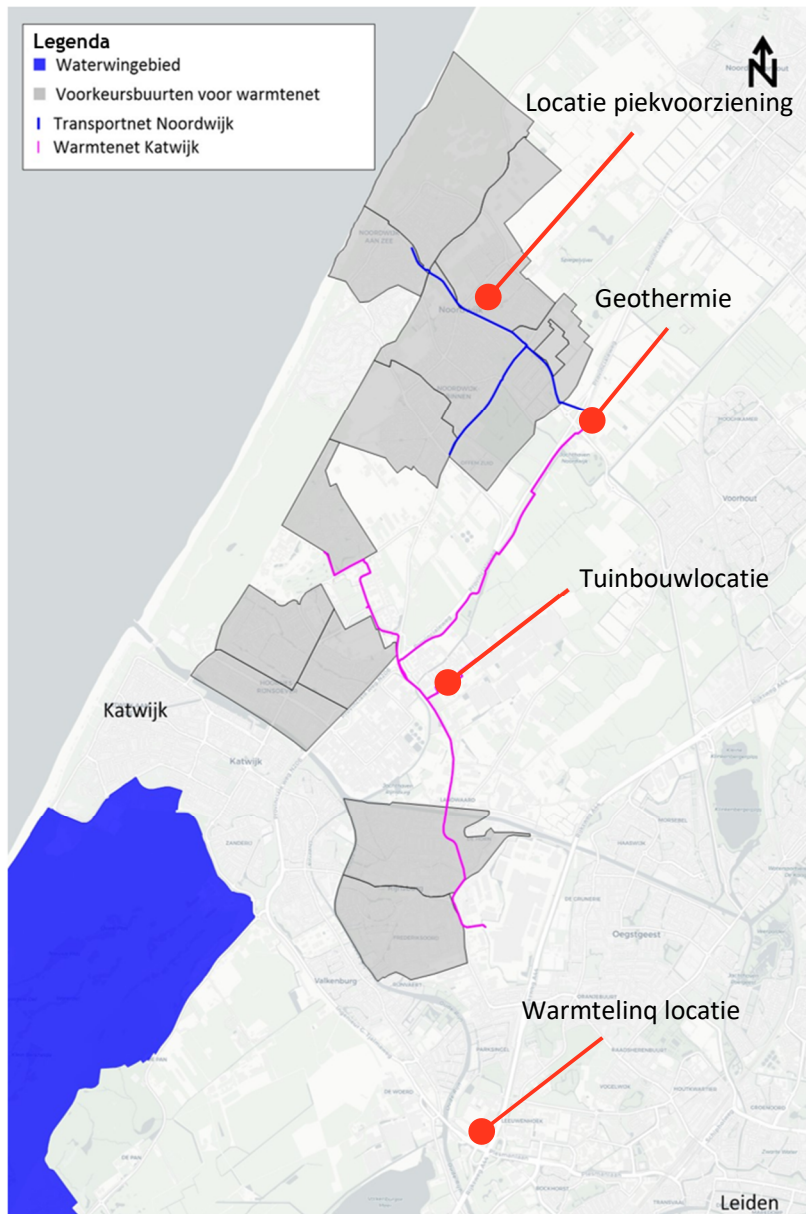
- De verkenning dient inzicht te geven in de haalbaarheid van HTO op de projectlocatie. Hiertoe dient bepaald te worden of en welke lagen van de bodem potentie hebben, of het technisch mogelijk is om HTO in te passen en wat de financiële en juridische haalbaarheid is.
- De resultaten van het onderzoek 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

D4, Firan en Shell ontwikkelen een warmtenet in Noordwijk en Katwijk (zie Figuur 2.1).



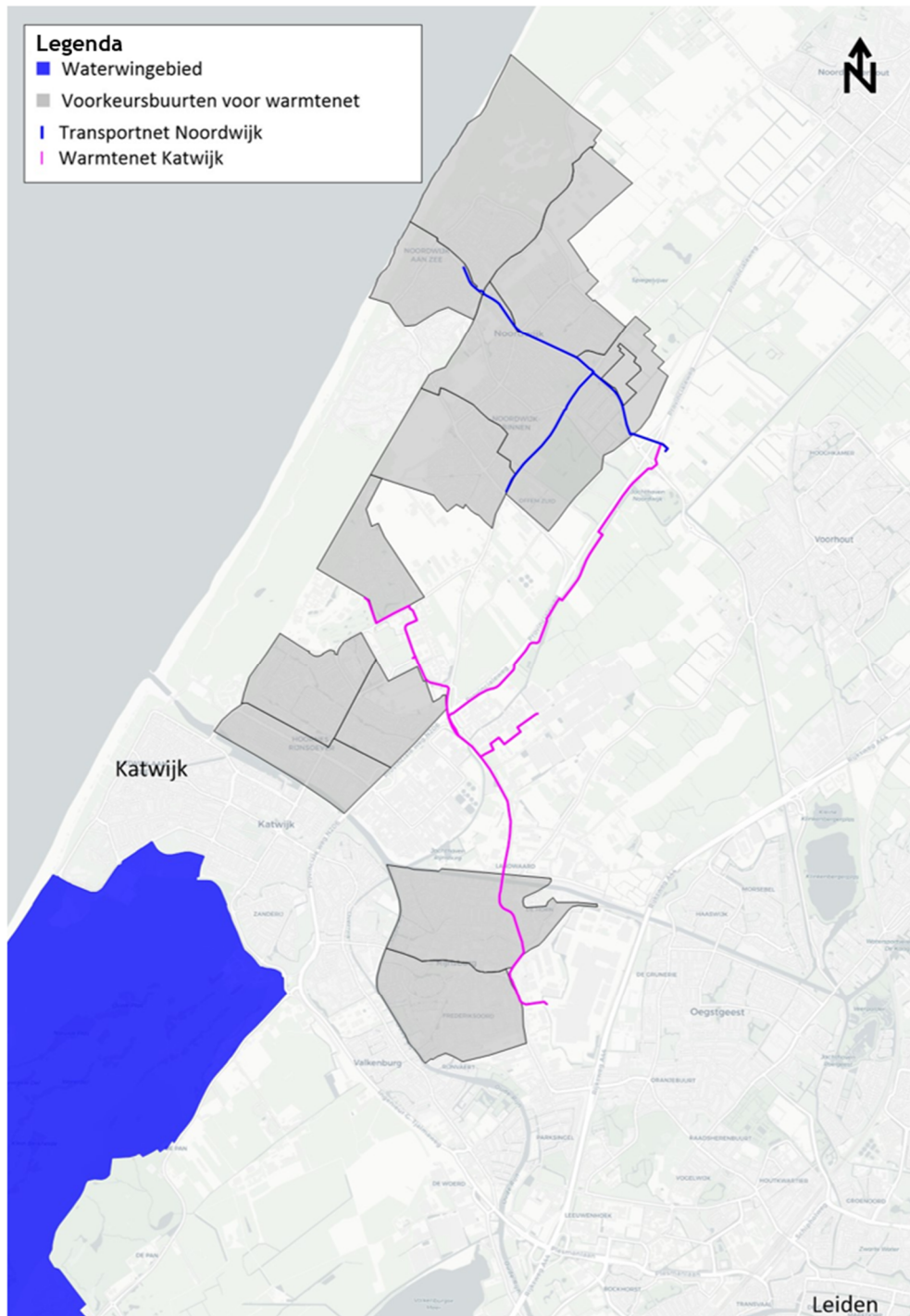
Figuur 2.1 Globale situatieschets

In de ontwikkeling Aardwarmte Rijnland wordt toegewerkt naar de uitrol van een duurzaam warmtenet, met een geplande eindomvang van circa 48.000 woningequivalenten. Het betreft een collectief warmtesysteem met aardwarmtebronnen in Katwijk, Noordwijk en Hillegom/Lisse/Teijlingen. Deze studie richt zich op het eerste deel, waarin wordt toegewerkt naar 29.000 woningequivalenten (zie paragraaf 2.2). Het warmtenet zal voorzien worden van duurzame

warmte door geothermie (zie paragraaf 2.3). In het zuidelijk deel is de mogelijkheid tot een koppeling met de Warmtelinq leiding.

2.2 Warmtevraag

Op het warmtenet wordt een mix van woningen en grootverbruikers aangesloten. Het warmtenet bestaat grofweg uit twee delen (zie Figuur 2.2), een zuidelijk deel (rood) en een noordelijk deel (lichtblauw). In het zuidelijk deel ligt ook een tuinbouwgebied (grijs).

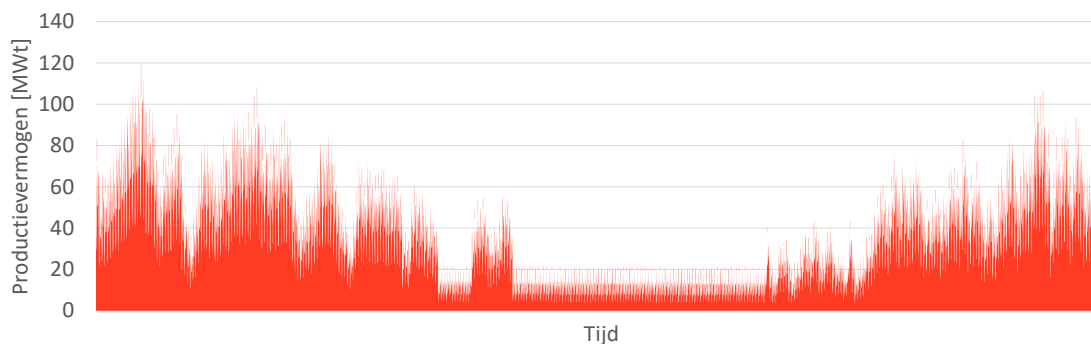


Figuur 2.2 Deelgebieden warmtenet. Lichtblauw: noordelijk deelgebied. Rood: zuidelijk deelgebied. Grijs: tuinbouwgebied.

De belangrijkste uitgangspunten van het warmtenet zijn hieronder samengevat:

- Omvang: 29.000 woningequivalenten
- Totale warmtevraag: 240.000 MWh_{th} per jaar
- Warmteverlies in warmtenet 12,5%
- Totale warmteproductie: 275.000 MWh_{th} per jaar
- Aanvoertemperatuur transportnet winter: 83°C
- Aanvoertemperatuur transportnet zomer: 76°C
- Retourtemperatuur transportnet: 45°C (constant)

Op basis van een standaard jaarprofiel voor een warmtenet is een inschatting gemaakt van de benodigde warmteproductie op uurbasis. In het standaard jaarprofiel is de warmtevraag opgesplitst in een vraag voor ruimteverwarming, tapwater en transportverliezen. Voor transportverliezen is een waarde aangehouden van 12,5% (bron: Firan). Voor de tapwatervraag is 1,9 MWh (7 GJ) per woning aangehouden. Het jaarprofiel voor de totale warmtevraag is opgesteld aan de hand van het totale aantal woningequivalenten. Verschil in warmtevraagprofielen voor utiliteit en tuinbouw zijn niet meegenomen. Het resulterende jaarprofiel voor de benodigde warmteproductie van het warmtenet is weergegeven in Figuur 2.3.



Figuur 2.3 Productieprofiel warmtenet bij een productievraag van 274.000 MWh_{th} (2040)

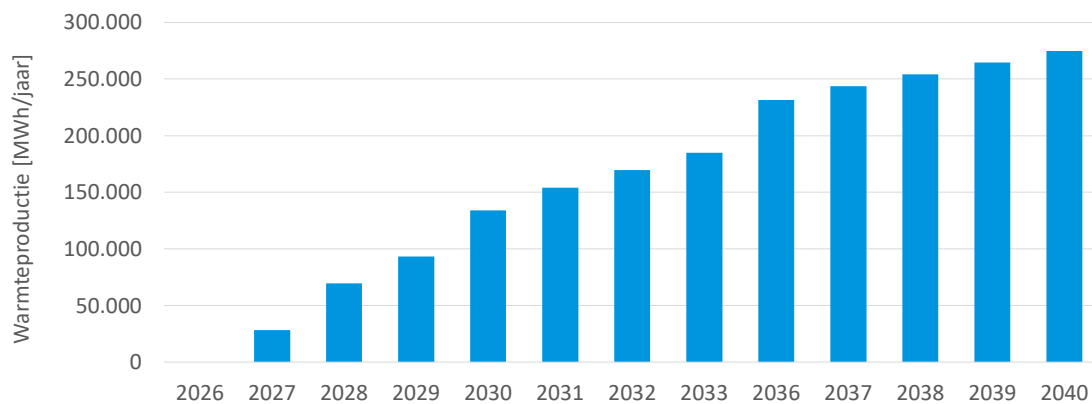
Enkele kengetallen vanuit het productieprofiel zijn:

- Piekvermogen: 119 MW_{th}
- Gemiddeld vermogen: 31 MW_{th}
- Equivalente vollasturen: 2.310 h/a

De geplande fasering en omvang per deelgebied is weergegeven in Tabel 2-1. In eerste instantie wordt gestart met een aantal grote zakelijke aansluitingen in het zuidelijk deel. Daarna volgt een verdere uitrol naar de rest van het zuidelijk deel en noordelijk deel. Op basis van de geplande fasering is een groei van de benodigde productie ingeschat (zie Figuur 2.4).

Tabel 2-1 Omvang en geplande fasering warmtenet

Deelgebied	Realisatie		Aantal woningen [weq]	Warmte- vraag [MWh _{th}]	Warmte- productie [MWh _{th}]
	Start [jaar]	Einde [jaar]			
ESA/ESTEC	2027	2027	703	5.833	6.666
Gebouwde omgeving Noordwijk	2027	2036	3.454	28.671	32.767
Huis ter Duin	2027	2027	470	3.905	4.463
STEK	2027	2030	1.355	11.250	12.857
Trappenberg-Kloosterschuur	2027	2030	3.551	29.473	33.683
VVE's Noordwijk	2027	2029	698	5.792	6.619
Gebouwde omgeving Noordwijkerhout	2028	2037	1.867	15.500	17.714
Kwekers Westeinde	2028	2028	298	2.470	2.823
NH Hotel	2028	2028	756	6.276	7.173
Padua	2028	2031	2.003	16.625	19.000
Royal Flora Holland	2028	2028	723	6.000	6.857
Theo Mulder	2028	2028	92	760	869
Hogeschool Leiden	2030	2030	205	1.700	1.943
Johnson & Johnson	2030	2030	1.821	15.114	17.273
Gebouwde omgeving Katwijk	2031	2040	6.079	50.458	57.667
Gebouwde omgeving Oegstgeest	2031	2040	4.910	40.750	46.571
Totaal			28.985	240.577	274.945

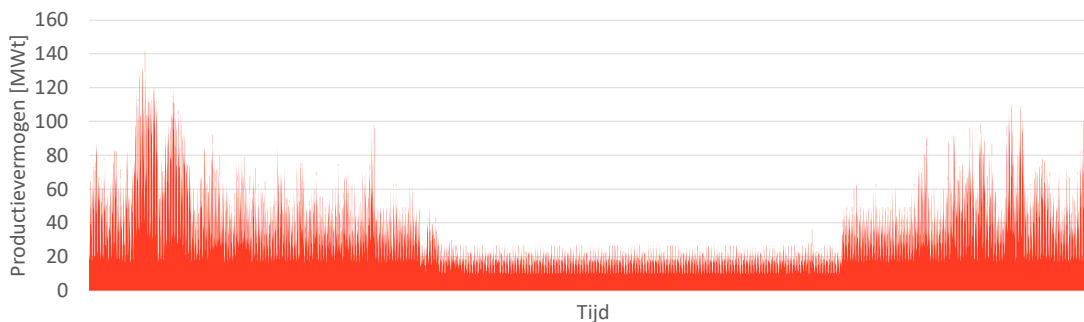


Figuur 2.4 | Geschatte ontwikkeling benodigde productie warmtenet

NEDU warmtevraagprofiel

Duurzaam Energie Perspectief (DEP) rekent standaard met een warmtevraagprofiel die gebaseerd is op de NEDU gasprofielen¹. Deze is weergegeven in Figuur 2.5.

¹ NEDU gasprofielen worden jaarlijks opgesteld door Energie Data Services Nederland, gebaseerd op de spreiding van de G1A gasprofielen voor woningen op uurbasis.



Figuur 2.5 NEDU productieprofiel warmtenet bij een productievraag van 274.000 MWh_{th} (2040)

Enkele kengetallen vanuit het jaarprofiel zijn:

- Piekvermogen: 141 MW_{th}
- Gemiddeld vermogen: 31 MW_{th}
- Equivalente vollasturen: 1.940 h/a

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

Tuinbouwgebied Trappenberg-Kloosterschuur

Een interessante deelgebied voor toepassing van HTO is het tuinbouwgebied Trappenberg-Kloosterschuur. Dit tuinbouwgebied heeft een hoge warmtevraag. Daarnaast is het voordeel dat tuinbouw doorgaans gebruik maakt van lagere temperaturen dan woningbouw. Dit heeft als voordeel dat meer van de in de HTO opgeslagen warmte teruggewonnen kan worden en op directe wijze kan worden ingezet voor verwarming, waardoor een kleinere warmtepomp nodig is, of zelfs helemaal geen warmtepomp meer nodig is. Het warmtevraagprofiel van tuinbouw wijkt af van woningbouw. Het precieze warmtevraagprofiel is onbekend. In deze studie is gebruik gemaakt van een gemiddeld warmtevraagprofiel voor tuinbouw. Rekening houdend met een warmteverlies van 12,5% resulteert dit in een warmteproductieprofiel zoals gegeven in Figuur 2.6.



Figuur 2.6 | Ingeschat warmteproductieprofiel voor tuinbouwgebied Trappenberg-Kloosterschuur

Enkele kengetallen vanuit het productieprofiel zijn:

- Piekvermogen: 7,0 MW_{th}
- Gemiddeld vermogen: 3,9 MW_{th}
- Equivalente vollasturen: 4.840 h/a

Qua energetische uitgangspunten is uitgegaan van de volgende waarden:

- Totale warmtevraag: 30.000 MWh_{th}
- Totale warmteproductie: 34.000 MWh_{th}
- Aanvoertemperatuur transportnet: 75°C (constant)
- Retourtemperatuur transportnet: 35°C (constant)

2.3 Bronnen

Geothermie

Langs de provinciale weg, tussen Noordwijk en Voorschoten, zijn er plannen voor de realisatie van een geothermiesysteem, bestaande uit twee doubletten (zie Figuur 2.1). Het eerste doublet is gepland in 2027. Het tweede doublet is gepland in 2029.

Over de geothermische bron is de volgende informatie aangeleverd:

- Productietemperatuur geothermie: 68°C
- Productietemperatuur warmtepomp: 83°C
- Debiet per doublet: 440 m³/h
- Injectietemperatuur geothermie: 28°C (constant)
- Dichtheid brijn: 978 kg/m³
- Warmtecapaciteit brijn: 3,89 kJ/(kg K)
- SPF ESP (en eventuele boosterpomp)²: 11
- COP warmtepomp: 5,0

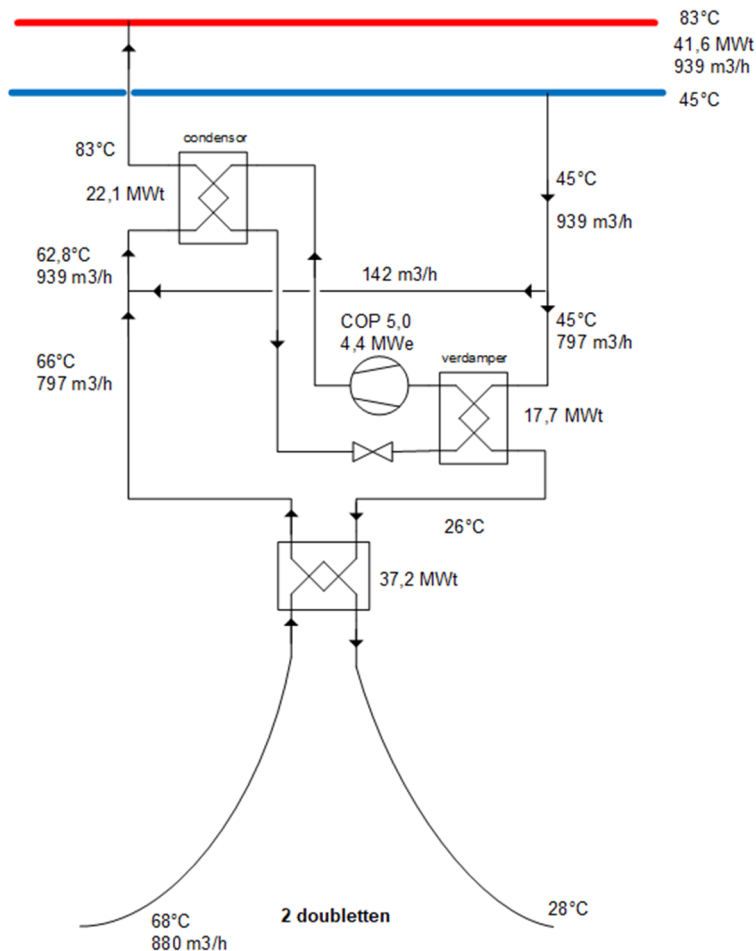
Bij warmtelevering draait de geothermiebron altijd in combinatie met een warmtepomp. Dit is nodig om de temperatuur van geothermische warmte op te waarden naar de benodigde productietemperatuur (85°C).

Op basis van bovenstaande zijn de volgende waarden berekend:

- Totaal geleverd vermogen (GT + WP): 41,6 MW_{th} (2 x 20,8 MW_{th})
- Max. vermogen directe warmtelevering geothermie: 37,2 MW_{th} (2 x 18,6 MW_{th})
- Vermogen condensor: 22,1 MW_{th}
- Vermogen verdamper: 17,7 MW_{th}
- Elektrisch vermogen: 4,3 MW_e

Bovenstaande is schematisch weergegeven in Figuur 2.7.

