

Hogetemperatuuropslag

Leidraad

Juli 2026



Inhoud

Samenvatting

- Aanleiding
- Wat is HTO?
- Waar is HTO mogelijk?
- Inpassing van HTO in een warmtenet
- SWOT-analyse HTO
- Hoe verder met HTO?

Wat is HTO?

- Wat is een HTO?
- Hoe werkt een HTO?
- Toepassing
- Wat is MTO?
- Voorbeelden
- Stand van zaken
- Recente onderzoeksresultaten

Waar is HTO mogelijk?

- Is HTO mogelijk?
- De ondergrond
- Proefboring
- Milieueffecten
- Ruimtelijke inpassing in de bovengrond
- Kosten
- Netcapaciteit elektriciteit
- Wet- en regelgeving

Waar is HTO nuttig?

- De rol van HTO in het regionale toekomstbeeld
- De inpassing van warmteopslag in het warmtesysteem
- MTO/HTO met geothermie
- MTO/HTO met restwarmte
- MTO/HTO als piek en back-up

Hoe verder met HTO?

- Hoe verder met HTO?
- Verschillende rollen in de ontwikkeling van HTO
- Obstakels
- Wat zijn kansen?

Bijlagen

- Literatuur
- Afkortingenlijst

Samenvatting



Aanleiding

Hogetemperatuuropslag (HTO) is een veelbelovende opslagtechniek die zich in de innovatiefase bevindt. Het wordt ontwikkeld in tal van programma's en verschillende samenwerkingen. De afgelopen jaren is er veel ervaring en kennis opgedaan met de ontwikkeling. Die kennis is echter verspreid onder veel organisaties en onderzoekers.

De Energieregio Rotterdam – Den Haag heeft aan CE Delft en Greenvis gevraagd om een leidraad op te stellen. CE Delft en Greenvis hebben in dit document de gedocumenteerde kennis en de parate expertise van kennishouders samengebracht.

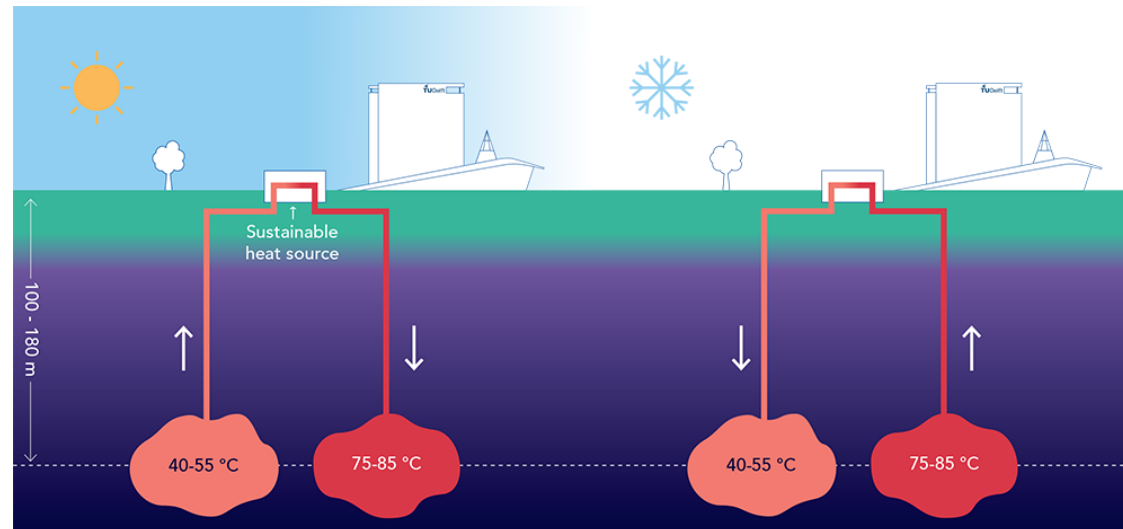
Het doel van deze leidraad is om te dienen als kennisdocument voor beleidsmakers. Zo kunnen zij op een gefundeerde manier HTO meenemen in hun warmteprogramma's en de ontwikkeling en realisatie van HTO in de regio versnellen.

Een toekomstbestendige midden- en pieklastvoorziening is nodig voor een duurzame warmtevoorziening door warmtenetten. HTO kan over seizoenen overschotten aan goedkope warmte opslaan en later afgeven. Hierdoor hoeft veel minder gebruik te worden gemaakt van minder wenselijke alternatieven voor piekvoorzieningen. Het gebruik van minder wenselijke opties kan door een HTO dalen van 20% naar 4%. Hierbij vervangt HTO bijvoorbeeld aardgas (hoge CO₂-uitstoot) of elektrische opties (netbelastend). Hoewel de huidige focus van de verduurzaming van warmtenetten zich richt op duurzame basislastbronnen zoals restwarmte(transport) en geothermie, is HTO een belangrijke optie om de midden- en pieklast te verduurzamen.

Om te zorgen dat HTO op tijd gerealiseerd kan worden, moet nu al rekening gehouden worden met het inpassen van HTO in de ondergrond, de bovengrond, de warmtevoorziening en het elektriciteitsnet.

Wat is HTO?

Hogetemperatuuropslag (HTO) is een vorm van een open bodemenergiesysteem (OBES) en de werknaam voor ondergrondse opslag van heet water in aquifers. Het principe is hetzelfde als een warmte-koudeopslag (WKO), maar wordt uitgevoerd op temperaturen van 50 tot 95 °C. Een HTO is een ondergrondse opslag van warmte, waarbij gebruik wordt gemaakt van bestaande lagen in de bodem. Doordat gebruik gemaakt wordt van de ondergrond kunnen zeer grote opslagvolumes gerealiseerd worden van 250.000 m³ tot meer dan een miljoen m³.



Een HTO heeft een minimale impact op de bovengrond. Het is de goedkoopst beschikbare techniek om grote volumes warmte op te slaan.

Een nadeel is dat het systeemrendement laag is in vergelijking met alternatieve opslagtechnieken. Een HTO verliest veel warmte aan de omgeving.

De businesscase hangt sterk af van het samenspel tussen de benodigde investeringen, exploitatiekosten en opbrengsten. Een HTO moet geoptimaliseerd worden ingezet, waarbij rekening moet worden gehouden met het totale warmtenetsysteem (van bron tot klant).

De techniek bevindt zich in de demonstratiefase: er is één werkende HTO in Middenmeer en momenteel wordt een HTO ontwikkeld voor de TU Campus en de gebouwde omgeving in Delft. Er lopen verschillende onderzoeksprogramma's met pilotlocaties in Nederland, zoals in Utrecht. Deze onderzoeksprogramma's zijn bedoeld om HTO's verder te ontwikkelen op technische, juridische en financiële aspecten.

Illustratie van een HTO-systeem.

In de zomer wordt overtollige warmte gebruikt om water uit de warmte bron te verhitten en te injecteren in de hete bron. In de winter wordt het systeem omgedraaid en wordt het hete water opgepompt. De warmte wordt ingezet in het warmtenet en het warme water wordt teruggeïnjecteerd in de warme bron.

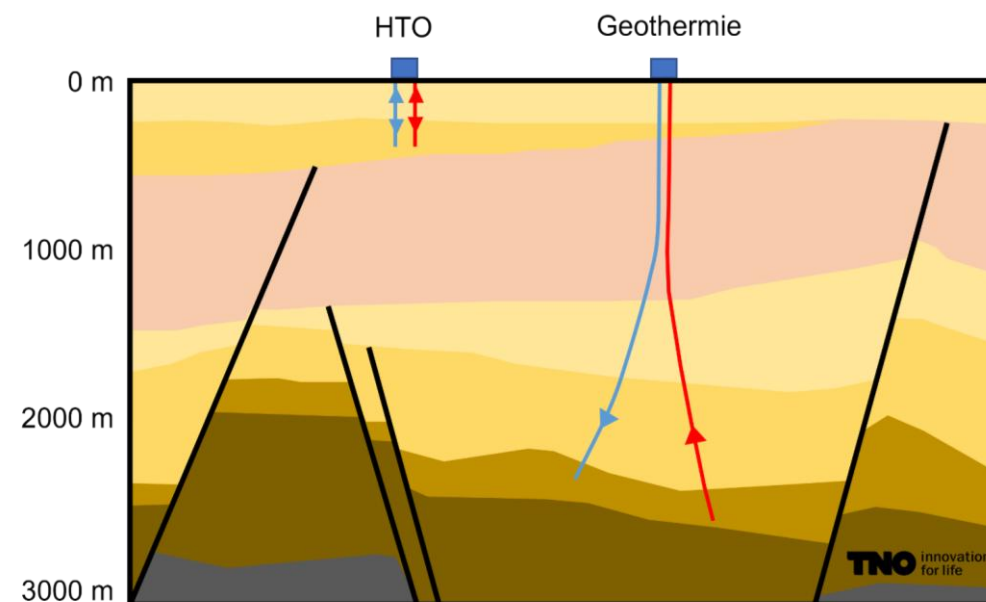
Bron: TU Delft.

