

# Hoge Temperatuur Opslag van warmte Stand der techniek en bodempotentie

RES Rotterdam Den Haag &  
omgeving Leiden

November 2023





**Datum** 27 november 2023  
**Referentie** PR09455/RK/20231127  
**Betreft** HTO Potentie voor de RES Rotterdam - Den Haag en Leidse regio  
**Behandeld door** P. Oerlemans, L. Borst, C. Schutte, R. Kleinlugtenbelt  
**Gecontroleerd door** R. Kleinlugtenbelt, N. Pinto, M. Leewis (EBN)  
**Versienummer** 1.1

**OPDRACHTGEVER**

EBN  
Daalsesingel 1  
3511 SV Utrecht

# Samenvatting

## CONTEXT EN AANLEIDING

De RES Rotterdam Den Haag, Invest-NL, Gasunie en EBN hebben gezamenlijk een werkprogramma opgezet waarin wordt toegewerkt naar een richtinggevend toekomstbeeld van de Regionale Structuur Warmte (RSW) en de Regionale Energie Strategie (RES 1.0). Doel van dit programma is om de optimale inzet en verdeling van warmte in het gebied met alle betrokken partijen samen vorm te geven in de RES 2.0. De werkzaamheden concentreren zich rond het opzetten en ontwikkelen van een publiek toegankelijk platform waarin alle data is opgenomen over (potentiële) warmtebronnen en warmtevragers in de regio. Middels dit platform wordt het mogelijk om collectieve warmtesystemen te modelleren en analyseren in verschillende configuraties. Daarmee worden stakeholders in de warmtetransitie in staat gesteld om warmtevraag en -aanbod af te stemmen in optimale samenhang.

Voor de analyses van warmtesystemen wordt gebruik gemaakt van de Design Toolkit<sup>1</sup>. Om de analyses uit te kunnen voeren is informatie omtrent vraag en aanbod van warmte nodig. Aan de warmte-aanbod kant is een potentiële studie aardwarmte uitgevoerd door EBN en IF Technology en zijn potentiële industriële warmtebronnen in kaart gebracht door CE Delft en Havenbedrijf Rotterdam. Dit rapport focust een andere component die onderdeel zal moeten worden van de toekomstige duurzame warmte-infrastructuur: Hoge Temperatuur Opslag (HTO).

## Waarom Warmteopslag?

Een belangrijke uitdaging in de warmtetransitie is dat het jaarprofiel van het warmteaanbod vanuit duurzame bronnen niet goed aansluit bij het profiel van de warmtevraag. Overschotten treden op in de zomer, terwijl in de winter tekorten heersen. Grootschalige warmteopslag biedt hierin een essentiële uitkomst en zal daarom een belangrijke rol spelen in duurzame regionale energiesystemen. Hoge Temperatuur Opslag (HTO) is een vorm van seizoensopslag waarmee het mogelijk wordt om grote hoeveelheden warmte voor een lange tijd op te slaan in de ondergrond (zomer), om het op een later moment weer terug te winnen (winter). Bij een platform waarin warmtebronnen en warmtevragers worden samengebracht kan de component warmteopslag dus niet ontbreken. Daarom heeft EBN aan IF Technology gevraagd om het potentieel, de kosten, de duurzaamheid en de doorontwikkeling van HTO inzichtelijk te maken in de RES-regio Rotterdam Den Haag en de Leidse Regio, om deze opslag-component onderdeel te maken van het publieke platform.

## Doelstelling

Doel van deze studie is om te zorgen dat plan- en besluitvorming rondom de toepassing van HTO in Zuid-Holland op een gedegen manier kan plaatsvinden, op basis van de laatste stand van kennis over HTO en een eerste beeld van de potentie van deze techniek in het studiegebied, evenals de kosten en de duurzaamheid. Omdat HTO nog een relatief nieuwe en onbekende techniek is, worden eerst belangrijke achtergronden rondom HTO behandeld, zoals de stand der techniek en de wet- en regelgeving. Vervolgens wordt voor de RES-regio Rotterdam - Den Haag en de omgeving Leiden een eerste kaartbeeld gegeven van de ondergrondse potentie voor HTO.

<sup>1</sup> <https://www.warmingup.info/designtoolkit>

Door bekendheid met de techniek HTO en bewustwording over diens potentie in dit gebied kan in de toekomstige besluitvorming rekening worden gehouden met de grote kansen die HTO biedt voor de warmtetransitie.

## ACHTERGROND HOGE TEMPERATUUR OPSLAG (HTO)

### Wat is HTO?

Hoge Temperatuur Opslag (HTO) is een techniek waarmee warmte op hoge temperatuur (25 - 90 °C) en op grote schaal (> 15 GWh per jaar) kan worden opgeslagen in de ondergrond. Het opslagmedium is een waterverzadigde zandlaag die aan de boven- en onderzijde goed wordt afgesloten door kleilagen (zie Figuur 2.2), het zogenaamde 'opslagpakket'. Een HTO-systeem bestaat uit twee verticale bronnen: een lauwe bron en een hete bron. Deze liggen meestal zo'n 100 - 300 m uit elkaar om interferentie tussen de lauwe bron (infiltratietemperatuur -30 °C) en de hete bron (max. 90 °C) te voorkomen. Tezamen vormen de bronnen één doublet. HTO lijkt vanuit technisch oogpunt erg op het meer gangbare en bekendere WKO (Warmte Koude Opslag), dat in Nederland veelvuldig wordt toegepast (>3.000 WKO-systemen vergund). Het belangrijkste verschil met WKO is de infiltratietemperatuur: bij WKO-bronnen is dit 5 - 25 °C, maar bij HTO ligt dit op 25 - 90 °C. HTO (tot een diepte van 500 m) valt wel onder hetzelfde juridische kader als WKO, omdat beide technieken voor de Waterwet onder de definitie van 'Open bodemenergiesysteem (OBES)' vallen.

### Hoe werkt HTO?

Het laden van de HTO met warmte vindt plaats door grondwater uit het opslagpakket te onttrekken bij de lauwe bron, deze via een warmtewisselaar te verwarmen met beschikbare warmte en het opgewarmde water in het opslagpakket terug te brengen via de hete bron (op circa 100 - 300 m afstand van de lauwe bron). In het opslagpakket ontstaat zo een bel met verwarmd grondwater rondom de hete bronfilters. In de winter wordt de pomprichting omgedraaid: het warme water in de warme bel wordt in de winter weer opgepompt, gebruikt voor verwarming van gebouwen, en het afgekoelde water wordt weer in de lauwe bron geïnfiltrerd. Bij HTO wordt (net als bij WKO) geen netto grondwater onttrokken uit het opslagpakket. Het opslagpakket dient slechts als een van nature aanwezig opslagmedium dat door haar enorme omvang in staat is om grote hoeveelheden warmte op te nemen in de zomer, om het vervolgens in de winter weer terug te leveren.

### Waarom warmteopslag met HTO?

Naast HTO bestaan er ook een aantal alternatieve warmteopslagtechnieken. Echter, als men kijkt naar de schaal van warmteopslag die nodig is om regionale energiesystemen (zoals de context van deze studie) te bufferen, heeft HTO een aantal voordelen ten opzichte van de alternatieven. Het kent de laagste investeringskosten naar opslagcapaciteit en heeft een kleine ruimtelijke impact aan de oppervlakte. HTO valt binnen dezelfde wettelijke- en kwaliteitskaders als die van WKO, wat maakt dat opschaling en implementatie van HTO in afzienbare termijn realistisch is, voortbouwend op deze bestaande structuren. Bovendien is in 2021 een state-of-the-art HTO-systeem gerealiseerd door ECW Energy op Agriport A7 in Middenmeer. Het feit dat dit systeem reeds twee volledige en succesvolle opslagcycli heeft doorlopen, toont aan dat HTO in de praktijk mogelijk is.

### De stand der techniek van HTO in Nederland

In Nederland wordt vanuit de bodemenergiesector onderscheid gemaakt tussen WKO, MTO en HTO.

Maar al deze soorten vallen volgens de Waterwet onder dezelfde juridische definitie ‘Open Bodemenergiesystemen’ (OBES), indien ze tot een diepte van 500 m worden toegepast. Het overgrote deel van de OBES in Nederland betreft Warmte Koude Opslag (WKO, >3.000 systemen vergund), waarbij de maximale infiltratietemperatuur 25 °C is. Er zijn enkele Middelhoge Temperatuur Opslagsystemen (MTO) gerealiseerd die door hun middelhoge opslagtemperatuur (25 - 50 °C) geen waterbehandeling nodig hebben en waarbij dezelfde materialen (PVC) kunnen worden gebruikt als bij WKO. Bij HTO zijn de opslagtemperaturen nog hoger (tot 90°C), waardoor waterbehandeling en andere materialen moeten worden toegepast.

Er is sinds 2021 één HTO-systeem in Nederland operationeel, namelijk in glastuinbouwgebied Agriport A7 in Middenmeer, van ECW Energy. Dit systeem is tussen 2018 en 2021 ontwikkeld binnen onderzoeksprogramma ‘HEATSTORE’ ([www.heatstore.eu](http://www.heatstore.eu)) en heeft van 2021 - 2023 reeds twee succesvolle cycli doorlopen. Voorafgaand aan het ontwerp van dit systeem is uitgebreid gekeken naar ‘lessons learned’ uit voormalige HTO-projecten (in Nederland en daarbuiten) om risico’s zo effectief mogelijk te mitigeren. Dit systeem representeert daarmee de laatste ‘stand der techniek’ voor HTO in Nederland.

Het HTO-systeem in Middenmeer bestaat uit een enkel doublet dat jaarlijks tot wel 28.000 MWh geothermische warmte kan opslaan op een temperatuur van 85 °C, met een maximaal vermogen van 10 MW (maximaal debiet is 150 m<sup>3</sup>/uur). De warmte wordt opgeslagen in een 25 m dik aquifer met zout grondwater op een diepte van 360 m, die aan de boven- en onderkant wordt afgesloten door dikke kleilagen (Figuur 2.2). De bronnen en de monitoringsput zijn uitgerust met peilbuizen voor grondwaterbemonstering en de geïnstalleerde glasvezelkabel faciliteert hoogfrequente ondergrondse temperatuurmetingen met ‘Distributed Temperature Sensing’ (DTS). Binnen het TKI onderzoeksprogramma ‘HTO-PEN’ wordt door ECW Energy, IF Technology en TNO uitgebreid onderzoek gedaan naar de effecten en de prestatie van dit systeem, van 2022 t/m 2025.

### Uitdagingen van HTO

Een aantal belangrijke uitdagingen die spelen voor HTO zijn:

- De geologische potentie van HTO is moeilijk op voorhand in te schatten;
- Integratie van HTO in een warmtesysteem is complex;
- Complexe en langdurige vergunningprocedure (vergunning Waterwet)
- Technische risico’s voor de prestatie van HTO

Deze zijn nader toegelicht in hoofdstuk 2.6. Er lopen momenteel een aantal (inter)nationale onderzoeksprogramma’s waarin deze uitdagingen worden aangepakt.

### DE INTEGRATIE VAN HTO IN EEN ENERGIESYSTEEM

Een goede optie voor de inpassing van HTO is op een locatie met een temperatuursprong. In een warmtenet is dit bijvoorbeeld bij een warmteoverdrachtstation. Bij een warmteoverdrachtstation wordt warmte vanuit het transportnet overgedragen aan het distributienet. De HTO kan dan in de zomer geladen worden met warmte uit het transportnet op een hoge temperatuur. De HTO kan in de winter de opgeslagen warmte terugleveren aan het distributienet, waar een lagere temperatuur gevraagd wordt. De HTO wordt gescheiden van het warmtenet door middel van (dubbele) warmtewisselaars. Een andere optie voor de inpassing is dicht bij de bron. De HTO kan dan in de zomer direct geladen worden met bronwarmte op een zo hoog mogelijke temperatuur. Er treden minder verliezen op doordat er minder warmtewisselaars tussen bron en de HTO liggen. Ook treden er minder leidingverliezen op. Optioneel kan een warmtepomp worden toegepast. Hiermee kan warmte vanuit de HTO worden opgewaardeerd wanneer de temperatuur van de HTO is gedaald tot onder de aanvoertemperatuur van het warmtenet.

## HTO POTENTIE IN RES REGIO ROTTERDAM - DEN HAAG EN REGIO LEIDEN

Deze studie heeft twee kaarten opgeleverd die een beeld geven van de ondergrondse potentie voor HTO in het studiegebied, voor de formatie van Maassluis. Voor het opstellen van de kaarten is gebruikgemaakt van publieke boringen, aangevuld met een aantal diepe boringen uit de interne database van IF Technology.

### HTO Potentiekaart

De 'HTO Potentiekaart' is de belangrijkste kaart die wordt opgeleverd in deze studie (Figuur 3.3). Het is een kwalitatieve kaart die in één oogopslag een beeld geeft van de ondergrondse potentie voor HTO in de formatie van Maassluis in het studiegebied, op basis van een aantal belangrijke criteria:

- 1 *Waterwingebied*: Deze gebieden zijn vanuit beleidsregels aangewezen als boringsvrije zones, waardoor toepassing van HTO hier vanuit juridisch oogpunt niet mogelijk is.
- 2 *Afsluitende kleilaag boven opslagpakket*: vanuit de ondergrond gezien is het essentieel dat er een goed afsluitende kleilaag aanwezig is boven het opslagpakket, om warmteverliezen naar ondiepere lagen te beperken.
- 3 *Risico op rendementsverliezen*: Het zandpakket dat als opslagpakket dient, moet de juiste dikte hebben. Deze moet niet te dun zijn, want dat geeft een laag debiet per bron. Tegelijkertijd mag de dikte ook niet te groot worden, want dat maakt het opslagpakket gevoelig voor grote warmteverliezen door opdrijving. De gebieden waarvoor in de Formatie van Maassluis een geschikte dikte wordt verwacht om te voldoen aan beide criteria, scoren hoog (groen) op de potentiekaart. In oranje gebieden is het risico op rendementsverliezen groter.

De HTO Potentiekaart laat zien dat binnen de formatie van Maassluis in grote delen van het studiegebied zandlagen worden aangetroffen met een optimale dikte (groene gebieden). Bovendien laten de meeste boringen zien dat deze formatie aan de bovenkant wordt afgesloten door een goed afsluitende kleilaag, maar er zijn ook gebieden waar dit beperkt het geval is (omgeving Leiden), of waar een sterk wisselend beeld heerst. Daar waar weinig datapunten aanwezig zijn of waar een grote lokale variabiliteit wordt getoond moet rekening worden gehouden met een grotere onzekerheid. Het algemene beeld voor toepassing van HTO in het studiegebied lijkt over het algemeen positief. Desondanks blijft het voor individuele HTO-projecten van belang om locatie-specifiek vervolgonderzoek uit te voeren om de ondergrondse potentie voor HTO scherper te kunnen beoordelen. Een veel gebruikte en geadviseerde manier hiervoor is het uitvoeren van een proefboring.

### HTO Debietkaart

De 'HTO Debietkaart' geeft een indicatie van de haalbare debieten die per HTO-doublet kunnen worden behaald. Het berekende debiet is bepaald aan de hand van de NVOE-onttrekkingsnorm, die op haar beurt weer afhankelijk is van de dikte van het opslagpakket, de doorlatendheid van het opslagpakket en de minimale onttrekkingstemperatuur bij de lauwe bron. De debietkaart laat zien dat er in grote delen van Zuid-Holland relatief hoge debieten haalbaar zijn ( $>150 \text{ m}^3/\text{uur}$ ).

### De optimale dikte van een opslagpakket

Bij eerdere HTO potentiëstudies is de HTO-potentie vaak direct gerelateerd aan de dikte van het opslagpakket, in lijn met potentiëstudies voor aardwarmte en/of WKO. Voor HTO geldt echter dat een te grote dikte ook negatieve invloed heeft op de potentie voor HTO, omdat grotere diktes leiden tot een grotere gevoeligheid voor rendementsverliezen door opdrijving van warmte. Om die reden kent de dikte van een HTO opslagpakket een bepaald optimaal bereik. Een laag debiet per

doublet als gevolg van een beperkte dikte is overkomelijk, omdat er meerdere doubletten kunnen worden aangelegd (weliswaar met hogere investeringskosten tot gevolg). Het risico op rendementsverliezen kan echter niet (gemakkelijk) worden gemitigeerd, en omdat deze factor van belang is voor de lange termijn prestatie van een HTO-systeem (rendement, operationele kosten, etc.) is dit aspect als belangrijk kwalitatief criterium opgenomen in de kwalitatieve HTO Potentiekaart.

### Aanbevelingen

De 'ondergrondse HTO potentie' kan op verschillende manieren worden gedefinieerd. In het verleden is voor HTO Potentiekaarten vaak hoofdzakelijk gekeken naar het debiet dat per put kan worden behaald, in lijn met de potentiekaarten die voor aardwarmte zijn opgesteld. Echter, de potentie van HTO hangt naast het debiet ook sterk af van aspecten zoals het terugwinrendement en daarom zou dit criterium mee moeten worden genomen in de uitdrukking van HTO potentie. In deze studie is daar rekening mee gehouden. Daarbij wordt wel de kanttekening geplaatst dat dit criterium erg gevoelig is voor de precieze opbouw van de ondergrond, die zich voor een groot studiegebied moeilijk in een kaart laat vatten. Zeker in Zuid-Holland is bekend dat de bodemopbouw in de formatie van Maassluis lokaal sterk kan variëren. Mede om deze reden wordt geadviseerd om voor HTO-projecten een proefboring uit te voeren om de locatie-specifieke haalbaarheid scherper in kaart te brengen.

### DUURZAAMHEID EN KOSTEN VAN HTO

De duurzaamheid en kosten van de HTO zijn sterk projectafhankelijk. In de Design Toolkit kunnen deze projectspecifiek worden berekend. Om een gevoel te krijgen bij de kosten en duurzaamheid, zijn deze berekend aan de hand van een aantal case.

#### Duurzaamheid

De duurzaamheid hangt sterk af van de duurzaamheid van de opgeslagen warmte. Andere belangrijke parameters zijn de duurzaamheid van het elektriciteit en het terugwinrendement (verhouding tussen teruggeleverde en opgeslagen warmte in de HTO). Binnen de cases is gevarieerd met de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de bron (2,5 en 10,0 kg CO<sub>2</sub>/GJ) en het systeemrendement (60 en 80%). De CO<sub>2</sub>-uitstoot voor teruggeleverde warmte tijdens exploitatie van de doorgerekende cases ligt tussen de 9,4 en 27 kg CO<sub>2</sub> per teruggeleverde GJ warmte. Vergelijken met warmte geleverd door een gasketel (63 kg CO<sub>2</sub>/GJ) is dat een reductie tussen de 57 en 85%. Om aan de streefwaarde voor warmtenetten in 2030 te kunnen voldoen (klimaatakkoord: 18,9 kg CO<sub>2</sub>/GJ & warmtewet: 25 kg CO<sub>2</sub>/GJ), is het van belang dat de opgeslagen warmte zo duurzaam mogelijk is en dat het terugwinrendement voldoende hoog is.

#### Kosten

Net als de duurzaamheid zijn de kosten berekend aan de hand van cases. Hierbij is gekeken naar de investeringskosten en de jaarlijkse exploitatiekosten. Voor de investeringskosten is bij de cases gevarieerd met de diepte van de bronnen (100 en 200 m-mv) en het debiet (100 en 200 m<sup>3</sup>/h). De investeringskosten ligt voor de onderzochte cases tussen de 2,5 en 3,4 M€. Voor de exploitatiekosten is bij de cases gevarieerd met het debiet (100 en 200 m<sup>3</sup>/h) en de kosten voor de inkoop van de opgeslagen warmte (2,5 en 5,0 €/GJ). De jaarlijkse exploitatiekosten liggen voor de onderzochte cases tussen 400 en 900 k€/jaar. Deze kosten zijn ingeschat op basis van de huidige stand van zaken. HTO is sterk in ontwikkeling. De verwachting is dat bij doorontwikkeling van deze techniek de kosten in de toekomst zullen dalen.

## JURIDISCH KADER HTO

Binnen onderzoeksprogramma WINDOW is in 2020 het Juridische Achtergronddocument opgeleverd, dat inzicht geeft in de wet- en regelgeving van HTO in Nederland, het HTO-beleid dat per provincie wordt gevoerd, en voorbeelden van bestaande HTO-vergunningen. Hierin wordt uitgelegd dat het wettelijke kader voor HTO tot 500 m-mv is vastgelegd in de Waterwet en onderliggende wetgeving. De gedeputeerde staten van de provincies zijn bevoegd gezag. De Waterwet biedt voldoende ruimte om vergunning te verlenen voor een HTO-systeem. Daarbij is een belangrijke randvoorwaarde dat het belang van de bescherming van de bodem zich daartegen niet verzet, en dat de ondergrond doelmatig wordt gebruikt. Het bevoegd gezag maakt de afweging. Echter, hoe deze wettelijke ruimte door het bevoegd gezag door kan worden vertaald naar de vergunning is niet vastgelegd, omdat er alleen standaardregels (BUM) zijn opgesteld voor OBES tot 25 °C (WKO).

In het verleden heeft dit tot complexe en langdurige vergunningsprocedures gezorgd. Om dit proces te stroomlijnen is vanuit het WarmingUP programma een ‘Voorlopig Afwegingskader voor vergunningverlening HTO’ opgesteld (2021), door de uitvoeringspartijen in samenwerking met een aantal provincies. Dit afwegingskader geeft initiatiefnemers voor HTO aan de voorkant duidelijkheid over wet- en regelgeving en de zaken die in een vergunningaanvraag (effectenstudie) dienen te worden opgenomen. Tevens bevat het een aantal HTO-specifieke voorschriften die door de vergunningverlener in de vergunning kan worden opgenomen, ter aanvulling van de voorschriften die al standaard voor WKO worden toegepast (BUM BE deel 1).

Het ‘Juridische Achtergronddocument’ ([link](#)) en het ‘Voorlopige afwegingskader vergunningverlening HTO’ ([link](#)) zijn publiek beschikbaar via [www.warmingup.info](http://www.warmingup.info). Binnen programma WarmingUP GOO worden beide documenten verder ontwikkeld op basis van recente ontwikkelingen en ervaringen.

## AANBEVELINGEN

Om ervoor te zorgen dat de kennis uit dit potentieonderzoek wordt benut in lopende en toekomstige onderzoeksprogramma's, en dat de methodieken voor het uitdrukken van HTO potentie verder worden ontwikkeld, worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Binnen het WarmingUP GOO programma worden vanaf 2023 werkzaamheden voorzien om de HTO potentie in kaarten te vatten. Het ligt voor de hand om ter voorbereiding daarvan de methodieken en resultaten van deze studie te bespreken.
- Een belangrijke *lesson learned* van voormalige HTO-systemen was: ‘doe een proefboring’. De reden daarvoor is dat de (ondergrondse) potentie van HTO sterk afhankelijk is van de lokale ondergrondse eigenschappen, en deze zijn vaak in grote mate onzeker. In Zuid-Holland komt daar nog eens bij dat ervaringen al laten zien dat de formatie van Maassluis relatief heterogeen is (in horizontale en verticale richting), wat de noodzaak voor een proefboring nog groter maakt. Voor een goed beeld van de kansen, een gedegen onderbouwing van een investeringsbesluit en een succesvolle operatie, wordt voor HTO-projecten in Zuid-Holland aanbevolen een proefboring uit te voeren.

## DOORONTWIKKELING HTO IN DE KOMENDE JAREN

Er zijn een aantal uitdagingen die belangrijk zijn om aan te pakken om de verdere ontwikkeling van HTO in Nederland te faciliteren. Zo zijn er vaak grote onzekerheden over de bodemopbouw op de geplande HTO-locatie, waardoor de haalbaarheid vooraf moeilijk is in te schatten. Daarnaast is de



integratie van HTO in een bestaand of toekomstig warmtesysteem complex. Weliswaar is er wettelijke ruimte om HTO te vergunnen, maar hoe die ruimte wordt afgebakend in een vergunning is niet in detail vastgelegd en dat leidt tot een langdurig vergunningsproces. Tenslotte is er een aantal technische en/of wetenschappelijke aspecten waarvoor het wenselijk is om meer kennis en ervaring over op te bouwen (zoals optimalisatie van de waterbehandeling en thermische prestatie en de effecten van HTO op het grondwater).

Dankzij (inter)nationale onderzoeksprogramma's zoals HEATSTORE (2018), WINDOW (2019) en WarmingUP (2020) zijn de afgelopen jaren grote stappen gezet om deze uitdagingen het hoofd te bieden. Dat is mogelijk geweest door succesvolle samenwerking tussen verschillende (kennis)instituten, bedrijven en overheden en de middelen die vanuit de staat beschikbaar zijn gesteld voor de energietransitie. Onder de filosofie van 'Learning by doing' zijn demonstratieprojecten opgestart en tijdens het ontwikkelproces zijn knooppunten geïdentificeerd en aangepakt. De onderzoeksprogramma's 'HTO-PEN' (2022-2025), WarmingUP GOO (2023-2026) en PUSH-IT (2023-2026) faciliteren de komende jaren in de verdere ontwikkeling op belangrijke (systeem)technische, juridische en operationele punten en opschaling van de techniek.

De belangrijkste uitdagingen, onderzoeksprogramma's en voorgestelde technische innovaties aan HTO-systemen zijn in meer detail beschreven in hoofdstuk 2.6.

## INHOUDSOPGAVE

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>11</b>
1.1	Context, aanleiding en doel van deze HTO Potentiëstudie	11
1.2	Leeswijzer	12
<b>2</b>	<b>Wat is Hoge Temperatuur Opslag?</b>	<b>13</b>
2.1	Waarom warmteopslag?	13
2.2	Wat is HTO?	14
2.3	Waarom warmteopslag middels HTO?	15
2.4	Hoe wordt HTO ingepast in een duurzaam energiesysteem?	18
2.5	De Stand der techniek van HTO in Nederland	20
2.6	uitdagingen van HTO	22
<b>3</b>	<b>HTO Potentie in studiegebied Rotterdam - Den Haag &amp; Leiden</b>	<b>24</b>
3.1	Welke Criteria bepalen de ondergrondse HTO- potentie?	24
3.2	Scope, data en onzekerheid	26
3.3	Potentiekaarten	27
3.3.1	HTO Potentiekaart	28
3.3.2	HTO Debietkaart	29
3.3.3	Vergelijking van de Potentiekaart (Figuur 3.3) met de Debietkaart (Figuur 3.4).	30
3.4	Interpretatie van de kaarten	31
3.4.1	Door wie worden deze kaarten gebruikt?	33
<b>4</b>	<b>Duurzaamheid en kosten</b>	<b>34</b>
4.1	Duurzaamheid HTO	34
4.2	Kosten HTO	35
4.3	Kostenreductie	38
<b>5</b>	<b>Juridisch kader HTO</b>	<b>39</b>
5.1	Wet- en regelgeving omtrent HTO	39
5.2	Een Afwegingskader voor vergunningverlening HTO 40	
5.3	Beleidsrestricties voor toepassing van HTO in Zuid-Holland	40
<b>6</b>	<b>Bijlagen</b>	<b>42</b>
	<b>Bijlage 1 Toelichting op Potentiekaarten HTO</b>	<b>43</b>
	<b>Bijlage 2 Duurzaamheid &amp; kosten</b>	<b>58</b>
	<b>Bijlage 3 Innovaties</b>	<b>70</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 CONTEXT, AANLEIDING EN DOEL VAN DEZE HTO POTENTIESTUDIE

### Context en aanleiding

De RES Rotterdam Den Haag, Invest-NL, Gasunie en EBN hebben gezamenlijk een werkprogramma opgezet waarin wordt toegewerkt naar een richtinggevend toekomstbeeld van de Regionale Structuur Warmte (RSW) en de Regionale Energie Strategie (RES 1.0). Het doel van dit programma is om de optimale inzet en verdeling van warmte met alle betrokken partijen samen vorm te geven in de RES 2.0. Het is een complexe opgave, waarin veel partijen betrokken zijn zoals Provincies, gemeentes, waterschappen, publieke, maatschappelijk en private partijen.

De doelstelling is vormgegeven door het opzetten en ontwikkelen van een open en toegankelijk platform waarin alle data is opgenomen over warmtebronnen en warmtevragers. Op basis daarvan helpt het platform om collectieve warmtesystemen te modelleren en analyseren. Door verschillende concepten te onderzoeken zijn betrokken stakeholders in staat om in optimale samenhang van vraag en aanbod op elkaar af te stemmen.

Vraag en aanbod sluiten zelden goed op elkaar aan in de tijd. Daarom is opslag van warmte van belang in het toekomstige energiesysteem. Hoge Temperatuur Opslag (HTO) is een vorm van seizoensopslag waarmee het mogelijk wordt om grote hoeveelheden warmte voor een lange tijd op te slaan in de ondergrond. Door warmte op te slaan in lange periodes van overschot (zomer) en het op een later moment weer terug te leveren (winter), kan HTO een grote rol spelen in de koppeling van vraag en aanbod. Bij een platform waarin warmtebronnen en warmtevragers worden samengebracht kan de component warmteopslag niet ontbreken. EBN heeft IF Technology gevraagd om het potentieel, de kosten en de duurzaamheid van HTO inzichtelijk te maken in de RES regio Rotterdam Den Haag en de Leidse Regio, opdat deze mee kan worden genomen in het platform. EBN heeft een review uitgevoerd op de rapportage.