² Aanname constante waarde, ook bij deellast.



Figuur 2.7 Principeschema 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, per doublet: 20 MW_{th}
- Max. vollasturen SDE++: 5.000 h/jaar
- Basisbedrag: 0,0974 €/kWh_{th}
- Subsidiebedrag op warmte opgeslagen in HTO: 0,077³ €/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

³ 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 0,077 €/kWh_{th}.

warmte wordt geleverd in de eerste 16 jaar (15 jaar SDE++ looptijd + 1 jaar mogelijke uitloop).

- De beschikbare SDE++ die nog kan worden toegekend aan HTO is het verschil tussen de maximale totale SDE++ subsidie, minus de hoeveelheid geleverde geothermische warmte in de referentiesituatie.
- Per jaar dat de HTO actief is, wordt bepaald hoeveel warmte wordt opgeslagen. SDE++ subsidie wordt toegekend tot een maximum van de beschikbare SDE++ subsidie.

Fasering geothermiedoubletten

Er zijn twee geothermiedoubletten gepland. De fasering hiervan is als volgt:

- Begin 2027: start produceren met eerste doublet
- Begin 2029: start produceren met tweede doublet.

In deze studie dient onderzocht te worden hoe de HTO in deze fasering ingepast kan worden.

2.4 Regelstrategie

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

- De volgende merit order wordt gehanteerd:
 - Geothermie
 - HTO
 - Piekvoorziening
- 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 en zo constant mogelijk.
- 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 piekvoorziening kan vaker en naar behoefte aan- en uitschakelen om de resterende warmtevraag in te vullen.
- In de eerste twee jaar wordt zoveel mogelijk warmte geladen omdat de omgeving nog opgewarmd moet worden. Ook is er dan nog veel warmte beschikbaar voor opslag omdat de warmtevraag van het warmtenet dan nog relatief beperkt is. Vanaf jaar drie wordt gestuurd op een balans, waarbij wel rekening wordt gehouden met de optredende opslagverliezen in de HTO.

2.5 Overige uitgangspunten

Financieel

• Aandeel eigen vermogen:	30%
• Aandeel vreemd vermogen:	70%
• Rendement op eigen vermogen:	15%
• Rente op lening:	6%
• WACC ⁴ (zonder belasting):	8,7%
• Projectrendement:	10%
• Looptijd:	15 jaar
• Gemiddelde elektriciteitsprijs in laadperiode:	83 ⁵ €/MWh _e
• Gemiddelde elektriciteitsprijs in terugleverperiode:	110 ⁵ €/MWh _e
• Kosten voor opslag van warmte:	n.v.t. ⁶
• Kosten WP:	470 €/kW _{th}
• Indexatie kosten:	2%
• Indexatie inkomsten:	2%

Duurzaamheid

• CO ₂ -uitstoot opgeslagen warmte:	n.v.t. ⁶
• Gemiddelde CO ₂ uitstoot elektriciteit huidig:	0,214 ⁷ kg CO ₂ /MWh _e
• Gemiddelde CO ₂ uitstoot elektriciteit 2030:	0,092 ⁸ kg CO ₂ /MWh _e
• Gemiddelde CO ₂ uitstoot elektriciteit 2050:	0,0 kg CO ₂ /MWh _e

⁴ 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.

⁵ Inclusief energiebelasting, exclusief BTW. Prijs ligt lager in laadperiode/zomerperiode dan in leverperiode/winterperiode.

⁶ Berekend is hoeveel extra elektriciteitsverbruik nodig is om geothermische warmte op te slaan in de HTO. De kosten hiervoor en CO₂-uitstoot hiervan zijn meegenomen door het extra elektriciteitsverbruik toe te kennen aan de HTO.

⁷ Nationaal Energie Dashboard

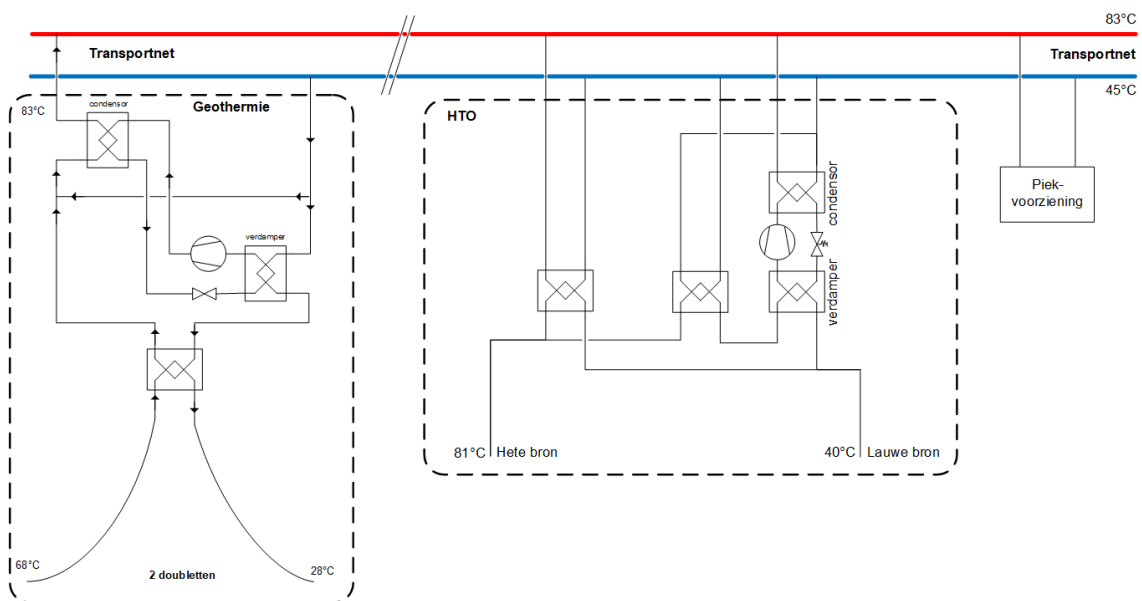
⁸ Emissiefactor elektriciteit uit fossiele bronnen, Voor compensatieregeling IKC-ETS, CE Delft, 2021

3 Systeemconcepten

In deze studie is gekeken naar twee locaties om de HTO in te passen, namelijk op de locatie van de piekvoorziening in Noordwijk (zie Figuur 2.1) en in het tuinbouwgebied Trappenberg-Kloosterschuur (zie Figuur 2.2). Voor beide locaties is een base case opgesteld. Deze zijn beschreven in paragraaf 3.1 en paragraaf 3.2. Aanvullend op de analyses voor de base cases zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd. Welke gevoeligheidsanalyses zijn uitgevoerd, zijn beschreven in paragraaf 3.3. 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 3.4.

3.1 Base case energieconcept 1 – inpassing bij piekvoorziening

Het energieconcept 1 is schematisch weergegeven in Figuur 3.1. Hieronder zijn een aantal zaken nader toegelicht die relevant zijn voor de base case van dit energieconcept.



Figuur 3.1 Schematische weergave energieconcept 1.

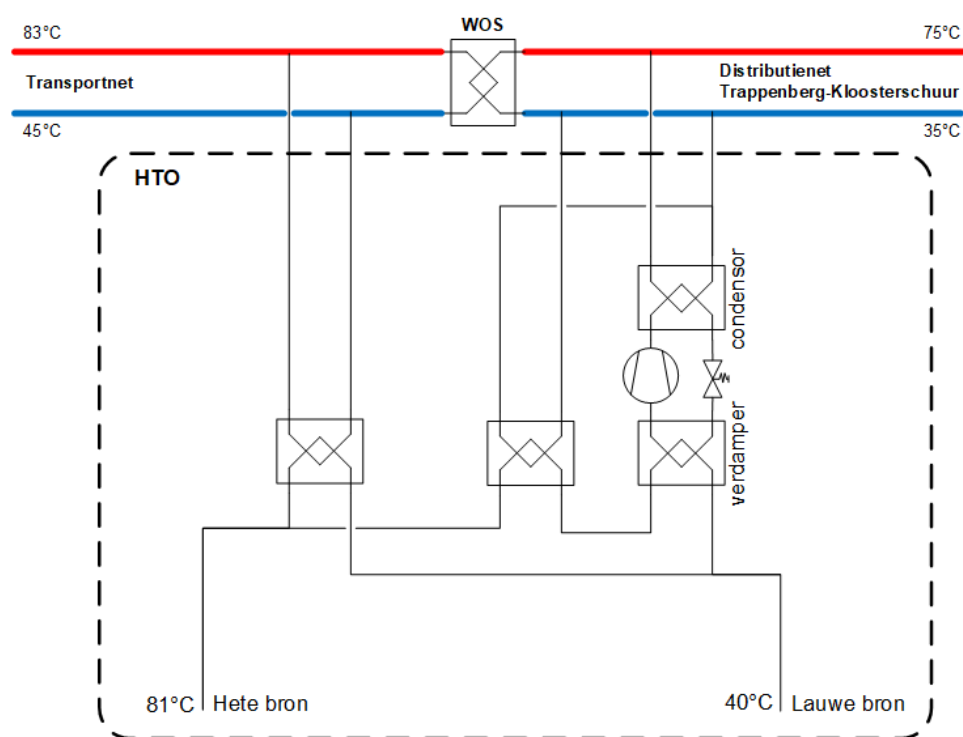
- **Laden:**

In dit concept wordt warmte vanuit het transportnet opgeslagen in de HTO. Uitgangspunt in deze studie is dat er een directe koppeling is tussen de productie van geothermie en de opslag van warmte, zodat geothermische warmte wordt opgeslagen in de HTO. Alle opgeslagen geothermische warmte is opgewaardeerd door de warmtepomp (Power to Heat, P2H). De warmte wordt dan in de HTO opgeslagen met een temperatuur van 81°C.

- **Terugleveren:**
In de terugleverperiode levert de HTO warmte aan het transportnet. Met een warmtewisselaar wordt in eerste instantie zoveel mogelijk warmte op directe wijze worden geleverd (voorverwarmen). Een warmtepomp is nodig om de warmte uit de HTO op te waarden naar de gewenste productietemperatuur van 83°C. Tijdens het terugleveren wordt de lauwe HTO-bron geladen met een constante temperatuur van 40°C.
- **Locatie:**
Dit concept kan overal langs het transportnet worden ingepast, mits er nog voldoende capaciteit over is in het transportnet om de HTO te laden en te ontladen. In deze studie is het uitgangspunt dat de HTO wordt ingepast bij de locatie voor de piekvoorziening in Noordwijk (zie Figuur 2.1).

3.2 Base case energieconcept 2 – inpassing bij tuinbouwgebied

Energieconcept 2 is schematisch weergegeven in Figuur 3.2. Hieronder zijn een aantal zaken nader toegelicht die relevant zijn voor de base case van dit energieconcept.



Figuur 3.2 Schematische weergave energieconcept 2.

- **Laden:**
Laden gaat op een gelijke wijze als in energieconcept 1.
- **Terugleveren:**
Warmte vanuit de HTO wordt geleverd aan het distributienet in combinatie met een warmtepomp. Het verschil met concept 1 is dat de temperaturen in het distributienet lager liggen dan in het transportnet. Ook heeft het distributienet een ander profiel dan het transportnet als geheel (zie paragraaf 3.1).

- **Locatie:**
De HTO wordt in dit concept ingepast bij het warmteoverdrachtsstation voor het tuinbouwgebied (zie Figuur 2.2).
- **Regelstrategie:** aanvullend op de regelstrategie (zie paragraaf 2.4) levert het geothermiesysteem eerst zoveel mogelijk warmte aan de rest van het warmtenet, niet zijnde de tuinbouw. Wanneer er geothermische warmte over is, wordt via het overdrachtsstation ook geothermische warmte aan de tuinbouw geleverd. Dit geeft voor HTO de mogelijkheid om deels ook warmte in de basislast te leveren aan de tuinbouw.

3.3 Gevoeligheidsanalyses

Gestandaardiseerde case

Naast deze HTO studie zijn nog twee andere verkenningen uitgevoerd voor HTO, namelijk HTO Capelle 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%. Dit wijkt af van de 10% die is aangehouden in de Base Case.
- **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. Dit wijkt af van de retourtemperaturen in concept 1 (45°C) en concept 2 (35°C). De temperaturen van de hete en lauwe bron veranderen niet. Die zijn in de gestandaardiseerde case gelijk aan de base case. Een hogere retourtemperatuur heeft dus als gevolg dat de HTO meer moet worden uitgeoeld met de warmtepomp. In deze case neemt het vermogen van de warmtepomp dus toe.

Aanvullende gevoeligheidsanalyses

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

- **Variatie in vraagprofiel:** DEP rekent standaard met een NEDU warmtevraagprofiel. Onderzocht zal worden wat de effecten hiervan zijn op de inzet van de HTO.
- **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 10% over een looptijd van 15 jaar. Aanvullend zal onderzocht worden wat het effect is van een projectrendement van 7% en van 8,7% (gelijk aan WACC).
- **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.

3.4 KPI's bij analyses

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

- **Bodem:** Gekeken wordt naar de geohydrologische geschiktheid van de bodem. Via modelberekeningen wordt het verwachte terugwinrendement van het HTO systeem bepaald (het systeemrendement genoemd). Dit is de verhouding tussen de hoeveelheid teruggeleverde warmte en de hoeveelheid opgeslagen warmte in de HTO. Een hoog systeemrendement is wenselijk omdat hierdoor zo effectief mogelijk gebruik wordt gemaakt van de opgeslagen warmte en omdat dit de effecten naar de omgeving zal minimaliseren. Het systeemrendement wordt beïnvloed door de efficiëntie van de opslag in zowel de hete bron (hete bronrendement) en de warme bron (warme bronrendement). Er is nog geen regelgeving over welke waarden acceptabel zijn. In deze studie wordt 50% als ondergrens aangehouden (in jaar 10), maar er is een voorkeur voor een systeemrendement van 70% of meer.
- **Business case:** een goede business case is belangrijk voor de (financiële haalbaarheid van een project. Gekeken wordt naar de volgende parameters:
 - **CAPEX:** De CAPEX zijn de investeringskosten die nodig zijn tot realisatie en inbedrijfstellen van de HTO. De hoogte hiervan zal van invloed zijn bij het nemen van een investeringsbesluit.
 - **Specifieke kostprijs geproduceerde warmte:** dit is de prijs die betaalt zou moeten worden voor de warmte die vanuit de HTO wordt geleverd aan het warmtenet, zodanig dat wordt voldaan aan het gewenste projectrendement. Deze prijs (in €/GJ) kan vergeleken worden met de kosten die in de markt gangbaar zijn.
- **CO₂-intensiteit bij de klant:** Dit is de CO₂ uitstoot van de warmte die vanuit de HTO wordt geleverd aan de klant (in kg CO₂/GJ). Dit is de verhouding van alle CO₂ uitstoot in een jaar van het HTO-systeem (zowel bij laden als bij terugleveren) en de totaal geleverde hoeveelheid warmte per jaar aan de klant. Warmteverliezen in het warmtenet zijn hierin verdisconteerd. Deze waarde kan vergeleken worden met andere duurzame bronnen en met duurzaamheidsrichtlijnen (bv klimaatakkoord of warmtewet).
- **Juridisch:** in een juridische scan zal een eerste inschatting gemaakt worden van de juridische haalbaarheid. Hierbij wordt gekeken naar nabijgelegen open- en gesloten bodemenergiesystemen en diverse aandachtsgebieden zoals waterwingebieden, natuurgebieden en gebieden met archeologische waarde.

4 Geologische haalbaarheid

4.1 Hydrogeologische analyse

Voor de analyse van de geschiktheid van de ondergrond in de regio Rijnland, 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.

4.1.1 Criteria voor toepassing HTO

In WINDOW fase 1 (WarmingUP) zijn criteria ontwikkeld voor het beoordelen van de beschikbare aquifers voor HTO toepassing op een specifieke locatie. Een aangepaste en verbeterde versie hiervan is te zien in Tabel 4-1. In deze verkenning is nog onderscheid gemaakt tussen de hydraulische en thermische afsluitende eigenschappen van de kleilaag boven het pakket. Ook is een criterium toegevoegd met de eerste inschatting van het rendement op basis van een snelle analytische berekening, dit criterium is echter niet gebruikt als potentiële showstopper. Zie Bijlage 2 voor gedetailleerde uitleg over de criteria.

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

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

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

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

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

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

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

4.1.2 Gebruikte ondergrond informatie

REGIS II v2.2

Het REGIS II v2.2 geologische model is gebruikt als basis. De ondergrond in de omgeving Rijnland bestaat uit een opeenvolging van verschillende formaties, die 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*.

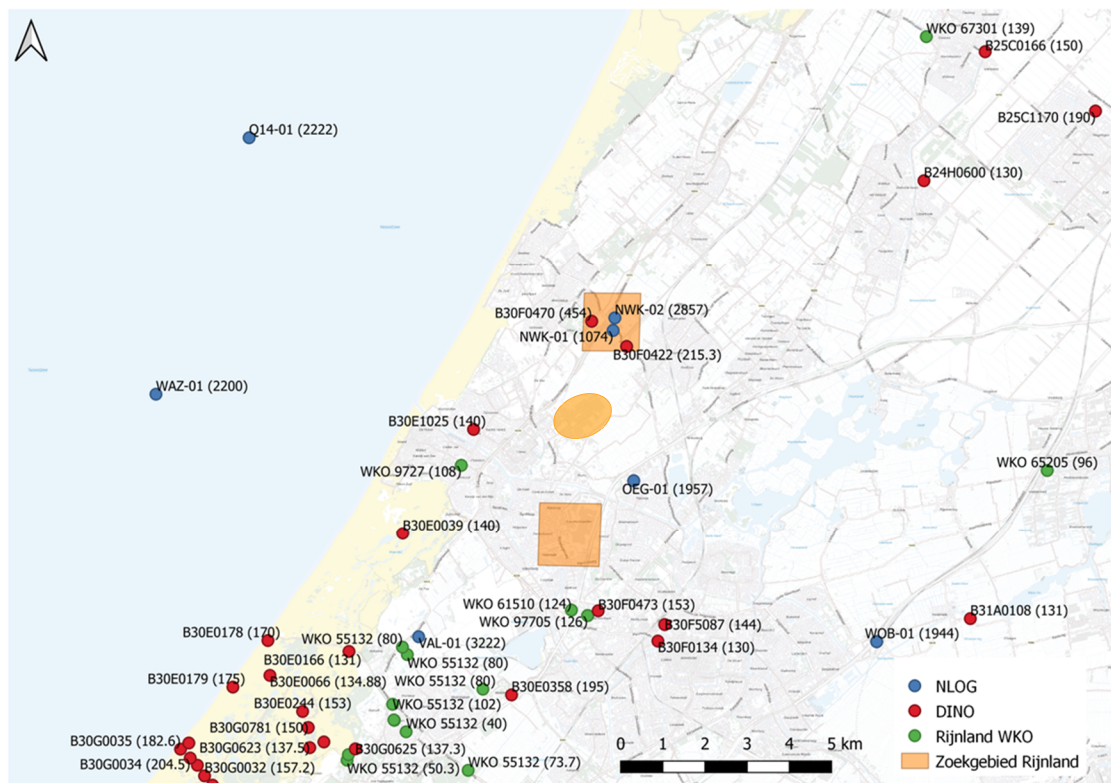
Boringen

Voor aanvullende informatie over de ondergrond is gekeken naar boringen in de omgeving (Figuur 4.1). In eerste instantie is gekeken naar boringen uit de DINO database met een diepte >135 m (rode punten in Figuur 4.1). In het noordelijke zoekgebied liggen twee diepere boringen: B30F0470 van 454 m en B30F0422 van 215 m diep, in de buurt van de locatie met de piekvoorziening (systeemconcept 1). In het zuidelijk deel liggen boring B30F0473 en B30E0358 van resp. 153 en 195 m-mv en liggen op ~5 en 8 km van het voorkeursgebied (tuinbouwgebied, systeemconcept 2). De overige boringen gaan tot een diepte van maximaal ~140 m, en doorboren slechts de bovenkant van de Formatie van Maassluis.

Ook zijn boorstaten van publieke WKO systemen uit de database van IF Technology bekeken om een beter beeld van de ondergrond te krijgen; helaas zijn deze vrijwel allemaal ondiep en reiken niet of nét in de bovenste paar meter van de Formatie van Maassluis. Confidentiële boringen uit de database van IF Technology zijn, indien aanwezig, meegenomen tijdens de besprekingen en in de analyse, maar kunnen niet worden weergegeven in dit rapport.

De aanwezigheid en beschikbare data van boringen uit de NLOG database (blauwe stip in Figuur 4.1) zijn geëvalueerd. Er bevindt zich één diepe olie en gas boring in de omgeving van het tuinbouwgebied: boring OEG-01. Echter is voor deze boring geen gamma ray log beschikbaar, enkel een SP en weerstand log, waardoor een goed onderscheid tussen zand en klei niet mogelijk is.