Waar is HTO mogelijk?

Voor de realisatie van een HTO moet aan de juiste randvoorwaarden worden voldaan:

- De opbouw van de ondergrond moet juist zijn en er moet een zandlaag aanwezig zijn waarin warmte kan worden opgeslagen. Deze moeten omgeven zijn met afsluitende kleilagen.
- De chemische kwaliteit van de ondergrond moet ook goed zijn, hierbij moet rekening worden gehouden met de effecten die opwarming van de ondergrond veroorzaakt. Een proefboring kan uitsluitsel geven over de eigenschappen van de ondergrond.
- Met een bodemenergieplan kan de gemeente ondergrondse activiteiten plannen. Hiermee kan worden voorkomen dat deze elkaar beïnvloeden.
- Bovengronds moet rekening worden gehouden met de ruimte, netaansluiting en de plaatsing in het warmtenet.

Na de realisatie moet een HTO blijvend gemonitord worden om te voorkomen dat er onacceptabele negatieve effecten op de leefomgeving ontstaan.



Inpassing van HTO in een warmtenet

In deze leidraad zijn verschillende usecases voor HTO modelmatig onderzocht. Voor een goede businesscase van een HTO is een groot en goedkoop warmteoverschot noodzakelijk in de zomer. Hierbij kan een speciaal zomertarief voor restwarmte uitkomst bieden om de oplaadkosten te drukken.

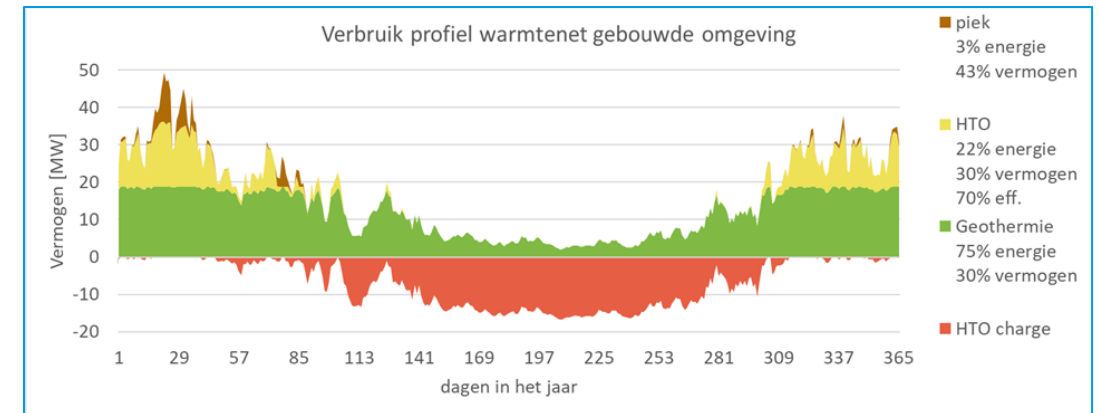
In de figuur is een 'badkuipfiguur' te zien, met een typisch vraagprofiel voor warmte voor de gebouwde omgeving. Het overschot van de basislastbron wordt in de zomer gebruikt om de HTO op te laden (rood). Deze warmte wordt in de winter ingezet als midden- en pieklastvoorziening (geel).

Een HTO kan worden ingezet om 10-20% meer warmte uit een basislastbron nuttig in te zetten. Deze opgeslagen warmte kan daarmee aardgas van pieketels vervangen. Hierdoor daalt het aandeel fossiele inzet, bij vergelijkbare of zelfs lagere nationale kosten.

Als een HTO met warmtepomp moet worden uitgevoerd, dan zal de inzet van een HTO in een warmtenet waarschijnlijk niet leiden tot lagere kosten, maar zorgt het wel voor een lagere koolstofvoetafdruk van het systeem.

Daarom wordt een HTO bij voorkeur lokaal ingepast achter de hoofdaansluitpunten (HAP) of onderstations (WOS) van grootschalige warmtenetten of nabij lokale geothermiebronnen. Hierdoor is het vaak mogelijk om de warmte met een lagere temperatuur uit een HTO te leveren, waardoor een warmtepomp kan worden vermeden.

Als de transportcapaciteit of broncapaciteit van een warmtenet beperkt is, biedt HTO mogelijkheid tot additionele groei en flexibiliteit. Hierdoor zijn er strategische voordelen voor de ontwikkelaar om zowel HTO als basislastbronnen te ontwikkelen. Een HTO kan zo modulaire groei van warmtenetten mogelijk maken totdat er voldoende vraag is om nieuwe basislastbronnen te realiseren.



Warmtevraag profiel fictief warmtenet in combinatie met inzetprofiel van geothermie (groen) en HTO laden (rood) en ontladen (geel), en een restant inzet van piek (bruin). Bron: CE Delft en Greenvis.

SWOT-analyse HTO

Interne herkomst

Sterktes

- HTO kan de totale systeemefficiëntie optimaliseren en draagt daarmee bij aan de performance, haalbaarheid en duurzaamheid van een warmtenet-oplossing. Daarmee vermindert ook de afhankelijkheid van de bron.
- Het is een relatief goedkope, simpele en robuuste techniek in vergelijking met andere vormen van langetermijnenergieopslag.
- Er worden nauwelijks kritische mineralen of metalen gebruikt voor deze vorm van opslag, daarmee is het een duurzame oplossing in de productiecyclus.
- Er is veel ervaring met WKO-systemen, waarop verder gebouwd kan worden voor HTO. Zo is de verwachting dat HTO ook veilig en betrouwbaar ingezet kan worden.

Zwaktes

- HTO verhoogt de complexiteit van het systeem afhankelijk van de beoogde inzet. Dit vraagt expertise in ontwikkeling en exploitatie.
- Het is nog een relatief nieuwe techniek met beperkte praktijkervaring, waardoor er nog 'kinderziektes' aanwezig zijn.
- Warmte is een 'laagwaardig' product, de verwachte businesscase is uitdagend door de beperkte marge die gemaakt wordt.
- De werkelijke efficiëntie en behaalde baten zijn sterk afhankelijk van wijze van integratie en interactie met het warmtenet (retourtemperatuur).

Externe herkomst

Kansen

- Er vindt veel onderzoek en innovatie plaats op het gebied van HTO, ervaringen en nieuwe oplossingen nemen toe, zoals ook de combinatie met kortetermijnopslag voor afvlakken van pieken gedurende de dag.
- Het kan voor verschillende doeleinden ingezet worden zoals: piek, reserve, flexibel en dynamisch, en seizoensopslag.
- Het is mogelijk om langdurig warmte op te slaan die kan worden geproduceerd tijdens momenten van lage elektriciteitsprijzen.
- Het is relatief makkelijk te integreren in de gebouwde omgeving doordat het bovengronds weinig impact en ruimte nodig heeft.

Bedreigingen

- Inpassing in omgeving kan tegen bezwaren aanlopen afhankelijk van variant (ruimtelijke inpassing of mogelijk invloed op omgeving).
- De businesscase moet vaak terugverdiend worden op een combinatie van baten die geïntroduceerd worden op het hele systeem. Naast de EIA en de WIS zijn er weinig subsidies voor de opslag van warmte.

Positieve factoren

Negatieve factoren

Hoe verder met HTO?

HTO is nog in de pilotfase en bij de ontwikkeling van HTO zijn veel verschillende partijen betrokken, zoals overheden, investeerders, ontwikkelaars, bronhouders en onderzoekers. Al deze partijen moeten stappen zetten om HTO's in de regio te realiseren.