### Doel

Dit rapport heeft als doel om te zorgen dat plan- en besluitvorming rondom de toepassing van HTO in Zuid-Holland op een gedegen manier kan plaatsvinden, op basis van de laatste stand van kennis over HTO. Omdat HTO nog een relatief nieuwe en onbekende techniek is, wordt hier eerst een aantal belangrijke aspecten van HTO toegelicht, zoals het nut en noodzaak van HTO voor de warmtetransitie, de huidige stand der techniek in Nederland, de uitdagingen van HTO, de wet- en regelgeving rondom deze toepassing en actuele (onderzoeks)projecten naar deze opkomende techniek.

Daarnaast is het doel om voor de RES regio Rotterdam - Den Haag en een aantal gemeentes in de Leidse regio inzichtelijk te maken wat de ondergrondse potentie voor HTO is. Dat is in kaart gebracht voor de geologische formatie van Maassluis. Daarmee wordt voor initiatiefnemers en overheden een eerste algemene beeld geschetst van de mogelijkheden voor toepassing van HTO in hun omgeving.

Door bewustwording van de potentie van HTO in dit gebied kan in de toekomstige besluitvorming rekening worden gehouden met de grote kansen die warmteopslag middels HTO biedt voor de warmtetransitie, en zodoende kan diens positieve impact op het klimaat worden benut.

## 1.2 LEESWIJZER

Allereerst wordt de lezer in hoofdstuk 2 meegenomen in de techniek Hoge Temperatuur Opslag (HTO). Wat is het? Waarom verdient deze techniek een plaats in de energietransitie in Nederland? Wat is de stand der techniek? Welke uitdagingen zijn er voor HTO in Nederland en hoe worden die nu aangepakt?

Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 getoond wat de ondergrondse potentie voor toepassing van HTO is in het studiegebied RES regio Rotterdam - Den Haag en regio Leiden. In hoeverre wordt een succesvolle toepassing van HTO verwacht in deze gebieden? Zijn er kansen voor warmteopslag in de grote industriële gebieden bij de Rotterdamse haven? Hoe groot is de onzekerheid over de kansen van HTO in mijn omgeving en is het noodzakelijk meer onderzoek uit te voeren?

Met de kaarten kunnen initiatiefnemers en plan- en besluitvormers rondom HTO anticiperen op toekomstige toepassing van deze techniek in hun eigen omgeving. Juist in de gebieden met hoge ondergrondse potentie is het noodzakelijk dat er kennis is over de rol die HTO kan spelen in de energietransitie, en dat HTO onderdeel wordt van de gereedschapskist die voor die transitie wordt ingezet.

In hoofdstuk 4 wordt de techniek HTO gevat in een aantal kengetallen. Er wordt aan de hand van voorbeeldcases een beeld gegeven van de investerings- en operationele kosten, en de duurzaamheid.

Tenslotte presenteert hoofdstuk 5 een kort overzicht van de vigerende wet- en regelgeving en de vergunningverleningsprocedure voor HTO. Mag HTO in Nederland worden toegepast? Hoe ziet de vergunningsprocedure eruit? Met welke maatwerkvoorschriften moet ik als HTO-operator rekening houden? De afgelopen jaren is hier uitgebreid naar gekeken in verschillende onderzoeksprojecten (WINDOW, WarmingUP) en de resultaten worden gepresenteerd.

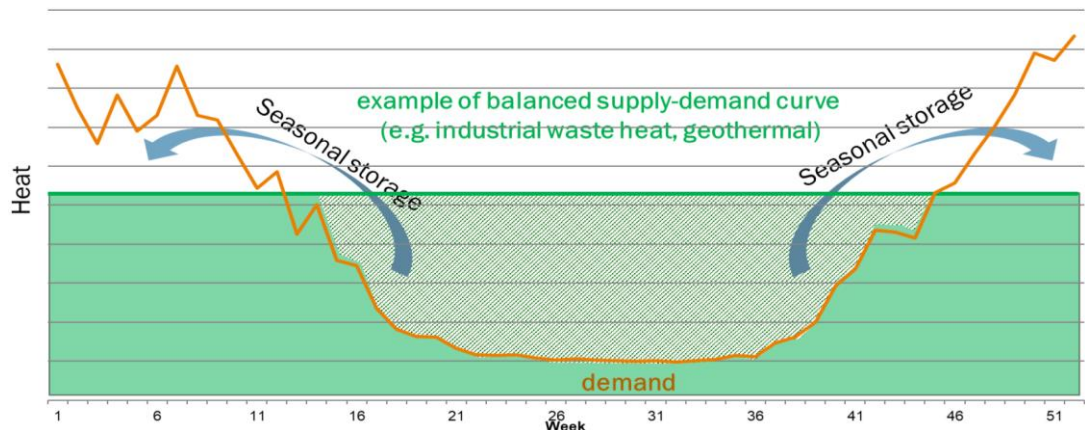
## 2 Wat is Hoge Temperatuur Opslag?

### 2.1 WAAROM WARMTEOPSLAG?

#### De onmisbare rol van warmteopslag in de energietransitie

Het is van groot belang dat de inzet van fossiele brandstoffen in Nederland op korte termijn drastisch wordt teruggedrongen, om daarmee de impact van klimaatverandering zoveel mogelijk te beperken. Aan de kant van de Warmtetransitie ligt daarin een enorme opgave. Warmte is verantwoordelijk voor circa 42% van het totale energieverbruik in Nederland en het overgrote deel daarvan wordt geproduceerd niet-duurzame bronnen zoals aardgas (EBN, infographic 2021). Het ontwikkelen en optimaal benutten van duurzame warmtebronnen zoals aardwarmte, zonthermie en (industriële) restwarmte is essentieel om de klimaatdoelstellingen te kunnen halen. Een belangrijke uitdaging die komt kijken bij deze duurzame bronnen, vergeleken met fossiele warmtebronnen, is dat de productie van warmte in de tijd vaak niet goed aansluit bij de warmtevraag. Zonthermie is in de zomer ruim beschikbaar, terwijl warmte pas in de winter gevraagd wordt. Restwarmte uit de industrie kan 's winters nuttig worden gebruikt door het in te zetten in een warmtenet, maar 's zomers verdwijnt het veelal de lucht in. Aardwarmtesystemen kunnen het hele jaar door op maximale capaciteit grote hoeveelheden duurzame warmte produceren. Maar in de zomer wordt regelmatig de productie teruggeschroefd omdat de vraag dan beperkt is, terwijl deze bronnen in de winter op maximale capaciteit niet aan de totale warmtevraag kunnen voldoen waardoor gasketels moeten bijspringen (zie Figuur 2.1).

Voor al deze duurzame bronnen geldt: toepassing van seizoensmatige warmteopslag faciliteert een significant betere benutting van deze duurzame bronnen. Door warmte-overschotten of restwarmte in de zomer op te slaan op grote schaal en 's winters weer te benutten, kan in de winter de inzet van gasketels aanzienlijk worden teruggedrongen. Bovendien kunnen de (kostbare) duurzame warmtebronnen op jaarbasis meer nuttig gebruikte warmte gaan leveren aan afnemers, waardoor ze zichzelf sneller terugverdienen. Warmteopslag wordt daarom gezien als een essentiële component van onze toekomstige duurzame warmte-infrastructuur.



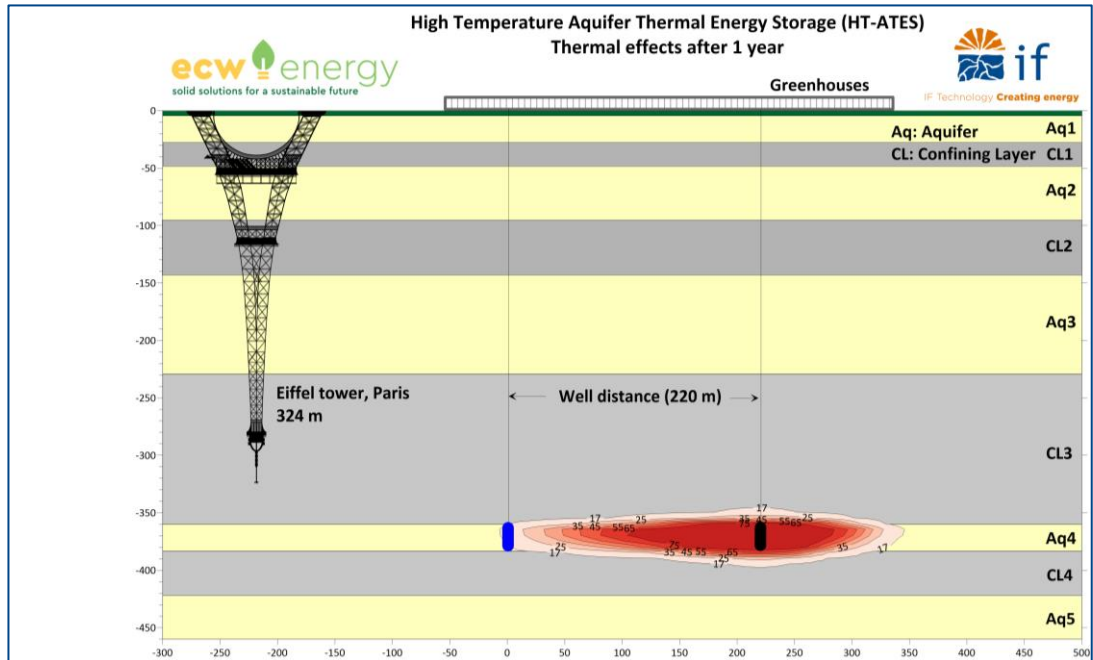
Figuur 2.1. Het patroon van warmteproductie van een duurzame warmtebron zoals aardwarmte of industriële restwarmte (groen) sluit niet goed aan bij het 'badkuiprofiel' dat de warmtevraag vanuit de gebouwde omgeving laat zien (oranje lijn). Door de overtollige warmte uit de zomer op te slaan met HTO en deze weer terug te winnen in de winter, wordt voorkomen dat er in de winter gasketels (of andere niet-duurzame bronnen) moeten bijspringen om in de hoge warmtevraag te voorzien.

## 2.2 WAT IS HTO?

Hoge Temperatuur Opslag (HTO) is een techniek waarmee warmte op hoge temperatuur (25 - 90 °C) en op grote schaal (> 15 GWh per jaar) kan worden opgeslagen in de ondergrond. Het opslagmedium is een zandlaag die aan de boven- en onderzijde goed wordt afgesloten door kleilagen (zie Figuur 2.2). De ondergrond is een ideaal medium om warmte in op te slaan: Het is van nature aanwezig onder onze voeten, het kent enorme dimensies, en het bodemmateriaal heeft isolerende eigenschappen. Bovendien is het water in de bodemlaag bij uitstek geschikt als warmtedrager: het heeft een hoge warmtecapaciteit vergeleken met andere stoffen, en het is van nature aanwezig.

### Hoe werkt HTO precies?

Een HTO-systeem bestaat uit twee verticale waterbronnen: een lauwe bron en een hete bron (zie Figuur 2.2). Deze liggen meestal zo'n 100 - 300 m uit elkaar om interferentie tussen de lauwe bron (-30 °C) en de hete bron (max. 90 °C) te voorkomen. Tezamen vormen de bronnen één doublet. Tijdens het opslaan van warmte wordt grondwater uit de zandlaag onttrokken vanuit de lauwe put, dat vervolgens via een warmtewisselaar opgewarmd wordt met de beschikbare (rest)warmte, waarna het opgewarmde grondwater (90 °C) weer wordt geïnfiltrerd in de hete bron. Zo ontstaat gedurende de zomer een hete waterbel rondom de hete bron. Tijdens de winter wordt de pomprichting omgekeerd: het hete grondwater wordt teruggewonnen uit het zandpakket door water te onttrekken uit de hete bron, de warmte eruit te halen, en het afgekoelde water (-30 °C) weer terug te brengen in de zandlaag via de lauwe bron. Het opslaan van warmte in de zomer gevolgd door het terugwinnen van de warmte in de winter beslaat één cyclus.



Figuur 2.2. Schematische dwarsdoorsnede van de ondergrond bij het operationele HTO-project van ECW Energy in Middenmeer, met in het opslagpakket een beeld van de worst-case temperaturen die optreden door toepassing van HTO, na 1 jaar. Zandlagen in geel, kleilagen in grijs. De lauwe bron (blauw) en hete bron (zwart) hebben bronfilters ter diepte van het opslagpakket (Aq4), op een diepte van circa 360 - 385 m. De figuur toont de temperaturen in de ondergrond nadat in de eerste zomer warmte is opgeslagen in de lauwe bron. Het opslagpakket is een 25 m dikke zandlaag (Aq4) op zo'n 360 m diepte. Boven en onder dit opslagpakket zijn dikke kleilagen aanwezig (CL3, CL4) die ervoor zorgen dat het warme water in het opslagpakket blijft zitten, en niet naar (on)dieper gelegen zandlagen kan stromen.

### WKO en HTO

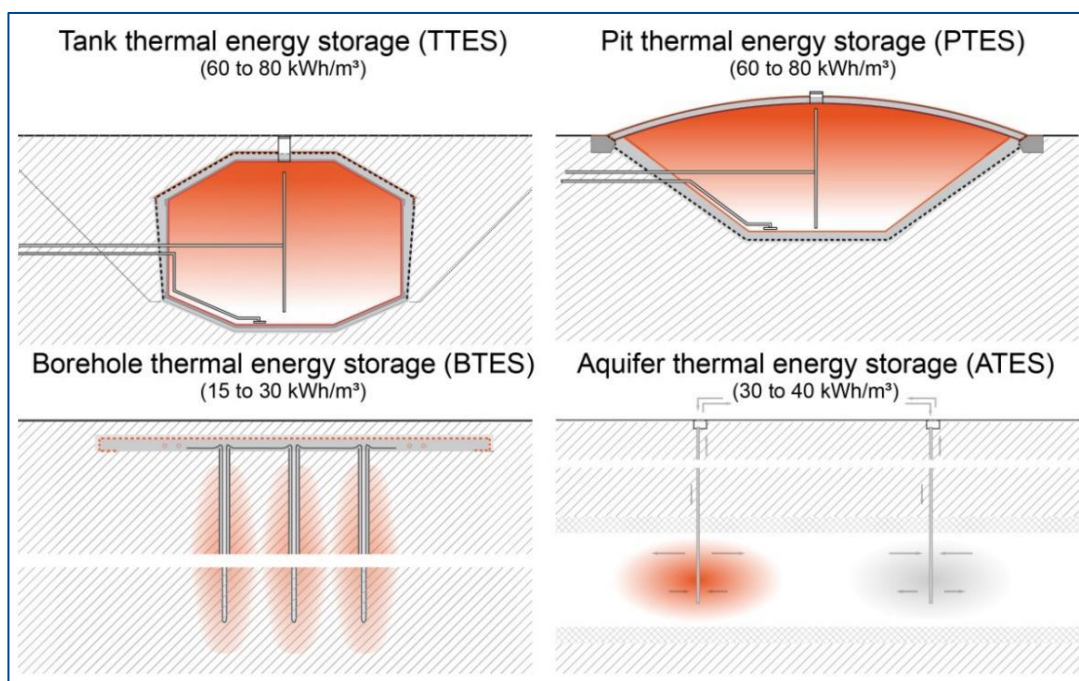
Vanuit technisch oogpunt lijkt HTO erg op het meer gangbare Warmte Koude Opslag (WKO), dat in Nederland veelvuldig wordt toegepast om gebouwen duurzaam te verwarmen en koelen (> 3.000 systemen vergund). Het belangrijkste verschil is de opslagtemperatuur: bij WKO mogen infiltratietemperaturen tussen de 5 en 25°C worden toegepast, terwijl de opslagtemperatuur van HTO juist hoger ligt (25 - 90°C). Daarnaast moet WKO gezien worden als een op zichzelf staande energiebron (in combinatie met een warmtepomp) die warmte en koude aan een gebouw kan leveren. HTO daarentegen is altijd onderdeel van en groter energiesysteem, omdat het de functie van warmtebuffer vervult tussen een externe warmtebron en -afnemer.

## 2.3 WAAROM WARMTEOPSLAG MIDDELS HTO?

### Vier vormen van ondergrondse warmteopslag

Er zijn verschillende warmteopslagtechnieken en HTO is daar één van. Voor grootschalige duurzame warmtebronnen zoals aardwarmte en industriële restwarmte wordt vooral gezocht naar grootschalige en langdurige (seizoensmatige) warmteopslag. Hiervoor wordt al snel gekeken naar ondergrondse warmteopslag, omdat de natuurlijke omvang van de ondergrond enorm is. Er worden hier vier vormen van ondergrondse warmteopslag kort genoemd (zie ook Figuur 2.3):

- Tank Thermal Energy Storage (TTES): Opslag van warmte in ondergrondse tanks.
- Pit Thermal Energy Storage (PTES): Opslag van warmte in grote gegraven kuilen, die met water worden gevuld; dit wordt in Denemarken op verschillende plekken succesvol toegepast.
- Borehole Thermal Energy Storage (BTES): Opslag van warmte/koude in en rondom boorgaten via bodemlussen. In Nederland is deze techniek ook wel bekend als Gesloten Bodemenergiesystemen (GBES), bodemlussen of bodemwarmtewisselaars. Het mag tot temperaturen van 25 °C worden toegepast.
- Aquifer Thermal Energy Storage (ATES): Opslag van warmte/koude in aquifers (watervoerende zandlagen). Met meer dan 3.000 systemen is Nederland wereldwijd koploper in toepassing van de lage temperatuur variant van deze techniek (5 - 25 °C), die hier beter bekend staat als Warmte Koude Opslag (WKO), of Open Bodemenergiesystemen (OBES). Voor Hoge Temperatuur Opslag (>25 °C) wordt internationaal meestal de term High Temperature ATES (HT-ATES) gebruikt.



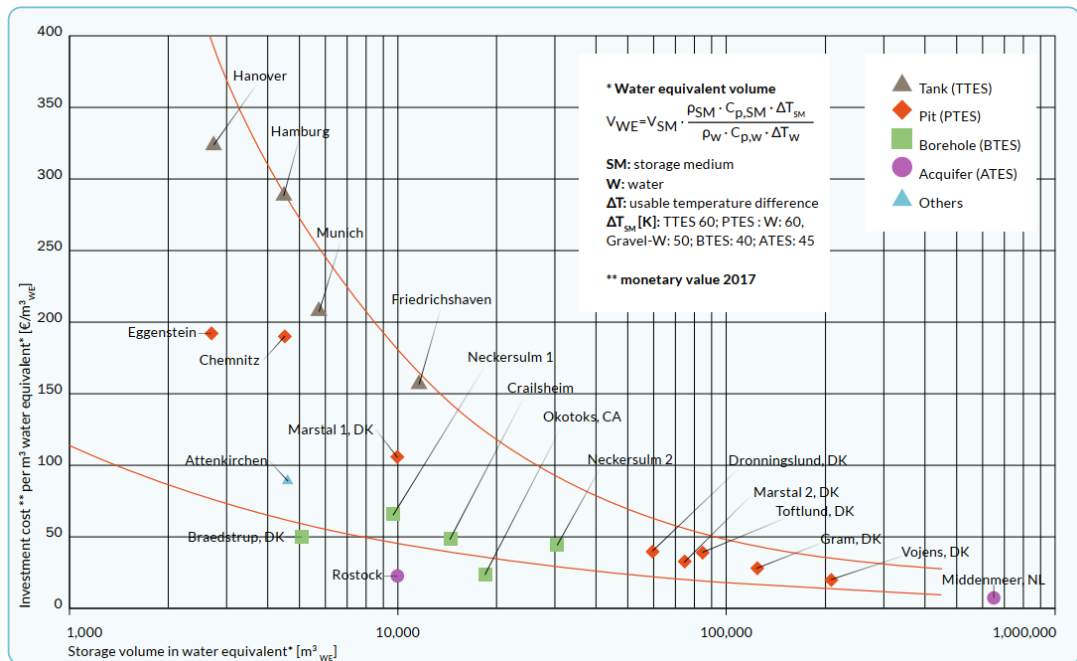
Figuur 2.3. Vier vormen van ondergrondse warmteopslag, schematisch weergegeven (bron: Solites).

### Waarom warmteopslag met HTO?

In Figuur 2.4 wordt een overzicht gegeven van Europese projecten waar deze vormen van ondergrondse warmteopslag op hoge temperatuur (>50 °C) zijn toegepast (HEATSTORE, 2021). Voor elk project wordt getoond wat de maximale opslagcapaciteit is (horizontale as), en wat de investeringskosten waren in verhouding tot de opslagcapaciteit (verticale as). Daaruit komt duidelijk naar voren dat High Temperature ATES (HTO) zowel de meest grootschalige vorm van warmteopslag is, en tevens gekenmerkt wordt door aanzienlijk lagere investeringskosten vergeleken met TTES, BTES en PTES (zie projecten Rostock en Middenmeer). TTES is relatief kostbaar omdat er veel graafwerkzaamheden en truckbewegingen moeten plaatsvinden om de Tank aan te leggen, met een te beperkt opslagvolume om grootschalige warmtenetten te bufferen (in Nederland 100 - 1.000 m<sup>3</sup>). PTES wordt in Denemarken op



verschillende plekken succesvol toegepast (tot wel 100.000 m<sup>3</sup>), maar in Nederland is warmteopslag in diepe gegraven kuilen uitdagender vanwege de hogere grondwaterstand en de ruimtelijke impact aan de oppervlakte. BTES wordt gekenmerkt door lage opslag- en teruglevercapaciteiten, omdat warmteopslag in de bodem plaatsvindt via het relatief trage proces van warmtegeleiding.



Figuur 2.4. Schaal versus investeringskosten van verschillende projecten van ondergrondse warmteopslag. Bron: HEATSTORE rapport 6.4 ([www.heatstore.eu](http://www.heatstore.eu)).

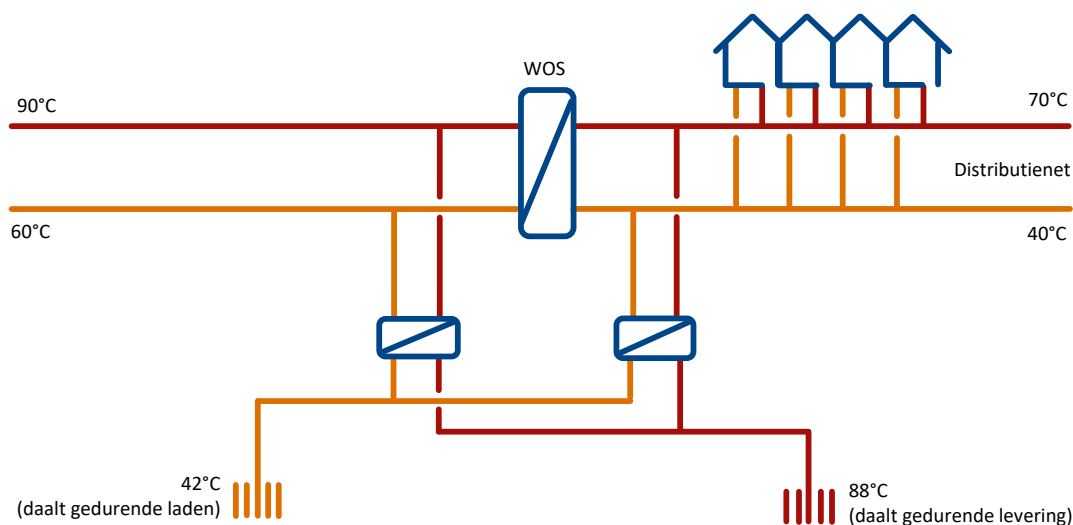
Naast de relatief lage investeringskosten voor een grootschalig HTO-systeem, zijn er een aantal andere factoren die bijdragen aan een geslaagde implementatie van HTO in Nederland op afzienbare termijn:

- De ondergrond in Nederland is geschikt voor toepassing van HTO. De ondiepe Nederlandse ondergrond (tot circa 500 m diepte) bestaat uit een afwisseling van ongeconsolideerde zand- en kleilagen die hoge pompcapaciteiten toestaan. Het feit dat er duizenden WKO-systemen in Nederland succesvol worden bedreven is een belangrijke indicatie dat ook kansen voor HTO aanwezig zijn.
- HTO valt onder dezelfde juridische definitie als WKO, namelijk 'Open Bodemenergiesysteem'. WKO is een gangbare techniek waarvoor de afgelopen jaren wettelijke, beleidsmatige en kwaliteitskaders zijn ontwikkeld. Deze kaders gelden ook voor HTO. Dat maakt dat HTO moet worden ontwikkeld door gecertificeerde (boor)partijen, en dat HTO (net als WKO) niet toegestaan is in grondwaterbeschermingsgebieden.
- In Nederland bestaat een bodemenergiesector die zich de afgelopen 30 jaar succesvol heeft ontwikkeld. Bij alle betrokken partijen, van vergunningverleners, adviesbureaus tot booraannemers, is kennis en ervaring aanwezig over het ontwikkelen van dit soort systemen. Dit maakt dat de techniek HTO in Nederland kan rekenen op succesvolle en verantwoorde implementatie.

- HTO is niet nieuw. Na de oliecrises uit de jaren '80 is veelvuldig (internationaal) onderzoek gedaan naar HTO en ook de afgelopen 10 jaar is veel labonderzoek uitgevoerd naar de effecten van HTO op de ondergrond. In Nederland is in 2021 zelfs een grootschalig HTO-systeem in bedrijf genomen in Middenmeer (Noord-Holland) voor opslag van geothermische warmte. Inmiddels zijn daar twee succesvolle opslag- en terugwincycli doorlopen (2021-2023). De derde cyclus is in mei 2023 opgestart. Dit toont aan dat HTO niet alleen een idee is, maar ook een techniek die beschikbaar moet zijn in de 'toolbox' van stakeholders in de energietransitie.
- De ruimte die een HTO-systeem inneemt aan de oppervlakte is zeer beperkt (lengte x breedte x hoogte is circa 2x1x2 per bron). Dat maakt de ruimtelijke impact van HTO aan de oppervlakte verwaarloosbaar vergeleken met andere toepassingen zoals windmolens en zonneparken.

#### 2.4 HOE WORDT HTO INGESTAPT IN EEN DUURZAAM ENERGIESYSTEEM?

Nadat de hete bron is geladen met warmte, kan deze weer warmte gaan terugleveren. Aan het begin van levering is de temperatuur gelijk aan de opslagtemperatuur. Gedurende levering zal de temperatuur langzaam dalen, doordat een deel van de opgeslagen warmte in de ondergrond achterblijft. Het is van belang dat de warmte-afnemer ook de lagere temperaturen uit de hete bron kan benutten. De beste plek om HTO in te passen is daarom een locatie waar een temperatuursprong optreedt. Dit is bijvoorbeeld bij een warmteoverdrachtsstation (WOS) van een warmtenet. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 2.5. De temperaturen zijn illustratief.

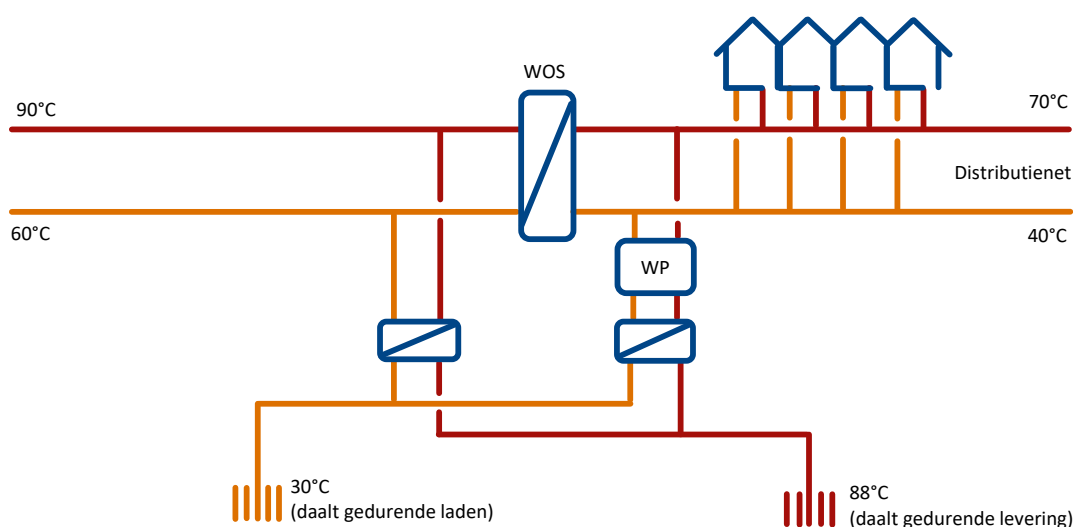


Figuur 2.5 Schematische weergave inpassing HTO bij een warmteoverdrachtsstation (WOS). Temperaturen zijn illustratief.

De HTO wordt in de zomer op hoge temperatuur geladen vanuit het transportnet (90 °C). De HTO wordt van het warmtenet gescheiden door middel van een warmtewisselaar. In de wisselaar treedt een 'temperatuurverlies' op van circa 2 °C. De opgeslagen temperatuur (88 °C) ligt daarom circa 2 °C lager dan de temperatuur in het transportnet. Eventueel kan ook gebruik worden gemaakt van een dubbele warmtewisselaar om het risico op lekkage van zout grondwater naar het warmtenet te voorkomen. In dat geval treedt er wel twee keer een temperatuurverlies op. In de winter levert de HTO warmte aan het distributienet (70 °C). Zolang de HTO warmer is dan 72 °C, kan warmte aan het distributienet geleverd worden zonder gebruik te maken van 'naverwarming'. Merk op dat zowel de lauwte bron als de hete bron in temperatuur dalen wanneer er grondwater aan onttrokken

wordt, omdat de infiltratietemperatuur bij elke bron hoger is dan de natuurlijke grondwatertemperatuur.