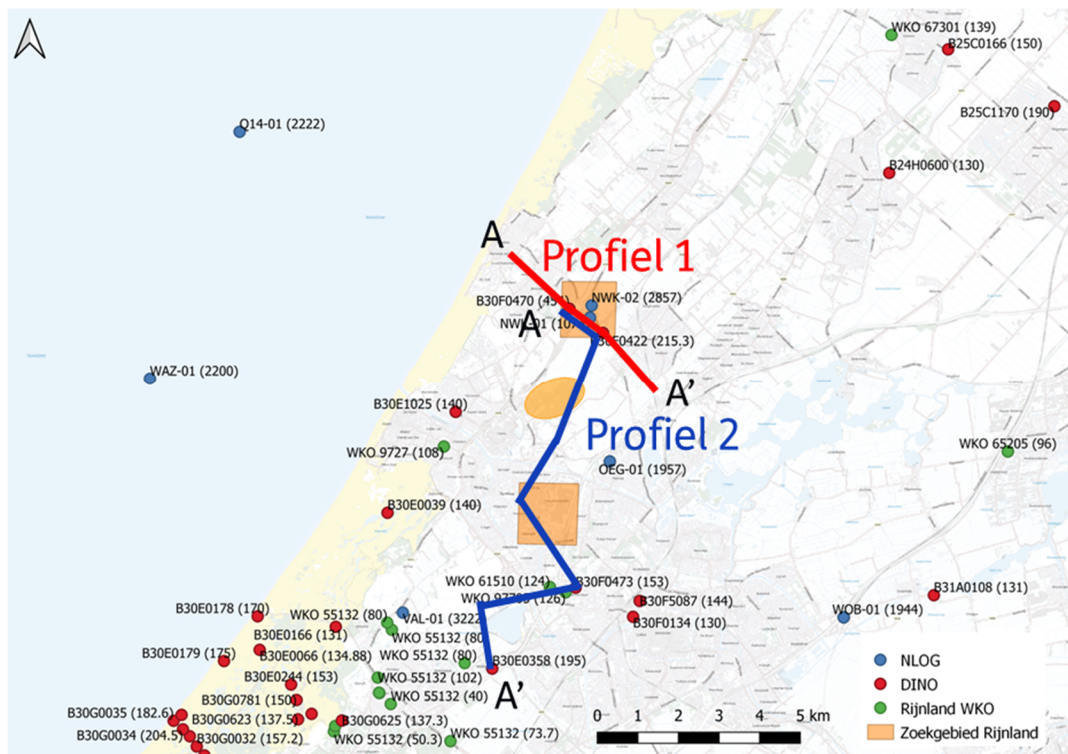
De boringen NWK-01 en NWK-02 liggen binnen de noordelijke zoeklocatie, dichtbij de piekvoorziening. NWK-01 heeft geen gamma ray log, enkel een SP en weerstand log, waardoor onderscheid tussen zand en klei moeilijk is aan te brengen. Boring NWK-02 heeft wel een gamma ray log, maar deze is door de casing gelogd waardoor de log alleen informatie geeft vanaf 300 m-mv, waardoor deze gegevens vooral voor de diepere lagen kan worden benut.



Figuur 4.1 Overzicht boringen rondom de locatie Rijnland, 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. De oranje cirkel en noordelijke oranje vierkant geven de locaties aan.

Twee REGIS profielen zijn gemaakt door het zoekgebied van Rijnland (Figuur 4.2). Profiel 1 loopt van NW naar ZO door het noordelijke zoekgebied waar de twee boringen uit de DINO database op geplot zijn. Profiel 2 loopt (zigzaggend) van Noord naar Zuid. Behalve de twee boringen van profiel 1 in het noorden zijn er alleen ondiepere boringen beschikbaar.

Informatie uit het REGIS model wijkt vaak af van de informatie uit boringen, omdat boringen zonder boorgatmeting en nieuwe boringen niet zijn meegenomen in de REGIS interpolaties. In dat geval kijken we naar de boringen, deze zijn leidend.



Figuur 4.2 Overzicht van twee profielen gemaakt voor Rijnland. De oranje cirkel en noordelijke oranje vierkant geven de locaties aan.

Breuken

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

Seismiek

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

Potentieelstudie RES regio Rotterdam Den Haag

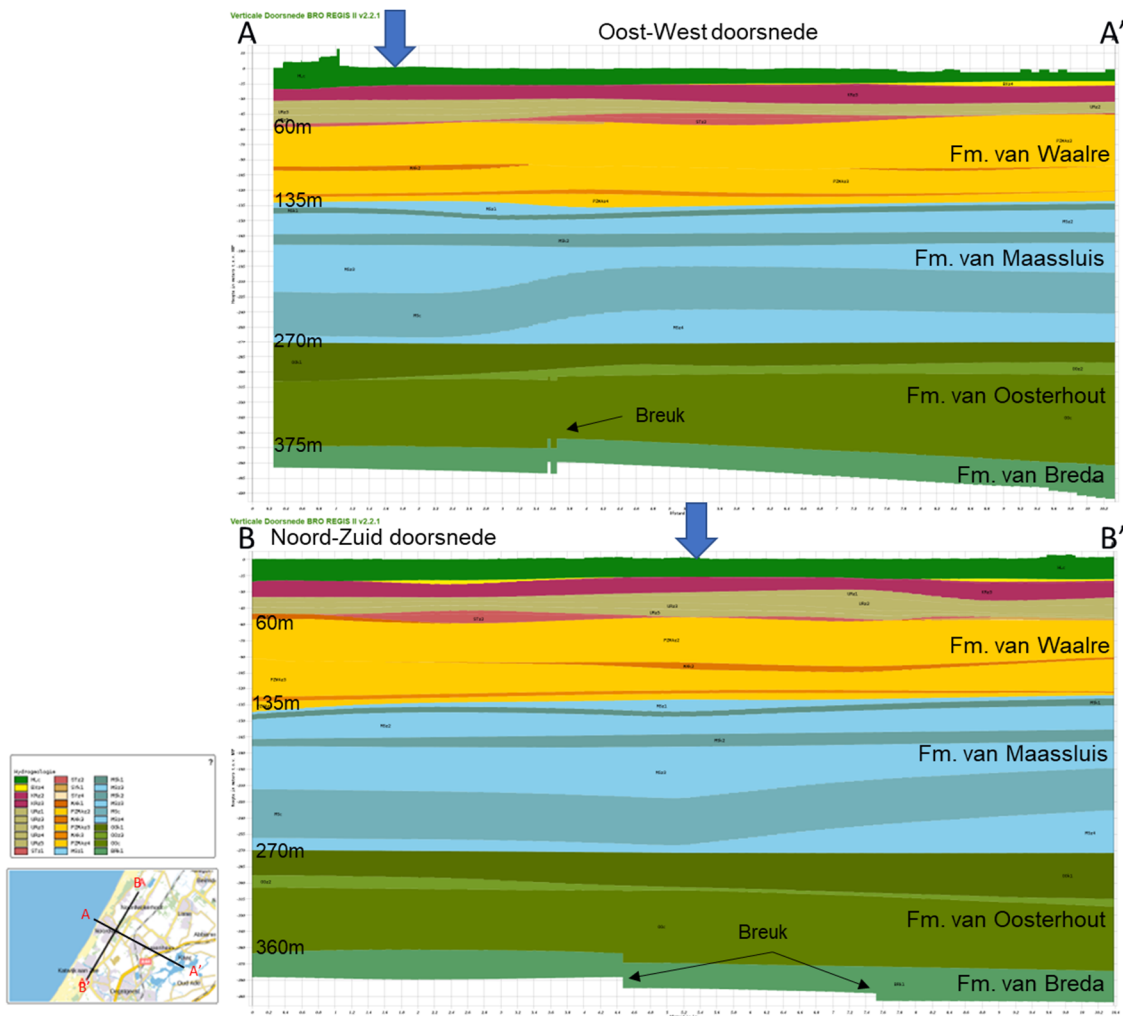
In de studie van Oerlemans et al. (2023) is gekeken naar het potentieel van de Formatie van Maassluis in de RES regio Rotterdam Den Haag. Hierbij zijn, naast de boringen uit de DINO database, ook de WKO boringen vanuit de interne (confidentiële) database van IF Technology meegenomen bij het inschatten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

4.1.3 Beschrijving regionale geologie

Figuur 4.3 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 Waalre** bestaat uit rivierafzettingen van de Rijn en ligt in de regio Rijnland op een diepte van ~60-135 m-mv. Dunne kleilagen wisselen de zandlagen van Waalre af in gestapelde fining-upward sequenties. De zandlagen zijn over het algemeen matig grof. De kleilagen zijn vaak sterk zandig tot zwak siltig.

De **Formatie van Maassluis** bestaat uit fijn tot matig grof mariene zanden afgewisseld met aaneengesloten kleilagen. De formatie wordt, door de gunstige combinatie van doorlatendheid, dieptelgging en de afwisseling van zand en kleilagen, gezien als meest interessante formatie voor HTO in Rijnland. De Formatie van Maassluis ligt rondom de locatie voor het tuinbouwgebied tussen de 135-270 m-mv. De formatie bestaat uit fijn tot matig grof ondiep marine zanden afgewisseld met kleilagen of kleilenzen.



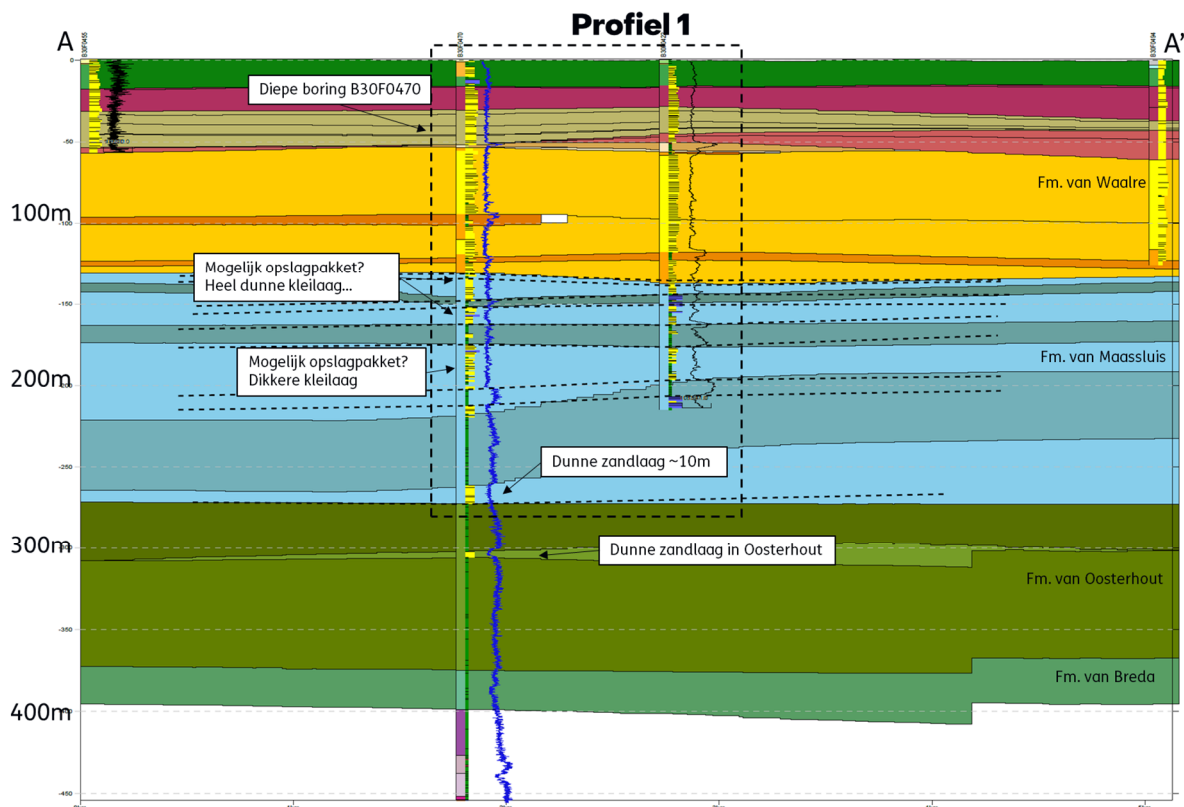
Figuur 4.3 REGIS II v2.2.1 Oost-West en Noord-Zuid doorsnedes van de ondergrond in de omgeving Rijnland. De blauwe pijl geeft grofweg de locatie van het tuinbouwgebied aan.

De **Formatie van Oosterhout** bestaat over het algemeen uit matig fijn tot fijne zanden en klei en zandige klei, uit een ondiep marien/deltaïsch afzettingmilieu. Deze formatie is in Zuid-Holland over het algemeen vaak kleilig/siltig ontwikkeld, met mogelijkheid op hooguit enkele meters zandlaag bestaande uit fijn zand met glauconiet en schelpenresten. De gamma ray log van boring NWK-02, welke binnen het noordelijke zoekgebied van, geeft aan dat deze Formatie kleilig ontwikkeld is met slechts hele dunne zandige intervallen van ~5-10 m.

De **Formatie van Breda** wordt ook zeer kleilig verwacht in deze omgeving.

Onder de Formatie van Breda (niet gekarteerd in het REGIS model) ligt **Laagpakket van Boom** (voorheen Rupel Klei Laagpakket) en het **Laagpakket van Berg** (voorheen Laagpakket van Vessem).

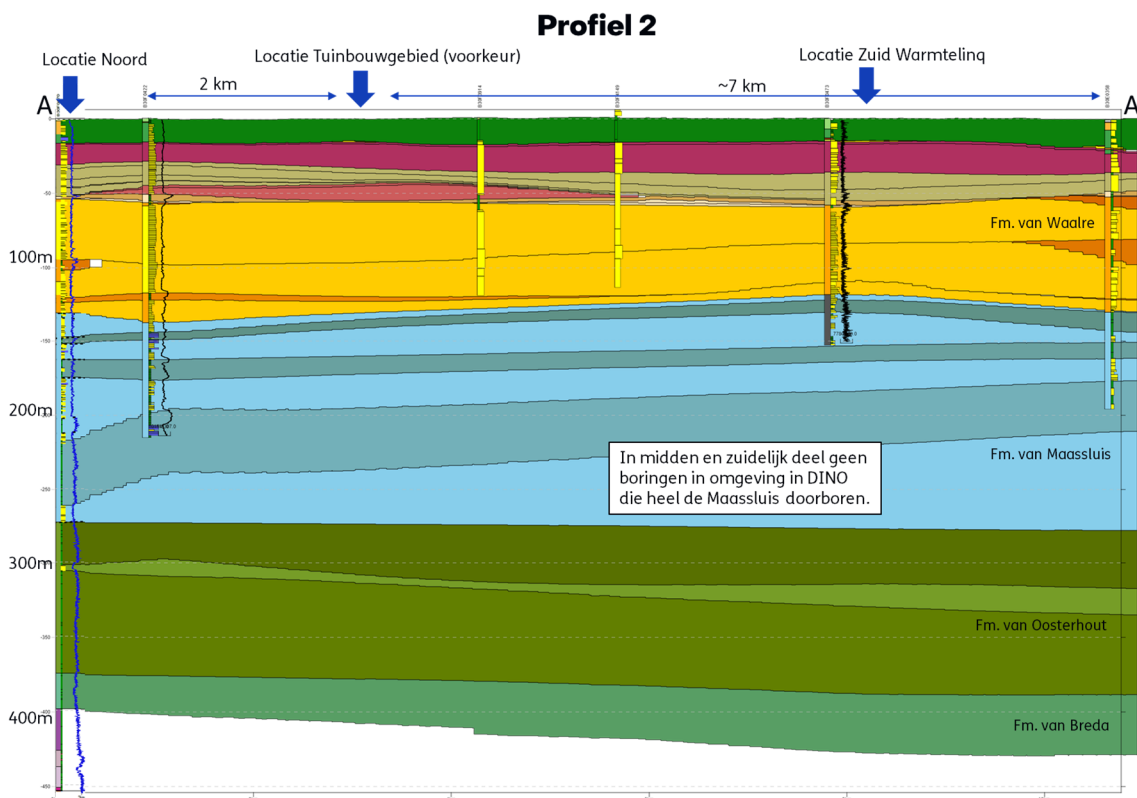
Figuur 4.4 laat profiel 1 uit Figuur 4.2 zien, van Noordwijk richting de Zwanburgerpolder, in de omgeving van de piekvoorziening. De twee boringen met een boorgatmeting uit de DINO database zijn geplot op de REGIS doorsnede. Beide boringen laten zien dat de Formatie van Waalre heel zandig ontwikkeld is met slechts hele dunne kleilaagjes, waarbij alleen de onderste kleilaag op een diepte van ~125 m door lijkt te lopen tussen de boringen. De Formatie van Maassluis bestaat uit een afwisseling van klei en zand. Een dunne kleilaag op ~150 m en twee iets dikkere kleilagen op ~165 en 210 m scheiden de aanwezige zandpakketten. Deze kleilagen lijken goed door te lopen tussen de boringen. Er lijkt een kleilaag te zitten rond 210 m diepte, welke een duidelijke uitslag geeft in de gamma ray van beide boringen (al is deze niet zichtbaar in de laagopbouw van het REGIS model). De diepere boring laat zien dat er nog een dikke kleilaag aanwezig is onderin de Formatie van Maassluis tussen ~220 en 260 m, met eronder een zandpakket van geringe dikte (<10m). Volgens het REGIS model wordt dit zandpakket naar het zuid-oosten toe dikker. De rechter boring gaat helaas niet dieper dan de kleilaag op ~210 m om dit te bevestigen. De beschikbare seismiek lijkt deze trend echter wel te bevestigen. Onder de dunne zandlaag onderin de Formatie van Maassluis begint de Formatie van Oosterhout, welke voornamelijk bestaat uit klei. De diepe boring laat nog een hele dunne zandlaag zien op een diepte van ~300 m.



Figuur 4.4 Profiel 1. REGIS doorsnede door het noordelijk deel van Rijnland, van Noordwijk naar Oegstgeest. Twee relevante boringen zijn geplot op het REGIS profiel: links de boorbeschrijving waarbij geel zand weergeeft en groen klei, rechts de gamma ray logs in blauw of zwart. Het omliggende gedeelte is vergroot weergegeven in Figuur 4.10.

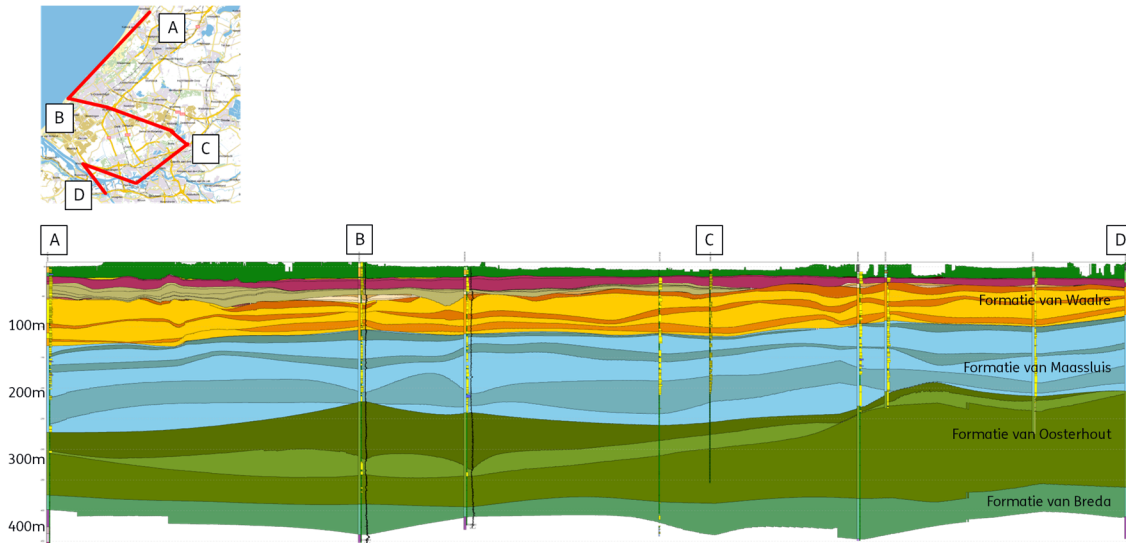
Figuur 4.5 toont profiel 2 uit Figuur 4.2 en is een Noord-Zuid profiel van de omgeving Rijnland. In het noorden zijn dezelfde 2 diepere boringen te zien als in profiel 1. Op ongeveer 2 km afstand ligt de tuinbouwlocatie, zie middelste blauwe pijl. De Formatie van Waalre bestaat zichtbaar

grotendeels uit zand tot aan de zuidelijke locatie bij Warmteling. Verder naar het zuiden komen er dikkere kleilagen in voor zoals te zien is in de meest zuidelijke boring. In het zuidelijk deel doorboort geen enkele boring de gehele Formatie van Maassluis; de 2 zuidelijke boringen penetreren slechts de top/bovenste helft. Dit maakt het lastig om de continuïteit van de zand- en kleilagen in deze formatie, zichtbaar in het Noorden (profiel 1) zoals hierboven beschreven, door te trekken naar het zuiden. De boorbeschrijving van de meest zuidelijke boring, op ~7 km van de tuinbouwlocatie, toont twee redelijk dikke kleilagen in de bovenkant van de Formatie van Maassluis, en ook de top van de 3^e kleilaag is zichtbaar. De minder diepe boring daarentegen geeft geen duidelijkheid over het voorkomen van een kleilaag. Voor de tuinbouwlocatie zal dus met name naar de twee noordelijke boringen (B30F0470 en B30F0422) op 2 à 3 km afstand van de tuinbouwlocatie gekeken worden.



Figuur 4.5 Profiel 2, van noord naar zuid. De drie zoeklocaties staan aangegeven met een blauwe pijl. De afstanden in vogelvlucht van de zoeklocatie naar de boringen noord en zuid zijn aangegeven.

Omdat in de nabije omgeving van het zoekgebied geen boordata beschikbaar is van boringen die reiken in de Formatie van Oosterhout en Breda, en dieper, is een profiel gemaakt door diepere boringen op grotere afstand van het gebied. In Figuur 4.6 is een profiel te zien door heel Zuid-Holland, van Noordwijk naar Rotterdam Botlek, met boringen die de Formatie van Oosterhout en Breda aanboren. Het REGIS model laat een zandlaag zien in de Formatie van Oosterhout (lichtgroene laag) met variabele dikte, echter is deze in de boringen niet, of heel dun aanwezig. De Formatie van Breda lijkt in de boringen ook uit klei te bestaan. Dit beeld komt overeen met resultaten van het WarmingUP project waarin de Formatie van Breda opnieuw is gekarteerd (Peters et al., 2022).