Wij zien de volgende vier aanbevelingen als de belangrijkste acties om HTO te stimuleren, gericht op vier partijen die een centrale rol spelen in de ontwikkeling van HTO.

Overheid: Proefboringgarantie

- Dek het risico af van tegenvallende resultaten van een proefboring. Dit zorgt voor een lager risico in de ontwikkeling van een HTO.

Ontwikkelaars: Ontwikkel een aantrekkelijke productcombinatie als nieuwe standaard

- Standaardiseer de productcombinatie geothermie met HTO tot een marktrijs, aantrekkelijk en integraal aanbod.
- Werk ook productcombinaties met andere duurzame HT-warmtebronnen (zoals restwarmte) verder uit.

Energieregio: Duidelijk toekomstbestendig duurzaam systeem

- Ontwikkel een integraal ontwerp voor een duurzaam warmtenetcluster, waarin HTO altijd wordt meegenomen in de overweging.

Warmtebronhouders: Slim kosten en baten bij (één) geschikte partij(en) brengen

- Vraag lagere tarieven voor warmtelevering in de zomer.
- Breidt de rol van bronhouder uit met beheer HTO, zodat zij lage zomerwarmtekosten kunnen terugverdienen in de winter en het systeem kunnen optimaliseren.

Wat is HTO?



Wat is HTO?

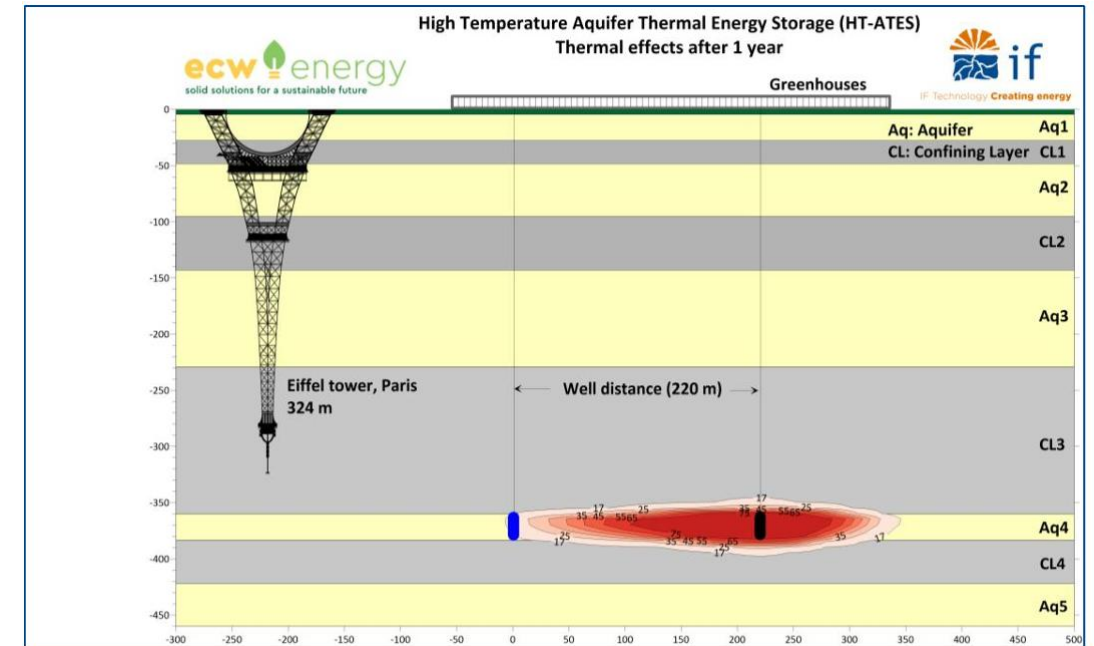
Een HTO-systeem is een warmteopslagtechniek waarmee een grote hoeveelheid aan hogetemperatuurwarmte opgeslagen kan worden voor langere periode in de ondiepe ondergrond. Tot een diepte van 500 m valt de HTO-boring onder de Omgevingswet, dieper valt het onder de Mijnbouwwet.

Een HTO-systeem lijkt op een WKO-systeem (warmte-koudeopslag). Alleen spreken we bij HTO niet van een 'warme en koude bron', maar van een 'hete en warme bron'. In de hete bron wordt heet water met een temperatuur tot 95 °C opgeslagen, bij een WKO-systeem is dit maximaal 25 °C.

Zowel een WKO als een HTO maakt gebruik van een watervoerend pakket in de ondergrond (zie figuur). Dit is een zandlaag die aan de boven- en onderzijde is ingesloten door kleilagen zodat het water niet kan wegstromen. Dit pakket wordt aangeboord met één of meerdere doubletten. Een doublet is één hete en één warme bron samen.

HTO wordt net als een WKO voornamelijk ingezet als een seizoensopslag. Dit verschilt wezenlijk van andere warmtebuffers die voornamelijk dag/nacht variaties of zelfs kortere periodes van dynamische gedrag opvangen. Een HTO wordt vaak wel gecombineerd met een kleine tankbuffer om zo ook de dagelijkse variaties aan te kunnen.

Met specifieke type pompen (die zullen worden toegepast in Delft) kunnen HTO's vaker schakelen tussen laden/ontladen en aan/uit waardoor ze ook kortetermijnfluctuaties beter kunnen opvangen.

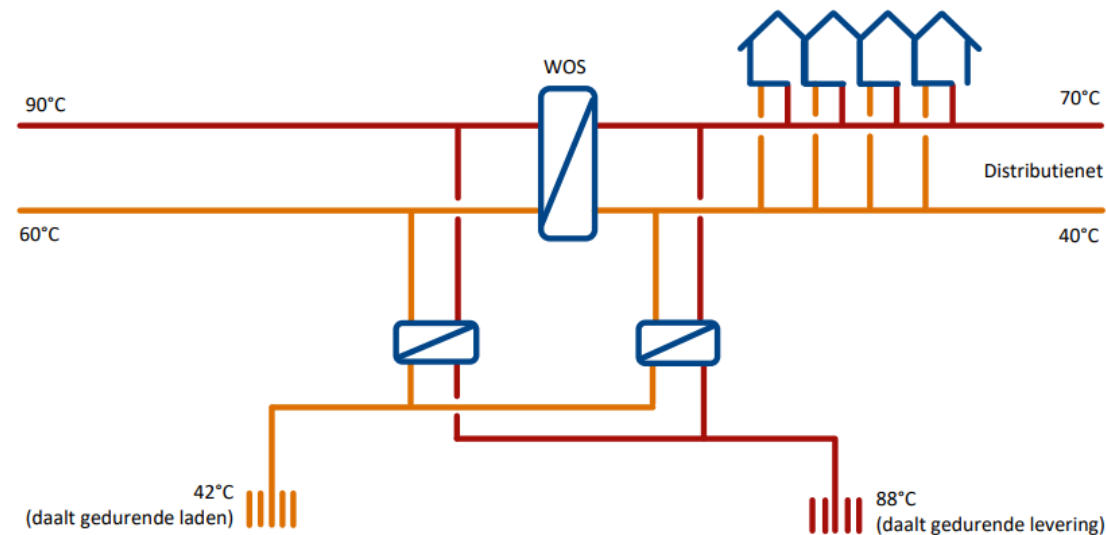


Hoe werkt een HTO?

Een HTO-systeem wordt geïntegreerd in een warmtenet. Dit is essentieel om het HTO-systeem zowel te kunnen laden als ontladen.

Laadcyclus

Een HTO-systeem wordt geladen door grondwater te onttrekken uit de warme bron en deze te verwarmen. Het verwarmen kan met warmte uit het warmtenet of direct uit de bron. Het hete water wordt vervolgens geïnjecteerd in de hete bron. Deze cyclus kan maanden duren en zo ontstaat een grote hete bel met verwarmd grondwater rond de hete bron.



Principeschema inpassing HTO bij een warmteoverdrachtstation (WOS) (EBN, IF Technology 2023).

Gescheiden systemen

Het warmtenet en de HTO zijn hydraulisch gescheiden: er komt geen water van het warmtenet in de ondergrond en geen water uit de ondergrond in het warmtenet.

Er wordt netto geen water onttrokken uit de ondergrond. Het reeds aanwezige grondwater wordt verpompt en als transport- en opslagmedium gebruikt voor warmte.