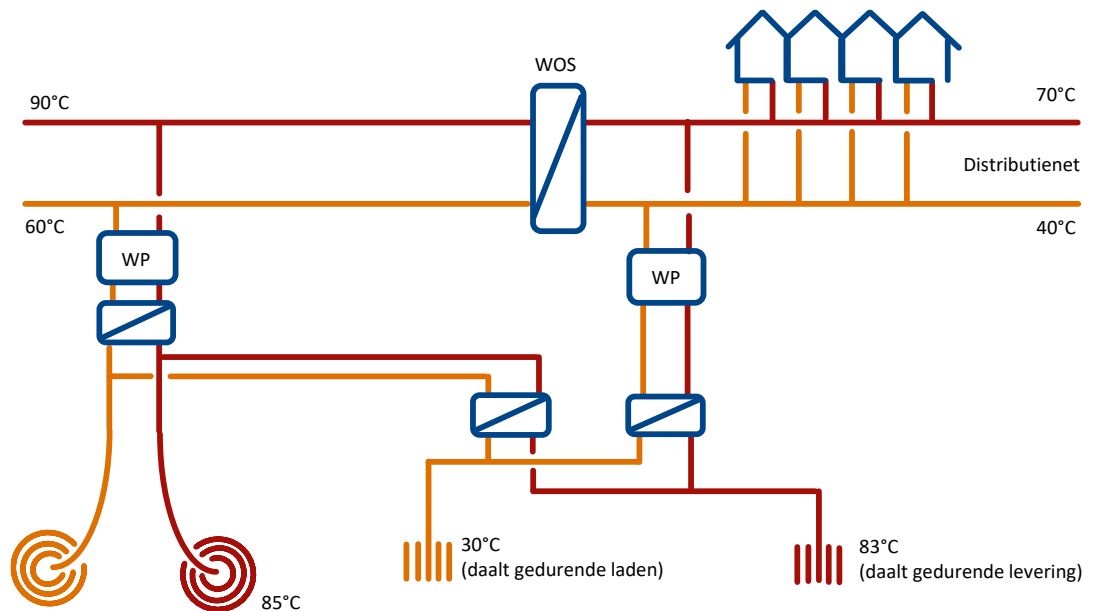
De temperatuur waarbij de HTO stopt met warmtelevering wordt de afkaptemperatuur genoemd. Als een lagere afkaptemperatuur mogelijk is, kan meer warmte vanuit de HTO worden geleverd en dus een hoger terugwinrendement worden behaald (verhouding opgeslagen en teruggeleverde warmte). Met een warmtepomp is het mogelijk om langer door te gaan met warmtelevering, want de warmtepomp kan (lagere temperatuur) warmte onttrekken aan de HTO en dit opwaarderen naar de gewenste temperatuur. Hierdoor is het ook mogelijk om de infiltratietemperatuur in de lauwe bron te verlagen. Hoe lager deze temperatuur gekozen wordt, hoe meer vermogen geleverd wordt door de HTO. Daar staat echter ook een lagere COP<sup>2</sup> (Coefficient Of Performance) tegenover van de warmtepomp. Een concept met een warmtepomp is schematisch weergegeven in Figuur 2.6.



Figuur 2.6 Schematische weergave inpassing HTO bij een warmteoverdrachtsstation (WOS) met een warmtepomp (WP).  
Temperaturen zijn illustratief.

Een HTO kan ook ingepast worden dicht bij de warmtebron (in dit voorbeeld aardwarmte). Of een warmtepomp nodig is hangt af van de temperatuur van de warmtebron (aardwarmte) en de temperatuur waarmee de warmte op het warmtenet moet worden afgezet. In veel gevallen zal een warmtepomp wel nodig zijn. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 2.7.

<sup>2</sup> Verhouding tussen teruggeleverde warmte en elektriciteitsverbruik van de warmtepomp



Figuur 2.7 Schematische weergave inpassing HTO bij een aardwarmtebron met een warmtepomp (WP). Temperaturen zijn illustratief.

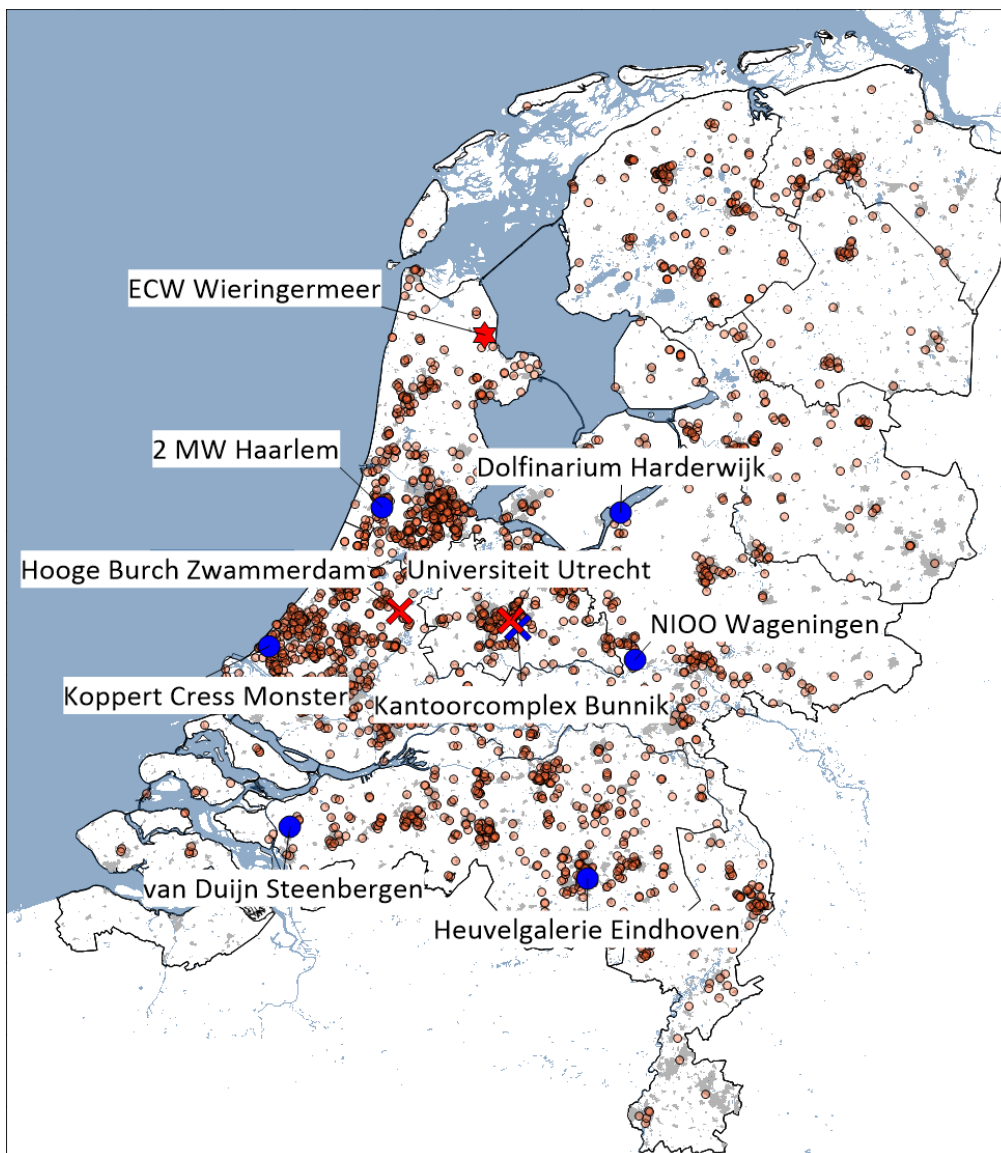
## 2.5 DE STAND DER TECHNIEK VAN HTO IN NEDERLAND

In Nederland wordt vanuit de bodemenergiesector onderscheid gemaakt tussen WKO, MTO en HTO (zie ook Tabel 2.1) maar al deze soorten vallen volgens de Waterwet onder dezelfde juridische definitie ‘Open Bodemenergiesystemen’ (OBES), indien ze tot een diepte van 500 m worden toegepast. Het overgrote deel van de OBES in Nederland betreft Warmte Koude Opslag (WKO).

Tabel 2.1. Namen en definities van verschillende vormen van ‘Open Bodemenergie’ (OBES) en het (relatieve) aantal systemen dat ervan in Nederland is gerealiseerd.

Techniek	Afkorting	Opslagtemperaturen	Aantal systemen in NL
Warmte Koude Opslag	WKO	5 - 25 °C	> 99% van alle OBES
Middelhoge Temperatuur Opslag	MTO	25 - 50 °C	< 1 % van alle OBES
Hoge Temperatuur Opslag	HTO	50 - 90 °C	1 operationeel systeem (2 voormalige systemen)

In Figuur 2.8 zijn de locaties van verschillende WKO, MTO en HTO-systemen aangegeven. Daarin is te zien dat veruit de meeste MTO-systemen nog operationeel zijn. Twee voormalige HTO-systemen bij Utrecht (1991-1999) en Zwammerdam (1998-2003) zijn na een aantal jaren operatie buiten bedrijf genomen. Bij Zwammerdam had dat te maken met een veranderende inzet van verschillende energiesystemen en de daardoor kleinere (financiële) meerwaarde van toepassing van HTO. Ook bij Utrecht lag de belangrijkste oorzaak van het buiten bedrijf nemen in het bovengrondse energiesysteem: de afkaptemperatuur in de praktijk was hoger dan bij het ontwerp was voorzien en in de praktijk was er duidelijk minder warmte beschikbaar voor opslag dan vooraf werd aangenomen. Dit laat zien dat de integratie van HTO met het bovengrondse systeem complex is en aandacht vraagt (zie ook hoofdstuk 2.6)



Figuur 2.8. Operationele WKO-systemen (oranje puntjes), operationele MTO-systemen (blauwe cirkels), voormalige HTO-systemen (rode kruizen) en het operationele HTO-systeem van ECW Energy in Middenmeer (rode ster). Bron: IF Technology.

Binnen onderzoeksprogramma Geothermica HEATSTORE ([www.heatstore.eu](http://www.heatstore.eu)) is tussen 2018 en 2021 een succesvol HTO-project gerealiseerd in Middenmeer (Noord-Holland), door ECW Energy. ECW opereert drie geothermische doubletten in het tuinbouwgebied 'Agriport A7'. In de zomer wordt het HTO-systeem geladen met overtollige geothermische warmte en in de winter wordt die warmte uit de HTO teruggewonnen en geleverd aan de kassen. De warmte uit de HTO zorgt daarmee voor een verlaagde inzet van gasgestookte installaties, met een aanzienlijke CO<sub>2</sub>-reductie tot gevolg. Tegelijkertijd faciliteert de HTO een grotere jaarlijkse warmteopbrengst uit de aardwarmtesystemen. De parameters in Tabel 2.2 geven een beeld van de schaal waarop HTO bij ECW wordt toegepast.

Tabel 2.2 Kenmerken van het operationele HTO-systeem van ECW Energy in Middenmeer (1 doublet).

parameter	eenheid	zomer	winter
grondwater verplaatsing (ontwerp)	[m <sup>3</sup> /seizoen]	440.000	440.000
maximaal debiet	[m <sup>3</sup> /uur]	150	150
injectietemperatuur	[°C]	85 (hete bron)	30 (lauwe bron)
capaciteit	[MW]	10 (laden)	2 - 8 (terugleveren)
Energieopslag/-terugwinning	[MWh/seizoen]	28.000	20.000

Het HTO-project bij ECW in Middenmeer is het enige HTO-project in Nederland dat nu operationeel is. Om die reden wordt er uitgebreid onderzoek uitgevoerd naar de effecten en prestatie ervan. Dat gebeurt binnen TKI-project 'HTO-PEN' in een samenwerkingsverband tussen ECW Energy, IF Technology en TNO. Tussen 2021 en 2023 zijn inmiddels twee succesvolle opslag- en terugwincycli doorlopen. Er zijn op verschillende momenten in het jaar grondwatermonsters genomen (8x per jaar) en de bodemtemperatuur bij de HTO-bronnen de monitoringsput wordt met hoge frequentie gemeten (uurlijks). Daarnaast wordt de operationele prestatie nauwkeurig bijgehouden vanuit verschillende sensoren in het grondwatercircuit. De meetresultaten van cyclus 1 lieten zien dat de toegepaste maatregelen om technische risico's (zoals putverstopping) te mitigeren succesvol waren (Oerlemans et al., 2022<sup>3</sup>) en op korte termijn wordt ook een rapportage verwacht over de chemische en microbiologische effecten van HTO op de ondergrond (vanuit TKI HTO-PEN en het WarmingUP programma). Het is raadzaam om de kennis en ervaring die is opgedaan bij de ontwikkeling, realisatie en operatie van dit 'state-of-the-art' HTO-systeem te benutten in de ontwikkeling van de toekomstige HTO-systemen in Nederland.

## 2.6 UITDAGINGEN VAN HTO

Er is een aantal uitdagingen die spelen bij de ontwikkeling van een HTO-systeem, die grofweg onder de volgende vier categorieën vallen. Per categorie is ook aangegeven welke werkzaamheden en/of onderzoeksprogramma's op dit moment in Nederland lopen om deze uitdaging aan te pakken.

### Geologische potentie is moeilijk op voorhand in te schatten

Voor een succesvol HTO-systeem is een juiste combinatie van ondergrondse eigenschappen belangrijk. Er is een zandlaag nodig met een goed doorlaatvermogen die aan boven- en onderkant wordt afgesloten door kleilagen. HTO wordt vaak in diepere zandlagen voorzien dan voor WKO gangbaar is, maar over het algemeen is er weinig bodeminformatie bekend van die dieptes. Dat maakt de inschatting van de haalbaarheid van HTO op voorhand onzeker. Oplossingen hiervoor zijn: uitvoeren van proefboringen en verbeterde kartering van de diepe Nederlandse ondergrond. Lopende onderzoeksprojecten die hier aandacht aan besteden zijn WarmingUP en WarmingUP GOO.

### Integratie van HTO in een warmtesysteem is complex

HTO wordt ingezet als een groot buffervat van een regionaal energiesysteem. Dat betekent dat de inzet ervan wordt bepaald door de vele warmtebronnen en -afnemers die op dat systeem zijn aangesloten, en dat is iets dat over het algemeen veel onzekerheden kent. Een belangrijke

<sup>3</sup> Oerlemans, P., Drijver, B., Koenen, M., Koornneef, J., Dinkelman, D., Bos, W., Godschalk, B. (2022). First field results on the technical risks and effectiveness of mitigation measures for the full scale HT-ATES demonstration project in Middenmeer. Paper gepresenteerd op het European Geothermal Congress 2022 Bertlijn, Duitsland. Artikel beschikbaar op: <https://iftechnology.nl/kennisbank/hoge-temperatuur-opslag-bij-ecw-in-middenmeer/>

ontwikkeling die hier een oplossing voor kan bieden is de Design-Toolkit. Dit is een softwarepakket waarmee warmtebronnen en warmte-afnemers via een warmtenet aan elkaar gekoppeld kunnen worden, en waar HTO ook in kan worden toegevoegd. Met deze software wordt het mogelijk op voorhand te onderzoeken hoe toepassing van HTO in een warmtenet bijdraagt aan duurzaamheid, flexibiliteit en betaalbaarheid van het totale energiesysteem (<https://www.warmingup.info/design toolkit>).

### **Complexe en langdurige vergunningprocedure**

De belangrijkste vergunning voor een HTO-systeem (tot 500 m diepte) is de vergunning Waterwet. Het proces voor het verkrijgen van deze vergunning was in het verleden vaak complex en langdurig, met onzekerheid over de uitkomst. Daarmee vormde het een drempel voor initiatiefnemers om aan HTO te beginnen. Om deze drempel te slechten zijn de afgelopen jaren vanuit onderzoeksprogramma's WINDOW en WarmingUP in samenwerking met provincies verschillende stappen gezet. Zo is er een overzicht gegeven van de wet- en regelgeving rondom HTO en tevens wordt een afwegingskader ontwikkeld die zowel initiatiefnemers als vergunningverleners ondersteunt in de vergunningprocedure (zie ook hoofdstuk 5). Een belangrijke oorzaak van de complexe vergunningverlening ligt in de onzekerheid over de effecten van HTO op de ondergrond. Onderzoeksprojecten zoals WarmingUP, WarmingUP GOO, TKI-project 'HTO-PEN', en het PUSH-IT programma zullen hier de komende jaren meer inzichten over verschaffen.

### **Technische risico's voor de prestatie van HTO**

Bij HTO wordt grondwater opgewarmd. Daardoor kan het grondwater oververzadigd raken met betrekking tot calciet en kan kalkneerslag in de put optreden met putverstopping tot gevolg. Dit biedt een belangrijke technische uitdaging voor HTO. Mitigerende maatregelen zoals monitoring en waterbehandeling zijn belangrijke ontwikkelpunten voor de komende jaren. Bij het HTO-project van ECW Energy in Middenmeer wordt dit risico succesvol gemitigeerd (Oerlemans et al., 2022) en tijdens het HTO-PEN programma wordt hier meer ervaring mee opgedaan.

### **Innovaties**

Daarnaast bestaan er nog een aantal technische aspecten die niet zozeer een direct risico vormen, maar waar wel optimalisaties en/of innovaties voor zijn voorgesteld die de komende jaren kunnen ontwikkeld. Daarbij gaat het over technische ontwikkelingen zoals isolatie van de putbuizen om warmteverliezen verder te minimaliseren, het ontwerpen van een compacte en corrosiebestendige bronkop die aan de oppervlakte weinig ruimte inneemt en het ontwikkelen van pompen die met hoge frequentie in debiet en pomprichting kunnen schakelen. Meer toelichting hierover is opgenomen in Bijlage 3.

## 3 HTO Potentie in studiegebied Rotterdam - Den Haag & Leiden

Wat is de ondergrondse potentie voor toepassing van HTO in het RES-gebied Rotterdam - Den Haag en de regio Leiden?

### 3.1 WELKE CRITERIA BEPALEN DE ONDERGRONDSE HTO-POTENTIE?

Voor een succesvolle prestatie van een HTO-systeem is het belangrijk dat in de ondergrond een geschikt opslagpakket aanwezig is. De geschiktheid van het opslagpakket wordt hoofdzakelijk bepaald door de mate van warmteverliezen die daarin verwacht kunnen worden en het debiet dat per HTO-bron in dat opslagpakket kan worden behaald. Voor deze potentiëstudie zijn deze factoren verder uitgewerkt in de volgende drie criteria, die hieronder nader zijn toegelicht.

- A. Aanwezigheid afsluitende kleilaag boven het opslagpakket
- B. Terugwinrendement van het HTO-systeem
- C. Maximale capaciteit per HTO-doublet

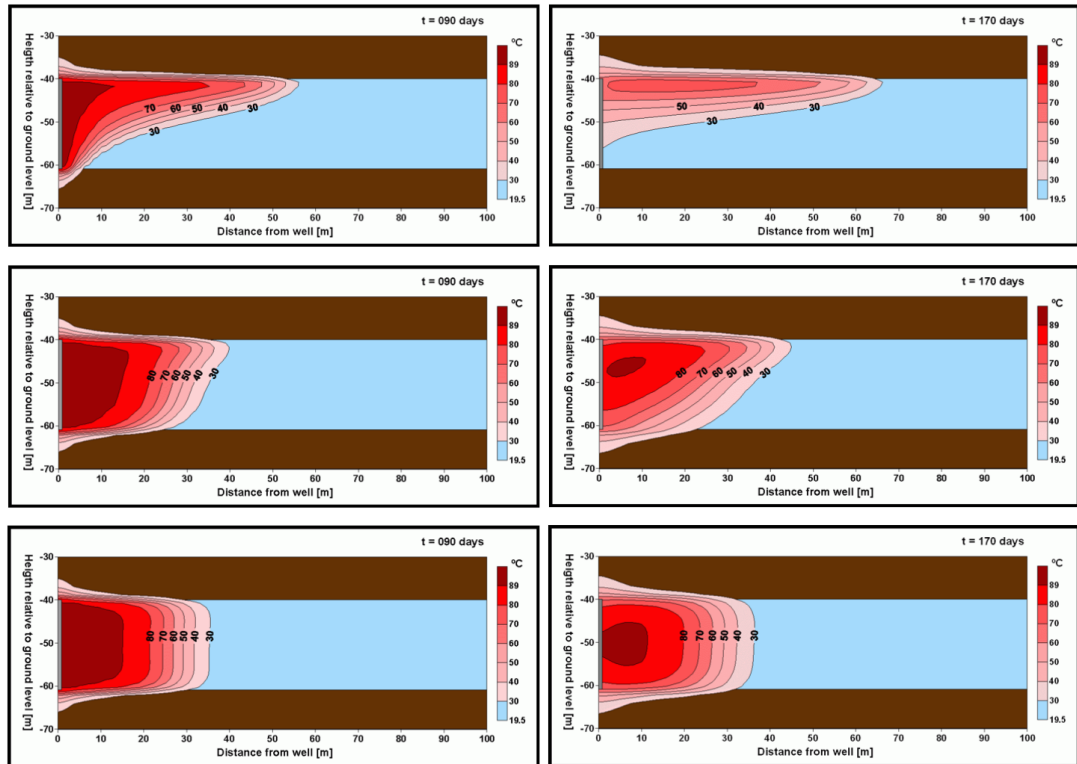
#### A: Aanwezigheid afsluitende kleilaag boven het opslagpakket

Eerdere warmteopslagprojecten laten zien dat het essentieel is dat er een afsluitende kleilaag boven het opslagpakket aanwezig is. Een goed afsluitende kleilaag zorgt namelijk voor een beter terugwinrendement voor de HTO, doordat het voorkomt dat het geïnfiltreerde warme water naar ondiepere lagen kan stromen. Daarnaast dempt een kleilaag de effecten van warmteopslag naar ondiepere bodemlagen. Het belang van de aanwezigheid van een goed afsluitende kleilaag is hoog om een HTO op een succesvolle manier te bedienen.

#### B: Terugwinrendement van het HTO-systeem

De ondergrond als opslagmedium faciliteert opslag van warmte op grote schaal en over lange tijdsperiodes (seizoenen). Echter, doordat de opslagtemperatuur bij HTO (-50 - 90°C) duidelijk hoger is dan de natuurlijke temperatuur van de ondergrond (12 - 15 °C), zullen warmteverliezen naar de omgeving optreden. Daardoor is de hoeveelheid warmte die uit het HTO-systeem wordt teruggewonnen geen 100% van de opgeslagen warmte. Het terugwinrendement is het percentage warmte dat wordt teruggewonnen ten opzichte van de hoeveelheid opgeslagen warmte (berekend per opslag-terugwincyclus). Met name het proces van warmte-opdrijving in het opslagpakket heeft een sterke invloed op het terugwinrendement van een HTO-systeem (zie Figuur 3.1). Er zijn een aantal ondergrondse parameters die grip hebben op dit proces en daarmee ook het terugwinrendement en de potentie van HTO in belangrijke mate bepalen, zoals de dimensies en eigenschappen van het opslagpakket, maar ook de aanwezigheid van een kleilaag aan de onderkant van het opslagpakket spelen een belangrijke rol. Bij het uitdrukken van de algehele potentie van HTO op een locatie dient daarom rekening gehouden te worden met deze factoren. Bij eerdere studies naar de ondergrondse potentie voor HTO werd vooral gekeken naar het haalbare debiet (zie criterium C) en werd het criterium rendement in beperkte mate meegewogen. In deze studie spelen risico's op rendementsverliezen een grote rol in de bepaling van de HTO potentie.





Figuur 3.1. Drie scenario's van thermisch transport in het opslagpakket bij toepassing van HTO (a, b, c) waarin drie verschillende maten van oprijving zichtbaar zijn (Schout, Drijver, Gutierrez-Nieri & Schotting, 2014<sup>4</sup>). Het opslagpakket is weergegeven in blauw en de kleilagen erboven/eronder in bruin. Aan de linkerkant van elk figuur is het bronfilter te zien (tussen 40-60 m diepte). In het bovenste scenario is de mate van oprijving van warmte in het opslagpakket zeer groot, zowel tijdens de opslag van warmte (links) als tijdens het terugwinnen ervan (rechts). Met name bij het terugwinnen (rechts) is goed zichtbaar dat er onder in de bronfilters koud grondwater wordt onttrokken, terwijl er boven in het opslagpakket warm water achterblijft, dat niet wordt teruggewonnen. Dat zorgt samen voor een lagere hoeveelheid teruggewonnen warmte en een laag terugwinrendement. In het middelste scenario is de mate van oprijving van warmte kleiner en in het onderste scenario treedt dit proces vrijwel niet op en mag een hoog terugwinrendement worden verwacht. Parameters zoals de doortatendheid en dikte van het opslagpakket zijn bepalend voor de mate van oprijving die optreedt.

### C: Maximale capaciteit per HTO-doublet

Voor HTO is het noodzakelijk dat er een geschikte zandlaag in de ondergrond aanwezig is, waaruit grondwater kan worden verpompt ten behoeve van warmteopslag. Dit criterium kan worden uitgedrukt in het maximale debiet (in m<sup>3</sup>/uur) dat per doublet van HTO-putten kan worden behaald. De eigenschappen van het opslagpakket zijn hierin sterk bepalend, en dan met name de dikte en doortatendheid van het opslagpakket. Let op: een lage maximale capaciteit per HTO-doublet wordt vanuit de ondergrond niet als showstopper gezien, omdat er simpelweg meerdere doubletten kunnen worden gemaakt om het gewenste debiet te halen. Maar omdat dit extra kosten met zich mee brengt voor de aanleg is de capaciteit, die bepaald wordt door de bodem, hier wel meegenomen.

<sup>4</sup> Schout, G., Drijver, B., Gutierrez-Nieri, M., Schotting, R. (2014). Analysis of recovery efficiency in high-temperature aquifer thermal energy storage: a Rayleigh-based method. *Hydrogeology Journal*, 22, 281-291.

### 3.2 SCOPE, DATA EN ONZEKERHEID

#### Scope: HTO potentie in de formatie van Maassluis

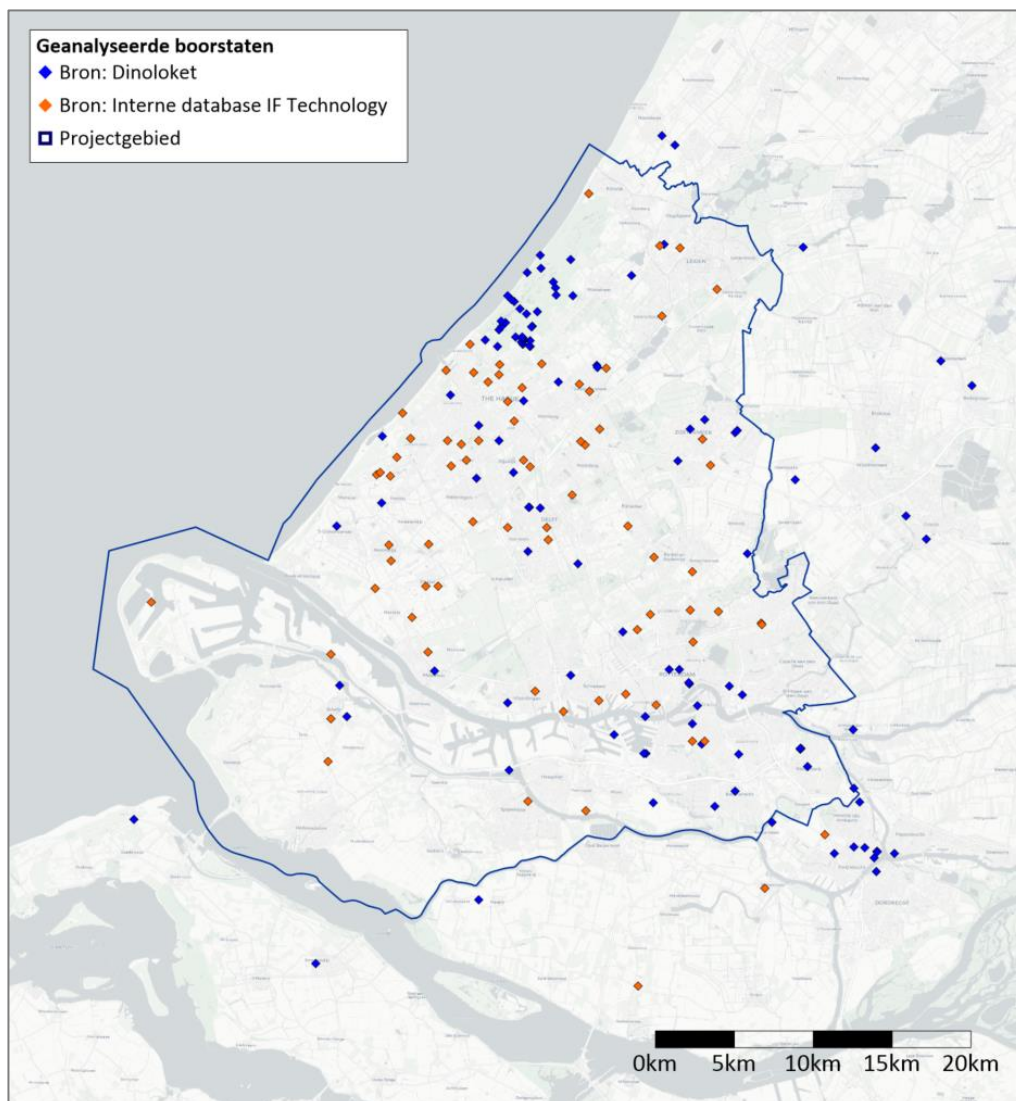
In deze studie is de ondergrondse potentie in kaart gebracht voor toepassing van HTO in de formatie van Maassluis. Voor het in kaart brengen van de ondergrondse potentie van HTO over het grote studiegebied zijn een groot aantal boringen nodig. De ondergrondse potentie hangt immers sterk af van de ondergrondse eigenschappen. Tot een diepte van circa 100 m-mv zijn grofzandige lagen aanwezig in het studiegebied, die suboptimaal zijn voor de toepassing van Hoge Temperatuur Opslag, omdat HTO hierin gevoelig is voor warmte-opdrijving, met grote warmteverliezen tot gevolg (zie criterium B in 3.1). Tegelijkertijd zijn er maar weinig boringen die dieper reiken dan 200 m diepte, waardoor het karteren van diepere formaties (zoals de formatie van Oosterhout) niet in voldoende detail kan plaatsvinden. De formatie van Maassluis bevindt zich in het studiegebied van de RES op een diepte van circa 100 - 250 m-mv en in de provincie zijn voldoende boringen gedaan die deze formatie gedeeltelijk aanboren of zelfs volledig doorboren. De formatie van Maassluis bevat zand met een doorlatendheid die goed past bij HTO: het is voldoende doorlatend om bevredigende debieten te leveren, maar blijft voldoende laag om grote rendementsverliezen te beperken (balans tussen criteria B en C, zie 3.1). Om deze redenen is de scope gesteld om de HTO-potentie specifiek in de formatie van Maassluis in kaart te brengen.