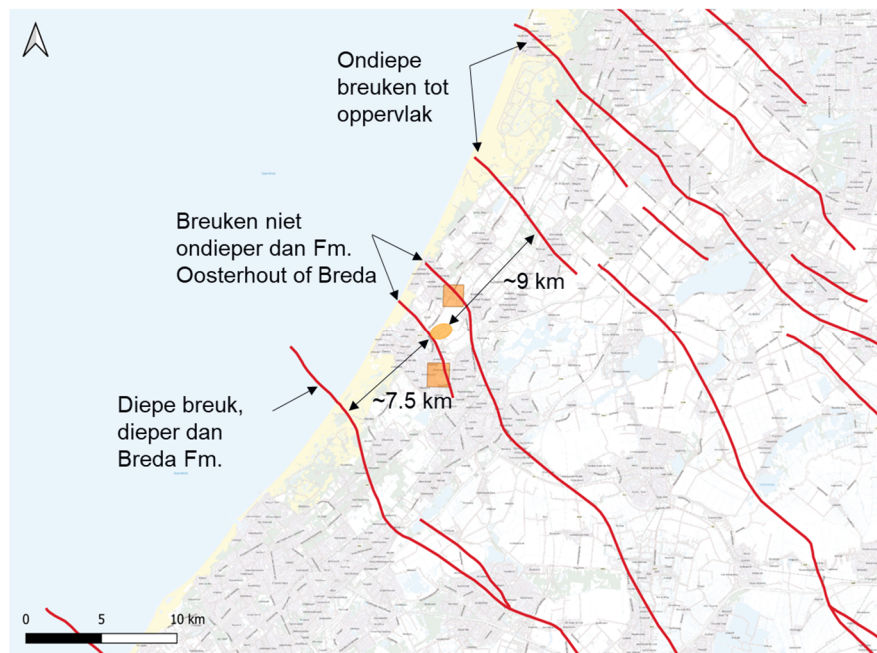


Figuur 4.6 REGIS II v2.2 doorsnede door Zuid-Holland met enkele diepe boringen. Van links naar rechts: van Noordwijk (A) naar Den Haag (B), Rotterdam Nesselande (C) en Rotterdam Botlek (D). Op de doorsnede staan de boorbeschrijvingen van diepe boringen tot de Oosterhout en Formatie van Breda in de omgeving weergegeven.

Breuken

Er is gekeken naar de aanwezigheid van breuken in het zoekgebied. Het risico van het voorkomen van breuken in deze ongeconsolideerde sedimenten op de integriteit van het opslag systeem (lekkage van warm water naar bovenliggende aquifers) is niet goed bekend. In het WINDOW project is besproken dat een afstand van het HTO systeem tot een aanwezige breuk in het voorziene opslag pakket groter dan 1 km dient te zijn om risico's te mijden (Zwamborn et al., 2020; Dinkelman et al., 2020). Figuur 4.7 toont een breukenkaart van de regio. Er loopt een breuk dichtbij de tuinbouwlocatie en eentje door het noordelijk zoekgebied, deze breuken reiken niet ondieper dan de Formatie van Breda en/of Formatie van Oosterhout. Het is raadzaam om rekening te houden met de aanwezigheid van deze breuken.

De breuken verder ten noorden van het zoekgebied zijn ondiep en reiken tot de oppervlakte, maar liggen op voldoende afstand van de tuinbouwlocatie. De breuk ten zuiden is dieper dan de Formatie van Breda en zal geen impact hebben op een eventueel HTO systeem, en vice versa.



Figuur 4.7 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. De huidige 3D seismiek is niet geschikt voor interpretatie van dunne kleilagen in de Formatie van Maassluis en ondieper. De 2D seismiek laat zien dat de dunne zandlaag onderin de Formatie van Maassluis mogelijk wat dikker wordt naar het ZO toe, en redelijk constant blijft wat betreft dikte naar het ZWZ toe. De kleilaag op ~170 m diepte is niet goed te zien in de 2D seismiek, en blijkt uit de logs niet van voldoende of betrouwbare dikte.

Potentieelstudie RES regio Rotterdam Den Haag

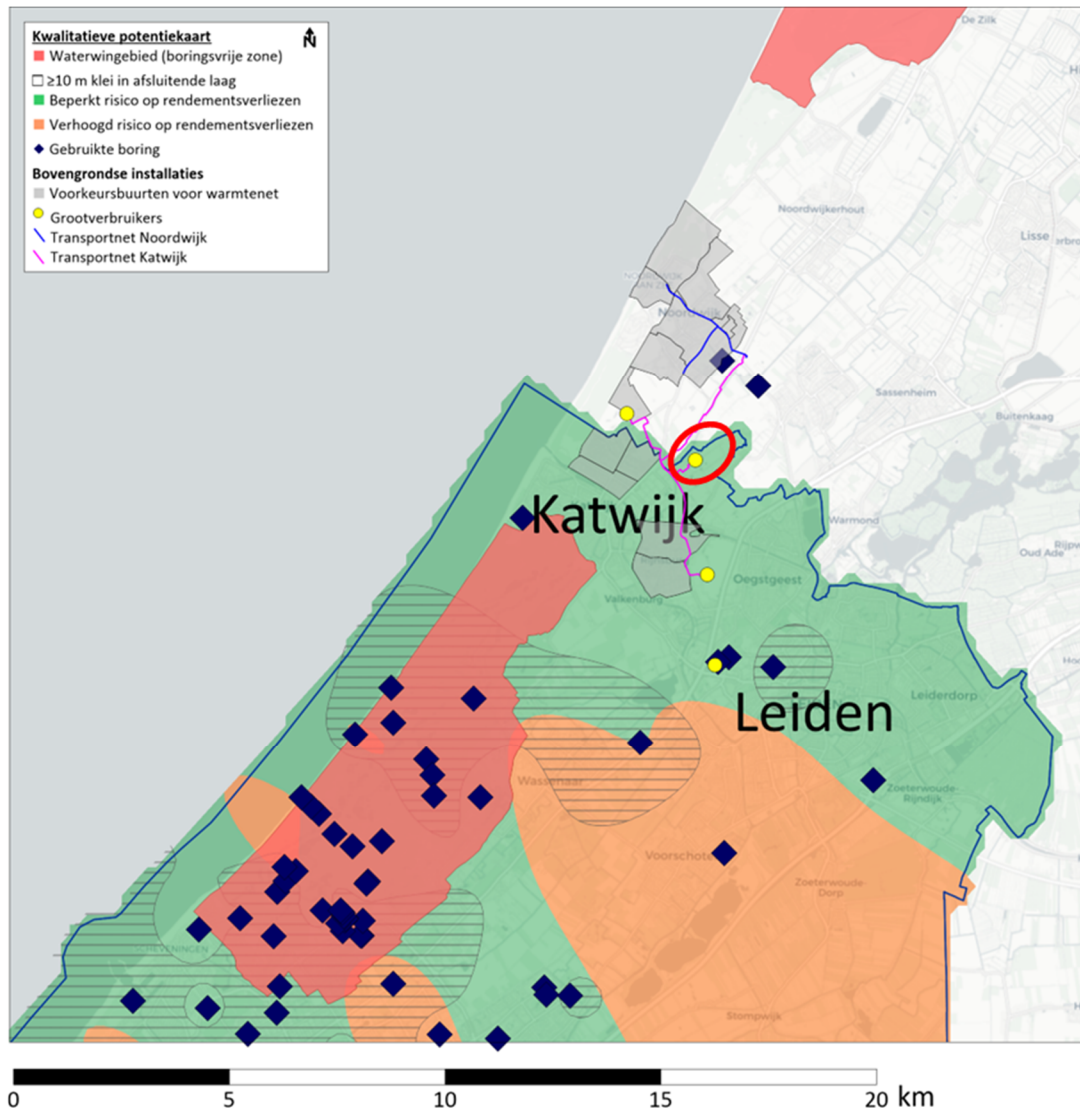
In de studie van Oerlemans et al. (2023) is gekeken naar het potentieel van de Formatie van Maassluis in de RES regio Rotterdam Den Haag. Hierbij zijn, naast de boringen uit de DINO database, ook de WKO boringen vanuit de interne (confidentiële) database van IF Technology meegenomen bij het inschatten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

Over het Katwijk gebied wordt gezegd:

“De datadichtheid in dit gebied is relatief laag, waardoor de resultaten relatief onzeker zijn. Op basis van de beschikbare data wordt ingeschat dat de kleilaag die de Formatie van Maassluis afdekt in Katwijk een beperkte dikte heeft, of in ieder geval een beperkt kleigehalte. Dat is een belangrijk risico dat lokaal beter onderzocht moet worden bij een eventueel HTO-project in dit gebied. Het zandpakket heeft in het noorden van Leiden een geschikte dikte voor HTO, waardoor er naar verwachting debieten tussen 150 en 250 m³/uur te halen zijn per doublet. In het zuiden is het zandpakket dusdanig dik dat het risico van grotere rendementsverliezen opspeelt. Aan de zuidkant van dit gebied bestaan boorrestricties i.v.m. Waterwingebied.”

In Figuur 4.8 is te zien dat het gebied Rijnland een beperkt risico op grote rendementsverliezen heeft, maar er is wel een risico op afwezigheid van een goede afsluitende kleilaag (niet gearceerde

gebied) of beperkte dikte/kleigehalte ervan. De debietkaart in het rapport laat een haalbaar debiet van tussen de 150-250 m³/h zien, dit is op basis van de NVOE onttrekkingsnorm en een doorlatendheid van 12 m/d. Die komt met name voort uit de grote zanddikte.

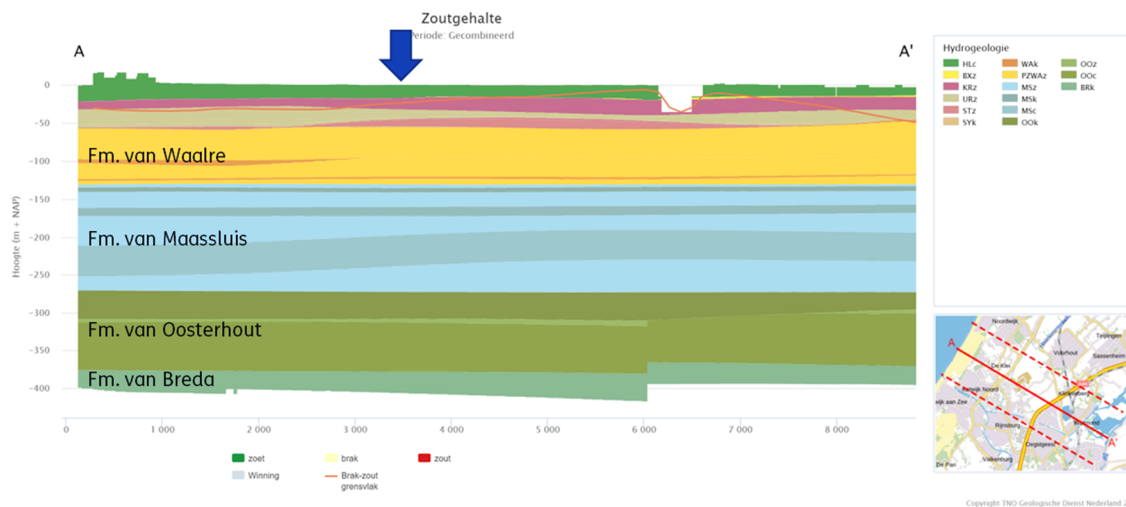


Figuur 4.8 Kwalitatieve potentiële kaart voor HTO in de Formatie van Maassluis. De rode cirkels geeft het zoekgebied van de beoogde locatie voor Trappenberg Kloosterschuur aan. Als er, gemeten vanaf de bovenkant van het opslagpakket, geen kleilagen in de boring werd aangetroffen die als onderliggende 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 vanwege het risico op rendement verliezen door opdrijving. 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 van nature een lagere kwaliteit hebben vergeleken met zoet grondwater. Figuur 4.9 laat het brak/zout grensvlak zien in de regio van Rijnland. Zoet water (< 150 mg Cl⁻/l) bevindt zich met name in de bovenste 50 m, het brak-zout grensvlak (1000 mg Cl⁻/l) wordt in de Formatie Kreftenheye en Urk (rode en grijze lagen) geschat. Dat betekent dat het grondwater in de Formatie van Waalre, Maassluis en Oosterhout zout is.



Figuur 4.9 Brak-zout grensvlak, de blauwe pijl indiceert het noordelijke HTO zoekgebied (locatie 1) van de regio Rijnland. De tuinbouwlocatie laat een soortgelijk profiel zien. Van: www.grondwatertools.nl/gwatlas.

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

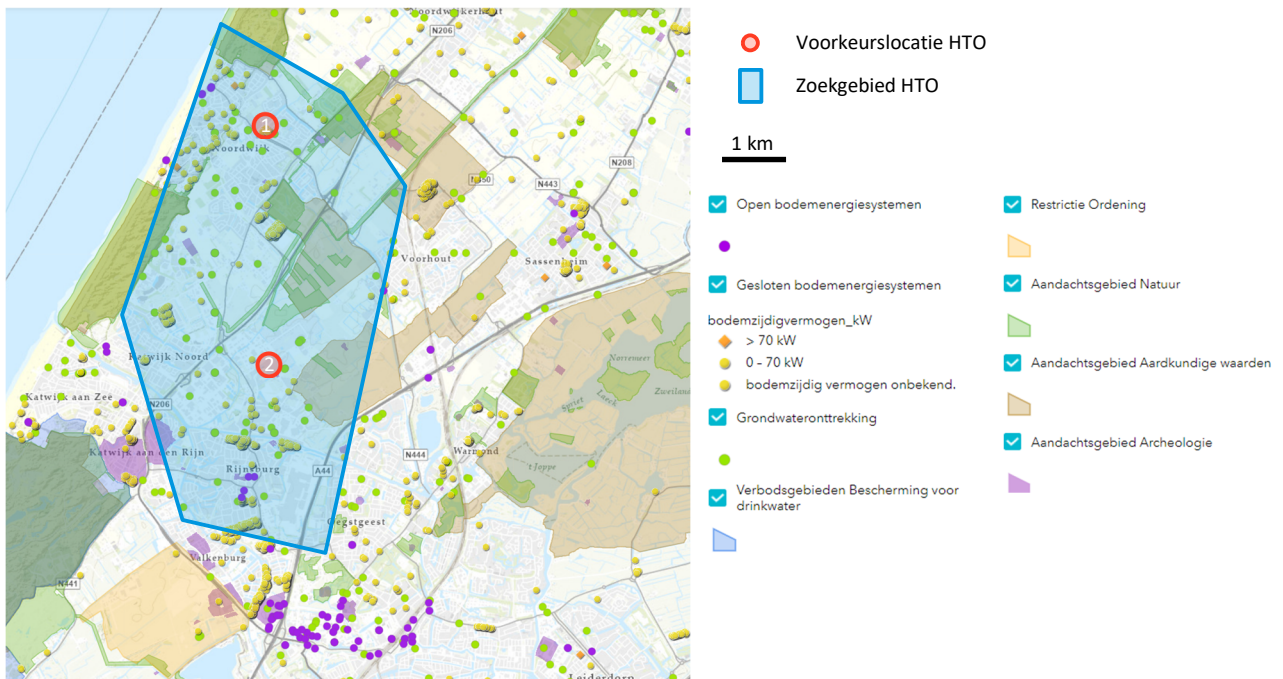
Uit de WKOtool (wkotool.nl) blijkt dat de locatie niet is gelegen in een restrictiegebied voor bodemenergie zoals een boringsvrije zone of een grondwaterbeschermingsgebied.

Aandachtgebieden

Uit de WKOtool (wkotool.nl) blijkt dat de locatie voor het overgrote gedeelte niet is gelegen in een aandachtsgebied voor aardkundige of archeologische waarden. Wel liggen er enkele kleine aandachtsgebieden voor natuur in het projectgebied. Het is in deze gebieden niet zonder meer toegestaan om een HTO-systeem te realiseren. Het risico bestaat dat hier niet mag worden geboord of dat er restricties gelden voor de toelaatbare invloed op de grondwaterstand.

Omgevingsbelangen

Er zijn meerdere grondwateronttrekkingen en open en gesloten bodemenergiesystemen gerealiseerd in het projectgebied. De werking en exacte dieptes en locaties van deze systemen moeten in een vervolgfase opgevraagd worden bij het bevoegd gezag. Verwacht wordt dat voldoende ruimte beschikbaar is voor de toepassing van HTO.



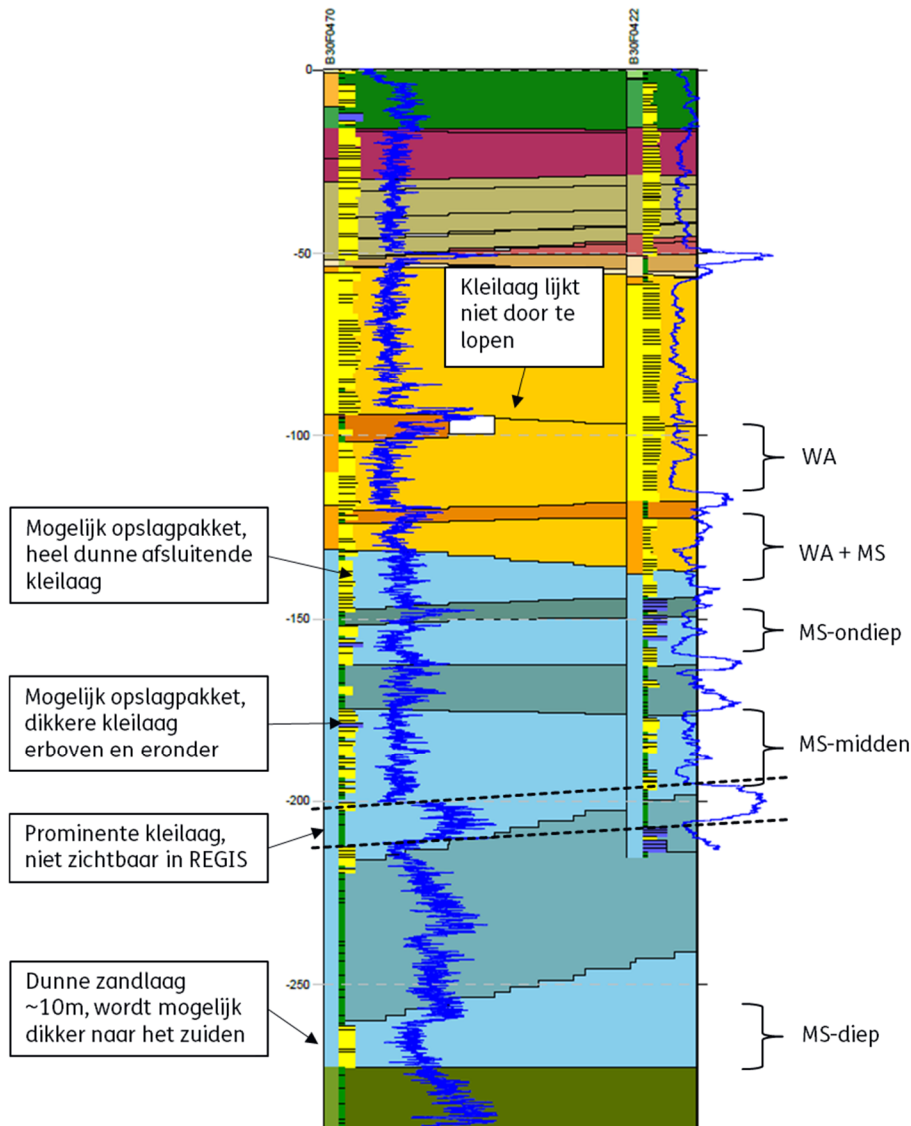
Figuur 4.10 Omgevingsbelangen rondom de het projectgebied Rijnland (blauw) en twee voorkeurslocaties voor HTO (rood). Bron: WKOtool.nl

Inpassing

Locatie 1 in (Figuur 4.10) bevindt zich op minder dan 100 m afstand van enkele gesloten bodemenergiesystemen (GBES). Deze afstand is relatief klein. Een HTO wordt daardoor mogelijk niet vergund. Aangeraden wordt om ten minste 500 m afstand aan te houden. Dit dient verder uitgezocht te worden in een effectenstudie. Op locatie 2 bevindt zich een GBES. Geadviseerd wordt om de HTO noordelijk of oostelijk ten opzichte van de GBES te plaatsen op voldoende afstand (500 m).

4.1.4 Bodemopbouw en potentiële opslagpakketten op de tuinbouwlocatie

Vanwege de beperkte beschikbaarheid van diepere boringen in de omgeving van de tuinbouwlocatie is besloten om de bodemopbouw en de potentiële opslagpakketten te baseren op de twee diepere boringen ten noorden van de tuinbouwlocatie, aangevuld met kennis vanuit de seismische interpretatie. Een overzicht van de geïdentificeerde potentiële opslagpakketten is te zien in Figuur 4.11. Voor elk opslagpakket is gekeken in hoeverre het voldoet aan de gestelde criteria voor HTO toepassing, zie Tabel 4-2.



Figuur 4.11. Vergroting van het omliggende gedeelte uit Figuur 4.4 met uitvergroting van de twee boringen in het noordelijke zoekgebied. De blauwe lijnen zijn de gamma ray logs, met links daarvan de boorbeschrijvingen (geel = zand, groen = klei). Aan de rechterkant zijn de mogelijke opslagpakketten aangegeven, zie voor eigenschappen Tabel 4-2.