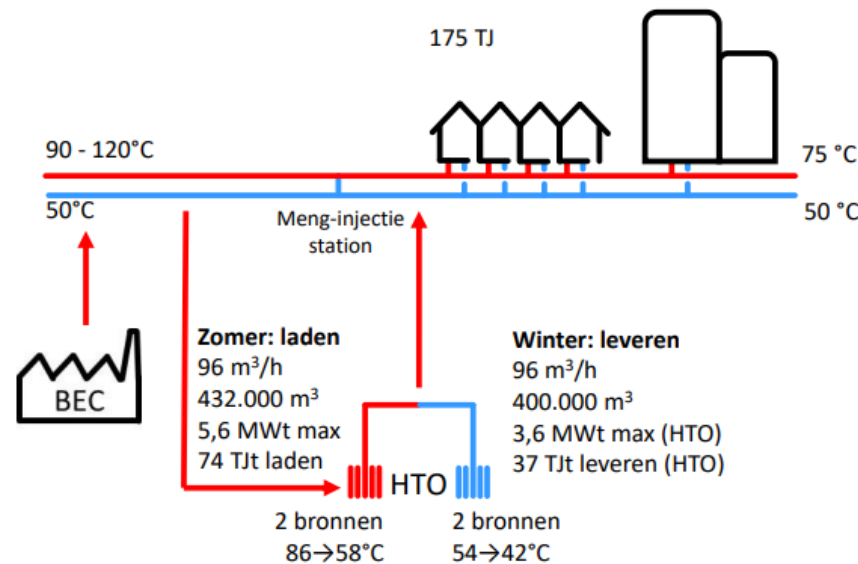
Ontlaadcyclus

Zodra de warmtevraag in het warmtenet toeneemt zal het HTO-systeem zijn warmte inbrengen in de ontlaadcyclus. Hiervoor wordt de pomprichting omgedraaid: het hete water in de hete bron wordt opgepompt en de warmte wordt geleverd aan het warmtenet. Het afgekoelde water wordt terug geïnjecteerd in de warme bron.

HTO zonder warmtepomp

Dankzij innovatieprogramma's zoals [WarmingUp](#) zijn er meerdere configuraties uitgewerkt voor een HTO-systeem.

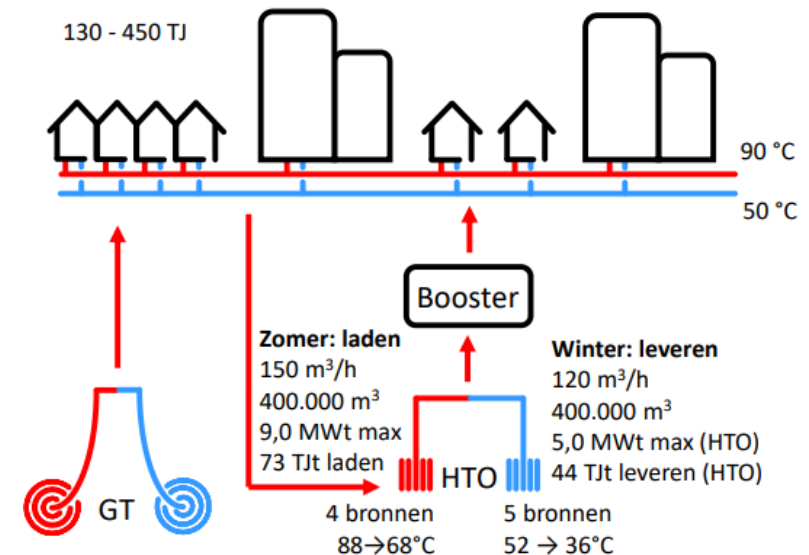
De eerste betreft een zogenaamd 'gecascadeerde' configuratie waarbij de warmte van een restwarmtebron gebruikt wordt om de bron op hoge temperatuur te laden. Vervolgens wordt de warmte uit het HTO-systeem op een lagere temperatuur gemengd met de restwarmtebron en benut voor directe levering aan een woonwijk. Hierbij wordt geen warmtepomp gebruikt. Hiervoor is een randvoorwaarde dat tussen de bron en levering een groot temperatuursverschil zit (+/- 20-30 °C).



Principeschema HTO voor Rotterdam Nesselande (IF Technology, 2020).

HTO met warmtepomp

Een tweede configuratie betreft een 'parallele' configuratie waarmee de HTO geladen wordt door geothermie en de HTO gecombineerd wordt met een warmtepomp. Hierdoor kan het HTO-systeem meer warmte terugwinnen uit de bodem en op de hogere temperatuur aan het warmtenet afleveren. Dit komt integratie in een bestaand warmtenetsysteem ten goede. Deze configuratie is duurder om te realiseren, door de hogere investerings- en operationele kosten voor de warmtepomp. Het HTO-rendement gaat omhoog, maar de COP van het hele systeem daalt. Uiteindelijk bepaalt een technische en economische afweging of deze variant de voorkeur krijgt.



Principeschema HTO voor Leeuwarden Geothermie (WarmingUp, 2020).

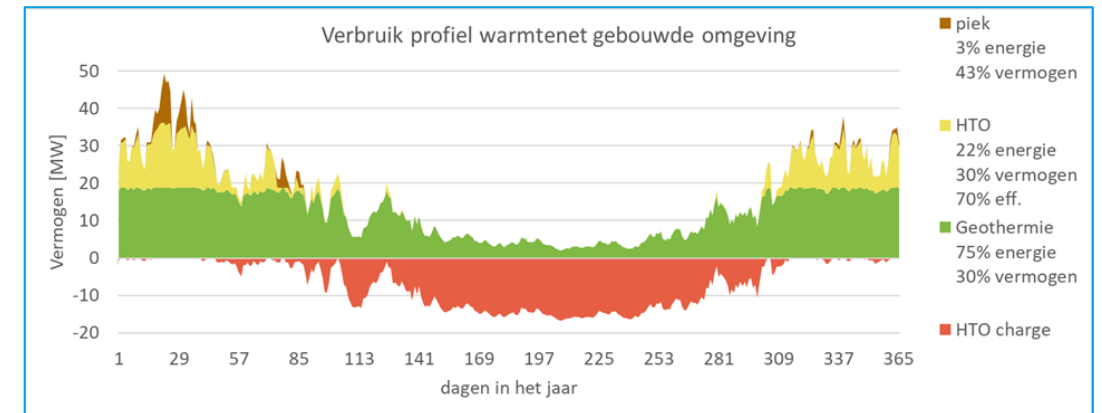
Toepassing

Een HTO-systeem is een seizoensopslagtechniek voor warmte. Het kan een oplossing zijn voor warmtenetten waar in de zomermaanden veel warmte onbenut blijft doordat de vraag lager is dan het aanbod van warmte. Dit kan bijvoorbeeld bij geothermie of restwarmtebronnen het geval zijn, omdat deze over het hele jaar door warmte kunnen leveren op een constant niveau. Ook bij zonnecollectoren is HTO een mogelijkheid, omdat die juist in de zomermaanden veel warmte genereren, wanneer de directe warmtevraag laag is.

Het figuur toont een typisch vraagprofiel van een warmtenet met een geothermiebron. Het overschot van een warmtebron kan worden opgeslagen in een HTO in de zomer. Dit wordt later benut als aanvulling op de warmteproductie in de wintermaanden. Hiermee kan de inzet van fossiele midden- of piekinstallaties teruggebracht worden. Dit komt de duurzaamheid en de betaalbaarheid van het hele warmtenet ten goede.

Ten opzichte van andere seizoensopslagoplossingen is een HTO interessant vanwege de laagste specifieke investeringskosten, het zeer grote opslagpotentieel per systeem en de kleine bovengrondse ruimtelijk impact.

Een HTO-systeem heeft ook kanttekeningen. Zo is de terugwinefficiëntie het hele jaar laag: 40-80%, afhankelijk van de specifieke toepassing (met of zonder warmtepomp) en de periode. De terugwinefficiëntie neemt in de loop van de exploitatie toe. Door dit hoge verlies neemt niet alleen de hoeveelheid warmte die teruggewonnen kan worden af, maar ook de temperatuur van de hete bron kan 10-20 °C lager zijn dan initieel geïnjecteerd. Deze temperatuu- daling kan ervoor zorgen dat een warmtepomp toegepast moet worden om deze warmte op te waarderen voor gebruik. Hierdoor moet de laadwarmte relatief goedkoop zijn om de investering in een HTO terug te kunnen verdienen.