#### Gebruikte bodeminformatie

Voor de potentiekaarten is bodeminformatie gebruikt die hoofdzakelijk afkomstig is uit twee typen bronnen. Allereerst is gebruikgemaakt van publiek toegankelijke bronnen zoals Dinoloket, REGIS II en boringen die bij het bevoegd gezag konden worden opgevraagd. Daarnaast is een beroep gedaan op de database en het archief van IF Technology. De kaart van Figuur 3.2 laat zien dat de toevoeging van de (niet-publieke) data van IF Technology belangrijk is geweest om 'blinde vlekken' in het studiegebied beter op te vullen.

#### Onzekerheid

Eerdere projecten hebben laten zien dat de potentie van een HTO-systeem sterk afhankelijk is van de eigenschappen van de ondergrond. Er zijn vele WKO-systemen in de formatie van Maassluis gerealiseerd in dit studiegebied, die een relatief grote variabiliteit in diepte, dikte en kleigehalte laten zien binnen de formatie van Maassluis. Juist deze parameters zijn erg bepalend voor de HTO potentie. De opgeleverde potentiekaarten kunnen weliswaar een algemeen beeld geven van de ondergrondse kansen voor HTO, maar deze bevat onzekerheden. Vanwege de gevoeligheid van een HTO-systeem voor de lokale bodemeigenschappen, is de belangrijkste 'Lesson Learned' uit voormalige projecten om een proefboring uit te voeren en daarmee voorafgaand aan het HTO-ontwerp een detailbeeld van de ondergrondse eigenschappen te krijgen. Een meer uitgebreide toelichting op de onzekerheden rondom de potentiekaarten is opgenomen in Bijlage 1.



Figuur 3.2. Kaart van het studiegebied met daarin de locaties waar bodeminformatie beschikbaar is vanuit publieke data (blauw) en de interne database van IF Technology (oranje).

### 3.3

#### POTENTIEKAARTEN

##### De twee hoofdkaarten

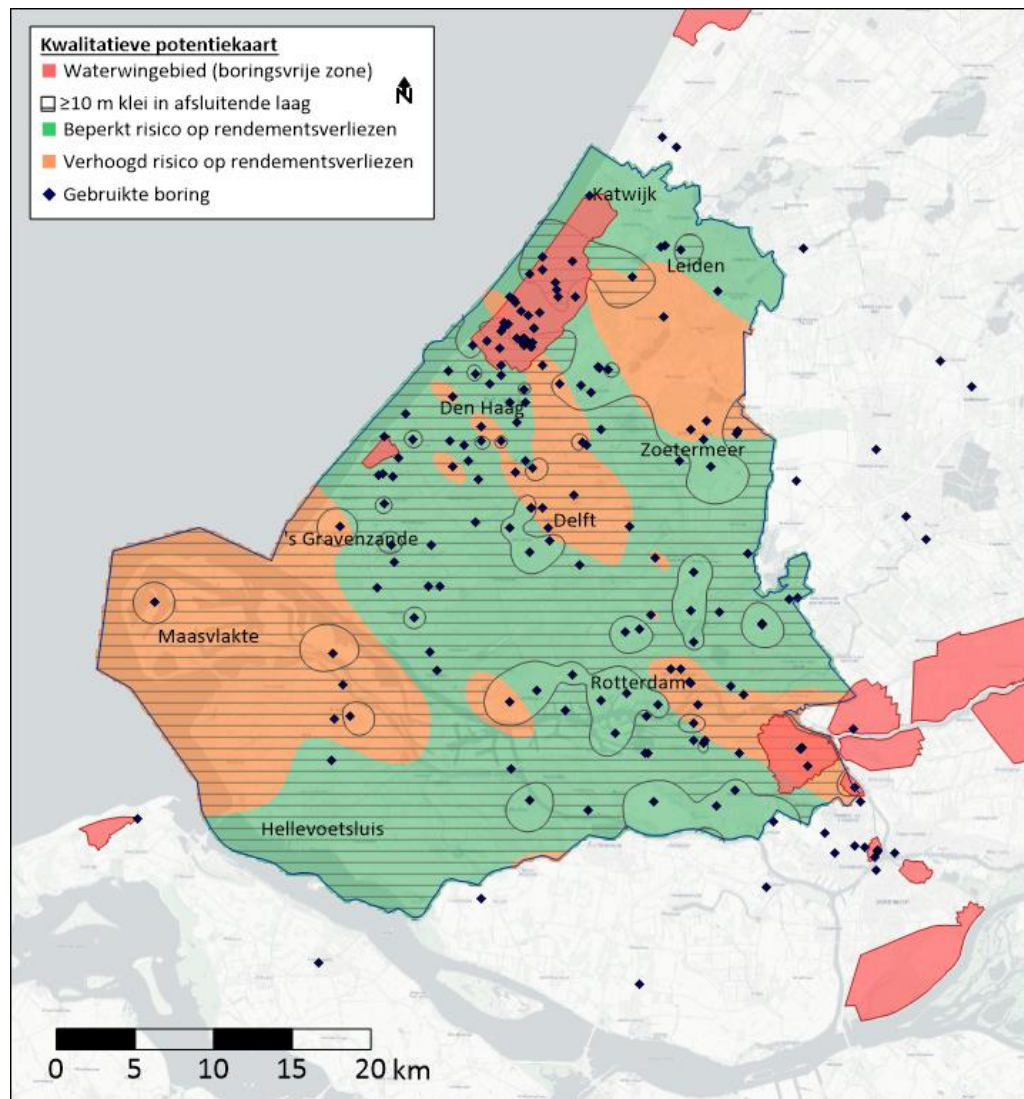
Er zijn twee specifieke kaarten opgesteld, beide toegespitst op de Formatie van Maassluis:

- **HTO Potentiekaart:** Dit is de belangrijkste kaart die wordt opgeleverd in deze studie en die als primaire kaart gebruikt moet worden. Het is een kwalitatieve kaart die in één oogopslag een beeld geeft van de ondergrondse potentie voor HTO in de formatie van Maassluis in het studiegebied, rekening houdend met de belangrijkste criteria;
- **HTO Debietkaart:** Dit is een aanvullende kaart die een inschatting geeft van het haalbare debiet ( $\text{m}^3/\text{uur}$ ) dat per HTO-doublet kan worden behaald.

De kaarten zijn hieronder toegelicht en in Bijlage 1 is de uitgebreide beschrijving opgenomen van hoe deze kaarten zijn opgesteld.

### 3.3.1 HTO Potentiekaart

De HTO Potentiekaart (Figuur 3.3) is een kwalitatieve kaart die per locatie toont of de ondergrondse ingrediënten wel of niet aanwezig zijn voor een succesvol HTO-project. De ondergrondse potentie voor HTO in de Formatie van Maassluis in het projectgebied is bepaald op basis van de bodemeigenschappen uit de gebruikte boringen, en een beoordeling op (een combinatie van) criteria A, B en C (zie hoofdstuk 3.1). Hieronder zijn de aspecten van de kaart nader toegelicht.



Figuur 3.3 | HTO Potentiekaart (kwalitatief) van de Formatie van Maassluis. Op deze kaart zijn een aantal belangrijke factoren weergegeven die bepalend zijn voor de HTO potentie vanuit de ondergrond. Waterwingebieden zijn showstoppers: in deze gebieden zijn boringen niet toegestaan. De gebieden waar op basis van de boringen een voldoende dikke kleilaag aanwezig lijkt te zijn boven de formatie van Maassluis, zijn gearceerd. Plekken zonder arcering leveren een risico op dit punt. Het risico op grote rendementsverliezen wordt als beperkt (groen) of verhoogd (oranje) weergegeven, afhankelijk van de dikte van het opslagpakket. De hoogste potentie voor HTO ligt dus in de groene gearceerde gebieden.

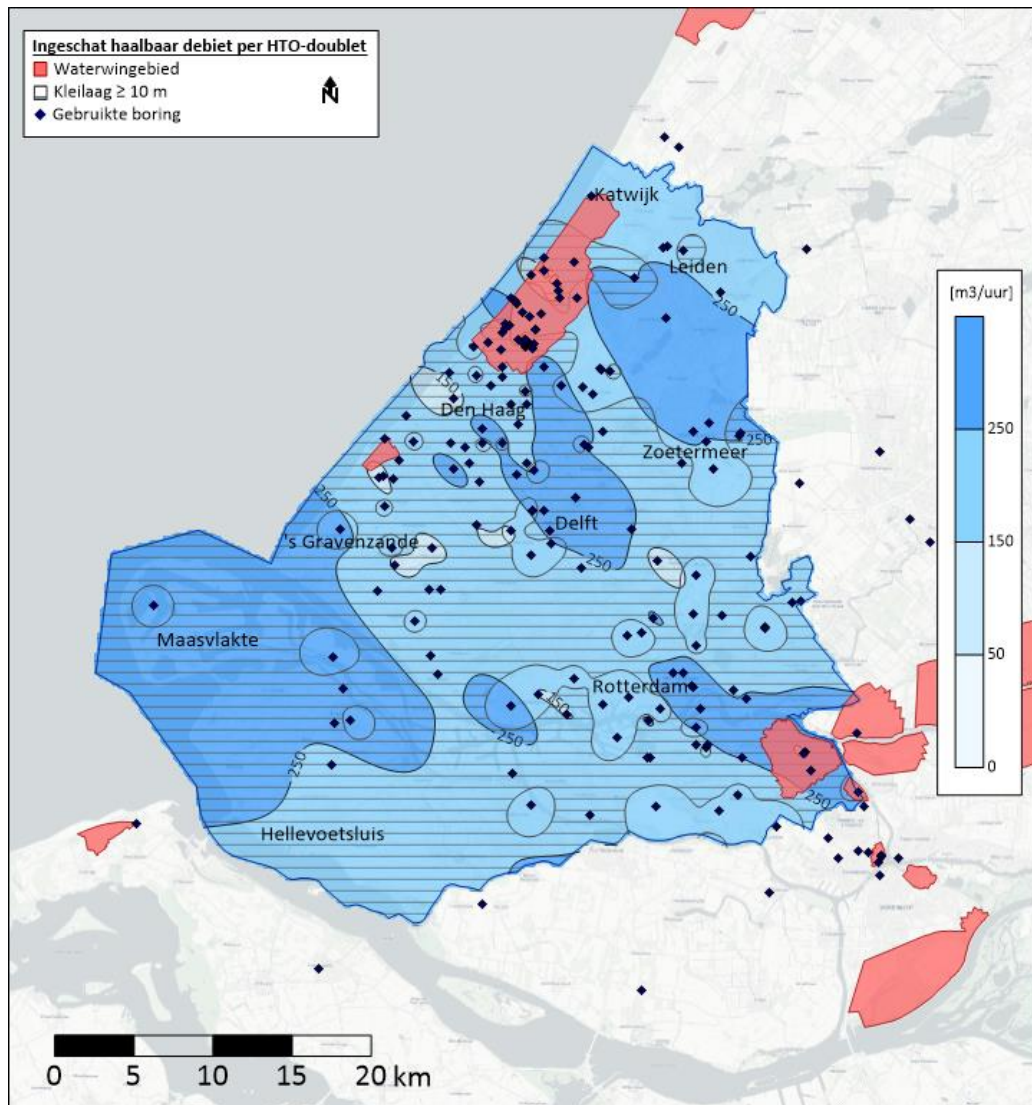
In de kaart zijn de volgende factoren weergegeven, die ieder mede bepalend zijn voor de ondergrondse potentie voor toepassing van HTO:

- Waterwingebied: In deze gebieden is het vanuit juridisch oogpunt niet mogelijk om te boren, en dus ook niet om HTO toe te passen. Deze showstopper is daarom toegevoegd aan de kaart (rood);
- Afsluitende kleilaag: de kleilaag boven een HTO opslagpakket dient voldoende dik te zijn om te voorkomen dat de opgeslagen warmte verloren gaat naar ondiepere lagen. De plekken waar aan de bovenkant van de formatie van Maassluis een goed afsluitende laag wordt verwacht ( $\geq 10$  m klei in de 20 m bodem die zich direct boven het opslagpakket bevindt), is aangegeven met arcering en deze plekken scoren dus goed op dit criterium. Op plekken waar deze arcering niet aanwezig is, heerst een risico m.b.t. dit criterium.
- Rendementsverlies: het zandpakket dat als opslagpakket dient, moet de juiste dikte hebben. Deze moet niet te dun zijn, want dat biedt een laag debiet per bron (criterium C). Tegelijkertijd mag de dikte ook niet te groot worden, want dat maakt het opslagpakket gevoelig voor grote warmteverliezen door opdrijving (criterium B). De gebieden waarvoor in de Formatie van Maassluis een geschikte dikte wordt verwacht om te voldoen aan zowel criterium B als C, zijn groen gekleurd in de potentiekaart. De overige gebieden zijn oranje. Voor alle oranje gebieden geldt dat de dikte van het zand in de formatie van Maassluis dusdanig groot is, dat er een risico heerst op grote rendementsverliezen door opdrijving van warmte, wat de HTO-potentie verlaagt.

Verder bevat de kaart de locaties van de gebruikte boringen. Daarmee wordt ook zichtbaar hoeveel datapunten er gebruikt zijn om de scoring te onderbouwen. Op plekken met een lage punt dichtheid of een grote variatie tussen nabijgelegen datapunten moet rekening worden gehouden met de grotere onzekerheid die daarbij komt kijken (zie ook Bijlage 1).

### 3.3.2 HTO Debietkaart

De Debietkaart is een kwantitatieve kaart die voor het studiegebied inzicht geeft in de haalbare broncapaciteit (of debiet) per doublet, uitgedrukt in  $\text{m}^3/\text{uur}$  (zie Figuur 3.4). Naast het debiet worden ook de Waterwingebieden en het criterium van de bovengelegen kleilaag weergegeven.



Figuur 3.4 HTO Debietkaart: minimale haalbare debieten per HTO-doublet in de formatie van Maassluis, in m<sup>3</sup>/uur. De aandachtspunten uit de kwalitatieve kaart zijn op de kaart weergegeven.

Het haalbare debiet op de kaart is berekend op basis van de NVOE-onttrekkingsnorm (NVOE, 2001). Die norm is opgesteld om risico's op putverstopping door deeltjesproductie te voorkomen en schrijft voor dat het maximale debiet dat uit een bron kan worden onttrokken wordt bepaald door de dikte en doorlatendheid van het opslagpakket. Voor het gehele studiegebied is voor de doorlatendheid een waarde van 12 m/d gehanteerd (bij de natuurlijke grondwatertemperatuur), op basis van beschikbare pomp- en stopproeven. De dikte van het opslagpakket die is gebruikt om het debiet te bepalen varieert per locatie. Een uitgebreide beschrijving van de rekenmethode voor de debieten is opgenomen in Bijlage 1.

### 3.3.3 Vergelijking van de Potentiekkaart (Figuur 3.3) met de Debietkaart (Figuur 3.4).

NB: Het is belangrijk om te realiseren dat de potentie voor succesvolle toepassing van HTO niet alleen maar afhangt van het debiet dat per doublet kan worden behaald. Immers, dat zou

betekenen dat een grotere dikte direct leidt tot meer succesvolle HTO, maar dan wordt de negatieve invloed die een grote dikte van het opslagpakket heeft op het terugwinrendement volledig genegeerd. Een opslagpakket met een dikte van 15 - 30 m wordt hier als zeer geschikt beschouwd omdat het een optimale balans heeft tussen rendement (criterium B) en capaciteit (criterium C). Grotere diktes geven een duidelijk groter risico op grote rendementsverliezen (gegeven de orde grootte van de doorlatendheid in de formatie van Maassluis). Op locaties waar de boring een zandlaag binnen de formatie van Maassluis laat zien van 15 - 30 m dik, met klei aan de boven- en onderkant die als afsluiting van die zandlaag mag worden beschouwd, is de betreffende dikte gehanteerd om het debiet te berekenen. Dit is ook het geval als er dieper in de formatie van Maassluis (onder de onderliggende kleilaag) nog meer zand wordt aangetroffen. Let op: Door deze definitie zijn juist de gebieden waarin de debietkaart lage waardes laat zien (50 - 250 m<sup>3</sup>/h per doublet, zie Figuur 3.4) de gebieden die op de kwalitatieve kaart groen scoren (Figuur 3.3). Hoewel er op die plaatsen wellicht meerdere doubletten nodig zijn om het gewenste totale debiet te behalen (hogere investeringskosten), blijven de (lange termijn) risico's m.b.t. het rendement duidelijk beperkter, en aan dit lange termijn rendementsvoordeel is een zwaardere weging toegekend in de kwalitatieve kaart (Figuur 3.3).

### 3.4 INTERPRETATIE VAN DE KAARTEN

Op basis van de HTO Potentiekaart (Figuur 3.3) en de HTO debietkaart (Figuur 3.4) is voor een aantal steden en regio's een beschrijving gegeven van de ondergrondse potentie voor HTO. De HTO Potentie of het Debiet die in kaart zijn gebracht worden gekenmerkt door een bepaalde mate van onzekerheid. De bodemopbouw en -eigenschappen in de formatie van Maassluis zijn variabel en kunnen lokaal sterk verschillen. Om die reden is het raadzaam om voor een HTO-project altijd op lokaal niveau nader onderzoek naar de bodemopbouw uit te voeren middels een proefboring. De kaarten maken het wel mogelijk om een algemeen beeld te verkrijgen van de kansen voor HTO in het gehele studiegebied. Hieronder wordt duiding van de kaarten gegeven.

#### Algemeen

Over het algemeen laat de Potentiekaart (Figuur 3.3) zien dat de formatie van Maassluis in grote delen van het studiegebied aan de bovenkant wordt afgesloten door een goed afsluitende kleilaag. Alleen aan de noordkant van het studiegebied geven verschillende boringen aan dat het risico bestaat dat de kleilaag hier een beperkte dikte heeft. Verder valt op dat in de omgeving Rotterdam een sterk wisselend beeld heerst over de afsluitende kleilaag, wat ervoor zorgt dat de interpolatie een zekere onzekerheid met zich meeneemt. Verder kleuren grote delen van de kaart groen, wat aangeeft dat er binnen de formatie van Maassluis op veel plekken een opslagpakket is gevonden met een dikte die in het optimale bereik valt (15 - 30 m). De oranje plekken op de Potentiekaart laten een risico op rendementsverlies zien, dat zijn wortels vindt in de grote dikte van de zandlaag en de mogelijke afwezigheid van lokale kleilaagjes binnen het zand. Op deze plekken is HTO mogelijk goed haalbaar, maar verdient het kijken naar de bodemopbouw en het onderzoeken van lokale kleilaagjes binnen de formatie extra aandacht. Voor deze oranje plekken is op de Debietkaart (Figuur 3.4) dan weer een hoger debiet per doublet te zien.

#### Delft

In het grootste gedeelte van Delft wordt de Formatie van Maassluis afgedekt door een voldoende dikke kleilaag. Het ingeschatte debiet is hoog, wat aangeeft dat de zandlagen relatief dik zijn met mogelijk weinig tussengelegen kleilaagjes. Vanwege het risico op rendementsverliezen is het

raadzaam om bij HTO-projecten in Delft aandacht te schenken aan het identificeren van lokale kleilaagjes in deze formatie, die mogelijk als onderkant van het opslagpakket kunnen dienen.

### **Den Haag**

De ondergrond in Den Haag lijkt op basis van de kaarten goed geschikt voor HTO. In het grootste gedeelte van Den Haag wordt de Formatie van Maassluis afgedekt door een voldoende dikke kleilaag. Ook de dikte van het opslagpakket valt op vele plekken in het optimale bereik (15 - 30 m). Er zijn naar verwachting hoge debieten haalbaar. Boren is niet in de gehele gemeente toegestaan: aan de noordzijde ligt een waterwingebied (boringsvrije zone).

### **'s Gravenzande**

In het grootste gedeelte van 's Gravenzande wordt de Formatie van Maassluis afgedekt door een voldoende dikke kleilaag. De noordkant van de gemeente laat een goede dikte van de opslagpakketten zien, waardoor rendementen in het 'groene' bereik vallen. Het zandpakket is in het zuiden van de gemeente relatief dik, waardoor er een risico op rendementsverlies bestaat dat nader aandacht vraagt in HTO-projecten. Er zijn geen verbodsgebieden in de buurt.

### **Hellevoetsluis**

De datadichtheid in dit gebied is zeer laag, waardoor er een grote onzekerheid hangt aan de resultaten van de kaart in dit gebied. Er is locatie-specifiek onderzoek nodig om de potentie voor HTO in deze regio beter te kunnen beoordelen. Wel mag op basis van de geologie verwacht worden dat hier ook de formatie van Maassluis aanwezig is met grote dikte en dus potentieel hoog debiet. De criteria afsluitende kleilaag en risico op rendementsverlies zijn hier moeilijk te beoordelen.

### **Katwijk**

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 m<sup>3</sup>/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.

### **Leiden**

De kleilaag die de Formatie van Maassluis afdekt lijkt in de omgeving van Leiden een beperkte dikte te hebben en dit levert hier risico's op voor toepassing van HTO in deze formatie. Rondom Leiden is nader onderzoek naar deze kleilaag essentieel en daarnaast moet ook gekeken worden naar toepassing van HTO in andere formaties. Mocht er lokaal wel voldoende afsluitende kleilagen worden gevonden, dan lijken de zanden van Maassluis wel te kunnen voorzien in een aanzienlijk debiet. Richting Wassenaar en Katwijk dient rekening te worden gehouden met de boringsvrije zone rondom het Waterwingebied.

### **Maasvlakte**

De datadichtheid van diepe boringen die de formatie van Maassluis gedeeltelijk of geheel doorboren is relatief laag bij de Maasvlakte en langs het Rotterdamse Havengebied. Dat maakt dat resultaten van de kaarten relatief onzeker zijn. Op basis daarvan is het advies om voor HTO-projecten (zeker op industriële schaal) nader bodemonderzoek uit te voeren middels proefboring.



Op basis van de beschikbare boringen is de inschatting dat de kleilaag die de Formatie van Maassluis afdekt in het grootste gedeelte van het gebied dik genoeg is. Er worden hoge debieten aangegeven in de debietkaart, wat gewenst is gegeven de grote industriële activiteit in deze regio. De kaart geeft aan dat er risico's zijn voor rendementsverliezen, maar voor deze specifieke regio is daarbij een kanttekening te maken. Voor de toepassing van HTO geldt: 'Bigger is better'. Des te groter een HTO-systeem is, des te lager de gevoeligheid voor grote rendementsverliezen. De industrie is bij uitstek een sector waar grote hoeveelheden restwarmte wordt geproduceerd die kan worden opgeslagen met HTO, met kleinere gevoeligheid voor rendementsverliezen tot gevolg. Het ligt voor de hand om in dit gebied nader onderzoek uit te voeren naar HTO, en een duidelijker beeld te scheppen van de mogelijke positieve bijdrage die industriële (rest)warmte via HTO kan leveren aan de warmtevoorziening, door betere benutting van restwarmte. Er gelden hier geen boorrestricties. Er lijken hoge debieten haalbaar per HTO doublet.

### Rotterdam

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

#### 3.4.1 Door wie worden deze kaarten gebruikt?

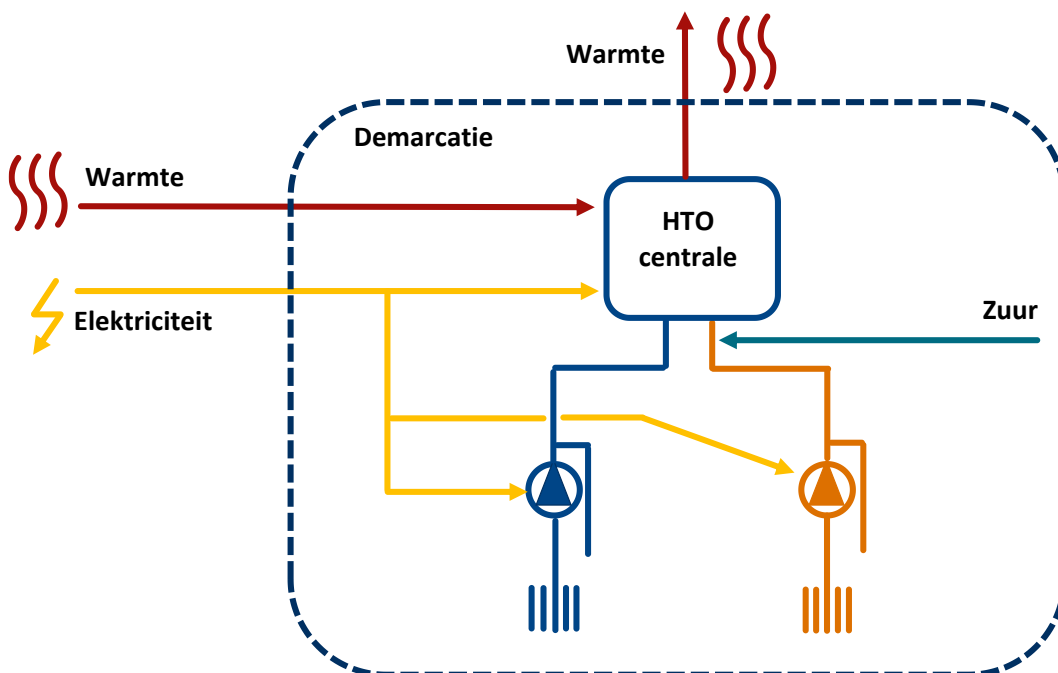
De kaarten zijn opgesteld voor gebruik door de Samenwerkingsstructuur RES Rotterdam Den Haag, Invest-NL EBN en Gasunie, en stakeholders in de omgeving Leiden, met als doel de vormgeving van de optimale inzet en verdeling van regionale warmte. De HTO potentiekaart geeft verschillende partijen, zoals overheden, warmtebedrijven en aardwarmte-operators een eerste beeld van de ondergrondse kansen voor warmteopslag in de formatie van Maassluis. Met name in de gebieden met hoge scores is het belangrijk dat deze partijen weet hebben van de kansen die HTO biedt in de verduurzaming van de warmtevoorziening. Wel geldt voor HTO altijd het advies om in groter detailniveau en met meer lokale informatie te kijken naar de kansen voor HTO op een specifieke projectlocatie.

De kaarten zijn opgebouwd uit een aantal onderliggende kaartlagen, waarin ook bodeminformatie is opgenomen. Bij berekeningen aan de financiële kosten van een HTO-systeem is het raadzaam om deze onderliggende bodeminformatie te benutten (zoals diepte), zodat de bodemparameters die invloed hebben op de kosten van HTO ook worden meegenomen en ruimtelijk in kaart kunnen worden gebracht. De bovenstaande kaarten bieden namelijk alleen een beeld van de ondergrondse haalbaarheid voor HTO. Zo'n financiële analyse op basis van bodeminformatie zou een extra financieel beoordelingscriterium bieden dat voor initiatiefnemers van HTO relevant is.

## 4 Duurzaamheid en kosten

Dit hoofdstuk behandelt de duurzaamheid en de kosten van HTO. In Bijlage 2 staat een meer uitgebreide omschrijving.

In Figuur 4.1 is het HTO systeem en de gehanteerde demarcatie bij het bepalen van de kosten en duurzaamheid weergegeven.



Figuur 4.1 Demarcatie HTO-systeem

### 4.1 DUURZAAMHEID HTO

De CO<sub>2</sub>-uitstoot van teruggeleverde warmte met HTO ligt in de doorgerekende cases tussen de 9,4 en 27,0 kg CO<sub>2</sub> per teruggeleverde GJ warmte (exclusief eventuele warmtepomp). Vergeleken met warmte geleverd door een gasketel (63 kg CO<sub>2</sub>/GJ) is dat een reductie tussen de 57 en 85%. Om aan de streefwaarde voor warmtenetten in 2030 te voldoen (klimaatakkoord: 18,9 kg CO<sub>2</sub>/GJ & warmtewet: 25 kg CO<sub>2</sub>/GJ), is het van belang dat de opgeslagen warmte zo duurzaam mogelijk is en dat het terugwinrendement voldoende hoog is.