Formatie van Waalre

De Formatie van Waalre bestaat voornamelijk uit grove zanden met dunne, mogelijk niet continue kleilagen. Door de hoge doorlatendheid van de zandpakketten kan de mate van opdrijving van warm water erg groot zijn, waardoor het risico aanwezig is op lage bronrendementen. Verder tonen de boringen en de seismiek aan dat de kleilagen, welke vaak sterk zandig tot zwak siltig zijn, niet erg continue zijn, en van geringe dikte. Dit maakt dat ze niet geschikt zijn als afsluitende laag aan de boven- of onderkant van het opslagpakket.

De ondiepe ligging, de zeer hoge doorlatendheid van de zanden en de vermoedelijke afwezigheid van dikke, continue kleilagen om warmteverliezen te voorkomen maken dat deze formatie waarschijnlijk niet geschikt wordt geacht voor HTO toepassing. Dit geldt in ieder geval voor scenario WA. Voor scenario WA + MS valt de gemiddelde doorlatendheid nog net binnen de acceptabele grenzen, en lijkt de afsluitende kleilaag in de Formatie van Waalre weliswaar dun, maar wel continu (Tabel 4-2).

Formatie van Maassluis

Op de tuinbouwlocatie zijn drie potentiële zandpakketten geïdentificeerd binnen de Formatie van Maassluis; MS-ondiep, MS-midden en MS-diep. Het ondiepe zandpakket heeft een geringe (effectieve) dikte, bovendien is de afsluitende kleilaag zeer dun en is de continuïteit onzeker. Het middelste zandpakket op 175-200 m diepte is dikker. Echter blijkt uit de boorbeschrijving dat hier wel veel kleilaagjes in zitten waardoor de effectieve dikte slechts 10-15m betreft. De dikte van de bovenliggende kleilaag lijkt acceptabel, maar kent ook enige onzekerheid. Doordat de tuinbouwlocatie op 2 km afstand ligt van de noordelijke boringen, en in de zuidelijke boringen (~7 km verderop) deze kleilagen wel dikker lijken, is besloten dit scenario een matige (oranje) score te geven en mee te nemen in de thermische simulaties. Het diepste zandpakket op 260-270 m diepte, welke alleen doorboord is in de diepste van de twee noordelijke boringen, is te dun voor HTO toepassing (~10 m), maar lijkt uit de seismiek iets dikker te worden naar het ZO toe, richting de tuinbouwlocatie. Er zit een dikke kleilaag (~40 m dik) boven deze dunne zandlaag. Vanwege de potentiële toenemende dikte naar het zuidoosten heeft dit scenario een matige (oranje) score gekregen (Tabel 4-2).

Formatie van Oosterhout

Weinig goede data is beschikbaar in de directe omgeving van de tuinbouwlocatie. In Zuid-Holland is de Formatie van Oosterhout over het algemeen vaak kleilig/siltig ontwikkeld, met mogelijkheid op hooguit enkele meters zand, bestaande uit fijn zand met glauconiet en schelpenresten. De gamma ray van boring NWK-02, liggend binnen het noordelijke zoekgebied, laat enkele dunne zandlagen zien in deze formatie van maximaal 10 m dikte. Dit is van onvoldoende dikte voor HTO opslag. Om die reden valt de Formatie van Oosterhout af voor de toepassing van HTO in Rijnland.

Dieper dan de Formatie van Oosterhout

Onder de Formatie van Oosterhout zit de Formatie van Breda. Deze wordt ook zeer kleilig verwacht in deze omgeving en valt om die reden af voor toepassing van HTO. Daaronder ligt Laagpakket van Boom (voorheen Rupel Klei Laagpakket) op ongeveer 440 m-mv en betreft een kleilaag met een dikte van < 10 m Hieronder ligt het Laagpakket van Berg (voorheen Laagpakket van Vessem). Dit is een dunne (< 10 m) zandlaag, en waarschijnlijk te dun voor toepassing van HTO, ook zijn de eigenschappen van die zand onbekend. In boring NWK-01 is de zandlaag 8 m dik, in NWK-02 9 m en OEG-01 7 m (nlog.nl).

Daar weer onder liggen formaties uit het Krijt tijdperk, en deze bevatten krijtmergel en krijtgesteente (sedimentair gesteende bestaande uit kleine kalkskeletjes van algen en andere fauna). Mergel is een sedimentair gesteende dat uit een mengsel van klei en fijnverdeelde kalk bestaat, voor HTO toepassing wordt dit minder geschikt geacht vanwege de reactiviteit van kalk bij temperatuur veranderingen.

De formaties onder de Formatie van Oosterhout worden niet geschikt geacht voor HTO toepassing.

Hieronder een korte samenvatting van de beoordeling van de 5 opslagpakketten (varianten) zoals uitgewerkt in Tabel 4-2:

- Variant WA valt af vanwege de beperkte thermische afsluiting en grote onzekerheid van de continuïteit van de afsluitende kleilaag. Bovendien zal de zeer hoge doorlatendheid leiden tot hoge warmteverliezen zoals terug is te zien in de zeer lage inschatting van het rendement.
- Variant WA-MS heeft negatieve beoordeling voor thermische afsluiting, echter vanwege toename van de dikte van de kleilagen naar het zuiden (richting de tuinbouwlocatie) toe wordt dit scenario alsnog meegenomen in de thermische simulaties.

- De Formatie van Maassluis wordt als potentieel meest geschikte formatie gezien, met enkele potentiële zandlagen voor de toepassing van HTO. Zoals ook geconcludeerd is in de potentieelstudie voor de RES regio Rotterdam Den Haag is een belangrijke onzekerheid en risicofactor de dikte, continuïteit en daarbij de thermische en hydraulische afsluitende werking van de bovenliggende kleilagen.
- Variant MS-ondiep valt af vanwege de zeer beperkte (effectieve) aquifer dikte en dikte van de afsluitende kleilaag.
- De twee diepere varianten 'MS-midden' en 'MS-diep' zijn het meest positief beoordeeld. Bij beide varianten is de effectieve dikte van het opslagpakket onzeker, vandaar dat een range van 10-15 m wordt aangenomen. Bij 'MS-midden' zijn veel dunne kleilaagjes te zien in het opslagpakket, en is de effectieve dikte 10 m dunner ingeschat dan de totale dikte.
- Bij variant 'MS-midden' is de dikte van de bovenliggende kleilaag onzeker, deze lijkt uit twee dunne kleilagen te bestaan met zand er tussen. Daarvoor is uitgegaan van 5-10 m klei voor de hydraulische afsluiting. De bij thermische afsluiting is voor 15 m klei in de 30 meter boven het opslagpakket gekozen. Echter zit er wel ongeveer 10 m zand tussen de kleilagen (* bij 15 m klei).

Tabel 4-2 Ingevulde criteria tabel voor de tuinbouwlocatie in de regio Rijnland met stoplicht indicatie: groen = goed, oranje = matig, rood = slecht. WA = Formatie van Waalre, MS = Formatie van Maassluis. * bij thermische afsluiting MS-midden: veel zand tussen kleilagen, risico op warmteverliezen. Bij de rendementsinschatting zijn de volgende bovengrondse varianten voor netwerk aanvoer en retour temperatuur aangehouden: V1: 81/30 °C, V2: 81/40 °C.

Voorkeurslocatie bovengrond	Tuinbouwgebied (voorkeur)				
Naam opslag pakket	WA	WA + MS	MS - ondiep	MS - midden	MS - diep
Lithologie/opmerkingen	Te dunne kleilaag voor HTO, opties voor WKO/MTO?	Te dunne kleilaag voor HTO, opties voor WKO/MTO?	Te dunne kleilaag voor HTO, opties voor WKO/MTO? Mogelijk schelpenlaagje	Veel kleibijmenging afsluitende kleilaag mogelijk uit twee dunne	Dikte zandlaag onzeker
Top Diepte (m-mv)	100	125	150	175	260
Bottom diepte (m-mv)	120	150	160	200	270
Totale dikte aquifer (m)	20	25	10	25	10-15
Effectieve dikte aquifer (m)	15-20	20	5-10	10-15	10-15
Doorlaatvermogen achtergrond T (m²/d)	600-800	400	50-100	100-150	100-150
Hydraulische afsluiting (m)	5 (0-10)	2-5	3 (1-5)	8 (5-10)	40
Thermische afsluiting (m)	0-8	2-5	<5	15*	40
Dikte kleilaag onder aquifer (m)	2-5	<5	5-10	>10	>100
Rendement inschatting Var. 1/2/	32 / 21 %	49 / 35 %		63 / 46 %	
Omgevingsbelangen	?	?	?	?	?
Beoogde opslag temperatuur (°C)	81	81	81	81	81
Filter lengte (m)					
Kh (m/d)	40	20	10	10	10
Kv (m/d)	20	8	2.5	2.5	2.5
Totaal score					

Nabeschuiving locatiekeuze

In de het begin van de studie is, na de eerste inventarisatieronde van de uitgangspunten, gestart met de analyse van de ondergrond. Op dat moment was de tuinbouwlocatie de primaire focus. De reden hiervoor was dat, door de lage temperaturen voor de tuinbouw, verwacht werd dat deze locatie gunstig zou uitvallen. Bij lage temperaturen in het warmtenet is namelijk geen warmtepomp meer nodig. In een later stadium, zijn de uitgangspunten aangepast. De temperaturen in het warmtenet voor de tuinbouw zijn omhoog gegaan. Hierdoor werd deze locatie minder interessant. Een verdieping op locatie 1 in Noordwijk, vergelijkbaar met de tuinbouwlocatie, was qua

beschikbare tijd op dat moment niet meer mogelijk. In principe is de inschatting van de opbouw van de ondergrond op de tuinbouwlocatie gebaseerd op 2 boringen uit het noordelijke gebied. Het enige verschil is de aanname dat de dikte van het aquifer in het MS-diep scenario iets toeneemt naar het zuiden toe, waardoor deze 10-15 m is geschat in plaats van 10 m zoals aangetroffen in het noordelijke gebied. In het verdere verloop van deze studie is verder gerekend met de bodemopbouw zoals ingeschat op de tuinbouwlocatie.

5 Thermische rendementssimulaties

5.1 Opzet en uitgangspunten model

5.1.1 Beschrijving modelopzet

Om de potentie voor HTO op deze locatie op basis van de huidige informatie te bepalen is 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 verkenninglocaties is er een afweging gemaakt op basis van de benodigde rekentijd, het kunnen doorrekenen van meerdere scenario's per verkenninglocatie, 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 4.11.

- 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 aan de hand van variabele put druk en temperatuur van de aquifer. De onttrekkingstemperatuur van de put is berekend op basis van de temperatuur en het volume van het instromende water over de lengte van het putfilter (gewogen gemiddelde).

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

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

5.1.2 Berekening thermisch terugwinrendement

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

$$\eta_{bron} = \frac{E_{uit}}{E_{in}} = \frac{\int V_{uit} \cdot (T_{uit} - T_{natuurlijk}) \cdot C_w \cdot \Delta t}{\int V_{in} \cdot (T_{in} - T_{natuurlijk}) \cdot C_w \cdot \Delta t} \quad (1.1)$$

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:

$$\eta_{systeem} = \frac{E_{leveren}}{E_{laden}} = \frac{\int V_{uit} \cdot (T_{heet} - T_{warm}) \cdot C_w \cdot \Delta t}{\int V_{in} \cdot (T_{heet} - T_{warm}) \cdot C_w \cdot \Delta t} \quad (1.2)$$

5.2 Scenario's

5.2.1 Ondergrond uitgangspunten

Op de beoogde locatie in Rijnland zijn 2 opslagpakketten geïdentificeerd met potentie voor HTO, beiden in de formatie van Maassluis (Tabel 4-2). Het diepste opslagpakket 'MS diep' heeft hierbij de grootste potentie, maar de dikte van het pakket is onzeker. Voor deze simulaties wordt een dikte van 15m gebruikt (positieve casus, zie hoofdstuk 4.1.4). Het ondiepere pakket 'MS midden' is daarnaast ook mogelijk bruikbaar, echter is bij deze laag de dikte van de afsluitende kleilaag aan de bovenkant van het pakket zeer onzeker.

Tabel 5-1 Modelschematisatie gebruikt voor het ondiepe opslagpakket: "MS midden"

Laag	Top (model)	Bot (model)	Kh & Kv	Type laag
1	0	-20	0,01 & 0,0025	aquitard
2	-20	-45	10 & 2,5	aquifer
3	-45	-65	0,01 & 0,0025	aquitard

Tabel 5-2 Modelschematisatie gebruikt voor het diepere opslagpakket: "MS midden". Dit pakket heeft de meeste potentie voor HTO op basis van de huidige beschikbare informatie.

Laag	Top (model)	Bot (model)	Kh & Kv	Type laag
1	0	-20	0,01 & 0,0025	aquitard
2	-20	-35	10 & 2,5	aquifer
3	-35	-55	0,01 & 0,0025	aquitard

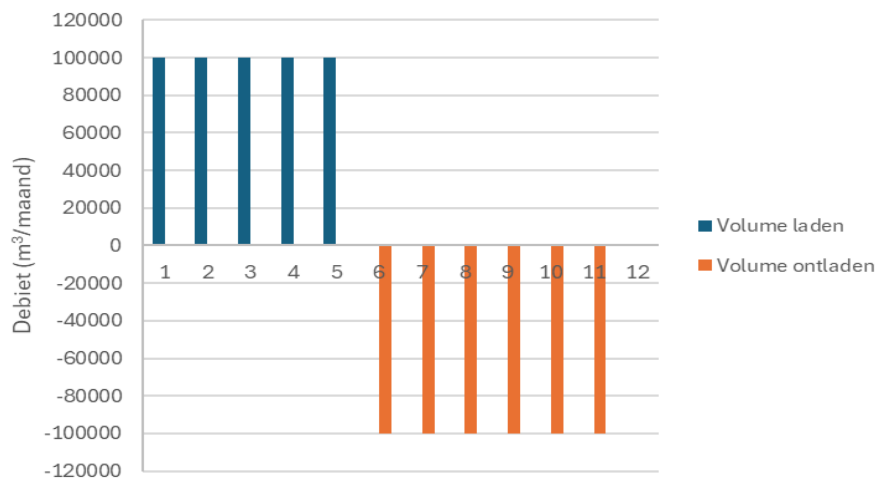
5.2.2 Operationele uitgangspunten

Voor locatie Rijnland zijn 2 mogelijke concepten qua inpassing van de HTO gedefinieerd, een bij locatie piekketel (C1) en een concept bij de Tuinbouw (C2). Concept 1 (piekketel) wordt momenteel ingeschat als de meest kansrijke locatie. De gedefinieerde scenario's voor dit scenario zijn gegeven in Tabel 5-3.

Tabel 5-3 De operationele scenario's die zijn opgesteld voor inpassing van een HTO in combinatie met concept 1.

Concept		Concept 1	Concept 1	Concept 1	Concept 1
Scenario		Base Case	Volume min	Volume max	T_warm_25
Locatie		Piekketel	Piekketel	Piekketel	Piekketel
Laden					
Injectietemperatuur hete bron	[°C]	81	81	81	81
Laadvolume	[m3]	500.000	250.000	750.000	500.000
Duur laden	[m]	5	5	5	5
Leveren					
Afkaptemperatuur	[°C]	50	50	50	40
Injectietemperatuur lauwe bron	[°C]	40	40	40	30
Maximale Levertvolume	[m3]	600.000	300.000	900.000	600.000
Duur leveren	[m]	6	6	6	6
Rustperiode					
Duur rustperiode	[m]	1	1	1	1

Voor de simulaties is een vast patroon en debiet gebruikt voor het laden (5 maanden) en ontladen (6 maanden) van de HTO (Figuur 5.1). Voor scenario's waar het maximale levertvolume onttrokken kan worden (tijdens ontladen wordt de afkaptemperatuur niet bereikt) wordt er 20% meer volume onttrokken uit de hete bron dan opgeslagen.



Figuur 5.1 Laad/ontlaadpatroon voor de thermische simulaties

5.2.3 Resulterende scenario's

In totaal zijn er 6 simulaties uitgerekend om het te verwachten thermische systeemrendement voor een variatie aan condities van oor de HTO locatie in kaart te brengen (Tabel 5-4).

Base case scenario

Om de gevoeligheid van het systeemrendement voor een variatie aan ondergrondparameters en operationele uitgangspunten inzichtelijk te maken is er een base case scenario opgesteld, en ten opzichte van dit scenario worden zijn uitgangspunten en/of parameters gevarieerd. Het base case scenario is opgesteld uit de laagopbouw met de hoogste slagingskans (MS diep) en het meest relevante operationele scenario (C1BC), zie Tabel 5-4.

Scenario's

Vijf aanvullende scenario's zijn daarnaast gesimuleerd waarbij of de karakteristieken van het opslagpakket worden gevarieerd (2 en 3) of de operationele inpassing wordt aangepast (4 t/m 6) .

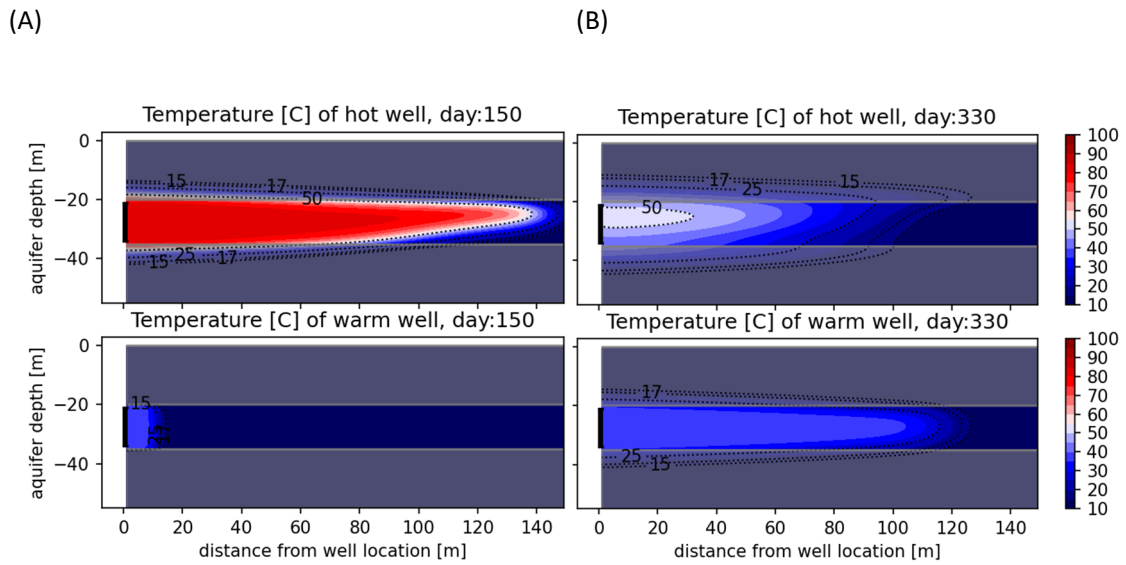
Tabel 5-4 Overzicht van gesimuleerde scenario's: de base case (1) en de vijf aanvullende varianten (2-6).