Warmtevraag profiel fictief warmtenet in combinatie met inzetprofiel van geothermie (groen) en HTO laden (rood) en ontladen (geel), en een restant inzet van piek (bruin). Bron: CE Delft en Greenvis.

Wat is MTO?

Een middentemperatuursopslag (MTO) is een open bodemenergiesysteem (OBES) die net zoals een WKO en HTO warmte opslaat in een aquifer.

MTO is geschikt voor opslagvolumes vanaf 40.000 m³ en slaat warmte op van temperaturen tussen 25-45 °C. Een MTO kan warmte opslaan uit een (rest)warmtebron, de retourleiding van een warmtenet of een warmtepomp.

Verschil met WKO: Een MTO lijkt qua materialen en uitvoering sterk op een WKO. Een WKO is door regelgeving beperkt tot temperaturen tot 25 °C.

Er wordt onderzoek gedaan naar de invloed van de verhoogde temperatuur bij een MTO. Een hogere temperatuur is voordelig voor het warmtesysteem, maar mag nabijgelegen systemen of andere functies van de ondergrond niet verstoren. Door het verhogen van de temperatuur zijn er minder putten voor warmte-koudeopslag (WKO) nodig en kan in de zomer meer warmte worden opgeslagen. Daarnaast levert een MTO warmte die in de winter beter bruikbaar is, door de hoge temperaturen.

Verschil met HTO: Een HTO slaat warmte op hoge temperaturen op boven 50 °C. Vanaf 45 °C-50 °C is er een omslag voor het materiaalgebruik voor het systeem door de lagere dichtheid van water, andere chemische evenwichten (zoutneerslag) en hogere drukklasse. Dit zorgt voor een flinke verhoging van de investeringskosten. De investeringen in een MTO en WKO zijn een stuk

lager. Als laatste kan een HTO niet gebruikt worden om te koelen.

Een MTO lijkt dus het meest op een WKO in kosten en gebruik, waarbij ook hogere temperaturen binnen bereik zijn. Deze temperaturen zijn nuttig inzetbaar voor de glastuinbouw.

Er zijn al meerdere MTO-systemen, zoals de MTO in Groningen, in NIOO Wageningen, Heuvelgalerie, Koppert Cress, en een aantal projecten in ontwikkeling zoals het PEDFriendship-project of het TKI Anthura-project bij de glastuinbouw in Bleiswijk.

Meer info over [verhogen warmtebrontemperatuur WKO](#) naar MTO (KWR, 2025).

Type OBES aquifer	Temperatuur	Aantal systemen
WKO	Max. 25 °C	>3.000
MTO	25 °C-45 °C	~10
HTO	50 °C-95 °C	1

Voorbeeld: HTO Ennatuurlijk Middenmeer

In Middenmeer is het enige volledig operationele HTO-systeem actief. Het HTO-systeem is ontwikkeld als onderdeel van het Europese HEATSTORE-onderzoek.

Na een testboring in 2019 bleek dat de ondergrond in Middenmeer zeer geschikt is voor HTO. Op 360 m diepte vonden de geologen een 23 m dikke zandlaag, opgesloten door dikke kleilagen, met een goede doorlaatbaarheid en dikte. In de zomer van 2021 is het systeem opgeleverd en het heeft sindsdien vijf laad- en ontlaadcycli doorlopen.

Het is ontworpen voor 440.000 m³ grondwaterverplaatsing per seizoen. In de zomer wordt er warm water van 85 °C in de opslag geïnjecteerd. Bij aanvang van de winter wordt er warm water van 75 °C onttrokken wat ingezet wordt voor de verwarming van kassen. Het verlies van temperatuur zorgt dat niet alle warmte teruggewonnen wordt. Naar verwachting zal het rendement uitkomen op 70 tot 75% voor een opslagcapaciteit van ca. 20.000 MWh.

De prestaties van de installatie worden nauwgezet gemonitord. De distributie van de warmtebel en de ondergrondse temperatuur worden gemeten. Er lijkt geen ontoelaatbaar effect op de omgeving meetbaar (Energy Innovation NL, 2024).



De bovengrondse installatie van een van de HTO-putten en de monitoringsput



De bovengrondse installatie van een van de HTO-putten en de monitoringsput

Bron: Energy Innovation NL, 2024

Voorbeeld: MTO WarmteStad Groningen

WarmteStad ontwikkelt en produceert duurzame warmte. Bij Dorkwerd, op de Zernike Campus, wordt het grootste zonnewarmtepark van Nederland aangelegd. De warmte die de zonthermie oplevert, wordt in combinatie met de WarmteCentrale Zernike en restwarmte uit datacenters gevoed aan het Groningse warmtenet.

Het zonnewarmtepark heeft een oppervlakte van 12 ha. De zonnewarmte is voldoende voor 25% van het totale warmteverbruik van de ruim 12.500 aangesloten huishoudens en bedrijven uit Noordwest Groningen.

Het zonnewarmtepark gaat in de zomer veel meer warmte produceren dan gevraagd door het warmtenet. In de winter is dit andersom. Een grootschalig ondergronds opslagsysteem op basis van middelhogetemperatuuropslag (MTO, 45 °C) zal als seizoensopslag gaan fungeren. De MTO zal de warmte uit de retourleiding van het warmtenet opslaan om zo het totale systeemrendement te verbeteren.

IF Technology heeft in 2020 voor WarmteStad onderzocht of een MTO-systeem technisch en juridisch haalbaar is. In 2023 hebben er proefboringen plaatsgevonden om de geschiktheid van de bodem te bepalen (IFTechnology, 2023).



*Impressie van het
zoncollectorveld
van Warmtestad
Groningen*

*Aanboring van
één van de
MTO-bronnen
in Groningen*



(IF Technology, 2023).

Voorbeeld: HTO TU Delft

Op de campus van TU Delft is een HTO-systeem in ontwikkeling. Deze ontwikkeling is onderdeel van PUSH-IT en WarmingUp-GOO, respectievelijk een Europees en Nederlands onderzoeksprogramma naar ondergrondse warmteopslag.

Met dit systeem wordt overproductie van warmte vanuit de aardwarmtebron op de campus in de zomerperiode opgeslagen, zodat deze warmte gebruikt kan worden wanneer er veel vraag is in de koudere periode van het jaar. Hiermee kan de capaciteit van de geothermiebron beter benut worden. (IF Technology, 2024)

Warmtevraag	80 TJ/r
Diepte HTO	200 m
Opslagvolume	500.000 m ³
Temperatuur warme bron	40-55 °C
Temperatuur hete bron	75-80 °C
Capaciteit warmteopslag	40 TJ



Bron: TU Delft, Martin Bloemendal

Voorbeelden: Leerprojecten - Proefboringen

HTO in Nesselande – proefboring

Eneco heeft HTO-pilot in Rotterdam Nesseland niet verder doorgezet na de proefboring die in februari 2022 in Nesselande is uitgevoerd. Uit de proefboring bleek een minder gunstige bodemopbouw dan in de verkenning was verwacht. Modelberekeningen van het terugwinrendement lieten een veel lagere efficiëntie zien in vergelijking met de verkenning (IF Technology 2020).

HTO in Leeuwarden – proefboring

Ennatuurlijk heeft in Leeuwarden een proefboring uitgevoerd in 2023. Het project bevindt zich in een fase waarin een gezamenlijke beoordeling van de businesscase moet leiden tot een investeringsbeslissing. Deze beslissing hangt mede af van een investeringsbeslissing van het geothermieproject door Geocombinatie Leeuwarden (GCL) (WarmingUp, 2020).



Boven: [Proefboring Nesselande](#) (IF Technology, 2020).



[Proefboring Leeuwarden](#) (WarmingUp, 2020).

Stand van zaken

In Nederland wordt vanuit de bodemenergiesector onderscheid gemaakt tussen WKO, MTO en HTO. Al deze systemen vallen volgens de Omgevingswet onder 'Open bodemenergiesystemen' (OBES) zolang ze niet dieper dan 500 m toegepast worden.

In Nederland zijn meer dan 3.000 WKO-systemen (<25 °C) gerealiseerd. Daarvan zijn slechts enkele MTO-systemen (25-50 °C), en is er op dit moment één HTO-systeem (>50 °C) operationeel in Nederland: in Middenmeer.