#### Analyse

Voor het bepalen van de duurzaamheid van HTO is gekeken naar de hoeveelheid CO<sub>2</sub>-uitstoot per teruggeleverde GJ aan warmte tijdens exploitatie (specifieke CO<sub>2</sub>-uitstoot HTO, in kg CO<sub>2</sub>/GJ). Deze is gedefinieerd als:

$$\text{Specifieke CO}_2 \text{ uitstoot HTO} = \frac{\text{CO}_2 \text{ uitstoot elektriciteit} + \text{CO}_2 \text{ uitstoot opgeslagen warmte}}{\text{Teruggeleverde warmte HTO}}$$

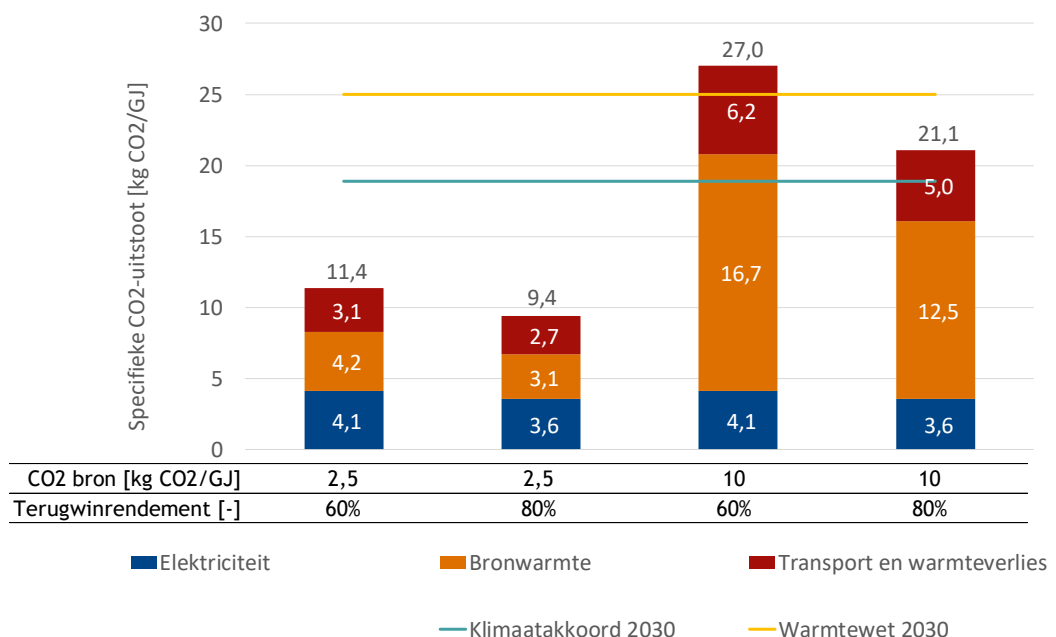
$$\text{Geleverde warmte HTO} = \text{Ontladen warmte HTO} - \text{warmteverlies}$$

De duurzaamheid hangt af van de duurzaamheid van de opgeslagen warmte en van de gebruikte elektriciteit, en de energie die het kost om de warmte uit het HTO-systeem terug te winnen.

Indirect hangt de duurzaamheid dus ook af van het terugwinrendement. Het terugwinrendement is de verhouding tussen de teruggeleverde en opgeslagen warmte. Bij een laag terugwinrendement moet meer warmte worden opgeslagen per teruggeleverde GJ aan warmte dan in geval van een hoog terugwinrendement.

De duurzaamheid hangt dus voor een groot deel af van zaken buiten de demarcatie van het HTO-systeem. In de Design Toolkit wordt de duurzaamheid van het gehele systeemconcept integraal doorgerekend. Ter illustratie is de duurzaamheid berekend voor een aantal cases. In de cases is gevarieerd met terugwinrendement (60 en 80%) en de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de bron (2,5 en 10 kg/GJ).

Figuur 4.2 geeft de resultaten weer. De gehanteerde uitgangspunten staan in Bijlage 2. De teruggeleverde warmte voldoet in een deel van de gevallen wel aan de doelstellingen uit het klimaatakkoord en warmtewet, maar niet in alle gevallen. De totale CO<sub>2</sub>-uitstoot wordt voornamelijk bepaald door de duurzaamheid van de opgeslagen warmte, in combinatie met het terugwinrendement. Wanneer het terugwinrendement laag is, zal deze ook significant bijdragen aan de CO<sub>2</sub>-uitstoot.



Figuur 4.2 Specifieke CO<sub>2</sub>-uitstoot per case

#### 4.2 KOSTEN HTO

De kosten van een HTO zijn afhankelijk van de omvang en de diepte. Voor de onderzochte cases liggen de investeringskosten tussen de 2,5 en 3,4 M€. De jaarlijkse exploitatiekosten zijn sterk afhankelijk van de kosten voor de opgeslagen warmte en liggen voor de onderzochte cases tussen de 400 en 900 k€/jaar. Deze kosten zijn ingeschat op basis van de huidige stand van zaken. HTO is

sterk in ontwikkeling. De verwachting is dat bij doorontwikkeling van deze techniek de kosten in de toekomst zullen dalen.

### Analyse

Om de investeringskosten te kunnen bepalen is de HTO onderverdeeld in een aantal hoofdcomponenten, namelijk:

- Proefboring
- Bronnen
- Bronpompen
- Technische ruimte
- Leidingwerk tussen bronnen en technische ruimte
- Ontwerp, advies en vergunningen
- Onvoorzien

De kosten per hoofdcomponent variëren van project tot project. Op basis van beschikbare data en kengetallen is per hoofdcomponent ingeschat hoe hoog de investeringskosten zijn. Voor meer detail wordt verwezen naar Bijlage 2. De investeringskosten (CAPEX) van een HTO kan worden ingeschat door de volgende formule:

$$CAPEX = 130\% * (\text{€ } 1.860 * \text{diepte}(m) + \text{€ } 5.050 * \text{debiet} \left(\frac{m^3}{h}\right) + \text{€ } 1.213.705$$

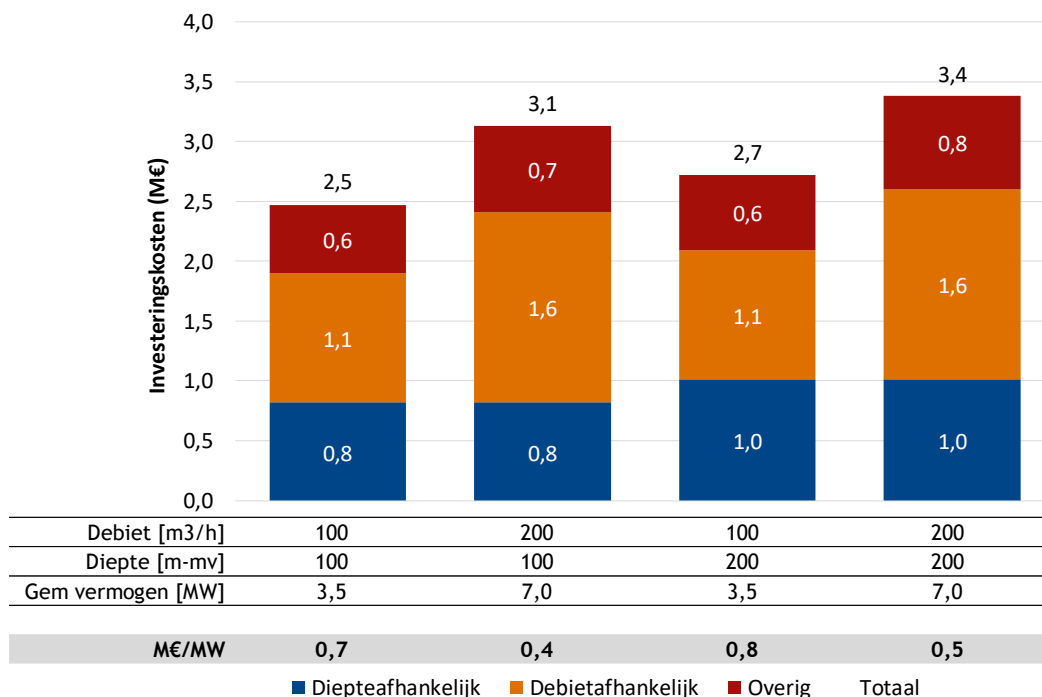
Op soortgelijke wijze als de investeringskosten zijn de exploitatiekosten ingeschat. De verschillende kostenposten zijn:

- Opgeslagen warmte
- Elektriciteitsverbruik
- Waterbehandeling
- Onderhoud en beheer bronnen
- Onderhoud en beheer bronpompen
- Onderhoud en beheer technische ruimte
- Monitoring & BRL
- Abandonneren (reservering)

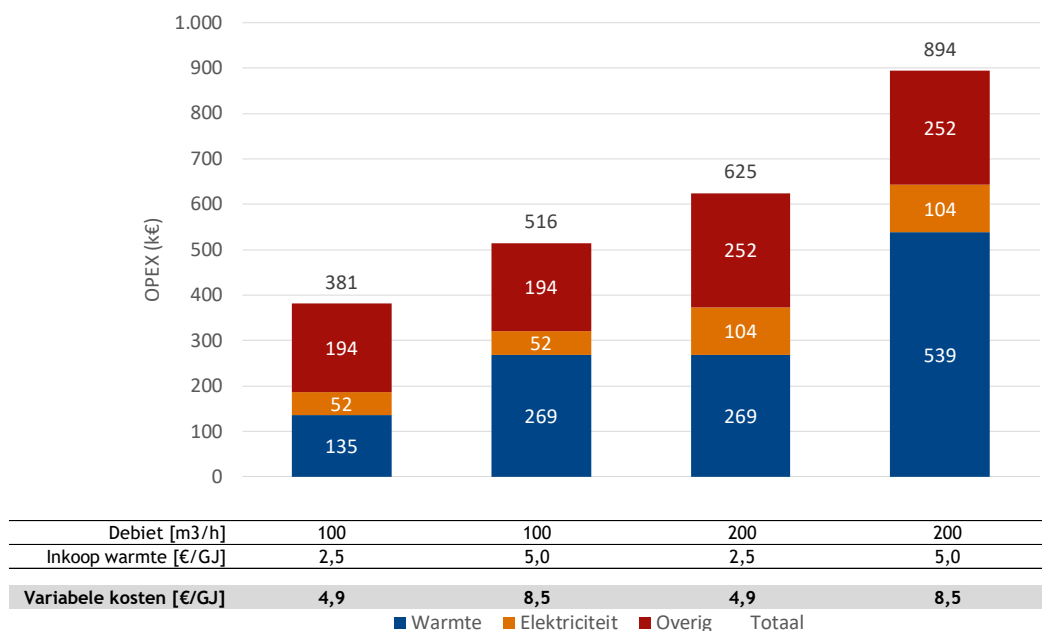
De exploitatiekosten (OPEX) kunnen ingeschat worden met de volgende formule:

$$OPEX = \text{€ } 134.646 + \text{€ } 424 * \text{debiet} \left(\frac{m^3}{h}\right) + (\text{€ } 0,28 + \text{kosten bronwarmte}) \\ * \text{opgeslagen bronwarmte (GJ)} + \text{elektriciteitstarief} * \text{elektriciteitsverbruik}$$

De uiteindelijke kosten kunnen pas berekend worden na het uitvoeren van een analyse in de Design Toolkit. Vanuit de analyse volgt namelijk, in interactie met de rest van het systeem, de omvang van het systeem, de hoeveelheid opgeslagen bronwarmte en het elektriciteitsverbruik. Ter illustratie zijn voor een aantal cases de investeringskosten en exploitatiekosten geraamd. Hierbij is bij de investeringskosten gevarieerd met de diepte (100 en 200 m-mv) en met het debiet (100 en 200 m<sup>3</sup>/h). Bij de exploitatiekosten is gevarieerd met het debiet (100 en 200 m<sup>3</sup>/h) en de kosten voor de inkoop van de opgeslagen warmte (2,5 en 5,0 €/GJ). Uitgangspunt in de cases is een HTO systeem met één doublet. De resultaten zijn gegeven in Figuur 4.3 en Figuur 4.4. Merk op dat de exploitatiekosten niet afhangen van de diepte.



Figuur 4.3 Investeringskosten per case, illustratief.



Figuur 4.4 Exploitatiekosten per case, illustratief. De exploitatiekosten zijn niet afhankelijk van de diepte.

#### 4.3 KOSTENREDUCTIE

HTO is een techniek waarbij nog relatief weinig ervaring is opgedaan. De verwachting is dat de kosten in de toekomst zullen dalen door innovaties, ervaring en standaardisatie en kennisopbouw van de bodem. Het is lastig om op dit moment een goede voorspelling te geven van de te verwachten kostenreductie. In bijlage 2 zijn een aantal mogelijkheden verder toegelicht.

## 5 Juridisch kader HTO

### 5.1 WET- EN REGELGEVING OMTRENT HTO

Binnen het WINDOW en WarmingUP project is in 2020 een Juridisch Achtergronddocument opgesteld. Deze is publiek beschikbaar via de website van WarmingUP:

<https://www.warmingup.info/documenten/window-fase-1---d1---juridisch-achtergronddocument.pdf>

Dit document bevat een overzicht van de wet- en regelgeving omtrent HTO. De belangrijkste bevindingen daarover zijn:

- Het wettelijke kader voor HTO tot 500 m-mv is vastgelegd in de Waterwet en onderliggende wetgeving (wijzigingsbesluit bodemenergiesystemen (WbBes), Waterregeling). De gedeputeerde staten van de provincies zijn bevoegd gezag.
- Vanaf 500 m-mv is de Mijnbouwwet van toepassing. Bevoegd gezag is het ministerie van Economische Zaken en Klimaat.
- Het wettelijk kader binnen de Waterwet (dus tot <500 m diepte) biedt voldoende ruimte om een vergunning te verlenen voor een HTO-systeem. Daarbij is een belangrijke randvoorwaarde dat het belang van de bescherming van de bodem zich daartegen niet verzet, en dat de ondergrond doelmatig wordt gebruikt. Het bevoegd gezag maakt de afweging.
- De Besluitvorming UitvoeringsMethode bodemenergie (BUM BE deel 1) bevat standaardvoorschriften die provincies kunnen gebruiken bij de vergunningverlening van Open Bodemenergiesystemen (OBES), veelal Warmte Koude Opslag (WKO). HTO kan niet voldoen aan twee standaardvoorschriften in de BUM: de maximale retourtemperatuur van 25 °C en de energiebalans in de ondergrond. De BUM stelt dat er van deze standaardvoorschriften mag worden afgeweken indien het een onderzoeksproject betreft, en dat HTO hier voorlopig ook onder valt. De termijn van 'voorlopig' is verder niet gespecificeerd.
- Het huidige wettelijke kader biedt voldoende ruimte om vergunning te verlenen voor HTO-projecten. Echter, hoe om te gaan met de wettelijke ruimte door het bevoegd gezag (binnen het huidige en toekomstige wettelijke kader) is niet vastgelegd, omdat er alleen standaardregels (BUM) zijn opgesteld voor OBES tot 25 °C.
- Het toekomstige wettelijke kader voor OBES is opgenomen in de Omgevingswet (Ow), die naar verwachting in 2024 in werking treedt. De wet vindt haar uitwerking in het Besluit activiteiten leefomgeving (Bal), waarin algemene regels voor OBES zijn opgenomen. Een belangrijk doel van de Ow is om maatwerk mogelijk te maken. Hoewel HTO niet in lijn is met de standaardregels voor OBES in het Bal, biedt de Ow ruime mogelijkheid aan het bevoegd gezag om HTO toe te staan via maatwerkvoorschriften en zodoende is HTO vergunbaar onder de Omgevingswet.

Tevens is in het Juridisch achtergronddocument samengevat welk beleid er per provincie reeds is gemaakt op het gebied van HTO. Daarnaast is ook gekeken naar een aantal bestaande HTO-vergunningen in Nederland en inzichtelijk gemaakt onder welke voorwaarden verschillende HTO-systemen zijn vergund.

In 2023 is het HTO onderzoeksprogramma WarmingUP GOO van start gegaan en daarin zal een herziene versie van het Juridische Achtergronddocument (2020) worden opgeleverd, waarin ook het juridische kader van HTO onder de Omgevingswet verder wordt uitgewerkt.

## 5.2 EEN AFWEGINGSKADER VOOR VERGUNNINGVERLENING HTO

De conclusie van het Juridisch Achtergronddocument was dat er voldoende ruimte bestaat in de Nederlandse wet- en regelgeving (Waterwet) om toepassing van HTO onder voorwaarden toe te staan. Er is dus wel ruimte voor HTO, maar de uitdaging bleek te zitten in hoe die ruimte wordt afgekaderd in de vergunning, wat veelal leidde tot een complexe vergunningprocedure. Welke zaken en risico's moet een initiatiefnemer van HTO in kaart brengen in zijn vergunningaanvraag? Hoe weegt een vergunningverlener die risico's af tegen de duurzame impact van een HTO-systeem? Welke voorwaarden en monitoringsvoorschriften moeten worden toegepast om de effecten en veiligheid rond het HTO-systeem effectief te monitoren en bijhouden?

Vanuit het WarmingUP consortium is in samenwerking met een aantal provincies een 'Voorlopig Afwegingskader vergunningverlening HTO' opgesteld dat antwoord biedt op deze vragen. Het afwegingskader bevat een soort handboek dat gebruikt kan worden bij de vergunningverlening van HTO-systemen door zowel initiatiefnemers als vergunningverleners. Het voorlopige kader is reeds publiek beschikbaar via de WarmingUP website:

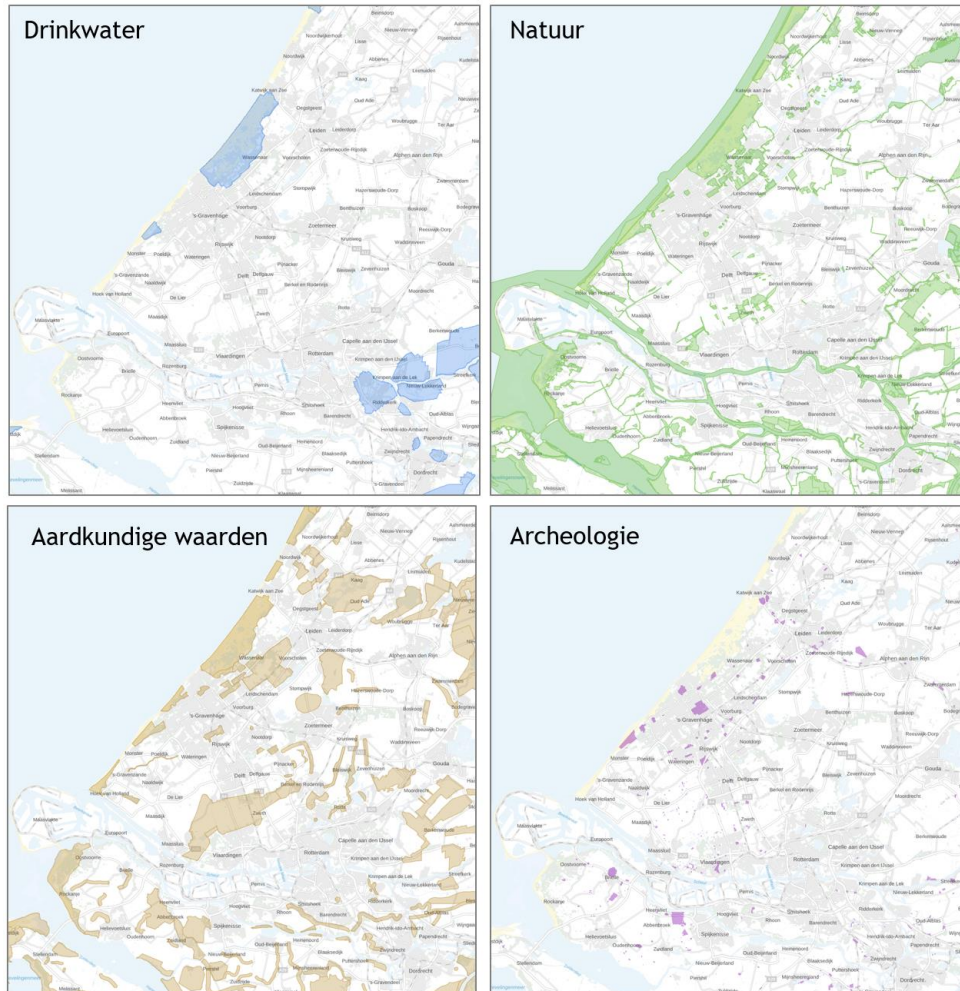
<https://www.warmingup.info/documenten/voorlopig-afwegingskader-vergunningverlening-hto-okt-2021.pdf>

Deze voorlopige versie wordt in 2023 in de praktijk getest bij een werkelijke vergunningaanvraag voor een beoogd HTO-systeem en het doel is om na evaluatie van dat proces een praktijkbeproeefde versie op te leveren binnen WarmingUP GOO.

## 5.3 BELEIDSRESTRICTIES VOOR TOEPASSING VAN HTO IN ZUID-HOLLAND

Op basis van beschikbare informatie uit de WKO-tool ([www.wkool.nl](http://www.wkool.nl)) is in Figuur 5.1 weergegeven welke aandachtsgebieden aanwezig zijn voor toepassing van Open Bodemenergiesystemen (waaronder WKO en HTO) in de provincie Zuid-Holland. Bij het aanvragen van een vergunning Waterwet voor een HTO-systeem moet rekening worden gehouden met deze aspecten. Voor Waterwingebieden bestaat het provinciale beleid dat hier geen OBES mogen worden toegepast. Voor zaken zoals aardkundige waarden en/of archeologie zijn vaak gemeentelijke regels opgesteld om deze belangen te beschermen. Naast de aandachtsgebieden dient ook rekening te worden gehouden met de grondwatergebruikers nabij de HTO-locatie. Het totale palet van aandachtsgebieden en de actuele omgevingsbelangen dient voor elk individueel HTO-project locatie-specifiek in kaart te worden gebracht.





Figuur 5.1 Aandachtsgebieden waar rekening mee moet worden gehouden bij het ontwikkelen van Open Bodemenergiesystemen (zoals WKO en HTO). Bron: [www.WKOtool.nl](http://www.WKOtool.nl).

## 6 Bijlagen

# Bijlage 1 Toelichting op Potentiekaarten HTO

## INTRODUCTIE

Er zijn twee kaarten opgeleverd, beide toegespitst op de Formatie van Maassluis:

- HTO Potentiekaart (kwalitatieve kaart)
- HTO Debietkaart (kwantitatieve kaart)

Deze kaarten zijn gemaakt op basis van boorbeschrijvingen van de projecten in en direct rondom het projectgebied.

De werkwijze wordt in de volgende paragrafen beschreven en bestaat uit de volgende stappen:

- Vaststellen benodigde informatie te bepalen o.b.v. boorbeschrijvingen
- Data verzamelen en selecteren
- Boorbeschrijvingen interpreteren
- Potentiekaarten opstellen

## HET GEBRUIK VAN REGIS VOOR INSCHATTING VAN HTO-POTENTIE

De succesvolle toepassing van HTO is sterk afhankelijk van de eigenschappen van de ondergrond. Het REGIS II model maakt het mogelijk om dwarsdoorsnedes te maken van de ondiepe ondergrond (tot ca 500 m) langs een gekozen lijn. Die dwarsdoorsnedes laat een geschematiseerde indeling van de ondergrond in zandige en kleiige lagen zien, middels geohydrologische eenheden zoals 'Formatie van Maassluis, eerste zandige eenheid' of 'Formatie van Maassluis, tweede kleiige eenheid'. Deze dwarsdoorsnedes zijn gebaseerd op een beperkt aantal boringen en daarom zitten er grote onzekerheden aan. Uit vergelijking van de dwarsdoorsnedes uit REGIS met recente boringen blijkt dat de bodemopbouw volgens REGIS niet goed overeenkomt met de werkelijkheid. Dat betekent dat het maken van potentiekaarten op basis van de bodeminformatie uit REGIS onnauwkeurig zal zijn. Om deze reden is er voor het maken van de potentiekaarten geen gebruik gemaakt van de bodemopbouw die voortkomt uit het REGIS II model. Als alternatief wordt een potentiekaart aangeboden die gebaseerd is op alle boringen die voor IF Technology beschikbaar waren uit publieke databases (Dinoloket, REGIS), aangevuld met een groot aantal boringen die IF Technology gedurende de afgelopen 34 jaar heeft verzameld in haar interne database (zie Figuur 3.2).

## VASTSTELLEN BENODIGDE INFORMATIE UIT BOORBESCHRIJVINGEN

Om de potentie voor succesvolle toepassing van HTO te bepalen, bezien vanuit de ondergrond, is inzicht nodig in verschillende ondergrondse eigenschappen. Dat wordt per kaart hieronder toegelicht.

### Benodigde data voor de HTO Potentiekaart (kwalitatieve kaart)

De ondergrondse potentie voor HTO in het projectgebied is weergegeven middels verschillende criteria. Per locatie wordt de score op een bepaald criterium weergegeven middels een bepaalde kaartlaag (bv. arcering, kleur). Daardoor wordt het mogelijk om in één kaart de scoring op

verschillende belangrijke (kwalitatieve) criteria te zien. De volgende criteria zijn opgenomen in de HTO Potentiekaart (Figuur 3.3):

1. De aanwezigheid van een **afsluitende kleilaag**.
  2. Het risico op grote mate van **rendementsverlies**: de aanwezigheid van een zandpakket met de geschikte dikte voor een HTO-project: niet te dun (te weinig opslagmogelijkheid) en niet te dik (te laag opslagrendement).
  3. Geen geldende **boorrestricties**, zoals waterwingebieden.
- Met kleuren of arcering is op deze kaart aangegeven wat de scoring op deze criteria is voor HTO.

#### 1. Afsluitende kleilaag

Om er zeker van te zijn dat de warmte die in het opslagpakket wordt opgeslagen niet naar ondiepere lagen kan stromen, is het belangrijk dat het pakket aan de bovenkant afgesloten wordt door een kleilaag. Per boring is bekeken waar het zand binnen de formatie van Maassluis begint, dat is de bovenkant van het opslagpakket. Vervolgens is gekeken hoeveel meter klei er is gevonden in de 20 meter bodem die zich direct daarboven bevindt. Bij minimaal 10 m klei wordt de bodem direct boven het opslagpakket als voldoende kleiig beschouwd om als afsluitende laag te kunnen fungeren, en op die plekken is de score op dit criterium goed (gearceerde gebieden).

#### 2. Risico op rendementsverlies: diktecriteria opslagpakket

Een opslagpakket met een dikte van 15 tot 30 m wordt voor de formatie van Maassluis als zeer geschikt beschouwd omdat het een optimale balans heeft tussen het rendement en de capaciteit van een HTO-doublet. Grotere diktes geven een duidelijk groter risico op grote rendementsverliezen (gegeven de doorlatendheid in deze formatie). Op locaties waar de boring een zandlaag binnen de formatie van Maassluis laat zien van 15 - 30 m dik, met klei aan de boven- en onderkant die als afsluiting van die zandlaag mag worden beschouwd, is deze betreffende dikte gehanteerd om het risico op rendementsverlies te bepalen. Dit is ook het geval als er dieper in de formatie van Maassluis nog meer zand wordt aangetroffen. Als er, gemeten vanaf de bovenkant van het opslagpakket, geen kleilagen in de boring werd aangetroffen die als onderliggende kleilaag kan dienen, dan loopt het opslagpakket net zo lang door totdat deze kleilaag wordt gevonden. Binnen de optimale range (15 - 30 m) scoort een opslagpakket groen op dit criterium, bij grotere diktes scoort deze oranje. Er zijn geen locaties gevonden waar de dikte van het opslagpakket kleiner was dan 15 m.

Let op: Door deze definitie zullen de gebieden die in de HTO Potentiekaart (Figuur 3.3) hoog scoren op het rendements-criterium, juist lager scoren in de HTO Debietkaart (Figuur 3.4). Hoewel er op die plaatsen wellicht meerdere doubletten nodig zijn om het gewenste totaaldebiet te halen, blijven de (lange termijn) risico's m.b.t. het rendement duidelijk beperkter, en aan dit rendementsvoordeel is een zwaardere weging toegekend in de kwalitatieve kaart (Figuur 3.3).

#### 3. Boorrestricties

Het is niet toegestaan te boren voor HTO in een waterwingebied. Deze gebieden zijn daarom weergegeven op de potentiekaarten. De waterwingebieden zijn gepresenteerd zoals te vinden op [www.wkotool.nl](http://www.wkotool.nl).

#### **Benodigde data HTO Debietkaart (kwantitatief)**

De debietkaart bevat een inschatting van de broncapaciteit die één HTO-doublet kan leveren. Het debiet wordt bepaald door een de NVOE-onttrekkingsnorm die de maximale stroomsnelheid op de boorgatwand voorschrijft om risico's van deeltjesproductie voor het systeem te beperken. De

maximale snelheid op de boorgatwand is volgens de norm afhankelijk van de eigenschappen van het opslagpakket (doorlatendheid). De berekening is hieronder stapsgewijs beschreven.