Nr.	Scenario naam	Ondergrond	Operationeel
1	Base case	MS diep	C1BC
2	Maassluis midden	<i>MS midden</i>	C1BC
3	Anisotropie 10	<i>MS diep (ani = 10)</i>	C1BC
4	Vmin	MS diep	<i>C1Vmin</i>
5	Vmax	MS diep	<i>C1Vmax</i>
6	Twarm 30	MS diep	<i>C1Tw30</i>

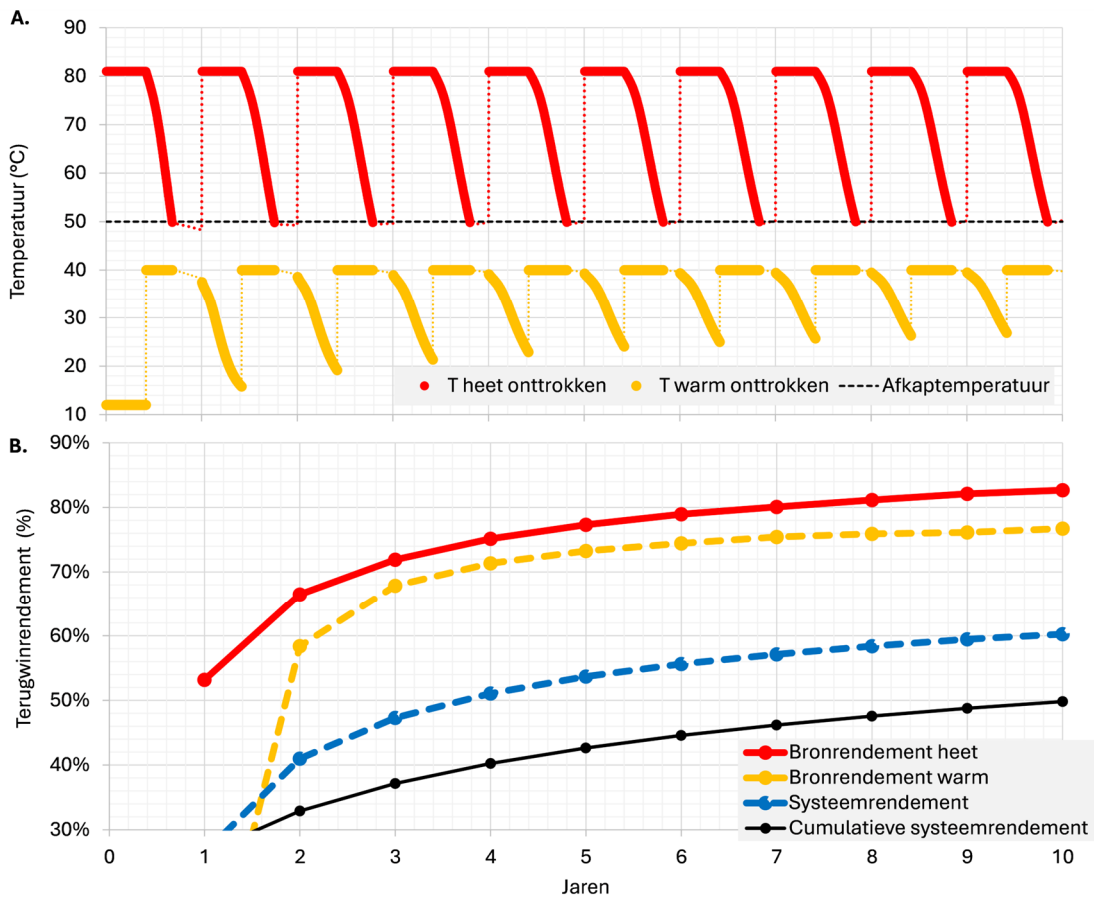
5.3 Resultaten

5.3.1 Base case

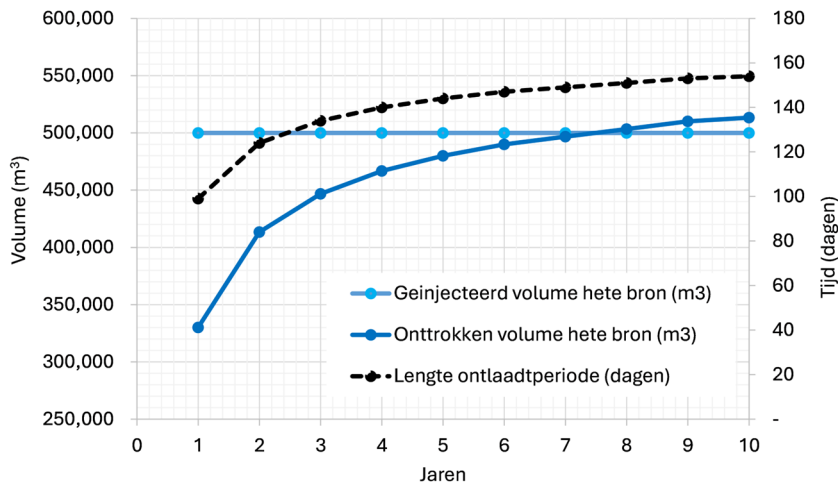
Voor het base case scenario is warmte opgeslagen in de hete bron met een temperatuur van 81 °C gedurende het laadseizoen van 150 dagen (Figuur 5.2). Tijdens ontladen is deze warmte onttrokken en het afgekoelde water opgeslagen in de warme bron op een temperatuur van 40 °C. Op het moment dat de afkaptemperatuur (50 °C) is bereikt stopt het ontladen (Figuur 5.3A). De achtergebleven warmte wordt in het volgende jaar deels weer teruggewonnen met als gevolg dat de temperatuurafname tijdens onttrekking in zowel de hete en de warme bron ieder opvolgend jaar afneemt. Daardoor neemt ook de tijd totdat de afkaptemperatuur wordt bereikt toe, van 99 dagen in het eerste jaar tot 154 dagen in jaar 10, met als resultaat dat het systeem vanaf het achtste jaar meer volume onttrekt dan er wordt opgeslagen (Figuur 5.4). Samen resulteert dit erin dat de efficiëntie van het systeem met de jaren toeneemt van 26% in het eerste jaar tot 60% in het tiende jaar (Figuur 5.3B). Op basis van het jaarlijkse systeemrendement is het cumulatieve systeemrendement berekend dat laat zien hoe efficiënt het systeem cumulatief is sinds de ingebruikname van het systeem. In jaar tien is dit 50% voor de base case.



Figuur 5.2 Doorsnede van de temperatuurverdeling bij de hete bron (boven) en de warme bron (onder) gesimuleerd met het axisymmetrische model. A. Dag 150 (eind van laadperiode en start van ontladperiode) en B. dag 330 (eind van ontladperiode). 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 5.3 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 het filtertraject van de bronnen gegeven (dunne stippellijn). B. Het jaarlijkse terugwinrendement van de hete bron, de warme bron, en het daaruit resulterende systeemrendement.



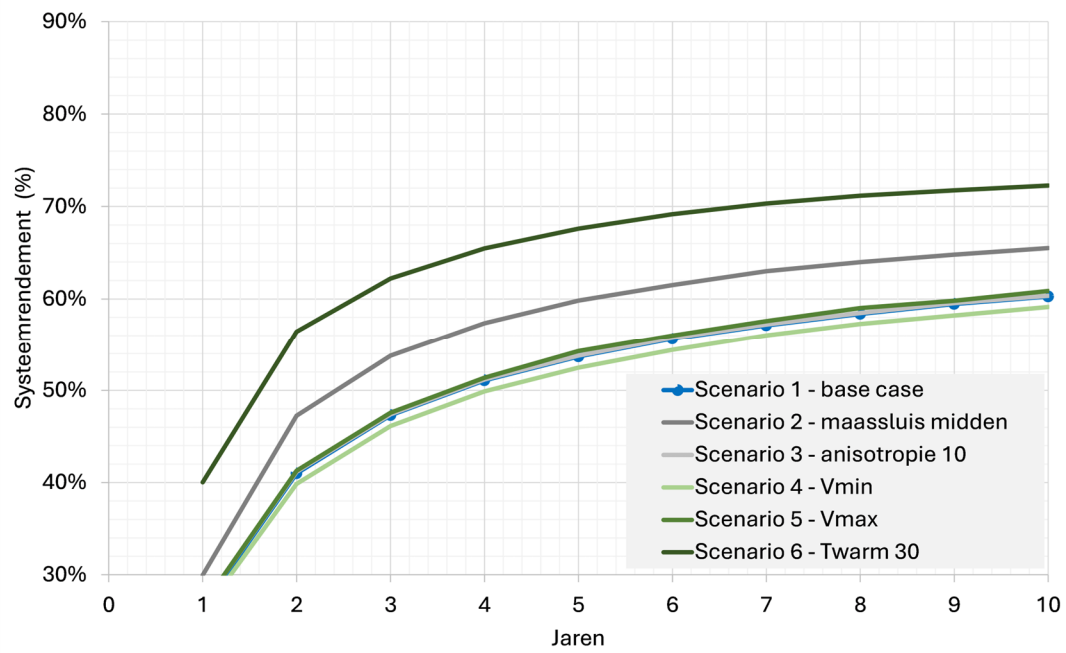
Figuur 5.4 Resultaten voor het base case scenario. Het jaarlijkse opgeslagen volume in de hete bron, de lengte van het ontladseizoen (tijd tot de afkapt temperatuur wordt bereikt) en de daaruit volgende totale onttrokken volume uit de hete bron.

5.3.2 Scenario's

De base case en de vijf gedefinieerde scenario's hebben in jaar tien een systeemrendement variërend tussen de 59% en 72%. De base case, en scenario 3 t/m 5 liggen dicht bij elkaar. De gevoeligheid van het HTO systeem voor een groter (scenario 5) of kleiner (scenario 4) opslagvolume is relatief beperkt: +1% / -1% in jaar 10 ten opzichte van de base case. Door de relatief kleine dikte van het opslagpakket (15m) is de verticale doorlatendheid geen beperkende factor voor de oprijving die aan het grensvlak plaatsvindt. Een kleinere verticale doorlatendheid van het opslagpakket (scenario 3, aanname anisotropie 10 i.p.v. 4) heeft in dit geval daarom geen merkbaar effect op het systeemrendement.

In scenario 2 is het ondieper gelegen pakket "MS midden" gebruikt als opslag laag. Het systeemrendement in dit dikkere pakket (25m t.o.v. 15m in MS diep) is in jaar 10 met 66% ruim 6% hoger dan het base case scenario. Voor de grootte van dit systeem (500.000 m³) is dit dikkere pakket beter geschikt als opslag laag doordat de geometrie (kleinere A/V) van het opslagvolume leidt tot minder warmte verliezen door conductie naar de omringende lagen terwijl de verliezen door oprijving relatief beperkt blijven (Beernink et al., 2024; Bloemendal & Hartog, 2018).

Ten opzichte van de base case is het grootste effect op het systeemrendement te zien voor scenario 6 (+12%). In dit scenario is er een 10 °C lagere warme bron en afkapt temperatuur toegepast, wat leidt tot een betere uitnutting van de hete bron doordat de afkapt temperatuur gemiddeld 25 dagen later wordt bereikt t.o.v. base case en doordat er per m³ onttrokken water uit de hete bron meer energie teruggewonnen kan worden (grotere ΔT).



Figuur 5.5 Vergelijking van het systeemrendement van de verschillende scenario's van jaar 1 t/m 10. Scenario 3 (grijze lijn) valt samen met scenario 5 (groene lijn).

6 Energetische en duurzaamheidsanalyses

6.1 Modelleren en analyses

Voor beide energieconcepten 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 relevante resultaten van deze thermische rendementssimulaties zijn in een database gestopt.

In deze studie is voor beide energieconcepten gekozen om de filters te plaatsen in Maassluis Midden. Deze laag geeft het hoogste systeemrendement. Voor deze laag is één simulatie (nummer 2) uitgevoerd, terwijl voor Maassluis diep voor de ingeschatte bodemopbouw drie simulaties (nummer 1, 3 en 4) zijn uitgevoerd. In deze drie simulaties is gevarieerd in volumes. Dit maakt het mogelijk om bij de energetische berekeningen te interpoleren op basis van volume. Dit is met één simulatie niet mogelijk. Wel is te zien dat de verschillen van de drie simulaties beperkt zijn. Bij de berekeningen zijn daarom de resultaten van MS Midden aangehouden, ongeacht het opslagvolume. 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 gedrag van de ondergrond gelijk is aan jaar 10.

6.2 Inzet HTO Base Case

6.2.1 Energieconcept 1

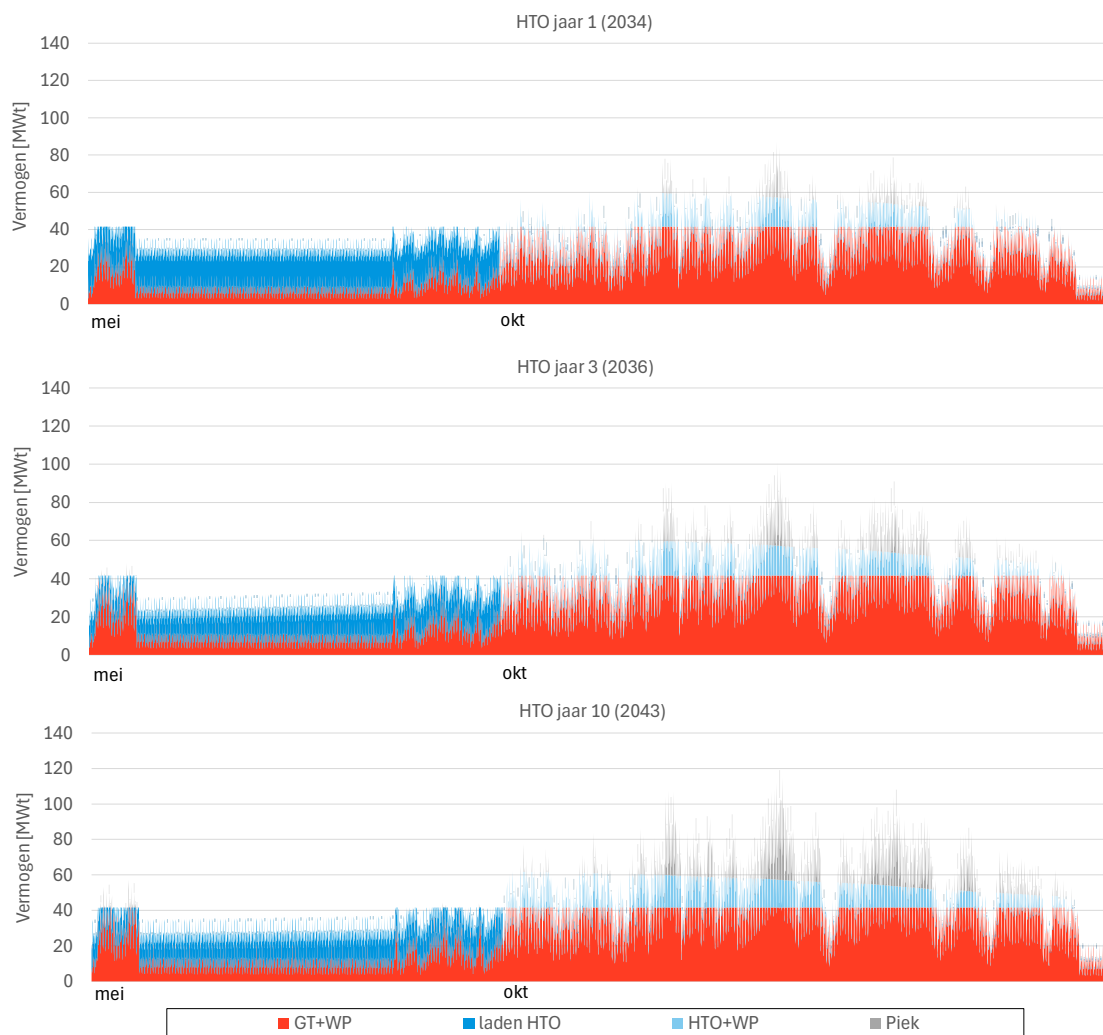
Voor de base case van energieconcept 1 (paragraaf 3.1) is de inzet van de HTO bepaald. Hierbij is gebruik gemaakt van de resultaten uit de thermische rendementssimulaties (zie hoofdstuk 5) en de uitgangspunten (zie hoofdstuk 2). De inzet is voor de base cases grafisch weergegeven in Figuur 6.1. De weergegeven resultaten zijn voor de HTO jaren 1, 3 en 10. De 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 2034. Het duurt lang voordat de HTO kan bijdragen aan de warmtelevering. Dit komt doordat er twee geothermiesystemen gepland zijn. Een eerste in 2027 en een tweede in 2029. De geplande geothermiesystemen kunnen lange tijd het grootste deel van de warmtevraag invullen, waardoor er geen directe behoefte is aan een HTO.

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 (i.c.m. de warmtepomp) wordt zoveel mogelijk opgeslagen in de HTO. De hoeveelheid die kan worden opgeslagen wordt begrensd door het maximale debiet van de HTO tijdens laden (in dit geval 400 m³/h, zie Tabel 6-7). In het eerste jaar wordt het hoogste laadvermogen bereikt. Dit komt doordat de bodem nog een natuurlijke grondwatertemperatuur heeft, waardoor het temperatuurverschil bij laden maximaal is. In latere jaren neemt de temperatuur van de lauwe

bron steeds verder toe. Het laadvermogen wordt dan beperkt door het maximale debiet dat beschikbaar is voor het laden.

Vanaf 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 12%.



Figuur 6.1 | Invulling van de warmtevraag en inzet van de HTO in jaar 1, 3 en 10 Base Case energieconcept 1. 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 wegdrrukken van geothermie is beperkt (zie tabel Tabel 6-3).

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

	HTO jaar 1 (2034)		HTO jaar 3 (2036)		HTO jaar 10 (2043)	
	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel
	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]
Geothermie + WP	178.000	89%	200.000	86%	224.000	82%
HTO + WP	21.000	10%	26.000	11%	34.000	13%
Piek	2.000	1%	5.000	2%	16.000	6%
Totaal	201.000	100%	231.000	100%	275.000	100%

Vergelijking met systeem zonder HTO energieconcept 1 (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 energieconcept 1 (referentie case).

	2034		2036		2043	
	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel
	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]
Geothermie + WP	190.000	95%	210.000	91%	232.000	84%
Piek	11.000	5%	22.000	9%	43.000	16%
Totaal	201.000	100%	231.000	100%	275.000	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 warmtelevering door de HTO uiteindelijk ook als geothermische warmtelevering gezien kan worden. Alleen is dit levering op indirecte wijze, en gaat gedurende opslag een deel van de opgeslagen warmte verloren.

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

	2032		2034		2043	
	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel
	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]
Inzet piek referentie case	11.000	5%	22.000	9%	43.000	16%
Inzet piek base case	2.000	1%	5.000	2%	16.000	6%
Reductie inzet piek relatief	9.000	4%	17.000	7%	27.000	10%
Reductie inzet piek absoluut		84%		75%		63%
Geothermie + WP referentie case	190.000	95%	210.000	91%	232.000	84%
Geothermie + WP base case	178.000	89%	200.000	86%	224.000	82%
Verdringing geothermie+WP abs.	12.000	6%	10.000	4%	8.000	3%
Verdringing geothermie+WP rel.		6%		5%		3%

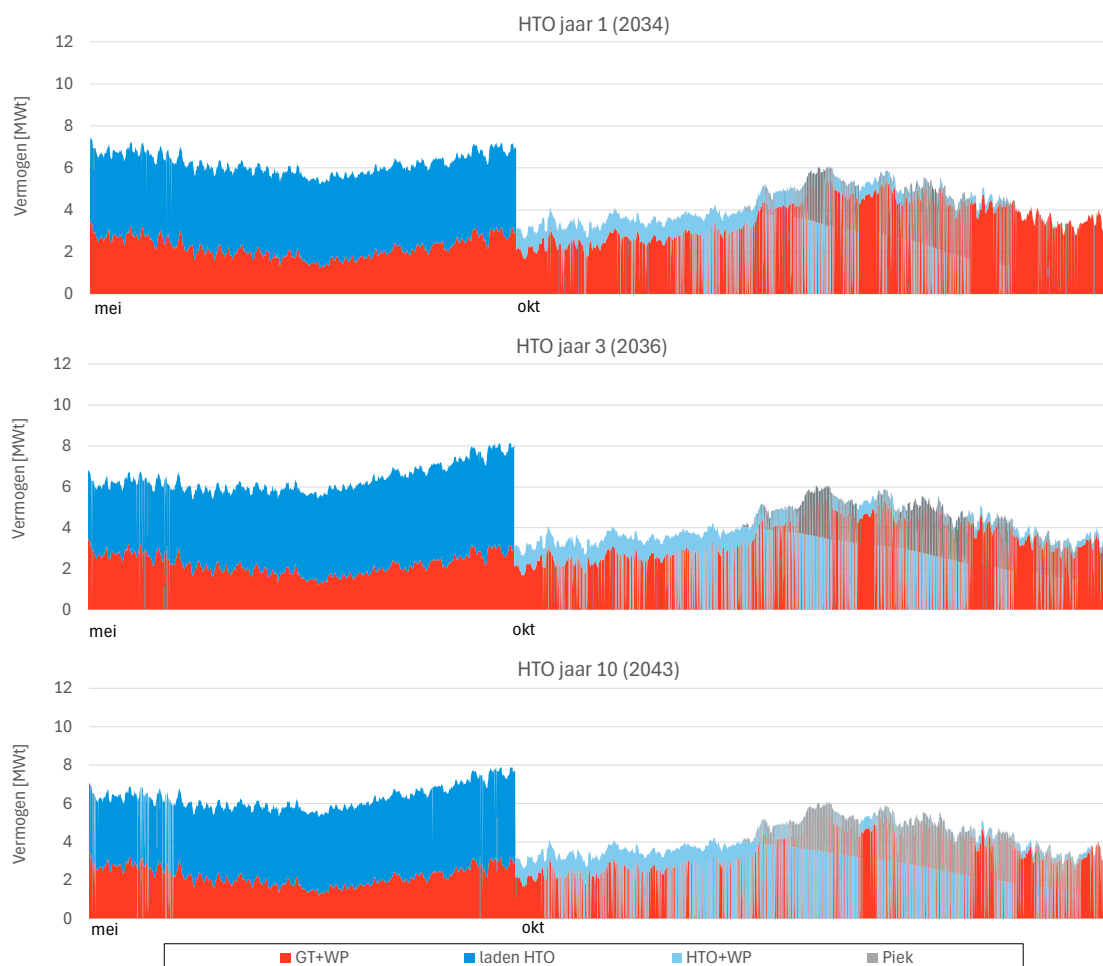
Door de inzet van HTO daalt de inzet van de piekvoorziening. In het eerste jaar is de relatieve daling 84% en in absolute zin 4% (van 4 naar 1%). In de loop van de tijd is de relatieve daling 63% en in absolute zin 10% (van 16 naar 6%). De hoeveelheid geleverde duurzame warmte (geothermie met warmtepomp 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 beperkt tot 6% (relatief en absoluut). Op termijn neemt dit af. Uiteindelijk is de verdringing beperkt tot 3% (relatief en absoluut). De HTO heeft een beperkte invloed op de directe warmtelevering van geothermie met warmtepomp aan het warmtenet.

6.2.2 Energieconcept 2

Voor energieconcept 2 is een vergelijkbare analyse uitgevoerd. De inzet is voor de base cases grafisch weergegeven in Figuur 6.2. De weergegeven resultaten zijn voor de HTO jaren 1, 3 en 10. De warmtehoeveelheden zijn ook samengevat in Tabel 6-4.

De hoeveelheid warmte die wordt geleverd door geothermie met warmtepomp neemt langzaam af. Dit is een gevolg van de gekozen regelstrategie. Geothermie levert in eerste instantie aan 'de rest' van het warmtenet. Wanneer er nog capaciteit over is, levert geothermie ook aan de tuinbouw. Doordat de warmtevraag van het warmtenet toeneemt, daalt daardoor de hoeveelheid geothermische warmte die geleverd wordt aan de tuinbouw. Door deze regelstrategie kan de HTO meer op basislast draaien, en daarmee ook meer vollasturen draaien. De inzet van de HTO loopt op van 18% in jaar 1 (2034) naar 31% in jaar 10 (2043).



Figuur 6.2 | Invulling van de warmtevraag en inzet van de HTO in jaar 1, 3 en 10 Base Case energieconcept 2. 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.

Tabel 6-4 | Hoeveelheden geproduceerde warmte in jaar 1, 3 en 10 van de base case energieconcept 2.