Volgens de Innovatieroadmap voor warmteopslagsystemen (TNO, 2024) heeft de HTO-techniek ondertussen TRL 8 bereikt. Dat wil zeggen dat het systeem nagenoeg uitontwikkeld is en klaar voor marktintroductie. De grootschalige inzet van HTO zal naar verwachting tussen 2025 en 2030 plaats kunnen vinden.

Er zijn verschillende uitdagingen die de grootschalige inzet van HTO nu belemmeren. Op het moment wordt onderzoek gedaan naar het verhelpen van de volgende belemmeringen:

- De geologische potentie voor HTO is moeilijk op voorhand in te schatten. Er is nog onvoldoende informatie over ondergrondlagen die voor HTO geschikt moeten zijn. Het advies is om een proefboring te doen om het juiste inzicht te krijgen in ondergrond.
- De integratie van HTO in een warmtesysteem is nog complex en slechts één keer gerealiseerd. Er is behoefte aan meer (praktijk-) ervaring. Daar wordt actief aan gewerkt in diverse onderzoeksprogramma's.
- De vergunningsprocedure is complex en heeft een lange doorlooptijd. Dit maakt de ontwikkeling kostbaar, onzeker en risicovol. De introductie van het raamwerk dat in WarmingUp is ontwikkeld voor de vergunningsprocedures, maakt het proces voor zowel vergunningverlener als aanvrager al een stuk overzichtelijker.
- Ontwikkelrisico's door onzekerheden over de prestatie van HTO in praktijk, met name op werkelijke systeemrendementen. Er zijn mogelijke risico's in de ondergrond of bij integratie in het warmtenet. Deze kunnen pas tot uiting komen in de exploitatiefase. Daarom is er meer ervaring nodig met praktijkprojecten om hier feitelijke ervaringscijfers over te krijgen.

Recente onderzoeksresultaten

Sinds 2019 wordt er programmatisch gewerkt aan de doorontwikkeling van HTO. Bijvoorbeeld onder de programma's **Heatstore**, **Window** en **WarmingUp**.

Heatstore heeft geleid tot de realisatie van de HTO in Middenmeer.

WarmingUp heeft gelopen van 2019-2023 en was het vervolg op Window. In deze programma's zijn drie pilotlocaties uitgewerkt, tools ontwikkeld om de HTO-potentie te beoordelen en ontwerpsimulaties gedraaid. Er zijn onderzoeken gedaan naar de techniek en het effect van HTO-bronnen. In samenwerking met de provincies is een juridisch afwegingskader opgesteld voor de vergunningverlening van HTO. De aanbevelingen van deze onderzoeken zijn verwerkt in de onderzoeksprogramma's PUSH-IT, WarmingUp-GOO en Nieuwe Warmte NU.

Het programma **PUSH-IT**, gestart in 2023, richt zich op de demonstratie van een volwaardige toepassing van drie verschillende opslagtechnieken: mijngang, boorgat en aquiferopslag, op zes verschillende locaties in Europa. Op de locatie Delft staat een demonstratie van een HTO-systeem onder de naam aquifer thermal energy storage (ATES). Voor deze locatie worden de eerste testresultaten begin 2027 verwacht. Het hele programma zal naar verwachting eind 2027 afgerond worden.

WarmingUp-GOO (Geothermie & Opslag Opschaling) loopt van 2023-2026 en werkt aan de volgende onderwerpen:

- Inzicht en kennis van middendiepe ondergrond (100-1.500 m), onder andere door uitbreiding ThermoGIS-HTO.
- Pilots, technische innovatie en milieueffecten van HTO. De aangewezen pilotlocaties zijn: Leeuwarden, Delft, Rotterdam Schiebroek en Capelle, Rijnland.
- Beheersbare financiële en juridische kaders door labonderzoeken naar effecten HTO en update vergunningskader.

Onder **Nieuwe Warmte NU** wordt onderzoek gedaan om putverstopping bij HTO te voorkomen en wordt de pilot HTO Leeuwarden doorontwikkeld.

Het onderzoek kan bijdragen aan bedrijfszekerheid door een kleiner risico op putverstopping, maar kan mogelijk ook het debiet verhogen door beter de mechanismes van stoftransport te begrijpen. De handreiking wordt eind 2027 verwacht.

Is HTO mogelijk?



Is HTO mogelijk?

Een HTO is een warmteopslagsysteem met de laagste specifieke investeringskosten per volume (€/m³). In de praktijk variëren de totale investeringskosten voor een HTO-systeem van € 5 tot 9 mln., waardoor een HTO niet altijd past binnen de businesscase van een warmtenet.

Er zijn verschillende sporen om de kosten van de realisatie van een HTO te laten dalen, voornamelijk door leereffecten en standaardisatie. Ook wordt er nog gerekend op technische vooruitgang om het gebruik te optimaliseren.

De belangrijkste economische parameter van een HTO-systeem is de inkoopprijs van warmte. De efficiëntie van warmteopslag is bij een goede bodemopbouw en een efficiënte configuratie van het HTO-systeem 70-80%, maar kan ook lager zijn. Omwille van de warmteverliezen moet de HTO daarom met goedkope warmte gevoed worden om te kunnen renderen. Er is immers een marge nodig tussen de inkoop en verkoop van warmte om de gemaakte kosten te kunnen dekken.

Naast de economische impact moet een HTO ook ruimtelijk mogelijk zijn. In dit hoofdstuk gaan wij in op de randvoorwaarden waaraan moet zijn voldaan om een HTO te realiseren. Wij beschrijven de benodigde opbouw van de ondergrond en de ruimtevrage in de onder- en bovengrond. Ook moet er ruimte zijn op het elektriciteitsnet.

De opbouw van de ondergrond moet getest worden met een proefboring om zowel de fysieke als chemische samenstelling van de ondergrond te onderzoeken. Na de realisatie van de een HTO moeten de effecten op de leefomgeving blijvend gemonitord worden om te voorkomen dat er negatieve effecten op de leefomgeving ontstaan.

Monitoring brengt hoge kosten met zich mee. Als wordt aangetoond dat er minimale negatieve effecten zijn, dan kan er minder gemonitord worden in nieuwe systemen. Hierdoor kunnen de kosten dalen ten opzichte van eerste systemen.