Het maximale debiet van één HTO-doublet ( $Q_{max}$ , m<sup>3</sup>/uur) is afhankelijk van twee factoren: de maximaal toelaatbare stroomsnelheid op de boorgatwand volgens de norm ( $v_{max}$ , m/uur) en de oppervlakte van de boorgatwand waardoor het water de put in stroomt.

$$Q_{max} = v_{max} * A_{put}$$

De  $v_{max}$  wordt in deze kaarten gebaseerd op de NVOE-onttrekkingsnorm voor Open Bodemenergiesystemen, die in het leven is geroepen om het risico op deeltjesproductie in de put (ten gevolge van te hoge stroomsnelheden op de boorgatwand) te voorkomen. Deze norm stelt dat de maximale darcy stroomsnelheid op de boorgatwand (in m/uur) bepaald wordt door de doorlatendheid van de formatie ( $K_h$ , in m/d) volgens de volgende relatie:

$$v_{max} = \frac{K_h}{12}$$

De oppervlakte van de boorgatwand ( $A_{bgw}$ ) ter hoogte van het bronfilter wordt bepaald door de straal van het boorgat ( $r$ , in meters) en de filterlengte die kan worden geplaatst ( $L$ , in meters). Voor de straal van de boorgatwand wordt een constante waarde van 0,4 m gehanteerd, op basis van de standaarddiameter waarmee bij HTO-systemen geboord wordt (800 mm). De filterlengte in het opslagpakket wordt bepaald door de dikte van het opslagpakket ( $D$  [m]), de fractie netto zanddikte t.o.v. de totale dikte van het opslagpakket (factor  $NtG$ ) en de fractie van de netto zanddikte waarin bronfilters kan worden geplaatst (Factor<sub>filter</sub>):

$$L = D * NtG * Factor_{filter}$$

$$L = (Diepte_{top} - Diepte_{basis}) * NtG * Factor_{filter}$$

De uitdrukking van het maximale debiet wordt dan als volgt:

$$Q_{max} = v_{max} * A_{bgw}$$

$$Q_{max} = \frac{K_h}{12} * 2 * PI * 0,4 * (Diepte_{top} - Diepte_{basis}) * NtG * Factor_{filter}$$

De variabelen  $K_h$ ,  $Diepte_{top}$ ,  $Diepte_{basis}$ ,  $NtG$  en  $Factor_{filter}$  dienen daarin nog te worden ingevuld om tot het maximale debiet te komen.

De waarden voor  $K_h$  en  $Factor_{filter}$  worden constante waarden aangenomen, in deze studie:  $K_h$  is 12 m/dag bij natuurlijke temperatuur maar deze wordt gecorrigeerd voor de temperaturen bij HTO (zie sectie 'Doorlatendheid' in Bijlage 1). De  $Factor_{filter}$  hangt sterk af van de hoeveelheid kleilagen binnen het filtertraject, en de data laat zien dat dit lokaal sterk varieert. Deze  $Factor_{filter}$  is daarom voor het gehele projectgebied op 100% gezet en dient in een lokale studie nader uitgezocht worden. Voor de waarden van de  $Diepte_{top}$ ,  $Diepte_{basis}$  en de beschikbare zanddikte ( $L$ ) zijn kaarten geconstrueerd op basis van de geïnterpreteerde boringen, en interpolatie voor de gebieden tussen de boringen in (zie sectie 'Dataverwerking' hieronder).

#### Overschrijding NVOE-onttrekkingsnorm

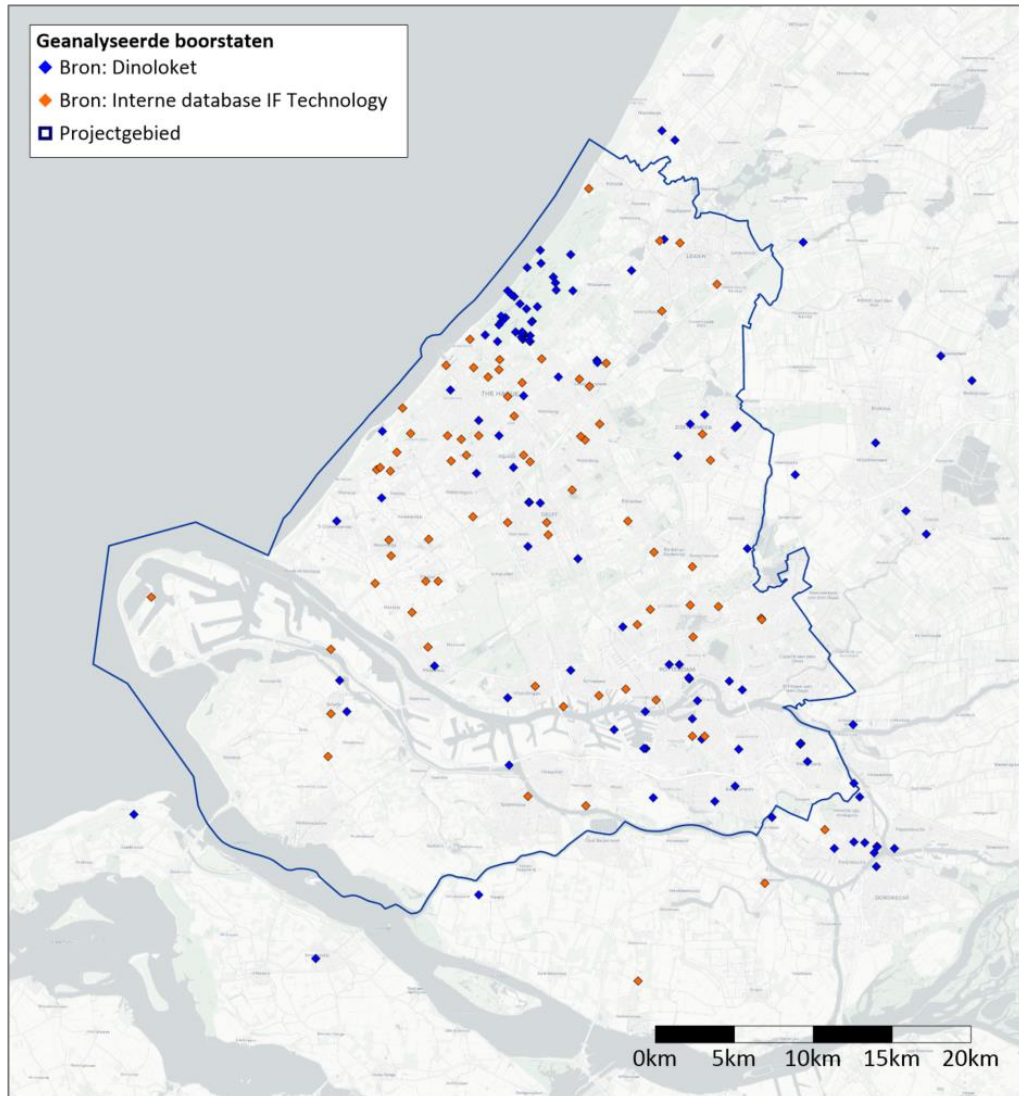
De NVOE-onttrekkingsnorm wordt standaard bij WKO-systemen toegepast. Deze norm is in de meeste systemen limiterend voor het debiet dat per put wordt toegepast. Uit de praktijk blijkt dat bij WKO zeer weinig gevallen bekend zijn waarin putverstopping door deeltjesproductie optreedt. De norm, die is bedoeld om die risico's te beperken, werkt dus goed, maar tegelijkertijd indiceren de praktijkgegevens dat deze norm wel eens erg conservatief kan zijn. Bij recente proefboringen voor HTO zijn onttrekkingen uitgevoerd waarbij de NVOE-onttrekkingsnorm tot wel 4,5x werd overschreden, maar toch bleef de mate van deeltjesproductie onder de voor WKO gehanteerde grenswaarde. Bij het HTO-systeem in Middenmeer wordt ook al meerdere jaren met hogere debieten onttrokken dan de norm voorschrijft, maar er zijn geen indicaties voor hoge mate van deeltjes. Dit is een aanwijzing dat de NVOE-onttrekkingsnorm conservatief is. Het is van belang om hier meer (lange termijn) onderzoek naar uit te voeren. Belangrijk voor deze studie is te realiseren dat de NVOE-onttrekkingsnorm mogelijk veilig overschreden kan worden, met hogere haalbare debieten per doublet als gevolg. Vooralsnog is in deze studie uitgegaan van de gangbare norm.

#### BESCHIKBARE DATA EN SELECTIE

Om deze kaarten op te stellen is gebruik gemaakt van boorbeschrijvingen van verschillende datasets (Figuur 6.1):

- Dinoloket (publieke data: [dinoloket.nl/ondergrondgegevens](https://dinoloket.nl/ondergrondgegevens))
- Interne database boorbeschrijvingen

De boorbeschrijvingen zijn geselecteerd op basis van een minimale boordiepte van 130 m-mv. Vervolgens is er geselecteerd op datadichtheid: op plekken met een hoge datadichtheid is ervoor gekozen om niet alle boringen mee te nemen in de analyse, maar bijvoorbeeld één per project. Altijd is gekozen voor de diepste boring. De verspreiding van de datapunten is te zien in Figuur 6.1. De figuur laat zien dat de interne database van IF Technology een waardevolle aanvulling is op de publieke data van Dinoloket, doordat er punten toegevoegd zijn in gebieden waar geen Dinoloket-boringen liggen.



Figuur 6.1 De data gebruikt voor het opstellen van de HTO-potentiekaart

## DATAVERWERKING

Voor elk van de gebruikte boringen is de volgende informatie afgelezen uit de boorbeschrijving:

### Diepte en dikte Maassluis

Allereerst wordt de beschikbare zanddikte bepaald. Dit wordt gedaan door in de boorbeschrijving met behulp van het REGIS v2.2-model de diepte van de Formatie van Maassluis op te zoeken. De bovenkant is relatief kleirijk, in de boorbeschrijving wordt gezocht naar de onderkant van dit kleirijke pakket. Dit is de "Diepte Top Maassluis, 1<sup>e</sup> zandige eenheid". Verder wordt de diepte onderkant van de Formatie van Maassluis genoteerd als deze aangeboord is. Dit is het geval voor slechts 25% van de boringen. Ook de hoeveelheid klei in de Formatie van Maassluis wordt genoteerd.

### **Dikte opslagpakket, t.b.v. rendementsfactor**

Ideaal gezien worden de filters van een HTO-systeem in een zandpakket met een dikte tussen de 15 en 30 m (dit is een redelijke aanname gezien de orde grootte doorlatendheid van deze formatie). Als het pakket dunner is, worden risico's voor het debiet per doublet te groot, en bij dickere pakketten begint opdrijving van warmte een aanzienlijke grip te krijgen op het opslagrendement. Bij het bepalen van de beschikbare zanddikte is dus gezocht naar een pakket met een dikte tussen de 15 en 30 meter, die aan de boven- en onderkant wordt begrensd door een kleilaag. Als er geen kleilaag aan de onderkant van de zandlaag werd aangetroffen na 30 m, dan valt de dikte van het opslagpakket buiten de optimale waarde, en wordt de einddiepte van het opslagpakket geprikt op basis van het eerstvolgende aangetroffen kleilaagje. Ondiepe boringen, waarvoor deze inschatting niet goed gemaakt kan worden, zijn niet meegenomen in dit criterium.

### **Afsluitende kleilaag**

De dikte van de kleilaag direct boven de "Diepte Top Maassluis, 1<sup>e</sup> zandige eenheid" wordt genoteerd, evenals de hoeveelheid klei in de 20 m direct boven die zandige eenheid. Dit maakt het mogelijk om kaarten te maken waarin de afsluitende werking van deze kleilaag wordt getoond.

### **Doorlatendheid**

De doorlatendheid van de aangeboorde zandlagen in de Formatie van Maassluis zijn voor een aantal boringen verspreid door het projectgebied berekend op basis van de korrelgrootte. Dit resulteert in een doorlatendheid tussen de 10 en 12 m/dag bij de natuurlijke grondwatertemperatuur (12 - 14°C). Ook de puttesten in dit gebied laten gemiddeld een doorlatendheid van 12 m/dag zien. Op basis daarvan is voor het gehele studiegebied voor het zand in de formatie van Maassluis een doorlatendheid van 12 m/dag aangenomen (bij natuurlijke temperatuur van de ondergrond van 13°C).

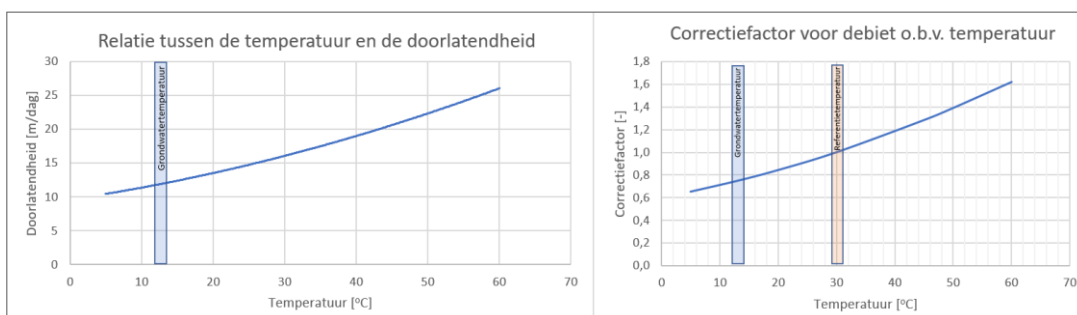
Bij hogere temperaturen van het water neemt ook de doorlatendheid toe (door verlaagde viscositeit). Dat betekent dat een put die wordt omgeven door warmer water ook een hoger debiet kan toepassen volgens de NVOE-onttrekkingsnorm, dan wanneer dezelfde put door kouder water zou zijn omgeven. De temperatuur van het onttrokken water is het laagst bij de lauwe bron van de HTO en daarom is de onttrekkingstemperatuur bij de lauwe put limiterend voor het debiet van het doublet. Als uitgangspunt voor de Debietkaart is genomen dat de minimale onttrekkingstemperatuur bij de lauwe bron 30°C is, waardoor de gecorrigeerde doorlatendheid uitkomt rond 16,1 m/d (tegen 12 m/d bij 13°C). Dit laat zien dat het debiet per bron sterk afhangt van de toegepaste temperaturen.

Weliswaar toont de Debietkaart de debieten per doublet, uitgaande van minimaal 30°C bij de lauwe bron, maar in werkelijkheid kan deze temperatuur ook hoger of lager zijn. Deze hangt namelijk af van de infiltratietemperatuur die bij de lauwe bron wordt gehanteerd. In de energieconcepten rondom HTO zijn temperaturen van de lauwe bron tussen de 20 - 60°C realistisch. Een HTO-gebruiker kan in Tabel 6.1 en Figuur 6.2 uitlezen met welke correctiefactor het debiet uit de Debietkaart moet worden gecorrigeerd, op basis van de minimale onttrekkingstemperatuur bij de lauwe bron die bij het betreffende HTO-systeem wordt verwacht.



Tabel 6.1 De doorlatendheid is afhankelijk van de temperatuur van het onttrokken water, omdat hogere temperaturen zorgen voor een lagere viscositeit. In deze tabel zijn de doorlatendheden en correctiefactoren voor het haalbare debiet weergegeven voor verschillende temperaturen. Het debiet per doublet uit de Debietkaart moet gecorrigeerd worden indien de verwachte onttrekkingstemperatuur bij de lauwe bron geen 30 °C is. De correctiefactor die toegepast moet worden op de Debietkaart om rekening te houden met deze temperatuurafhankelijkheid, is weergegeven in de rechterkolom, en afhankelijk van de minimale onttrekkingstemperatuur die bij de lauwe bron verwacht wordt.

Minimale onttrekkingstemperatuur bij lauwe HTO-bron [°C]	Doorlatendheid [m/d]	correctiefactor [-]
13	12,0	0,75
20	13,5	0,84
30	16,1	1,00
45	20,6	1,28
60	26,1	1,39



Figuur 6.2 Links: De relatie tussen de temperatuur van het onttrokken water en de doorlatendheid van de Formatie van Maassluis. Hoe hoger de temperatuur, hoe hoger de doorlatendheid. De gemiddelde grondwatertemperatuur van 13°C voor de formatie van Maassluis in het studiegebied is weergegeven met verticale balk. Rechts: de correctiefactor (verticale as) die moet worden toegepast op de Debietkaart, afhankelijk van de verwachte onttrekkingstemperatuur bij de lauwe HTO-bron (horizontale as). Daarbij is 30 °C de referentietemperatuur waar de correctiefactor 1,0 is.

De relatie tussen de injectietemperatuur van de lauwe bron en de correctiefactor wordt beschreven met de volgende formule:

$$\text{Correctiefactor} = 0,0001 * \text{temperatuur}^2 + 0,0097 * \text{temperatuur} + 0,5993$$

Deze is afgeleid van de relatie tussen de temperatuur en de viscositeit van het water<sup>5</sup>. Deze factor [-] kan vermenigvuldigd worden met het haalbare debiet bij grondwatertemperatuur om het debiet bij andere injectietemperaturen mee te bepalen.

### Debiet

De debieten op de Debietkaart zijn berekend middels de formule voor  $Q_{\max}$ . Voor de parameter  $K_h$  (doorlatendheid) is een constante waarde genomen van 16,1 m/d: dit is gelijk aan de natuurlijke

<sup>5</sup> Batzle en Wang (1992), Seismic properties of pore fluids, Geophysics, vol. 57, no. 11, P1396-1408

doorlatendheid van 12 m/d gecorrigeerd naar 30 °C). De netto zanddikte ( $[\text{diepte\_top} - \text{diepte\_basis}] * \text{NtG}$ ) is afgeleid uit de boringen. Filterfactor is gesteld op 1.

### Kaarten opstellen

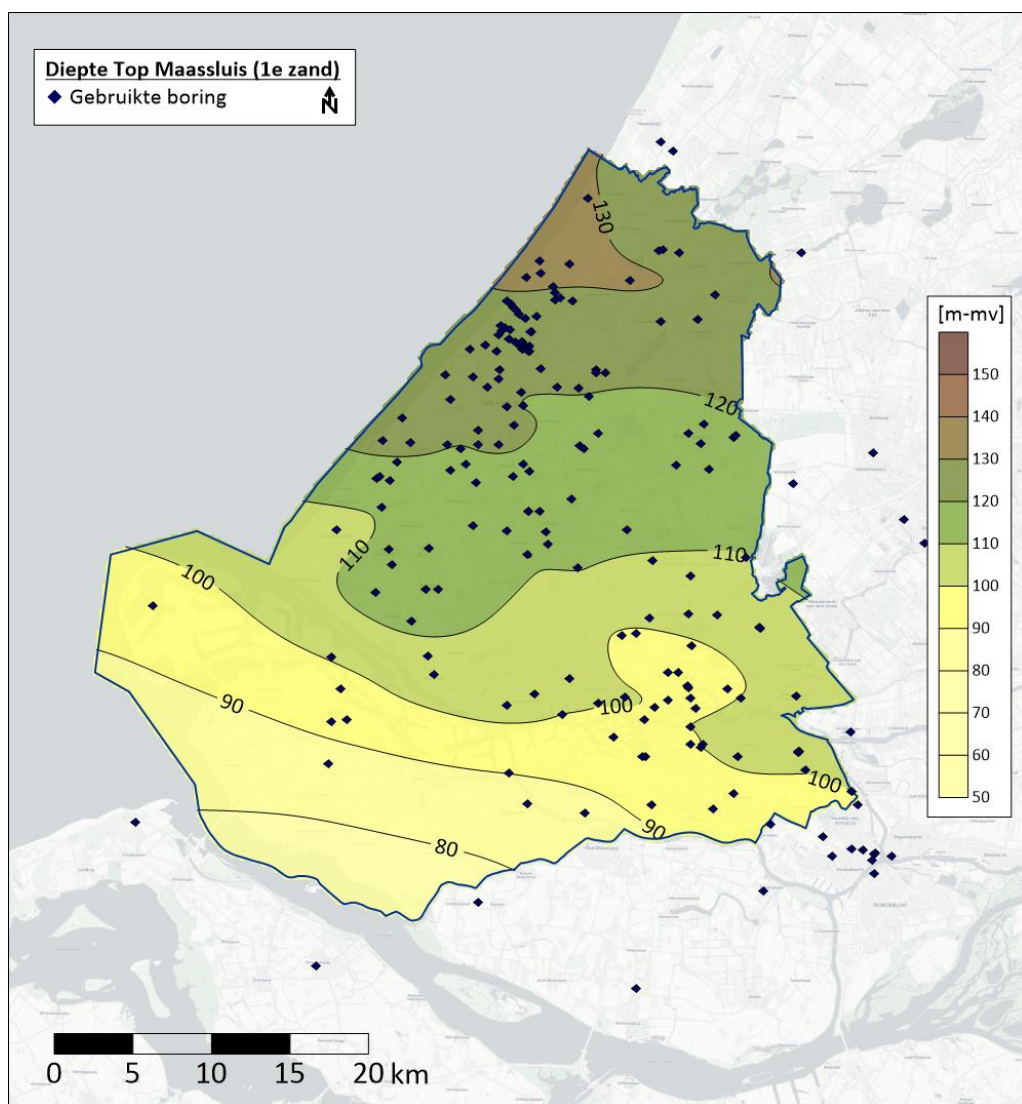
De kaarten zijn opgesteld middels het programma Surfer 24, van Golden Software. De methoden voor het gridden van de verschillende parameterkaarten zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 6.2 Griddingsmethoden

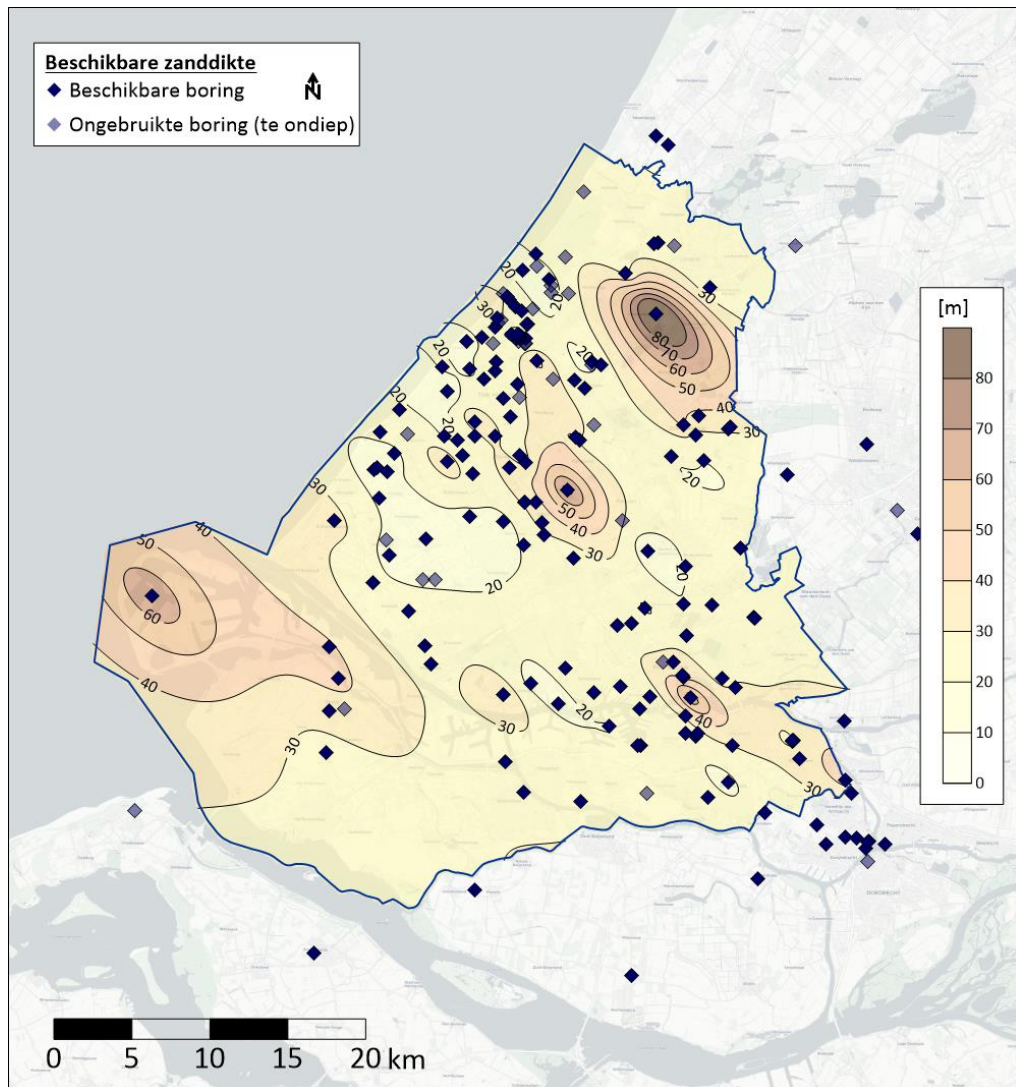
parameter	griddingsmethode
diepte top Maassluis, 1 <sup>e</sup> zandige eenheid [m-mv]	kriging, linear
beschikbare zanddikte [m]	kriging, exponential
klei in afsluitende laag [m]	inverse distance to a power (trend ontbreekt)
debietkaart [m3/uur]	berekend o.b.v. kaart "beschikbare zanddikte"

## KAARTEN

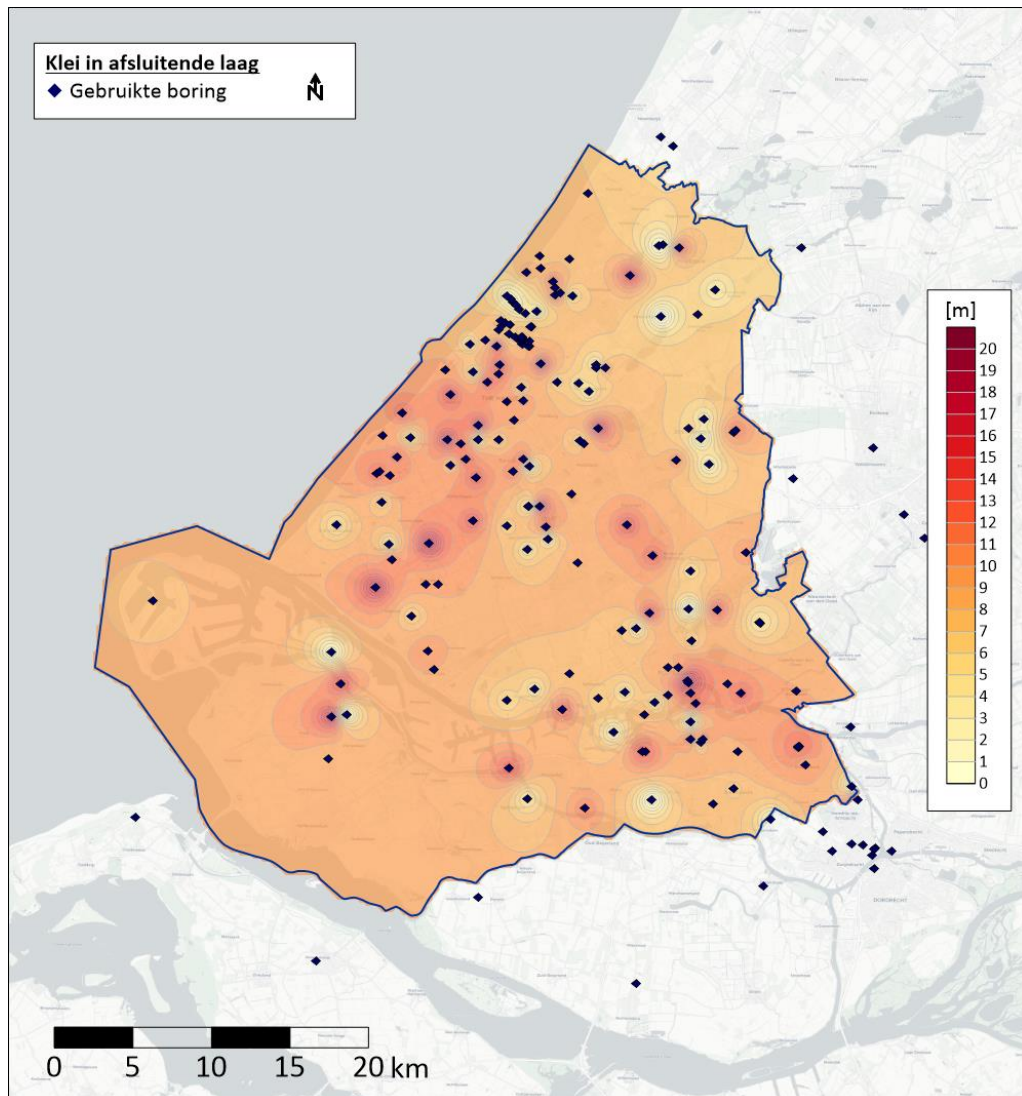
De opgestelde kaarten die de basis vormen voor de potentiekaarten zijn gepresenteerd in onderstaande figuren.