	HTO jaar 1 (2034)		HTO jaar 3 (2036)		HTO jaar 10 (2043)	
	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel
	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]
Geothermie + WP	23.000	77%	20.000	68%	17.000	58%
HTO + WP	5.000	18%	7.000	25%	9.000	31%
Piek	1.000	5%	2.000	7%	3.000	11%
Totaal	29.000	100%	29.000	100%	29.000	100%

Vergelijking met systeem zonder HTO energieconcept 2 (referentie case)

Ook voor concept 1 is een vergelijking gemaakt met de referentiecasse (situatie zonder HTO). De resultaten staan in de onderstaande tabellen.

Tabel 6-5 | Hoeveelheden geproduceerde warmte in jaar 1, 3 en 10 voor concept zonder HTO energieconcept 2 (referentie case).

	2034		2036		2043	
	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel
	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]
Geothermie + WP	25.000	85%	22.000	76%	19.000	64%
Piek	4.000	15%	7.000	24%	11.000	36%
Totaal	29.000	100%	29.000	100%	29.000	100%

Tabel 6-6 | vergelijking base case en referentie case in jaar 1, 3 en 10 energieconcept 2.

	2032		2034		2043	
	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel	Warmte	Aandeel
	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]	[MWh _{th}]	[-]
Inzet piek referentie case	4.000	15%	7.000	24%	43.000	16%
Inzet piek base case	1.000	5%	2.000	7%	16.000	6%
Reductie inzet piek relatief	3.000	10%	5.000	18%	27.000	10%
Reductie inzet piek absoluut		66%		72%		63%
Geothermie + WP referentie case	25.000	85%	22.000	76%	19.000	64%
Geothermie + WP base case	23.000	77%	20.000	68%	17.000	58%
Verdringing geothermie+WP abs.	2.000	8%	2.000	8%	2.000	6%
Verdringing geothermie+WP rel.		9%		10%		9%

6.3 Dimensionering Base Case

6.3.1 Energieconcept 1

Vanuit de inzet van de HTO volgt het dimensionering van de HTO. De waarden zijn samengevat in Tabel 6-7 voor de base case.

Tabel 6-7 | Dimensionering HTO voor de base case energieconcept 1.

Onderdeel		Base Case
Max. debiet laden	[m ³ /h]	300
Max. debiet leveren	[m ³ /h]	400
Ontwerpdebiet	[m ³ /h]	400
Aantal hete bronnen	[-]	4
Aantal lauwe bronnen	[-]	5
Diepte bronnen	[m-mv]	270
Afstand bronclusters	[m]	450
Capaciteit warmtepomp	[MW _{th}]	7,1
Vermogen HTO + WP, max	[MW _{th}]	20,2
Vermogen HTO + WP, min (bij afkapt temperatuur)	[MW _{th}]	5,3

Op basis van de bodemeigenschappen is ingeschat dat het maximale debiet per bron tijdens laden rond de 75 m³/h ligt en tijdens leveren rond de 100 m³/h. Hierbij is rekening gehouden met de maximale injectiedruk en onttrekkingsnorm. Bij de onttrekkingsnorm is aangenomen dat de deze met maximaal factor twee mag worden overschreden⁹. Het maximale debiet tijdens leveren ligt wat lager, omdat de temperaturen in de lauwe bron dan het laagste zijn. Dit heeft effect op de viscositeit van het water, en daarmee ook het maximaal haalbare debiet. Merk op dat het maximale debiet tijdens laden in jaar 1 nog wat lager ligt, omdat er dan sprake is van grondwater met een natuurlijke grondwatertemperatuur. Hierdoor is het maximale debiet per bron tijdens laden circa 50 m³/h. In de eerste jaren is daarom het maximale totale debiet wat lager (250 m³/h) dan in de latere jaren (300 m³/h).

⁹ Uit eerdere proefboringen en de ervaring vanuit het HTO project in Middenmeer is gebleken dat het overschrijden van de NVOE norm niet tot significante zandlevering leidt, zelfs niet wanneer dit met factor 3 a 4 gebeurt. Om de bronnen zo (kosten)efficiënt toe te kunnen passen, is in deze studie daarom gerekend met een toegestane overschrijdingsfactor van 2. Een hogere factor is wellicht ook mogelijk. Geadviseerd wordt om dit te testen bij een eventuele proefboring.

6.3.2 Energieconcept 2

De dimensionering is samengevat in Tabel 6-8 voor de base case van energieconcept 2.

Tabel 6-8 | Dimensionering HTO voor de base case energieconcept 2.

Onderdeel		Base Case
Max. debiet laden	[m ³ /h]	75
Max. debiet leveren	[m ³ /h]	100
Ontwerpdebiet	[m ³ /h]	100
Aantal hete bronnen	[-]	1
Aantal lauwe bronnen	[-]	1
Diepte bronnen	[m-mv]	270
Afstand bronclusters	[m]	200
Capaciteit warmtepomp	[MW _{th}]	1,1
Vermogen HTO + WP, max	[MW _{th}]	4,8
Vermogen HTO + WP, min (bij afkapt temperatuur)	[MW _{th}]	1,3

6.4 Energetische en duurzaamheidsanalyse Base Case

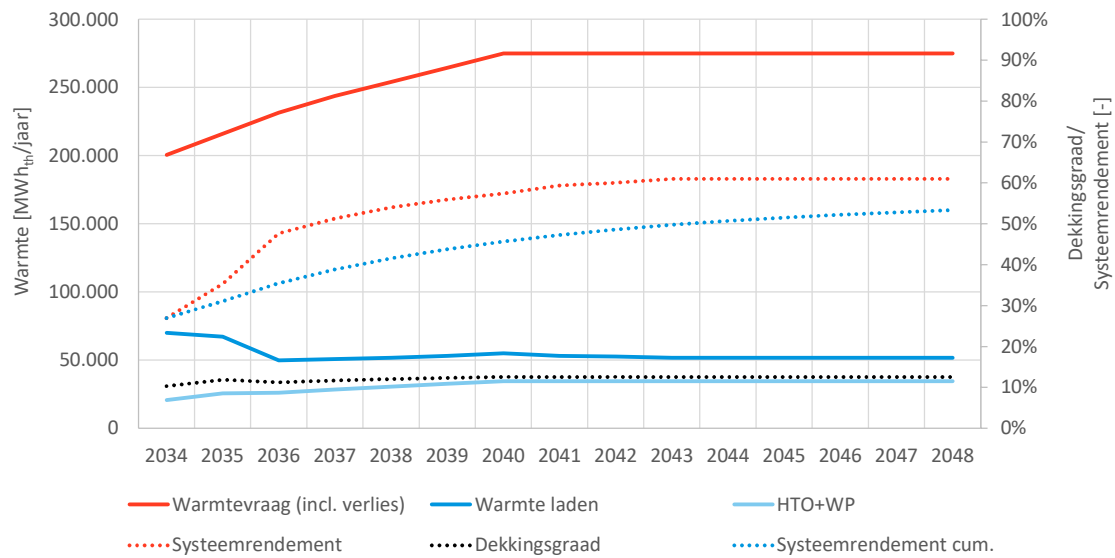
6.4.1 Energieconcept 1

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.

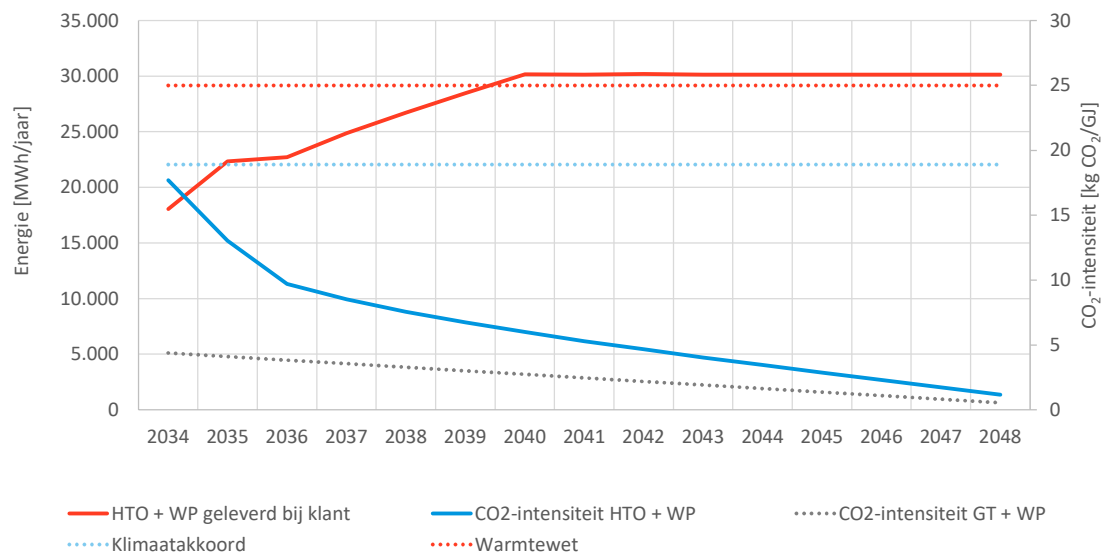
Voor de duurzaamheidsanalyse is gekeken naar de volgende parameters:

- 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 bij transport meegenomen. Hiervoor is gekozen zodat de berekende waarde vergeleken kan worden met de waarden die genoemd worden in het klimaatakkoord en de warmtewet. Deze gaan beide namelijk ook uit van de CO₂-intensiteit per GJ die geleverd wordt aan de klant. In deze studie is de CO₂-uitstoot een gevolg van het elektriciteitsverbruik. Deze neemt door de jaren heen af (zie paragraaf 2.5). Formatiegas is buiten beschouwing gelaten.

De resultaten van beide analyses zijn opgenomen in Figuur 6.3 en Figuur 6.4.



Figuur 6.3 | Systeemrendement HTO-systeem voor de base case energieconcept 1.



Figuur 6.4 | CO₂-intensiteit geleverde warmte vanuit de HTO+WP aan de klant in de base case energieconcept 1, 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 (2034) bedraagt het systeemrendement 27%. 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 terugwinrendement snel. In jaar 3 (2036) is het systeemrendement gestegen naar 48%. 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 61%. Het cumulatieve systeemrendement ligt na 15 jaar op 53%. In jaar 10 bedraagt het cumulatieve systeemrendement 50%. Vanuit juridisch oogpunt is het advies om te ontwerpen op een cumulatief systeemrendement van 50% in jaar 10. Hier wordt net aan voldaan. Dit is een aandachtspunt in het vervolgtraject. Het systeemrendement kan verbeterd

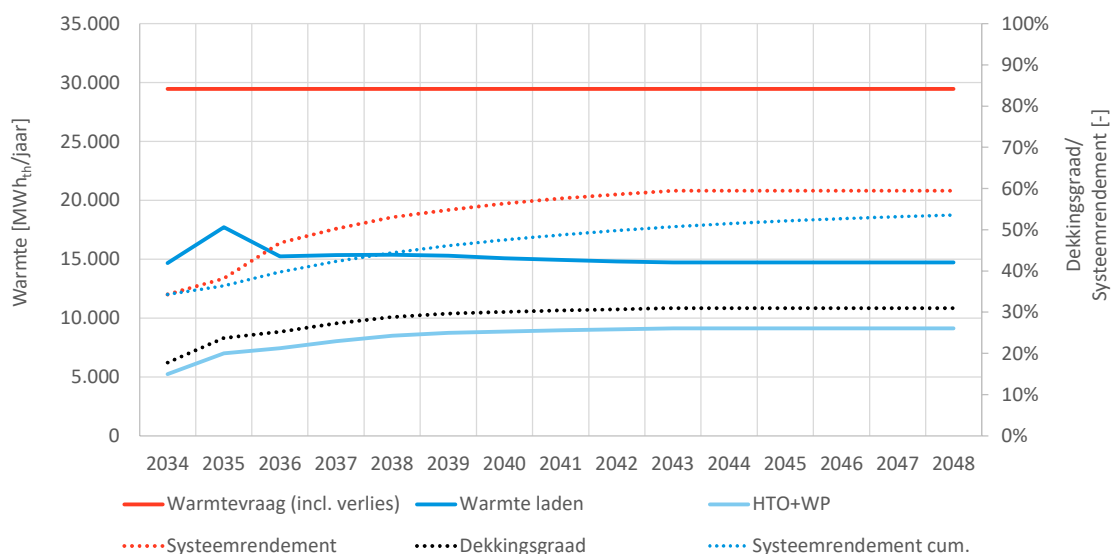
worden door de lauwe brontemperatuur te verlagen (momenteel 40°C) en/of de opslagtemperatuur te verhogen (momenteel 81°C). Ook zal de uiteindelijke bodemopbouw van invloed zijn op het systeemrendement.

De CO₂-intensiteit ligt, met een waarde van circa 17 kg CO₂/GJ_{th} direct vanaf jaar 1 (2034) onder de waarden zoals genoemd in het klimaatakkoord en de warmtewet. In de zomer wordt geothermische warmte via gebruikmaking van een warmtepomp opgeslagen in de HTO. In deze studie is gerekend met een constante CO₂-uitstoot van elektriciteit per jaar. Een verdere verfijning kan aangebracht worden door een inschatting te maken van de duurzaamheid van elektriciteit per uur. Door de jaren heen daalt de CO₂ intensiteit, doordat aangenomen is dat de elektriciteitsvoorziening in Nederland steeds verder verduurzaamt (zie uitgangspunten in paragraaf 2.5). Na 15 jaar (2048) is de CO₂-intensiteit gedaald tot circa 1 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.

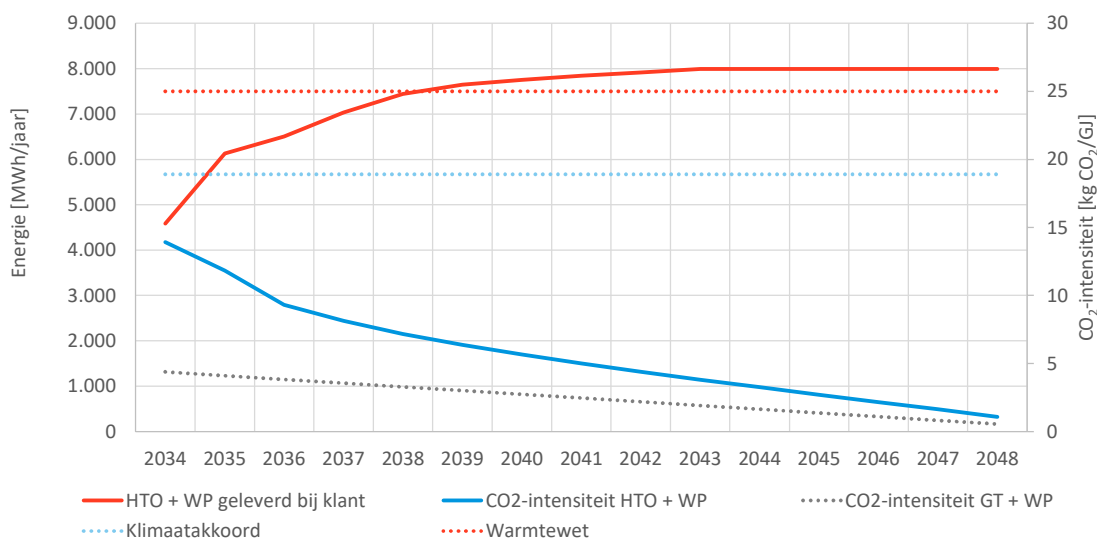
Ter vergelijking is ook de CO₂-intensiteit van de geothermie met warmtepomp opgenomen. Deze ligt lager dan de CO₂-intensiteit van HTO met warmtepomp. De CO₂ intensiteit daalt van circa 4 kg CO₂/GJ naar circa 0,5 kg CO₂/GJ. De CO₂-intensiteit ligt bij HTO hoger door de opslagverliezen die optreden in de HTO en omdat 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.

6.4.2 Energieconcept 2

Ook voor energieconcept 2 zijn een energetische analyse en duurzaamheidsanalyse uitgevoerd. De resultaten staan in Figuur 6.5 en Figuur 6.6.



Figuur 6.5 | Systeemrendement HTO-systeem voor de base case energieconcept 2.



Figuur 6.6 | CO₂-intensiteit geleverde warmte vanuit de HTO+WP aan de klant in de base case energieconcept 2, 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 loopt op van 34% naar 59% in jaar 15 (2048). Het cumulatieve systeemrendement ligt na 10 jaar op 51% en na 15 jaar op 54%. Het systeemrendement kan verbeterd worden door de lauwe brontemperatuur te verlagen (momenteel 40°C) en/of de opslagtemperatuur te verhogen (momenteel 81°C).

De CO₂-intensiteit van de warmte van HTO met warmtepomp die geleverd wordt aan de klanten liggen onder de waarden zoals genoemd in het klimaatakkoord en de warmtewet.

6.5 Gevoeligheidsanalyses

Uit de financiële analyse (zie paragraaf 7.3.2) volgt dat een HTO vanuit financieel oogpunt, onder de huidige marktcondities, niet haalbaar is voor energieconcept 2. De kosten voor warmte geleverd vanuit de HTO aan het warmtenet liggen daarvoor te hoog. De kosten liggen dusdanig hoog, dat gevoeligheidsanalyses alleen zijn uitgevoerd voor energieconcept 1.

Diverse gevoeligheidsanalyses zijn uitgevoerd, welke in paragraaf 3.3 zijn benoemd.

Gevoeligheidsanalyses die invloed hebben op de energiestromen zijn:

- Gestandaardiseerde case: hierin is gerekend met een retourtemperatuur in het warmtenet van 50°C. Voor het projectrendement is 8,7% aangehouden.
- Vraagprofiel: hierin is gerekend met het NEDU warmtevraagprofiel. Deze is grilliger en heeft een hoger piekvermogen dan het 'standaard' warmtevraagprofiel.

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 (2043) zijn bekeken en vergeleken met de standaard case. De resultaten staan in Tabel 6-9.

Tabel 6-9 | Resultaten energetische gevoeligheidsanalyses

Case	Opslagvolume (HTO jaar 10)	Systeemrendement (HTO jaar 10)	Cum. syst. rendement (HTO jaar 10)	Dekkingsgraad (HTO jaar 10)	CO ₂ -intensiteit bij klant (HTO jaar 10)
	[m ³]	[-]		[-]	[kg CO ₂ /GJ]
Base Case	950.000	61%	50%	13%	4,0
Gestandaardiseerde case	910.000	61%	50%	12%	4,5
Vraagprofiel (NEDU)	840.000	61%	51%	11%	4,0

Bij de gestandaardiseerde case is een hogere CO₂-intensiteit te zien ten opzichte van de Base Case. Doordat de retourtemperatuur in de gestandaardiseerde case is verhoogd van 45 naar 50°C, moet meer met de warmtepomp worden uitgeoeld om de injectietemperatuur in de lauwe bron op 40°C te houden. Dit zorgt voor een toename in elektriciteitsverbruik, en daarmee hogere CO₂-intensiteit.

Wanneer het NEDU warmtevraagprofiel wordt gehanteerd, daalt de inzet (opslagvolume en dekkingsgraad) van de HTO. Dit komt doordat het NEDU profiel hogere pieken heeft. Hieruit is af te leiden dat het de moeite waard kan zijn om in te zetten op een zo vlak mogelijk warmtevraagprofiel. Deltares heeft hier in eerdere studie onderzoek naar gedaan (Pothof et al., 2023). Door bijvoorbeeld minder nachtverlaging toe te passen, kan de ochtendpiek aanzienlijk naar beneden en stijgt het aantal vollasturen voor de woonwijken van 2000 naar 3000 uur/jaar.

7 Financiële analyses

7.1 Investeringskosten

De investeringskosten voor de base case zijn op haalbaarheidsniveau geraamd. De geraamde kosten exclusief BTW zijn voor beide energieconcepten 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 energieconcept 1 en energieconcept 2.

Onderdeel		Base Case (Prijspeil 2024)	Base Case (Geïndexeerd)	Base Case (Prijspeil 2024)	Base Case (Geïndexeerd)
		Energieconcept 1	Energieconcept 1	Energieconcept 2	Energieconcept 2
Proefboring	[€]	170.000	190.000	170.000	190.000
Bronnen	[€]	4.700.000	5.600.000	1.200.000	1.400.000
Leidingwerk in veld	[€]	720.000	860.000	110.000	130.000
Warmtepomp	[€]	3.400.000	4.000.000	500.000	600.000
Technische ruimte	[€]	2.500.000	3.000.000	600.000	700.000
Subtotaal	[€]	11.400.000	13.700.000	2.500.000	3.000.000
Onvoorzien	[€]	1.100.000	1.400.000	250.000	300.000
Ontwerp, advies en vergunningen	[€]	1.700.000	2.000.000	400.000	400.000
Totaal	[€]	14.300.000	17.100.000	3.200.000	3.800.000

- 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 bronnen en lauwe bronnen, putbehuizingen, bronpompen en techniek in de putbehuizing. Kosten voor het realiseren van de bronnen, zoals o.a. het boren, de stijgbuis, een wikkeldraadfilter en het afwerken zijn hierbij inbegrepen. Aangenomen is dat de bronpompen eens per vijf jaar vervangen dienen te worden.
- Leidingwerk in terrein: Deze post omvat het leidingwerk van de bronnen naar de technische ruimte, inclusief voedings-, stuur- en signaalkabels. Uit de check op de juridische haalbaarheid volgt dat er op locatie 1 (energieconcept 1) op ca 100 meter enkele gesloten bodemenergiesystemen aanwezig zijn. Hierdoor moeten de bronnen mogelijk verder van de warmtecentrale gerealiseerd worden. Of dit nodig is, zal uit detailtekeningen moeten volgen. In deze studie is rekening gehouden met 600 meter extra aan leidingwerk in het veld om voldoende afstand te kunnen creëren. Als alternatief zou de HTO ook elders ingepast kunnen worden langs het transportnet naar een locatie waar minder bodemenergiesystemen zijn.