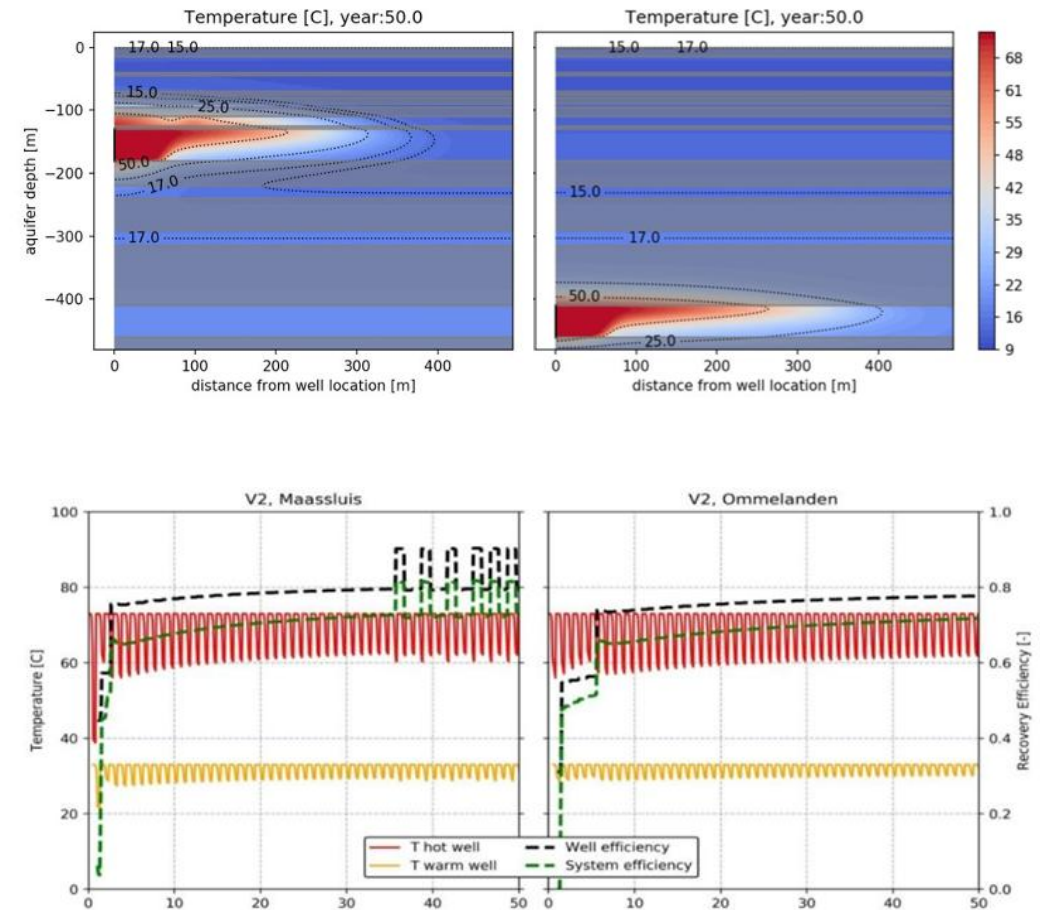
Ondergrond

De potentie van een HTO-systeem wordt in de eerste plaats bepaald door de kenmerken van de ondergrond. Een geschikte locatie heeft een gelaagde opbouw met een afgesloten watervoerend pakket, meestal een zandlaag die aan boven- en onderkant is afgesloten door kleilagen. In deze zandlaag kan heet water worden geïnjecteerd, waarna een driedimensionale waterbel ontstaat met volumes tot 1.000.000 m³ (EBN & IF Technology, 2023).

De diepte van geschikte lagen varieert. Twee voorbeelden hiervan zijn de Maassluisformatie die zich op 100-200 m diepte bevindt en de Ommelandenformatie die op 400-500 m ligt. Voor iedere laag zal gekeken moeten worden naar de lokale situatie. Uit langjarige simulaties (tot 50 jaar) voor de twee voorbeeldformaties blijkt dat het systeemrendement toeneemt van 40 naar 70% naarmate er meerdere laad- en ontlaadcycli hebben plaatsgevonden. Op de lange termijn schommelt het verwachte rendement tussen 60-80% per locatie, afhankelijk van de lokale omstandigheden.

Voor een goede werking van HTO is de ondergrondse opbouw cruciaal.

Boven en onder de waterbel moet een kleilaag van minimaal 10 m aanwezig zijn om warmteverlies te voorkomen. Het opslagpakket zelf moet bestaan uit een zandlaag van 15 tot 30 m dik. Een te dunne laag levert onvoldoende waterdoorlatendheid op, wat resulteert in een laag debiet. Een te dikke laag kan leiden tot warmteverlies door oprijving naar omringende lagen.



Linksboven: Hetebelsimulatie formatie Maassluis. Rechtsboven: Dito formatie Ommelanden.
Linksonder: Simulatie van temperaturen en efficiëntie over periode van 50 jaar voor formatie Maassluis.
Rechtsonder: Dito formatie Ommelanden.
Locatie: Delft.
Bron: M. Bloemendal (2020).

De HTO-potentiekaart laat zien waar de ondergrond geschikt is voor HTO: rode gebieden zijn waterwingebieden waar boren niet is toegestaan, gearceerde gebieden hebben een voldoende dikke afsluitende kleilaag, en groene versus oranje gebieden geven aan of het risico op rendementsverlies door een te dikke zandlaag beperkt (groen) of verhoogd (oranje) is (EBN & IF Technology, 2023)

De debietkaart toont aanvullend het haalbare debiet per HTO-doublet in m³/uur; vanaf circa 150 m³/uur is doorgaans voldoende capaciteit beschikbaar voor een goed functionerend systeem.

Op basis van deze kaarten kunnen de onderzochte locaties grofweg worden ingedeeld in drie groepen:

Kansrijk, met een goede afsluitende kleilaag, een gunstige dikte van het opslagpakket en doorgaans hoge debieten: Den Haag, Delft, 's Gravenzande en de Maasvlakte/Rotterdamse haven (industrieel potentieel).

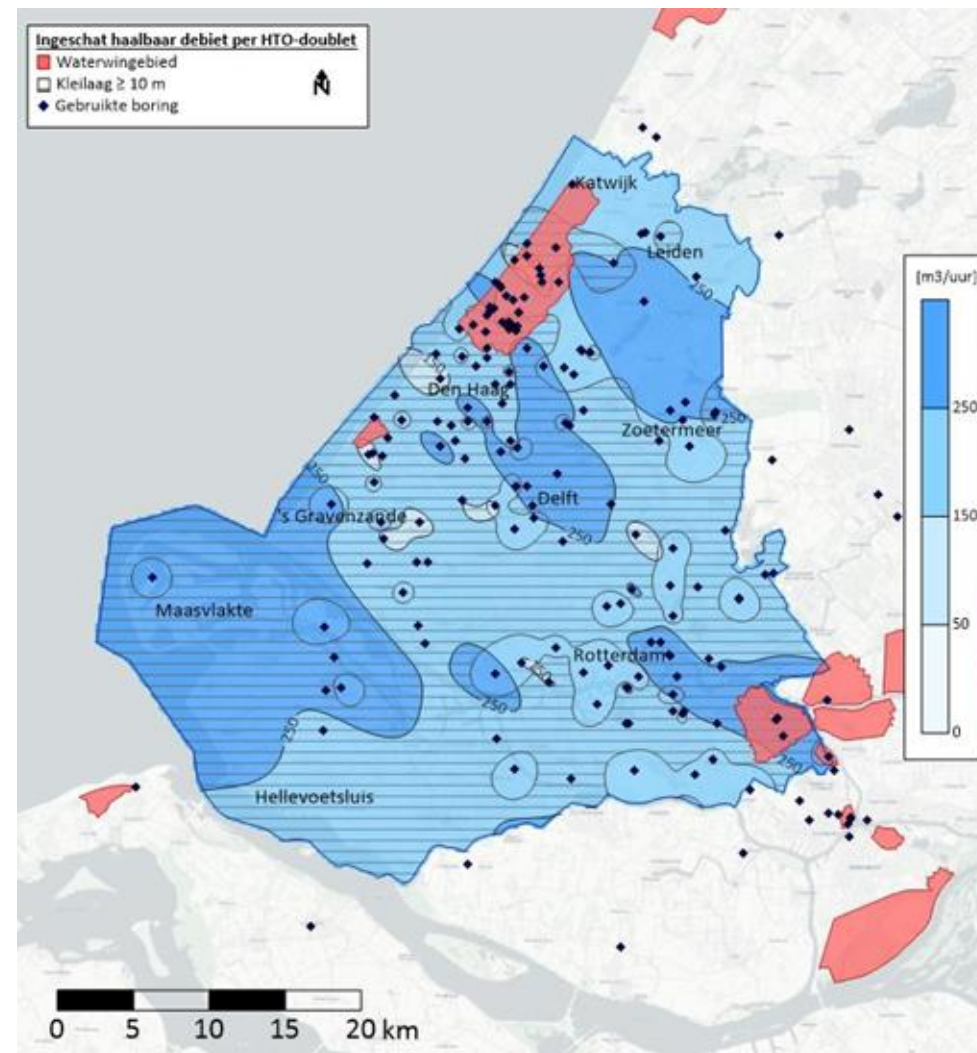
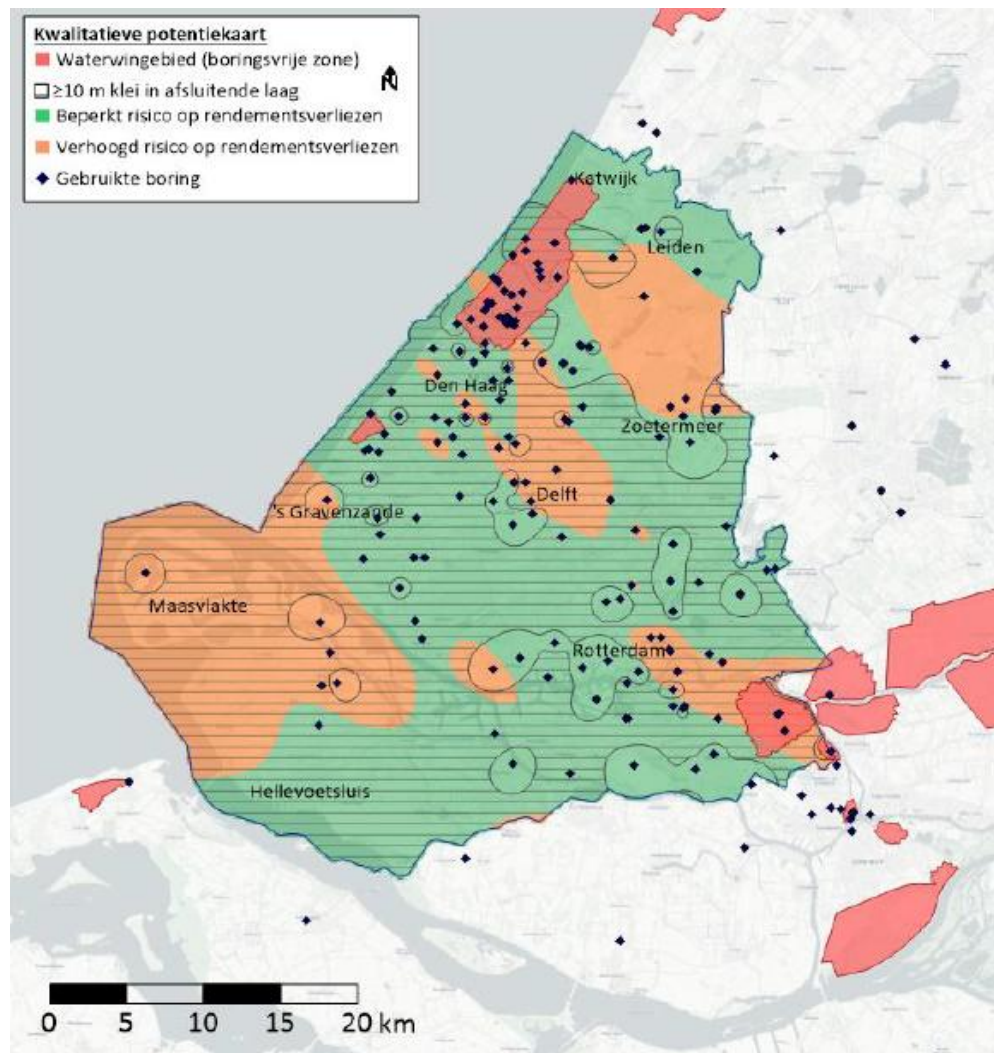
Mogelijk kansrijk, met aandachtspunten die nader onderzoek vereisen (bijvoorbeeld een wisselend beeld van de afsluitende kleilaag of een verhoogd risico op rendementsverlies): Rotterdam en het noordelijke deel van Katwijk.