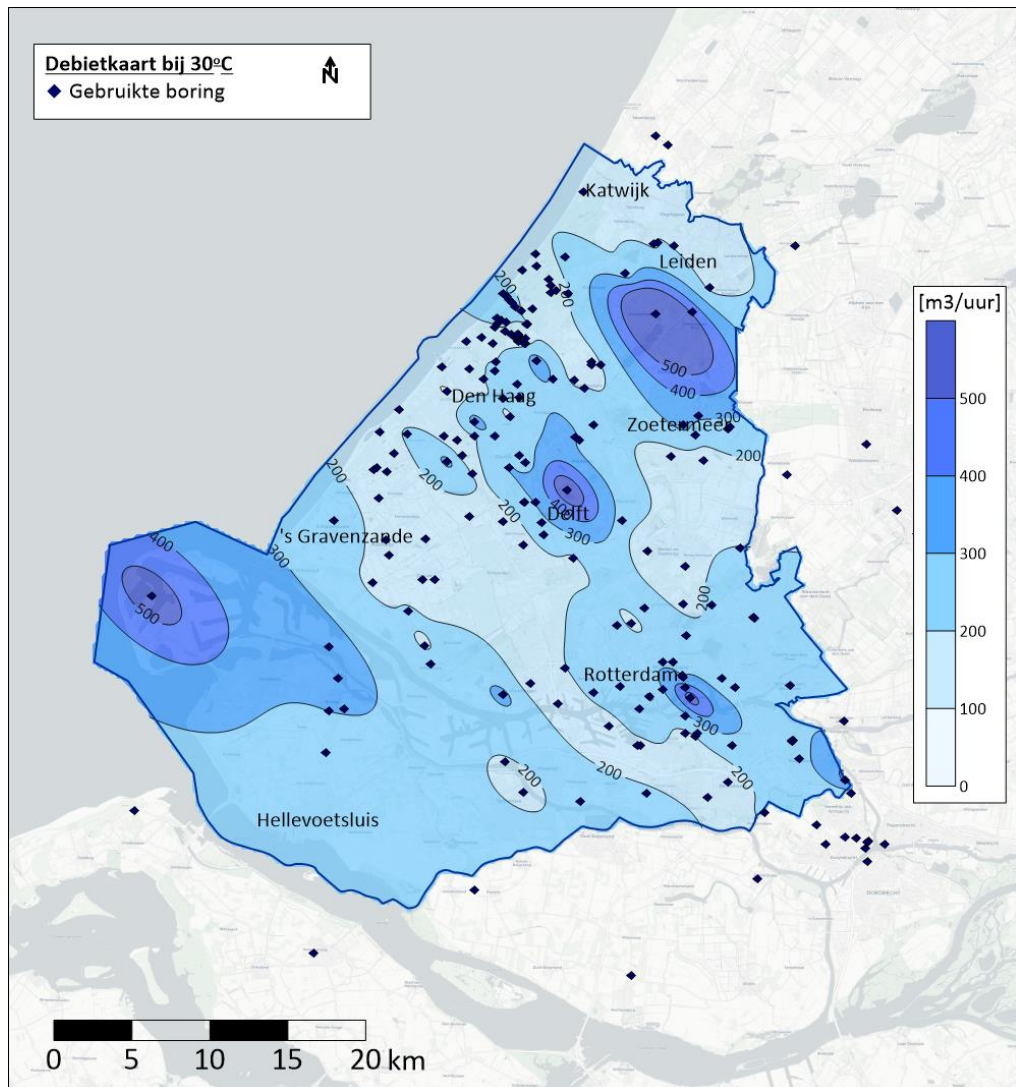
Figuur 6.3 Resultaat: Diepte Top Maassluis, 1<sup>e</sup> zandige eenheid, in m-mv.



Figuur 6.4 Resultaat: Beschikbare zanddikte, in m.



Figuur 6.5 Resultaat: Aantal meters klei in de afsluitende laag (20 m boven het opslagpakket), in m.



Figuur 6.6 Resultaat: debietkaart per doublet bij een minimale onttrekkingstemperatuur van 30°C, in m<sup>3</sup>/uur.

## ONZEKERHEDEN

### Algemeen

De HTO-potentiekaarten in deze studie geven een eerste beeld, maar geen uitsluitsel of bevestiging van de potentie van HTO per locatie. Er zijn factoren die te gedetailleerd zijn om in kaarten vast te leggen (heterogeniteit, kleidiktes van onderzijde van opslagpakket, etc.), die wel van belang zijn voor HTO. Om die reden is er ook een kwalitatieve kaart opgesteld, die de potentie voor succesvolle toepassing van HTO aangeeft o.b.v. een aantal belangrijke criteria. De kaarten geven dus een indicatie; er dient altijd een lokale studie uitgevoerd te worden om te bepalen of de beoogde projectlocatie daadwerkelijk geschikt is.

### Interpolatie

De potentiekaarten geven aan op welke plekken succesvolle toepassing van HTO mag worden verwacht, uitgedrukt op basis van kwalitatieve criteria (HTO Potentiekaart, Figuur 3.3) en het

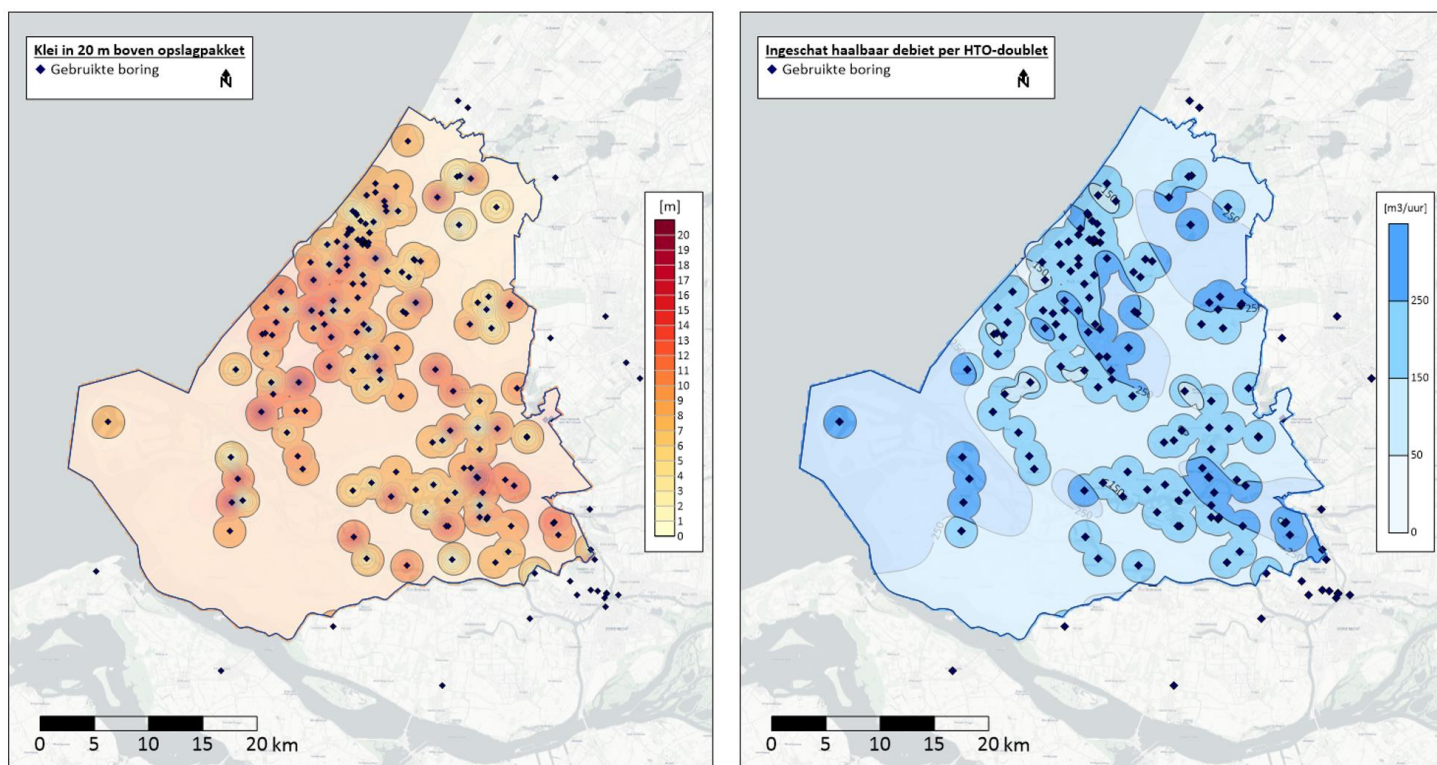
verwachte debiet per doublet (HTO Debietkaart, Figuur 3.4). Deze potentie is bepaald op basis van de beschikbare gegevens, namelijk boorstaten in en direct rondom het projectgebied. Voor de locaties daartussen wordt de potentie van HTO geïnterpoleerd op basis van deze boringen. Deze interpolatie kent een onzekerheid, met verschillende oorzaken.

#### Puntendichtheid

Zoals te zien is in Figuur 6.1 zijn de boringen die gebruikt zijn om de kaarten te griden niet evenredig verdeeld over het projectgebied. In grote stedelijke gebieden zoals Den Haag en Rotterdam liggen veel datapunten, terwijl bijvoorbeeld in het zuidwestelijke gedeelte van het projectgebied de datadichtheid erg laag is. Doorgaans geldt: hoe meer datapunten (boringen), hoe lager de onzekerheid van de resulterende kaarten. De potentiekaart is voor Den Haag dus bijvoorbeeld zekerder dan voor de Maasvlakte.

#### Voorspellende waarde

Wat verder meetelt is de voorspellende waarde van een boring. Sommige datasets laten duidelijke regionale trends zien, zoals bijvoorbeeld dieptekaart. Op de dieptekaart is bijvoorbeeld te zien dat diepte van het pakket toeneemt in noordelijke richting (Figuur 6.3). Deze trend is duidelijk zichtbaar in de dataset en is bovendien vanuit geologisch oogpunt goed te verklaren, en dit zorgt ervoor dat ook de voorspelde waarden van de tusseliggende gebieden relatief betrouwbaar worden geacht. Daartegenover staat de kaart met de hoeveelheid klei in de laag boven het opslagpakket: deze datapunten laten geen duidelijke trend zien. Hoewel het algemene beeld wordt onderbouwd dat de Maassluis formatie in grote delen van de provincie wordt afgesloten door klei, is de dikte van die klei per plek sterk verschillend, waardoor de voorspellende waarde van deze datapunten kleiner is dan bv. in de dieptekaart het geval is.



Figuur 6.7 Onzekerheidskaarten voor de hoeveelheid klei in de afsluitende laag (links) en de debietkaart (rechts). De voorspellende waarde van de kleilaag is relatief klein: er is een straal van 1 km rondom de datapunten aangehouden. Voor de debietkaart is de voorspellende waarde groter. Hier is een straal van 2 km rondom te datapunten aangehouden. De kaarten zijn dus het meest betrouwbaar waar kleur te zien is, en het minst betrouwbaar in de witte gebieden.

## AANBEVELINGEN

De 'ondergrondse HTO potentie' kan op verschillende manieren worden gedefinieerd. In het verleden is voor HTO Potentiekaart vaak hoofdzakelijk gekeken naar het debiet dat per put kan worden behaald, in lijn met de potentiekaarten die voor aardwarmte zijn opgesteld. Echter, de potentie van HTO hangt naast het debiet ook af van aspecten zoals terugwinrendement. In deze studie is beschreven dat een dikker opslagpakket weliswaar hoge debieten per put oplevert, maar ook nadelen kent, namelijk het grotere risico op rendementverliezen. Dit laatste is in deze studie meegenomen in de scoring (HTO Potentiekaart, Figuur 3.3), en daarmee wordt het beeld van de potentie genuanceerder dan wanneer alleen naar debiet wordt gekeken. De aanbeveling is om in toekomstige studies naar de HTO potentie niet alleen te kijken naar het haalbare debiet, maar ook naar zwaarwegende aspecten zoals het terugwinrendement.

Om ervoor te zorgen dat de kennis uit dit project wordt benut in lopende/toekomstige onderzoeksprogramma's, en dat de methodieken voor het uitdrukken van HTO potentie verder worden ontwikkeld, worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Binnen nationaal onderzoeksprogramma 'WarmingUP GOO' worden ook werkzaamheden voorzien om de HTO potentie in kaarten te vatten. Het ligt voor de hand om de gehanteerde criteria voor potentie en de gebruikte methodieken uit deze studie te evalueren en op basis daarvan een werkmethode te kiezen binnen WarmingUP GOO. De uitvoerders van deze



rapportage (IF Technology en EBN) zijn direct of indirect bij WarmingUP GOO betrokken en staan open voor deze evaluatie.

- De belangrijkste *lesson learned* van voormalige HTO-systemen was: doe een proefboring. De reden daarvoor is dat de (ondergrondse) potentie van HTO sterk afhankelijk is van de lokale ondergrondse eigenschappen, en deze zijn vaak in grote mate onzeker. In Zuid-Holland komt daar nog eens bij dat ervaringen al laten zien dat de formatie van Maassluis relatief heterogeen is (in horizontale en verticale richting), wat de noodzaak voor een proefboring nog groter maakt. Voor een goed beeld van de kansen voor HTO, een goed onderbouwd investeringsbesluit voor HTO en een succesvolle operatie, wordt aanbevolen een proefboring uit te voeren.
- Samenwerken met TNO en Deltares bij het overdragen van het kaartmateriaal uit deze studie voor gebruik in de Design-Toolkit.

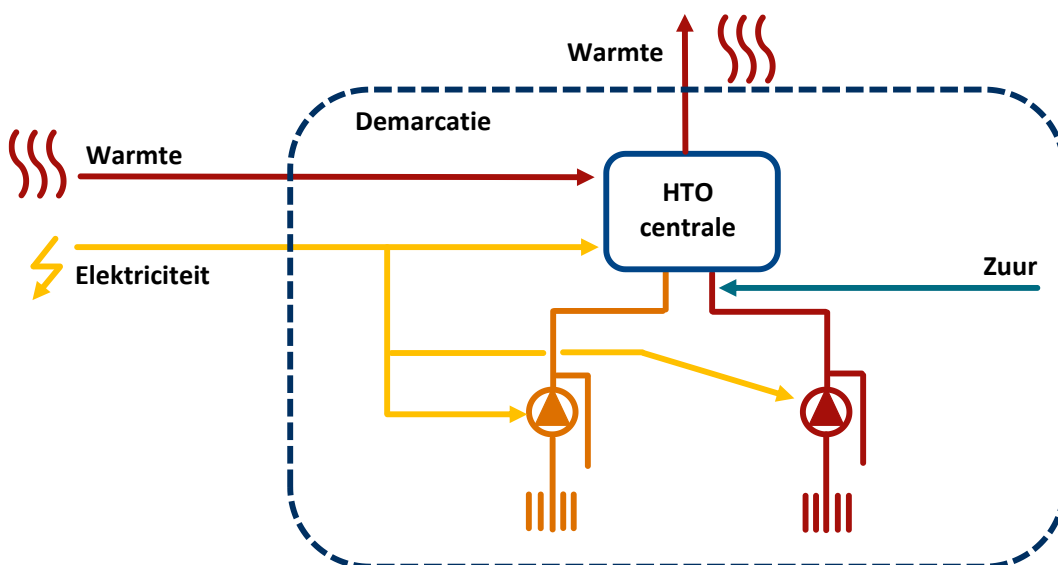
# Bijlage 2 Duurzaamheid & kosten

## INLEIDING

In deze bijlage komen de duurzaamheid en kosten van een HTO-systeem aan bod. Deze zullen per project verschillen. De methode voor het bepalen van de duurzaamheid en kosten is toegelicht.

## DEMARCATIE

In Figuur 6.8 is de demarcatie aangegeven van het HTO systeem. Bij het vastleggen van de demarcatie is uitgegaan van de wijze waarop het HTO-systeem geïntegreerd wordt in de Design Toolkit.



Figuur 6.8 Demarcatie HTO-systeem

Het HTO systeem bestaat grofweg uit de volgende onderdelen:

- Bronnen: Een HTO systeem heeft tenminste één hete en één lauwe bron. Meerdere hete en lauwe bronnen zijn mogelijk.
- HTO-centrale: in de HTO centrale staan alle componenten opgesteld die nodig zijn ten behoeve van het HTO-systeem, zoals onder andere warmtewisselaars, circulatiepompen, kleppen, appendages, waterbehandeling, regeling etc. Merk op dat een eventuele warmtepomp niet tot het HTO-systeem behoort. In de Design Toolkit is dit een apart component.
- Terreinleidingen en kabels: dit is het leidingwerk en bekabeling van de bronnen naar de technische ruimte. De bekabeling bestaat uit voedingskabels en signaalkabels.

De input bestaat uit het volgende:

- Warmte: warmte vanuit een bron die wordt opgeslagen in de HTO. De kosten en duurzaamheid van de opgeslagen warmte komen vanuit de Design Toolkit.
- Elektriciteit: diverse componenten verbruiken elektriciteit, zoals onder andere bronpompen en circulatiepompen. De kosten en duurzaamheid van de elektriciteit komen vanuit de Design Toolkit.
- Zuur: om neerslag van kalk te voorkomen wordt grondwater aangezuurd. Dit kan op verschillende wijzen, bijvoorbeeld met CO<sub>2</sub>-dosering of zoutzuurdosering. Bij het bestaande HTO systeem in Middenmeer wordt CO<sub>2</sub>-doseing toegepast. De kosten voor de zuurdosering zijn meegenomen in het HTO-systeem.

De output bestaat uit het volgende:

- Warmte: warmte geleverd door de HTO. In het begin is de temperatuur van de warmte gelijk aan de opslagtemperatuur. Gedurende levering daalt de temperatuur. De HTO gaat door met warmte terugleveren totdat de afklaptemperatuur is bereikt, of tot het einde van het leverseizoen (afhankelijk van wat het eerste optreedt).

### DUURZAAMHEID

De CO<sub>2</sub>-uitstoot van een typisch HTO-systeem (zonder warmtepomp) ligt tussen de 9,4 en 27,0 kg CO<sub>2</sub> per teruggeleverde GJ warmte. Vergeleken met warmte geleverd door een gasketel (63 kg CO<sub>2</sub>/GJ) is dat een reductie tussen de 57 en 85%. Ook ligt dit (grotendeels) onder de streefwaarde voor warmtenetten in 2030 (klimaatakkoord: 18,9 kg CO<sub>2</sub>/GJ & warmtewet: 25 kg CO<sub>2</sub>/GJ). Om aan de streefwaarde voor warmtenetten in 2030 te kunnen voldoen (klimaatakkoord: 18,9 kg CO<sub>2</sub>/GJ & warmtewet: 25 kg CO<sub>2</sub>/GJ), is het van belang dat de opgeslagen warmte zo duurzaam mogelijk is en dat het terugwinrendement voldoende hoog is.

### Methodiek

Voor het bepalen van de duurzaamheid van HTO is gekeken naar de hoeveelheid CO<sub>2</sub>-uitstoot per teruggeleverde GJ aan warmte (specifieke CO<sub>2</sub>-uitstoot HTO, in kg CO<sub>2</sub>/GJ) tijdens exploitatie. Deze is gedefinieerd als:

$$\text{Specifieke CO}_2 \text{ uitstoot HTO} = \frac{\text{CO}_2 \text{ uitstoot elektriciteit} + \text{CO}_2 \text{ uitstoot opgeslagen warmte}}{\text{Teruggeleverde warmte HTO}}$$

$$\text{Geleverde warmte HTO} = \text{Ontladen warmte HTO} - \text{warmteverlies}$$

### Elektriciteit

De CO<sub>2</sub>-uitstoot van elektriciteit wordt berekend door het elektriciteitsverbruik te vermenigvuldigen met de specifieke CO<sub>2</sub>-uitstoot van elektriciteit. In deze studie is gerekend met een waarde<sup>6</sup> van 0,29 kg CO<sub>2</sub>/kWh. Afhankelijk van het project kan de waarde anders zijn.

Het elektriciteitsverbruik van de HTO bestaat uit de volgende onderdelen:

- Bronpomp lauwe bron: wordt ingezet tijdens het laden van de hete bron.
- Bronpomp hete bron: wordt ingezet tijdens het terugleveren van warmte

<sup>6</sup> CBS (2022), Rendementen, CO<sub>2</sub>-emissie elektriciteitsproductie, 2020, <https://www.cbs.nl/nl-nl/maatwerk/2022/05/rendementen-co2-emissieelektriciteitsproductie-2020>

- Technische ruimte: dit betreft diverse componenten, zoals circulatiepompen, regeling, waterbehandeling etc.
- Voor het elektriciteitsverbruik voor transport is gerekend met een waarde van 1,26% van de hoeveelheid teruggeleverde warmte (TNO (2020)).

Het elektriciteitsverbruik van de verschillende onderdelen is ingeschat aan de hand van de Seasonal Performance Factor (SPF). Dit is de verhouding tussen de jaarlijkse hoeveelheid warmtestroom door het betreffende onderdeel en het jaarlijkse elektriciteitsverbruik van het betreffende onderdeel. Het aantal HTO-systemen is beperkt. Hierdoor is nog geen (substantiële) meetdata aanwezig om de SPF te bepalen. Op basis van projecten die bij IF zijn uitgevoerd is een eerste inschatting gemaakt. Naarmate meer projecten worden ontworpen en gerealiseerd, dienen deze inschattingen aangepast te worden. In onderstaande tabel zijn per onderdeel de ingeschatte SPF gegeven en op welke warmtestroom de SPF betrekking heeft.

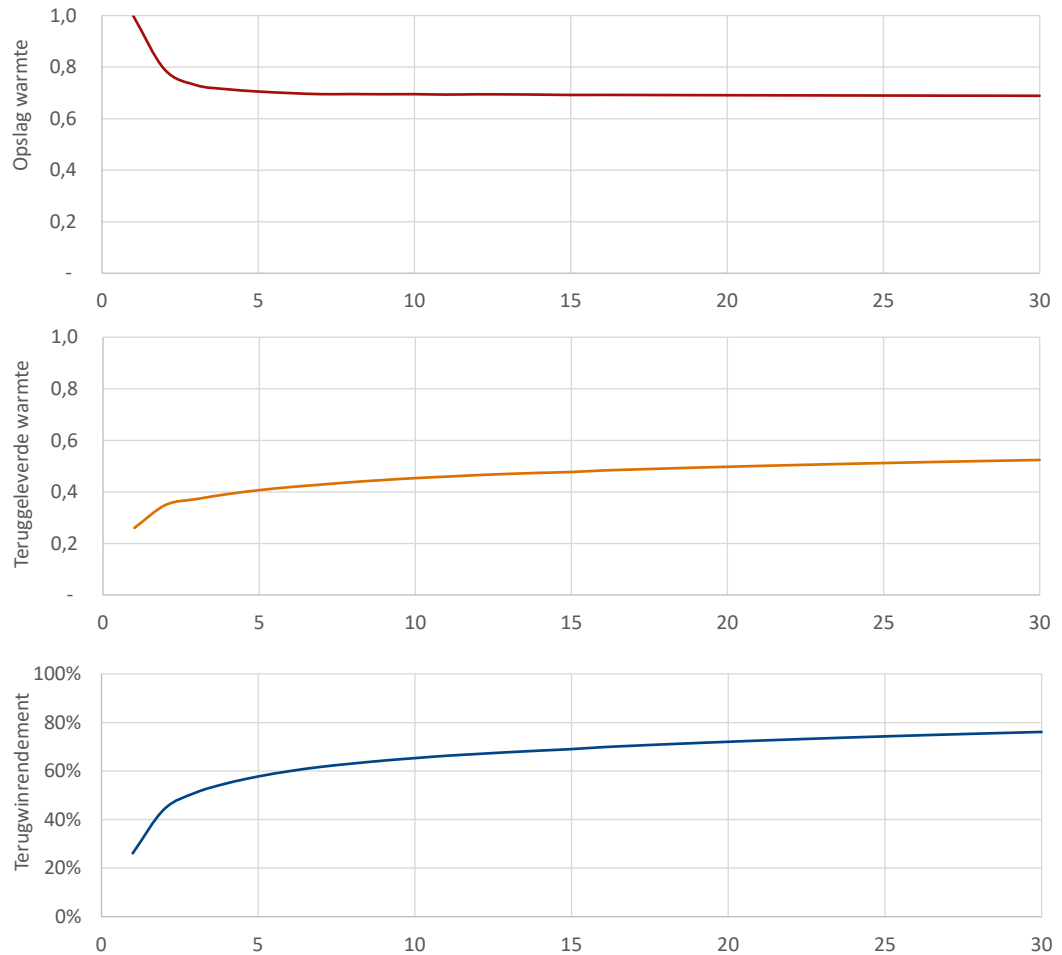
Onderdeel	SPF [-]	Warmtestroom
Lauwe bronpomp	150	Opgeslagen warmte HTO
Hete bronpomp	75	Teruggeleverde warmte HTO
Technische ruimte	100	Opgeslagen + teruggeleverde warmte HTO

#### Opgeslagen warmte

De CO<sub>2</sub>-uitstoot van de opgeslagen warmte hangt af van de bron en het terugwinrendement van de HTO. Voorbeelden van warmte die opgeslagen kunnen worden zijn onder andere aardwarmte en restwarmte.

#### Teruggeleverde warmte aan warmtenet en geleverde warmte aan gebruikers

Door warmteverlies bij transport is de hoeveelheid geleverde warmte aan gebruikers lager dan de hoeveelheid teruggeleverde warmte vanuit de HTO aan het warmtenet. Voor het warmteverlies in het warmtenet is een waarde van 20% aangehouden. De hoeveelheid warmte die door de HTO wordt teruggeleverd, varieert per jaar. Dit is toegelicht aan de hand van onderstaande figuren. Omdat bij de start van het project de bodemtemperatuur laag is (ongeveer tussen de 12 en 15°C) wordt in de eerste jaren veel meer warmte in de bodem opgeslagen dan in latere jaren. Door de jaren heen warmte bodem rondom de bronnen op. Bij teruglevering zal in de eerste jaren de temperatuur van de HTO sneller inzakken, waardoor in de eerste jaren minder warmte teruggeleverd kan worden dan in latere jaren. Het terugwinrendement (de verhouding tussen teruggeleverde warmte en opgeslagen warmte) neemt per jaar toe. Het haalbare terugwinrendement is projectafhankelijk. Modelberekeningen van projecten met een goede bodemopbouw voorspellen dat een terugwinrendement van 80% haalbaar is.

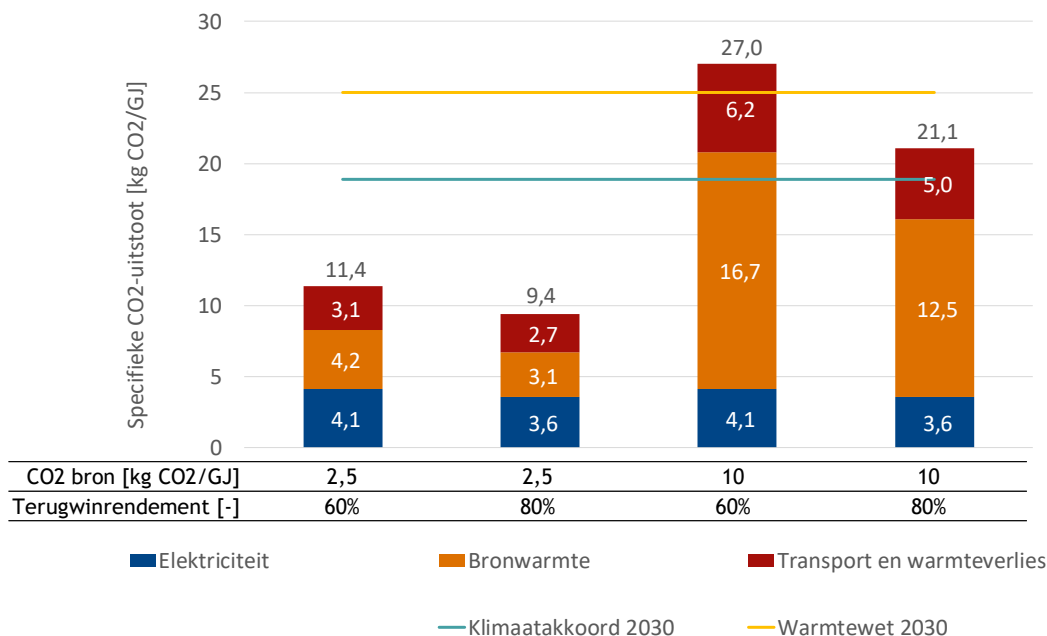


Figuur 6.9 Boven: typisch verloop opgeslagen warmte, waarden zijn genormaliseerd t.o.v. hoeveel opgeslagen warmte in jaar 1. Midden: terugleveren warmte, waarden zijn genormaliseerd t.o.v. hoeveel opgeslagen warmte in jaar 1. Onder: terugwinrendement (verhouding teruggeleverde warmte en opgeslagen warmte).

### Resultaten

De duurzaamheid van de HTO kan projectspecifiek worden berekend met behulp van de Design Toolkit. In deze bijlage is illustratief de specifieke duurzaamheid berekend aan de hand van voorbeeldcases. In de cases is gevarieerd met terugwinrendement (60 en 80%) en de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de bron (2,5 en 10 kg/GJ).

De resulterende specifieke CO<sub>2</sub>-uitstoot per case is weergegeven in Figuur 6.10.



Figuur 6.10 Specifieke CO<sub>2</sub>-uitstoot per case

De berekende CO<sub>2</sub>-uitstoot varieert bij de gekozen cases tussen de 9,4 en 27,0 kg CO<sub>2</sub>/GJ. De teruggeleverde warmte voldoet in een deel van de gevallen wel aan de streefwaarden uit het klimaatpakkoord en warmtewet, maar niet in alle gevallen. Om aan de streefwaarden te voldoen, zijn er de volgende aandachtspunten:

- De opgeslagen warmte dient zo duurzaam mogelijk te zijn. Aardwarmte en restwarmte zijn goede voorbeelden van bronnen met een lage CO<sub>2</sub>-uitstoot.
- Het terugwinrendement dient zo hoog mogelijk te zijn. Een goede bodemopbouw, voldoende schaalomvang en een zo groot mogelijk temperatuurverschil tussen opgeslagen warmte en de afkaptemperatuur spelen hierin een belangrijke rol.
- Aanvullende kan de duurzaamheid verhoogd worden door verliezen bij transport te minimaliseren.

Projectspecifiek zal bekeken moeten worden wat de uiteindelijke CO<sub>2</sub>-uitstoot is per teruggeleverde GJ warmte en wat de optimalisatiemogelijkheden zijn.

## KOSTEN

De kosten van een HTO zijn afhankelijk van de omvang en de diepte. Voor de onderzochte cases liggen de investeringskosten tussen de 2,5 en 3,4 M€. De jaarlijkse exploitatiekosten zijn sterk afhankelijk van de kosten voor de opgeslagen warmte en liggen voor de onderzochte cases tussen de 400 en 900 k€/jaar. Deze kosten zijn ingeschat op basis van de huidige stand van zaken. HTO is sterk in ontwikkeling. De verwachting is dat bij doorontwikkeling van deze techniek de kosten in de toekomst zullen dalen.