- 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, koppelend leidingwerk met het warmtenet en regeling en elektra. In het geval van HTO omvat deze post ook waterbehandeling en een stikstofinstallatie. Deze post is exclusief kosten voor het gebouw en exclusief een elektriciteitsaansluiting.
- 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 cases, 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 energieconcept 1 en energieconcept 2.

Post		Base Case	Base Case	Base Case	Base Case
		(Prijspeil 2024)	(Geïndexeerd)	(Prijspeil 2024)	(Geïndexeerd)
		Energieconcept 1	Energieconcept 1	Energieconcept 2	Energieconcept 2
Opslag warmte	[€/jaar]	-	-	-	-
Elektriciteitsverbruik	[€/jaar]	1.200.000	2.000.000	300.000	470.000
O&B – warmtepomp*	[€/jaar]	130.000	220.000	21.000	33.000
O&B – overig*	[€/jaar]	3.000	4.000	3.000	4.000
Waterbehandeling	[€/jaar]	42.000	67.000	20.000	32.000
Monitoring en BRL	[€/jaar]	60.000	97.000	60.000	97.000
Personeelskosten	[€/jaar]	54.000	87.000	54.000	87.000
Subtotaal	[€/jaar]	1.500.000	2.400.000	450.000	730.000
Onvoorzien	[€/jaar]	150.000	240.000	45.000	73.000
Totaal	[€/jaar]	1.700.000	2.700.000	500.000	800.000

* O&B: Onderhoud en beheer

- 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

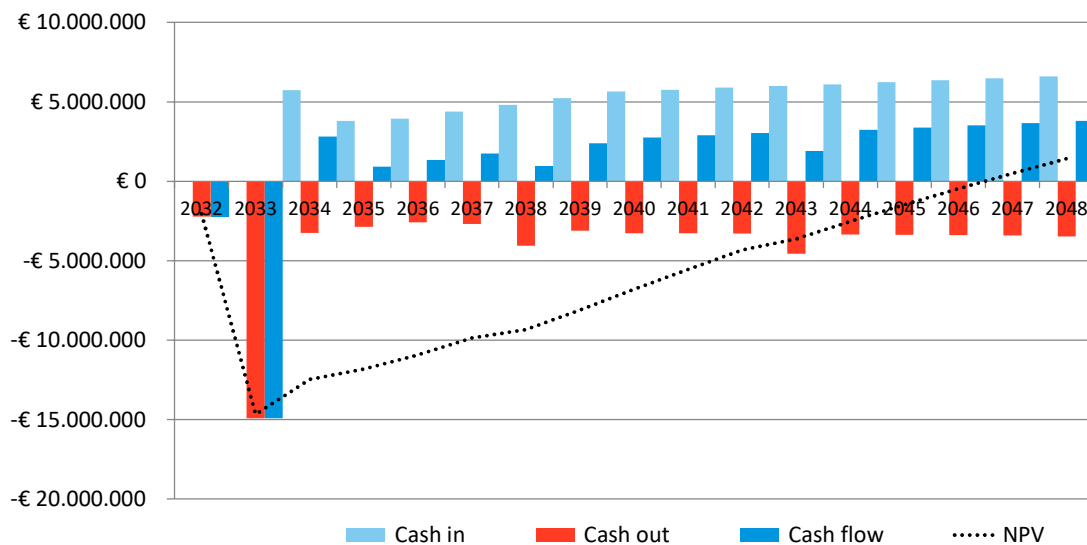
7.3.1 Energieconcept 1

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 2032 bestaan de investeringskosten uit een proefboring en kosten voor ontwerp, advies en vergunningen. In 2033 wordt de gehele HTO gerealiseerd.
- Vanaf 2034 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 case van energieconcept 1.



Figuur 7.1 Kasstromen en netto contante waarde (NCW) van de base case energieconcept 1.

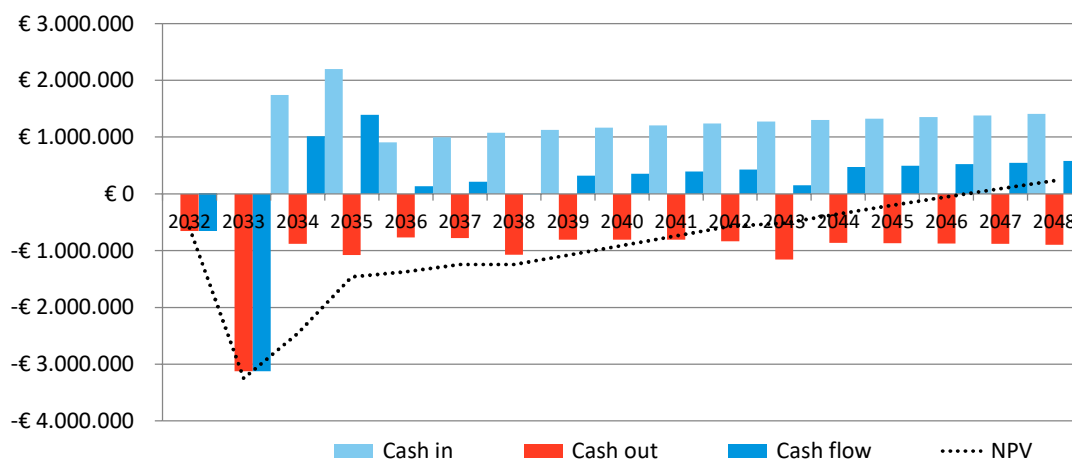
Om een netto contante waarde van nul te halen na 15 jaar exploitatie (2048), is de LCOH (Levelized Cost of Heat) voor warmte 33,2 €/GJ_{th} (prijspeil 2024). Het gaat hier om de warmte die door de HTO, inclusief warmtepomp, wordt geleverd aan het warmtenet. Wanneer rekening wordt gehouden met verliezen in het warmtenet (12,5%), wordt de LCOH geleverd aan de klant € 37,9 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 (LCOH) is vergelijkbaar met het ACM tarief, maar daarbij zijn de transportkosten nog niet meegenomen. Voor een financieel haalbare case dient de integratie van het HTO systeem geoptimaliseerd te worden. In de volgende paragraaf zijn diverse gevoeligheidsanalyses uitgevoerd.

In 2034 is er een forse netto positieve cash flow te zien. Dit komt doordat de resterende SDE++ subsidie wordt toegekend aan de opgeslagen warmte. Hierna is de “pot” resterende SDE++ subsidie op en wordt geen SDE++ subsidie meer toegekend aan de HTO. Elke 5 jaar is er hogere “cash out” als gevolg van herinvestering in de pompen.

7.3.2 Energieconcept 2

In Figuur 7.2 zijn de kasstromen en netto contante waarde (NCW) gegeven voor de base case van energieconcept 2.



Figuur 7.2 Kasstromen en netto contante waarde (NCW) van de base case energieconcept 2.

Om een netto contante waarde van nul te halen na 15 jaar exploitatie (2048), is de LCOH voor warmte 26,6 €/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 (12,5%), wordt de LCOH geleverd aan de klant € 30,4 per GJ. De transportkosten dienen hierbij nog opgeteld te worden.

Warmte wordt geleverd aan de tuinbouw. Tarieven voor warmtelevering aan tuinbouw vallen niet onder de warmtewet. Vanwege het groot zakelijke karakter liggen de tarieven lager dan de tarieven in de warmtewet. In deze studie is voor de marktwaarde van warmte het correctiebedrag aangehouden voor geothermie in de SDE++ subsidieregeling (16,3 €/GJ). Het berekende tarief ligt bijna twee keer hoger. Geconcludeerd wordt dat de berekende tarief voor warmtelevering aan tuinbouw te hoog is en dat HTO vanuit financieel oogpunt, onder de huidige marktcondities, niet haalbaar is.

7.4 Gevoeligheidsanalyses

Uit de financiële analyse (zie paragraaf 7.3.2) volgt dat een HTO vanuit financieel oogpunt, onder de huidige marktcondities, niet haalbaar is voor energieconcept 2. De kosten voor warmte geleverd vanuit de HTO aan het warmtenet liggen daarvoor te hoog. De financiële gevoeligheidsanalyses zijn alleen uitgevoerd voor energieconcept 1.

De diverse gevoeligheidsanalyses zijn in paragraaf 3.3 benoemd. Van alle gevoeligheidsanalyses zijn de effecten op de business case onderzocht.

In de financiële gevoeligheidsanalyses is gekeken naar de volgende parameters:

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

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

Tabel 7-3 | Resultaten financiële gevoeligheidsanalyses energieconcept 1

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)	17.100.000	-	2.700.000	-	37,9	-
Gestandaardiseerde case	18.000.000	105%	3.000.000	111%	44,0	116%
Vraagprofiel (NEDU)	16.400.000	96%	2.400.000	89%	40,7	107%
Elektriciteit +1%	17.100.000	100%	2.300.000	85%	36,1	95%
Elektriciteit +5%	17.100.000	100%	4.600.000	170%	45,4	120%
Projectrendement 7%	17.100.000	100%	2.700.000	100%	34,5	91%
Projectrendement 8,7%	17.100.000	100%	2.700.000	100%	36,3	96%
Geen SDE++	17.100.000	100%	2.700.000	100%	40,5	107%
Minder bronnen (heet 3, lauw 4)	15.800.000	92%	2.700.000	100%	36,2	95%
Meer bronnen (heet 5, lauw 6)	18.300.000	107%	2.700.000	100%	39,5	104%

Uit de resultaten volgt dat de LCOH sterk reageert op de elektriciteitsprijs. Doordat de HTO via power-to-heat geladen wordt in de zomer, is het elektriciteitsverbruik hoog. In de zomer is gerekend met een lagere prijs voor elektriciteit, maar ook deze prijs schaaft mee in het scenario met de jaarlijkse indexatie van de elektriciteitsprijs. Voor een financieel aantrekkelijke case dient de LCOH onder de maximale ACM-waarde te liggen. De ACM waarde bedraagt 38,42 € per GJ geleverd aan de klant. De transportkosten dienen nog van het verdisconteerde ACM tarief afgetrokken te worden. In veel gevallen ligt de berekende LCOH net boven of onder het ACM tarief. De grootste gevoeligheid is de indexatie van de elektriciteitskosten. Op basis hiervan wordt geadviseerd om in meer detail te kijken naar de impact van variabele elektriciteitsprijzen. Kijk indien mogelijk naar elektriciteitsprijzen op uurbasis en neem prognoses/scenario's van de ontwikkeling in de toekomst hierin mee.

De LCOH ligt in de gestandaardiseerde case aanzienlijk hoger. Dit komt doordat in de gestandaardiseerde case gerekend is met een hogere retourtemperatuur. Hierdoor is een grotere warmtepomp nodig (hogere investeringskosten) en neemt het elektriciteitsverbruik toe (hogere exploitatiekosten). Dit benadrukt de noodzaak om bij het warmtenet in te zetten op een zo laag mogelijke retourtemperatuur.

Uit de vergelijking met het NEDU warmtevraagprofiel is te zien dat bij hogere pieken in het warmtevraagprofiel de LCOH stijgt. Geadviseerd wordt om te onderzoeken of met een vlakker vraagprofiel (lagere piekvermogens, meer vollasturen) de LCOH daalt. Dit is niet direct eenduidig te voorspellen. Uit de ander verkenningen (Schiebroek en Capelle) volgt dat, naast het warmtevraagprofiel, ook de toekenning van eventuele SDE++ subsidie aan de opgeslagen warmte hierbij een rol speelt.

Een andere optie om de business case te optimaliseren is via het bronontwerp. In deze studie is gerekend met een maximale overschrijding van de NVOE-norm met factor 2. Wanneer deze factor hoger gekozen wordt, daalt het aantal benodigde bronnen. Of dit mogelijk is, zal via een proefboring moeten worden bepaald. Ook kan in een vervolgstudie gekeken worden of filterstelling in een ander pakket (MS Midden) tot een betere business case leidt. Door de lagere diepte zullen de kosten per bron ook lager uitvallen. Mogelijk is het haalbare debiet per bron ook hoger, waardoor de totale investering nog verder afneemt.

Investeringsubsidies

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

8 Discussie, conclusies & vervolg

8.1 Discussie

Het eerste doel van deze studie is om inzicht te geven in de mogelijkheden en haalbaarheid van HTO. Dit wordt gedaan aan de hand van een aantal KPI's (zie paragraaf 3.4 voor toelichting). De score per KPI kort samengevat is in Tabel 81 kort samengevat. Dit is gedaan voor de Base Case en voor de gestandaardiseerde Case voor concept 1. 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 voor concept 1

Thema	KPI	Base Case	Gestandaardiseerde case
Bodem	Cum. systeemrendement (jaar 10)	50%	50%
Business case	CAPEX (geïndexeerd)	17.100.000	18.000.000
Business case	LCOH bij klant	37,9	44,0
Duurzaamheid	CO ₂ -intensiteit bij klant (jaar 10)	4,0	4,5
Juridisch	Inpassing	Aandachtspunt: GBES in de regio	Aandachtspunt: GBES in de regio

Het cumulatieve systeemrendement voldoet net aan het gestelde minimum van 50%, echter worden de warmteverliezen in de ondergrond wat overschat in de gebruikte conservatieve modellen. Daarnaast is er een relatief grote onzekerheid in de bodemopbouw, waardoor de uiteindelijke waarde zal afwijken van hetgeen hier berekend is. Het cumulatieve systeemrendement vormt een belangrijk aandachtspunt bij een eventueel vervolg. Het systeemrendement kan verhoogd worden door lagere temperaturen in de lauwe bron toe te passen.

Voor de investeringskosten zijn geen voorwaarden opgesteld. De hoogte van de investering kan mogelijk wel van invloed zijn op het investeringsbesluit. De investeringskosten liggen in de gestandaardiseerde case hoger dan bij de base case. Dit komt doordat in de gestandaardiseerde case gerekend is met een retourtemperatuur van 50°C i.p.v. 45°C. Hierdoor moet meer worden uitgekocht om de injectietemperatuur in de lauwe bron te halen. Hierdoor is een grotere warmtepomp nodig is.

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 is vergelijkbaar. Echter zullen er ook nog transportkosten gemaakt worden, welke nog niet zijn meegenomen in het berekende tarief. In de gestandaardiseerde case ligt de LCOH boven het ACM tarief. De hogere kosten zijn voornamelijk een gevolg van hogere investeringen en elektriciteitsverbruik als gevolg van een grotere warmtepomp. Dit benadrukt het belang om in te zetten op een zo laag mogelijke retourtemperatuur in het warmtenet. Een andere optie om de LCOH te verlagen is het toestaan van een hoger debiet per bron. Voor een financieel haalbare case dient de HTO zo optimaal mogelijk ingepast te worden.

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.

Uit de check op de juridische haalbaarheid volgt dat er op locatie 1 (energieconcept 1) op ca 100 meter enkele gesloten bodemenergiesystemen aanwezig zijn. Hierdoor moeten de bronnen mogelijk verder van de projectlocatie gerealiseerd worden. Of dit nodig is, zal uit detailtekeningen moeten volgen. In deze studie is rekening gehouden met 600 meter extra aan leidingwerk in het veld om voldoende afstand te kunnen creëren. Een gevolg is wel dat de bronnen wellicht niet op het eigen terrein kunnen worden gerealiseerd. Een oplossing zou in dat geval kunnen zijn om bronnen, in overleg, op gemeentelijke grond te plaatsen. Als alternatief zou de HTO ook elders ingepast kunnen worden langs het transportnet naar een locatie waar minder bodemenergiesystemen zijn.

8.2 Conclusies

Bodem en juridisch

- De formatie van Maassluis heeft in het onderzochte gebied de meeste potentie als opslag laag voor een HTO systeem. Op basis van de beschikbare data lijkt het zandpakket 'MS diep' op ~260m diepte de grootste potentie te hebben. Voor deze formatie is het onzeker of de dikte van de zandlaag voldoende is aangezien deze op de noordelijke voorkeurslocatie waarschijnlijk slechts 10 m in plaats van 15 m is zoals toegepast in de thermische simulaties (15m wordt gezien als minimum). Als alternatief is 'MS midden' (~175m-mv) mogelijk geschikt als opslag laag, hier is echter zowel de effectieve dikte van het aquifer als de afsluitende werking van de bovenliggend kleilaag niet zeker. De aanwezigheid van geschikte opslaglagen is voor deze locatie dus onzeker op dit moment. Een proefboring (tot bijv. 300m diepte) kan deze onzekerheid sterk verkleinen.
- De thermische simulaties, uitgaande van de aanwezigheid van de twee opslagpakketten gedefinieerd in de geohydrologische analyse (Tabel 4-2), hebben een bronrendement (hete bron) van >80% na 10 jaar. Voor de variatie aan operationele uitgangspunten die zijn onderzocht resulteert dit in een HTO-systeemrendement van 59-72% in jaar 10. Het cumulatieve systeemrendement is 50% in jaar 10 voor de base case. In een eventueel vervolg zullen gedetailleerder inzicht in de ondergrond in combinatie met gedetailleerdere modellen worden gebruikt om het thermische terugwinrendement grondiger te bepalen.
- Door de relatief diepe ligging van beide potentiële opslagpakketten is de kans op thermische effecten van een mogelijk HTO systeem op andere omgevingsbelangen relatief klein. Echter, de omgevingsscan laat zien dat de aanwezigheid van een GBES systeem op ~100m van de gekozen locatie (locatie 1) een punt van aandacht is. Een effectenstudie moet laten zien in hoeverre dit een probleem is, en zo ja hoe/waar een geschikte plaatsing van de HTO mogelijk is.

Systeemconcept, energetisch en duurzaamheid

- Met een HTO systeem van 400 m³/h (energieconcept 1) of 100 m³/h (energieconcept 2) is het mogelijk om de warmteproductie en warmtevraag beter aan elkaar te koppelen door het seizoensmatig opslaan van warmte. Geothermische warmte wordt opgewaardeerd met de warmtepomp en via het transportnet opgeslagen in de HTO op 81°C. Een warmtepomp is nodig om de opgeslagen warmte op te waarden en verder te uit te koelen.
- HTO draagt bij aan de verduurzaming van de warmtevoorziening
 - Door het toevoegen van HTO neemt de totale hoeveelheid geleverde duurzame warmte toe. De inzet van de piekvoorziening daalt in HTO jaar 10 (2040) van 16%

- (situatie zonder HTO) naar 6% (situatie met HTO). HTO draagt dus bij aan het terugdringen van het gasverbruik door het wegdrukken van de piekvoorziening.
- o De warmte die geleverd wordt door de HTO met warmtepomp heeft een lage CO₂-intensiteit. Deze daalt van 17 kg CO₂/GJ in 2034 naar 1 kg CO₂/GJ in 2048. De CO₂-uitstoot ligt onder de waarde uit de warmtewet (25 kg CO₂/GJ) en, met uitzondering van 2034, ook onder de waarde uit het klimaatakkoord (18,9 kg CO₂/GJ)

Financieel en organisatorisch

- De LCOH voor energieconcept 1 ligt rond het ACM tarief. Hierin zijn echter transportkosten nog niet meegenomen. Voor een financieel haalbare case zal gezocht moeten worden naar een optimale inpassing. Hierbij kan gedacht worden aan een zo laag mogelijke retourtemperatuur, zo laag mogelijke elektriciteitskosten door slim power-to-heat toe te passen of door het toepassen van een ander bronontwerp.
- Voor energieconcept 2 (locatie 2, tuinbouw), is toepassing van een HTO te duur. Dit komt door een combinatie van punten. Het HTO systeem is relatief klein. Hierdoor wordt het maximale debiet per bron niet optimaal gebruikt en is er geen investeringsvoordeel door schaalomvang. Daarnaast kan aan tuinders een minder hoog tarief in rekening worden gebracht dan bij consumenten. Hierdoor daalt het verdienpotentieel.
- De LCOH reageert sterk op de elektriciteitsprijs. Bij een indexatie van 5% (ipv 2%), stijgt de LCOH met circa 20%. 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. 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 eenvoudiger.
- De LCOH zou omlaag kunnen door voldoende focus te hebben op een zo laag mogelijke retourtemperatuur in het warmtenet en door uit te gaan van een hoger debiet per bron.

8.3 Vervolg

Er is een grote onzekerheid in de bodemopbouw. Dit kan effecten hebben op het systeemrendement en de broncapaciteit, en daarmee ook op de haalbaarheid van het systeem. De onzekerheid in de bodemopbouw is sterk te verkleinen door het uitvoeren van een proefboring. Dit was bij het opstellen van het onderzoeksvoorstel al voorzien. Daarom is 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 Rijnland 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)

9 Referenties

- Beernink, S., Hartog, N., Vardon, P. J., & Bloemendal, M. (2024). Heat losses in ATEs systems: The impact of processes, storage geometry and temperature. *Geothermics*, 117, 102889.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102889>
- Bloemendal, M., & Hartog, N. (2018). Analysis of the impact of storage conditions on the thermal recovery efficiency of low-temperature ATEs systems. *Geothermics*, 17, 306-319.
doi:[10.1016/j.geothermics.2017.10.009](https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.10.009)
- 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>
- 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. <https://www.warmingup.info/documenten/window-fase-1---a1---notitie-vergelijking-en-selectie-locaties.pdf>

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 het 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 9-1).

Tabel 9-1 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

Lithologie

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

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

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

Diepte top aquifer

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

Totale en effectieve dikte opslagpakket

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

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

Hydraulische afsluiting kleilaag bovenzijde

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

Thermische afsluiting kleilaag bovenzijde

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

Doorlaatvermogen opslagpakket

Het doorlaatvermogen (m^2/d) is de doorlatendheid (m/d) over de effectieve dikte van de aquifer (m). Het debiet van een HTO wordt in de praktijk bepaald door het doorlaatvermogen op de diepte van de bronfilters. De waarde van $100 m^2/d$ komt bij volledige filterstelling 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.

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