### Kostenstructuur

In deze studie is gekeken naar de investeringskosten en exploitatiekosten. Beide onderdelen zijn onderverdeeld in diverse kostenposten. Deze zijn hieronder benoemd en kort toegelicht.

#### Investeringskosten (CAPEX)

- Proefboring: een belangrijke lesson learned uit diverse HTO studies en projecten is dat het belangrijk is om een proefboring uit te voeren. Dit maakt het mogelijk om beter het bodempotentieel in te schatten en het ontwerp te optimaliseren. De proefboring wordt na afloop afgewerkt als een monitoringsput.
- Bronnen: hieronder vallen de kosten voor het boren en afwerken van de bronnen, inclusief putbehuizing en onderdelen binnen in de putbehuizing. Door afwijkend ontwerp van o.a. het injectiesysteem en materiaalkeuze zijn HTO bronnen duurder dan standaard WKO-bronnen.
- Bronpompen: de bronpompen komen in de bronnen te hangen. De kosten hiervoor zijn niet meegenomen in de kosten voor bronnen. Welke type pomp gebruikt kan worden, zal afhangen van de temperatuur. Bij het HTO systeem bij ECW in Wieringermeer is gekozen voor een ESP die ook toegepast wordt bij aardwarmte. Deze pompen zijn bestand tegen de hoge opslagtemperaturen.
- Technische ruimte: hierin staan alle componenten opgesteld die nodig zijn voor het HTO-systeem, zoals kleppen en appendages, waterbehandeling, regeling, warmtewisselaars etc.
- Leidingwerk: dit is het leidingwerk tussen de bronnen en de technische ruimte. Door deze leidingen stroomt grondwater. Vanwege de hoge temperaturen zijn de leidingen geïsoleerd. Een typische afstand tussen de hete en lauwe bronnen ligt rond de 200 à 300 meter.
- Ontwerp, advies en vergunningen: dit zijn kosten die nodig zijn voor een haalbaarheidsstudie, aanvraag van diverse vergunningen (waterwet, lozingsvergunning, omgevingsvergunning etc.), en het uitwerken en aanbesteden van het ontwerp.
- Onvoorzien: een extra kostenpost voor onvoorziene kosten.

#### Exploitatiekosten (OPEX)

- Opgeslagen warmte: dit zijn de kosten voor de warmte die wordt opgeslagen in de HTO.
- Elektriciteit: dit zijn de kosten voor elektriciteitsverbruik.
- Waterbehandeling: om kalkneerslag te voorkomen in de hete bron dient het water aangezuurd te worden. Dit kan bijvoorbeeld met CO<sub>2</sub> of zoutzuur.
- Onderhoud en beheer bronnen: om de kwaliteit van de bronnen te behouden worden deze één keer in de vijf jaar gereinigd. Verder is aangenomen dat de bronpompen eens in de vijf jaar vervangen dienen te worden (reservering).
- Onderhoud en beheer overig: dit betreft regulier onderhoud en beheer van de installatie.
- Monitoring & BRL: in deze post zijn de kosten opgenomen voor de jaarlijkse monitoring, grondwateranalyses, interpretatie en jaarlijkse BRL-check.

- Abandonneren: aan het einde van de levensduur dienen de bronnen deels verwijderd te worden (bovenste deel) en gedicht te worden. Hiervoor wordt een reservering gemaakt over een duur van 30 jaar.

## Methodiek

### Investeringskosten

De investeringskosten van de HTO hangen sterk af van de omvang van het systeem, de diepte van het systeem en het aantal bronnen. Voor het aantal bronnen is in deze studie uitgegaan van een ontwerp met één hete en één lauwe bron. Momenteel is in de Design Toolkit bij de module voor de ondergrond (ROSIM) ook uitgegaan van een standaard ontwerp met één doublet. In de toekomst kan dit verfijnd worden en het aantal bronnen ook worden meegenomen. Van de investeringskosten is per kostenpost bepaald waar deze (voornamelijk) van afhangt (zie Tabel 6.3).

Tabel 6.3 Afhankelijkheid kostenpost investeringen

Kostenpost	Afhankelijkheid
Proefboring	Diepte
Bronnen	Diepte
Bronpompen	Debiet
Technische ruimte	Debiet
Leidingwerk	Debiet
Ontwerp, advies en vergunningen	Percentage van investering
Onvoorzien	Percentage van investering

Voor het bepalen van de kosten zijn uitgevoerde projecten, projecten in ontwikkeling, offertes, en kengetallen geraadpleegd. Op basis van de kosten en eigenschappen (diepte, debiet, etc.) hiervan zijn de kosten per kostenpost bepaald.

- Boringen: voor de boringen (proefboring en bronnen) is een onderscheid gemaakt tussen vaste kosten en variabele kosten op basis van verschillende offertes. De putbehuizing is een onderdeel van de vaste kosten voor de bronnen.
- Bronpompen en technische ruimte: voor de bronpompen en technische ruimtes zijn ramingen gemaakt van de kosten voor verschillende debieten. Deze ramingen zijn gecontroleerd met gegevens van uitgevoerde projecten. Uit de ramingen volgt een correlatie tussen het debiet en de kosten.
- Leidingwerk: voor het leidingwerk is een vaste lengte van 200 m aangenomen. De kosten per project worden verder alleen bepaald door het debiet (diameter leiding).
- Ontwerp en advies: hiervoor is een vast percentage van de investeringskosten gehanteerd, namelijk 20%. Grotere projecten zijn meestal ingewikkelder, wat hogere kosten voor ontwerp en advies verantwoord. Vanwege het nieuwe karakter van HTO liggen de kosten voor ontwerp en advies relatief hoog. De verwachting is dat in de toekomst de kosten door ervaring en standaardisatie zullen dalen.
- Onvoorzien: voor deze post wordt een vast percentage van de investeringskosten gehanteerd (10%).



## OPEX

Van de exploitatiekosten is per kostenpost gekeken waar deze van afhangt (zie Tabel 6.4). Een korte toelichting is gegeven onder de tabel. Aanvullend is aangegeven of het om een vaste of variabele kostenpost gaat.

Tabel 6.4 Afhankelijkheid kostenpost exploitatiekosten

Kostenpost	Type	Afhankelijkheid
Opgeslagen warmte	Variabel	Opgeslagen bronwarmte
Elektriciteit	Variabel	Elektriciteitsverbruik componenten
Waterbehandeling	Variabel	Opgeslagen bronwarmte
Onderhoud en beheer bronnen	Vast	n.v.t.
Onderhoud en beheer pompen	Variabel	Debiet
Onderhoud en beheer overig	Vast	Percentage van investering
Monitoring & BRL	Vast	n.v.t.
Abandonneren	Vast	n.v.t.

- Opgeslagen warmte: de kosten hiervan hangen af van de bron van de opgeslagen warmte. Dit wordt in de Design Toolkit berekend.
- Elektriciteit: de elektriciteitskosten hangen af van het elektriciteitsverbruik en van de elektriciteitsprijs. Hoe het elektriciteitsverbruik bepaald wordt, is hierboven in de paragraaf duurzaamheid uitgelegd. In de Design Toolkit wordt bepaald welke elektriciteitsprijs gehanteerd wordt.
- Waterbehandeling: deze kosten hangen af van de hoeveelheid opgeslagen warmte. Per GJ opgeslagen warmte wordt een vast tarief gehanteerd.
- Onderhoud en beheer bronnen: voor het reinigen van de bronnen en een inspectie van de bronpompen wordt een vast bedrag per jaar betaald.
- Onderhoud en beheer bronpompen: Voor het vervangen van de bronpompen wordt per jaar een bedrag gereserveerd. De hoogte van dit bedrag hangt af van de investeringskosten van de bronpompen en dus indirect van het debiet. De levensduur van de bronpomp in de hete bron is ingeschat op 5 jaar. De levensduur van de lauwe bron is ingeschat op 15 jaar.
- Onderhoud en beheer overig: voor deze post wordt een bedrag van 4% van de investeringskosten voor putbehuizing, technische ruimte en leidingwerk gehanteerd.
- Monitoring & BRL: dit is een vast bedrag per jaar.
- Abandonneren: dit is vast bedrag als reservering per jaar.

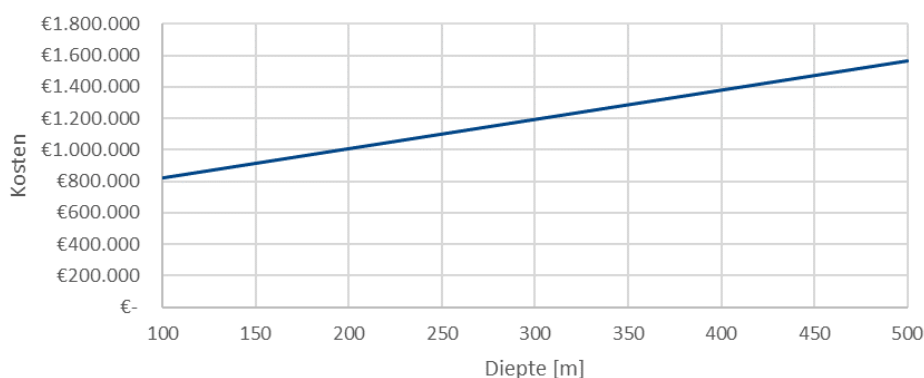
## Resultaten

De kosten van de HTO kan projectspecifiek worden berekend met behulp van de Design Toolkit. De kosten van de HTO zijn deels afhankelijk van zaken die buiten de demarcatie vallen (zoals de elektriciteitsprijs). Hieronder worden eerst de formules voor de berekening van de kosten gegeven. Daarna zijn illustratief de kosten berekend aan de hand van voorbeeldcases.

### Investeringskosten

Zoals beschreven in de methodiek zijn de kosten afhankelijk van de diepte en het debiet van de HTO. In Figuur 6.11 zijn de kosten van de proefboring en bronnen afgezet tegen de diepte weergegeven. De formule van deze kosten is als volgt:

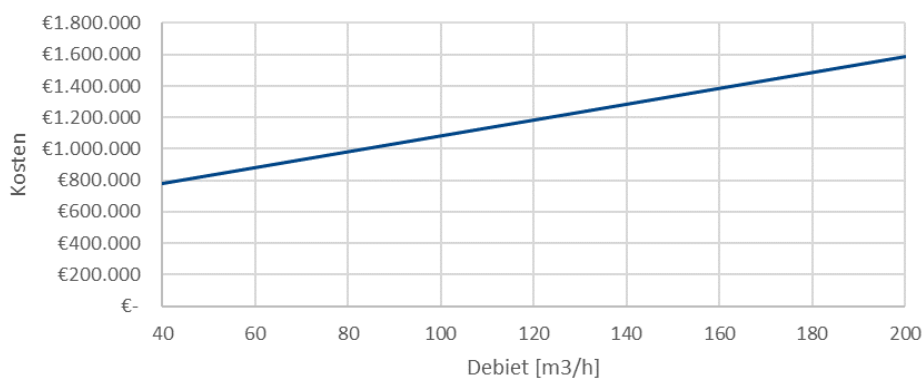
$$\text{Kosten proefboring} + \text{bronnen} = \text{€ } 1.860 * \text{diepte (m)} + \text{€ } 634.932$$



Figuur 6.11 Kosten proefboring en bronnen afhankelijk van de diepte. Formule: kosten = € 1.860 \* diepte (m) + € 634.932

In Figuur 6.12 zijn de kosten van de bronpompen, technische ruimte en leidingwerk afgezet tegen het debiet weergegeven. De formule van deze kosten is als volgt:

$$\begin{aligned} \text{Kosten bronpompen} + \text{technische ruimte} + \text{leidingwerk} \\ = \text{€ } 5.050 * \text{debiet (m}^3/\text{h)} + \text{€ } 578.773 \end{aligned}$$



Figuur 6.12 Kosten bronpompen, technische ruimte en leidingwerk afhankelijk van debiet. Formule: kosten = € 5.050 \* debiet (m³/h) + € 578.773

De ontwerp en advieskosten worden geschat op 20% van de investeringskosten. Dit is relatief hoog vanwege het innovatieve karakter en beperkte ervaring met HTO. Deze kosten zullen naar verwachting dalen. Voor de post onvoorzien wordt een vast percentage van 10% geschat.

De formule van de totale investeringskosten (CAPEX) wordt dan als volgt:

#### CAPEX

$$\begin{aligned}
 &= \text{Diepteafhankelijke kosten} + \text{debiet afhankelijke kosten} + \text{ontwerp en advies} + \text{onvoorzien} \\
 &= (100\% + 20\% + 10\%) * \left( \text{€ } 1.860 * \text{diepte (m)} + \text{€ } 634.932 + \text{€ } 5.050 * \text{debiet} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) + \text{€ } 578.773 \right) \\
 &= 130\% * \left( \text{€ } 1.860 * \text{diepte(m)} + \text{€ } 5.050 * \text{debiet} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \right) + \text{€ } 1.213.705
 \end{aligned}$$

#### OPEX

De hoogte van de jaarlijkse exploitatiekosten (OPEX) wordt als volgt berekend:

$$\begin{aligned}
 \text{OPEX} &= \text{€ } 134.646 + \text{€ } 424 * \text{debiet} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) + (\text{€ } 0,28 + \text{kosten bronwarmte}) \\
 &\quad * \text{opgeslagen bronwarmte (GJ)} + \text{elektriciteitsstarief} * \text{elektriciteitsverbruik}
 \end{aligned}$$

#### Voorbeeldcases

De uiteindelijke kosten kunnen pas berekend worden na het uitvoeren van een analyse in de Design Toolkit. Vanuit de analyse volgt namelijk, in interactie met de rest van het systeem, de omvang van het systeem, de hoeveelheid opgeslagen bronwarmte en het elektriciteitsverbruik.

Ter illustratie is in deze bijlage de specifieke kosten berekend van voorbeeldcases. In de cases is voor het bepalen van de investeringskosten gevarieerd met diepte (100 en 200 m-mv) en debiet (100 en 200 m-mv). Voor het bepalen van de exploitatiekosten is gevarieerd met het debiet (100 en 200 m<sup>3</sup>/h) en de prijs voor de opgeslagen warmte (2,5 en 5 €/GJ). In Tabel 6.5 zijn de gekozen waarden voor andere gebruikte variabelen weergegeven. De waarden van de SPF zijn hetzelfde als gebruikt bij de voorbeeldcases over duurzaamheid. De gekozen waarden zijn ter illustratie en dienen per project bepaald te worden.

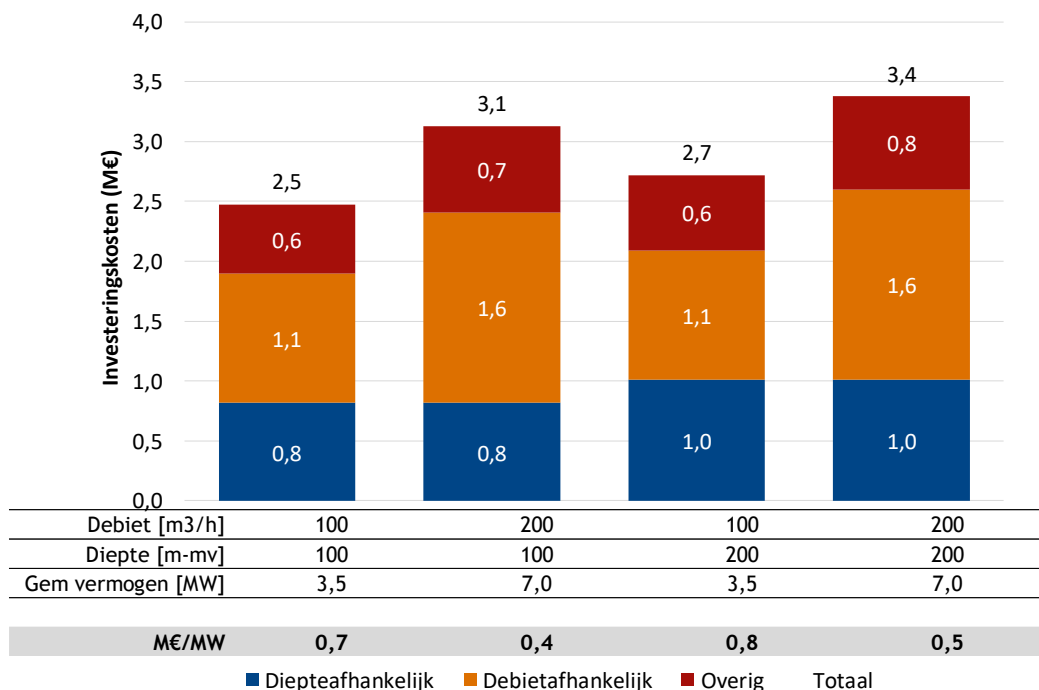
Tabel 6.5 Gebruikte waarden variabelen

Variabele	Eenheid	Waarde
Vollasturen bronpompen	[h]	3.000
Opslagrendement	[%]	70
Injectietemperatuur hete bron	[°C]	85
Injectietemperatuur lauwe bron	[°C]	42
SPF Lauwe bronpomp	[-]	75
SPF Hete bronpomp	[-]	150
SPF Technische ruimte	[-]	100
Elektriciteitsprijs <sup>7</sup>	[€/MWh]	104,82
Prijs opgeslagen warmte <sup>8</sup>	[€/MWh]	8,7

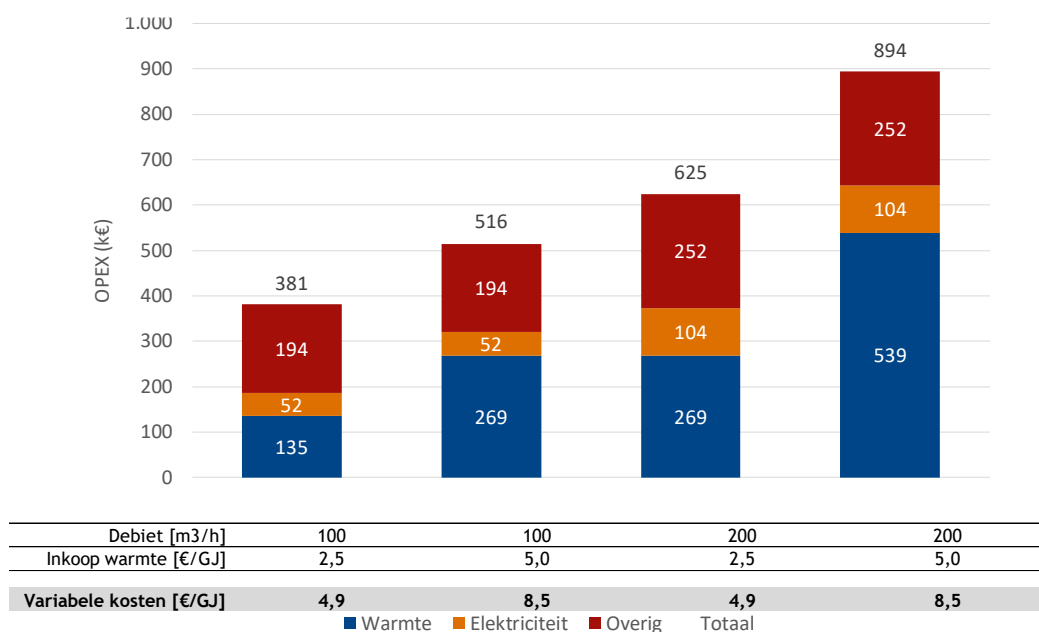
<sup>7</sup> De elektriciteitsprijs bestaat uit de groothandelsprijs en belasting. Voor de groothandelsprijs is de waarde uit de Klimaat en Energieverkenning 2022 voor het jaar 2025 genomen. De bijbehorende grootverbruikers belasting voor het jaar 2025 komt uit het Belastingplan 2023.

<sup>8</sup> De prijs van de opgeslagen warmte is gebaseerd op de marginale kosten van het produceren met aardwarmte. De marginale kosten hiervan komen uit het SDE++ OT model 2023 van de categorie Diepe geothermie (basislast) >= 20 MW<sub>th</sub>. De variabelen operationele kosten representeren de marginale kosten.

De resulterende investeringskosten en exploitatiekosten per case zijn weergegeven in Figuur 6.13 en Figuur 6.14.



Figuur 6.13 Investeringskosten per case, illustratief



Figuur 6.14 Exploitatiekosten per case, illustratief. Deze zijn niet afhankelijk van het de diepte.

De berekende investeringskosten variëren bij de gekozen cases tussen de 2,5 en 3,4 M€. Een stijging van het debiet van 100 m<sup>3</sup>/h naar 200 m<sup>3</sup>/h zorgt voor een stijging van de investeringskosten van circa € 650.000. Dieper boren van 100 naar 200 meter voegt circa € 250.000 toe aan de investeringskosten. Als KPI voor de investeringskosten is gekeken naar de specifieke investering ten opzichte van het thermisch vermogen. Deze varieert tussen de 0,4 en 0,8 M€/MWt. Hierbij is gerekend met het gemiddelde vermogen van de HTO bij teruglevering.

De exploitatiekosten variëren bij de gekozen cases tussen de € 381.000 en € 894.000 per jaar. De exploitatiekosten zijn onafhankelijk van de diepte. De exploitatiekosten worden voor een groot deel bepaald door de kosten van de opgeslagen warmte. Voor een financieel haalbaar project is het van belang dat warmte opgeslagen kan worden tegen zo laag mogelijke kosten. Dit betekent dat in ieder geval de marginale kosten beperkt dienen te zijn.

### KOSTENREDUCTIE

Vanwege het innovatieve karakter van HTO liggen de kosten nu nog hoog. De verwachting is dat de kosten in de toekomst zullen dalen, onder andere door innovaties en het opdoen van praktische ervaring en standaardisatie. Het is moeilijk om daar een goede inschatting voor te geven. In plaats daarvan zijn hieronder een aantal punten benoemd en zijn, waar mogelijk, grove inschattingen gemaakt.

- Ontwerp, advies en vergunningen: dit omvat de kosten van al het voorbereidende werk van het project. Deze zijn momenteel ingeschat op 20%. In de toekomst zal dit door ervaring en standaardisatie dalen. Als voorbeeld wordt gekeken naar aardwarmte. Dit zijn ook complexe projecten waarbij al wel meer ervaring is opgedaan. Voor een typisch project bedragen daarvan de kosten voorafgaand aan realisatie circa 10% van de totale investering. Verwacht wordt dat dit op termijn bij HTO ook mogelijk moet zijn.
- Onttrekkingsnorm: de NVOE-norm schrijft voor WKO systemen voor wat de maximale snelheid op de boorgatwand mag zijn. Of en hoeveel in de praktijk de NVOE-norm overschreden kan worden dient door middel van onderzoek te worden vastgesteld. Eerste inschattingen geven aan dat een factor 2 wellicht mogelijk is. Ter illustratie is een rekenvoorbeeld gegeven.
  - HTO met debiet 300 m<sup>3</sup>/h, 2 doubletten, diepte van 200 m-mv: kosten bronnen 1.700 k€
  - Zelfde systeem, maar 1 doublet in plaats van 2 doubletten: kosten bronnen 1.100 k€De investeringskosten dalen in het rekenvoorbeeld dus met 600 k€.
- Bronpompen: de ESP's die momenteel worden toegepast, zijn duur in aanschaf. De kosten voor een pomp met een debiet van 150 m<sup>3</sup>/h zijn ingeschat op 125 k€. Vanwege de hoge temperaturen is ingeschat dat de ESP in de hete bron een levensduur van 5 jaar heeft. Dit komt overeen met een jaarlijkse reservering van 25 k€ per jaar. Wanneer het lukt om de levensduur te verlengen naar 15 jaar, wat gangbaar is bij WKO pompen, dalen de jaarlijkse reserveringskosten tot onder de 5.000 euro per jaar.

## Bijlage 3 Innovaties

Innovaties dragen bij aan de haalbaarheid van HTO. Doelen van innovaties kunnen verschillend zijn. Het kan bijvoorbeeld de flexibiliteit of betrouwbaarheid verhogen, op het van de kosten verlagen of inkomsten verhogen. Hieronder zijn een aantal belangrijke innovaties opgesomd die voorzien worden.

### Bronpompen

De temperaturen in de HTO, en dan met name in de hete bron, zijn te hoog om standaard WKO pompen toe te passen. De pompen die nu zijn toegepast bij HTO zijn zogenaamde ESP's (Electrical Submersible Pumps). Deze pompen worden ook toegepast bij aardwarmte. Deze zijn relatief duur. Ook geeft de fabrikant aan dat het aantal start/stops van dit type pomp zoveel mogelijk beperkt moet worden in verband met de levensduur van de pomp. Dit beperkt de flexibiliteit van het HTO systeem (zie ook regelstrategie). Hieronder staan een aantal mogelijke oplossingsrichtingen die onderzocht kunnen worden in overleg met de leveranciers:

- In hoeverre kunnen bestaande ESP's binnen HTO flexibeler worden ingezet?
- In hoeverre kunnen bestaande WKO pompen hogere temperaturen aan?
- Welke pompen zijn beschikbaar in andere sectoren?
- Ontwikkeling van een nieuw type pomp

### Isolatie bronnen

Langs de wanden van de bronnen treden warmteverliezen op. Het warmteverlies resulteert in een temperatuurverlies. Deze verliezen treden zowel op bij het laden van de HTO als bij het terugleveren. De verliezen kunnen significant zijn, zeker wanneer de filters van de bronnen diep liggen of wanneer het temperatuurverschil tussen de hete en lauwe bronnen beperkt is. Het temperatuurverlies kan in de orde grootte van circa 2°C liggen. In totaal kan dit resulteren in een temperatuurverlies van 4°C (opslag + terugleveren). Wanneer het temperatuurverschil tussen de hete en lauwe bron 40°C bedraagt, komt dit overeen met een verlies van circa 10%. Momenteel worden niet geïsoleerde bronnen toegepast. Het toepassen van geïsoleerde bronnen kan het warmteverlies significant reduceren.

Een bijkomend voordeel van het isoleren van de put is dat sneller, eenvoudiger en veiliger onderhoud aan de bronpomp kan worden verricht. Door de hoge temperatuur in de put staat er normaal gesproken druk op de bronkop. Bij de huidige systemen houdt dat in dat het water in de put tot onder 40°C graden wordt afgekoeld. Met een bypass op de bronkop wordt dan water afgevoerd terwijl er een verhoogde opstelling wordt gemonteerd, zodat op een hoogte van 4 meter kan worden gewerkt. Dat is dan bij die temperatuur de hoogte van de waterkolom. Door de put te isoleren, hoeft slechts het volume in de put teruggebracht te worden tot een lagere temperatuur. De grond om de put heen is dan niet (of beperkt) opgewarmd en kan dus niet het water opnieuw opwarmen. Zo kan het onderhoud op een vergelijkbare manier plaatsvinden als bij WKO systemen.

### Injectievoorziening

De standaard WKO injectievoorziening is vanwege de hogere temperaturen niet toegepast. In plaats daarvan zijn verschillende, losse injectiepijpen toegepast in combinatie met kleppen. In overleg met leveranciers dient afgestemd te worden of en in hoeverre bestaande injectiesystemen geschikt zijn of gemaakt kunnen worden voor hogere temperaturen.

### **Materiaalkeuze**

Qua materiaalkeuze kunnen diverse zaken onderzocht worden. Momenteel wordt een mix van glasvezelversterkt kunststof (GRE) en roestvast (RVS) staal toegepast. GRE wordt met name toegepast voor het leidingwerk en RVS voor de bochtstukken. RVS heeft als voordeel dat er kleinere radii mogelijk zijn, wat de inpasruimte beperkt. Het nadeel van RVS is dat de wanden ruwer zijn, waardoor meer wrijvingsverliezen optreden. Ook kan het, vanwege het zoutgehalte en hoge temperaturen, toch roesten. Bij voorkeur wordt RVS volledig vermeden, waardoor er geen roest meer op kan treden. Wanneer er geen metalen onderdelen meer worden toegepast bij de bronkoppes, is een bijkomend voordeel dat de stikstofdosering achterwege gelaten kan worden. De mogelijkheden van andere, meer temperatuurbestendige kunststoffen kan onderzocht worden, zoals bijvoorbeeld PVC-C en HDPE.

### **Regelstrategie**

In de huidige regelstrategie toert de HTO wel op en af, maar wordt het aantal start/stops beperkt. Wanneer het mogelijk is om meer start/stops te maken (zie ook kopje bronpompen), kan de HTO veel flexibeler worden ingezet. Dit is met name zinvol in het tussenseizoen, wanneer er wisselend behoefte zal zijn aan opslag en levering.

### **Onttrekkingsnorm**

Bij WKO wordt gerekend met een NVOE-norm. Deze norm schrijft de maximale snelheid op de boorgatwand voor om zandproductie te voorkomen. Bij het HTO project van ECW en bij diverse proefboringen zijn testen uitgevoerd met een verhoogd debiet. Tot op heden zijn hier geen significante hoeveelheden zandlevering bij geconstateerd. Ook zal door de hogere temperaturen de viscositeit afnemen, waardoor hogere snelheden op de boorgat wand mogelijk zijn (zie ook Bijlage 1). Wanneer het inderdaad mogelijk is om hogere snelheden toe te passen, kan met eenzelfde systeem en investering meer vermogen en warmte geleverd worden.

IF Technology **Creating energy**



Velperweg 37  
6824 BE Arnhem  
Postbus 605  
6800 AP Arnhem

T 026 35 35 555  
E [info@iftechnology.nl](mailto:info@iftechnology.nl)  
I [www.iftechnology.nl](http://www.iftechnology.nl)

NL60 RABO 0383 9420 47  
KvK Arnhem 09065422  
BTW nr. NL801045599B01

IF Technology **Creating energy**