Zeer beperkt of onzeker, een dunne of afwezige kleilaag, een laag risico-profiel dat extra onderzoek vraagt, of een lage datadichtheid: Leiden en Hellevoetsluis.

Deze kaarten geven een eerste indicatie van de potentie in de regio.

De werkelijke potentie moet met proefboringen verder worden onderzocht.

Potentie in de ondergrond



HTO-potentiekaart en -debietkaart (EBN & IF Technology, 2023) Gearceerde gebieden hebben een kleilaag >10 m.

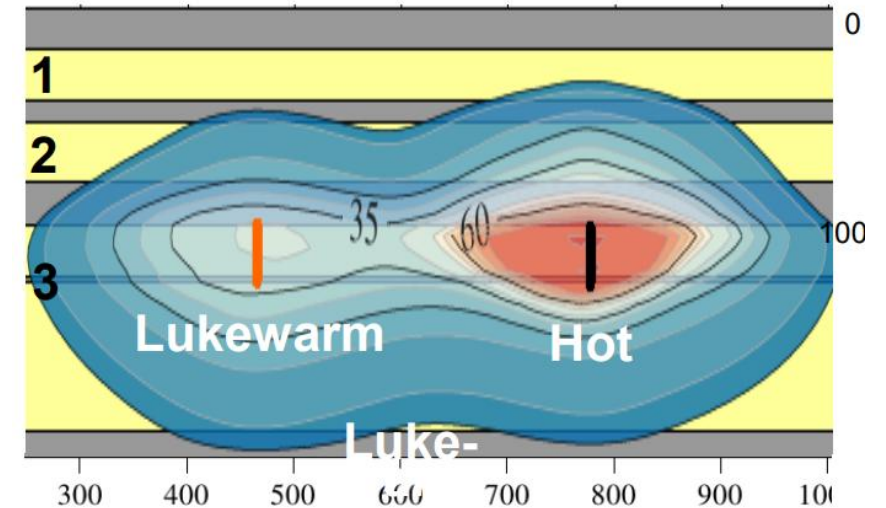
Drukke in de ondergrond

Een bodemenergieprogramma regelt activiteiten in de ondergrond en is nodig om te zorgen dat verschillende activiteiten elkaar niet negatief beïnvloeden.

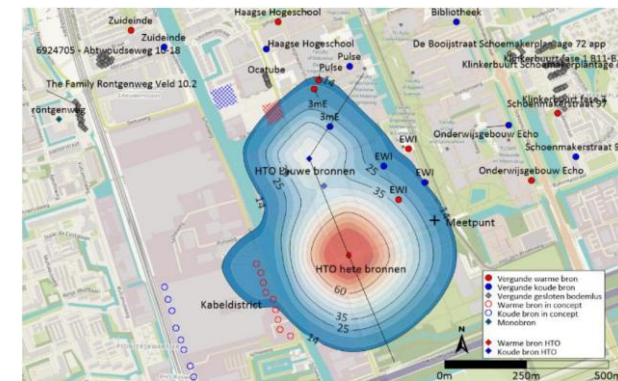
HTO-systemen kunnen warmte afgeven aan omringende grondwaterlagen, wat kan interfereren met andere ondergrondse systemen zoals WKO of geothermie. Een bodemenergieprogramma helpt om deze conflicten te voorkomen en ervoor te zorgen dat deze systemen goed gezamenlijk passen in dezelfde omgeving in verschillende watervoerende pakketten.

Met een bodemenergieprogramma brengen de gemeente, provincie en de omgevingsdienst in kaart welke ondergrondse activiteiten er al zijn en waar ruimte is voor nieuwe systemen. Hierin worden de leidende principes voor verantwoord ondergronds gebruik meegenomen. Drinkwaterwinning heeft altijd voorrang en de grondwaterkwaliteit moet goed blijven. Daarnaast moeten de natuurlijke scheidingen tussen waterlagen intact blijven om warmteverlies en vermenging te voorkomen.

Voor meer info: [Sturen op bodemenergie in de ondergrond | Informatiepunt Leefomgeving](#) (IPLO, 2026).



Zijaanzicht van een warme- en hete put van een HTO.



Bovenaanzicht van de HTO-putten en andere warmteopslagsystemen in Delft.

In Delft zijn HTO-putlocaties gewijzigd om interferentie met koude WKO-bronnen te voorkomen. De warmte uit de derde aquiferlaag heeft veel invloed op de WKO-bronnen die de tweede aquiferlaag gebruiken (IF Technology, 2024).

Proefboring

Hoewel de HTO-potentiekaart een eerste inschatting geeft van de geschiktheid, is een proefboring onmisbaar om de daadwerkelijke omstandigheden in de ondergrond te verifiëren. Tijdens deze boring wordt niet alleen gekeken naar de dikte en samenstelling van de zand- en kleilagen, maar ook naar de doorlatendheid van het opslagpakket, wat het haalbare debiet bepaalt.

Aan de hand van pompproeven kan het maximale debiet ook in de praktijk gemeten worden. Daarnaast worden grondwatermonsters genomen om de chemische samenstelling te analyseren en eventuele risico's op verontreiniging in kaart te brengen. Zonder deze gedetailleerde informatie kan de geschiktheid van de locatie niet met zekerheid worden vastgesteld.

In de Energieregio Rotterdam - Den Haag is de ondergrond divers.

Milieueffecten

De kortetermijneffecten van een HTO op de grondwaterkwaliteit zijn lokale menging van diep en ondiep grondwater binnenin bovenliggende waterlagen, met beperkte chemische en microbiologische effecten.

Voor meer info: Monitoring grondwaterkwaliteitseffecten [Warming-Up programma](#) (KWR, 2023) en [KEEN onderzoeksprogramma](#) (TNO, 2026).

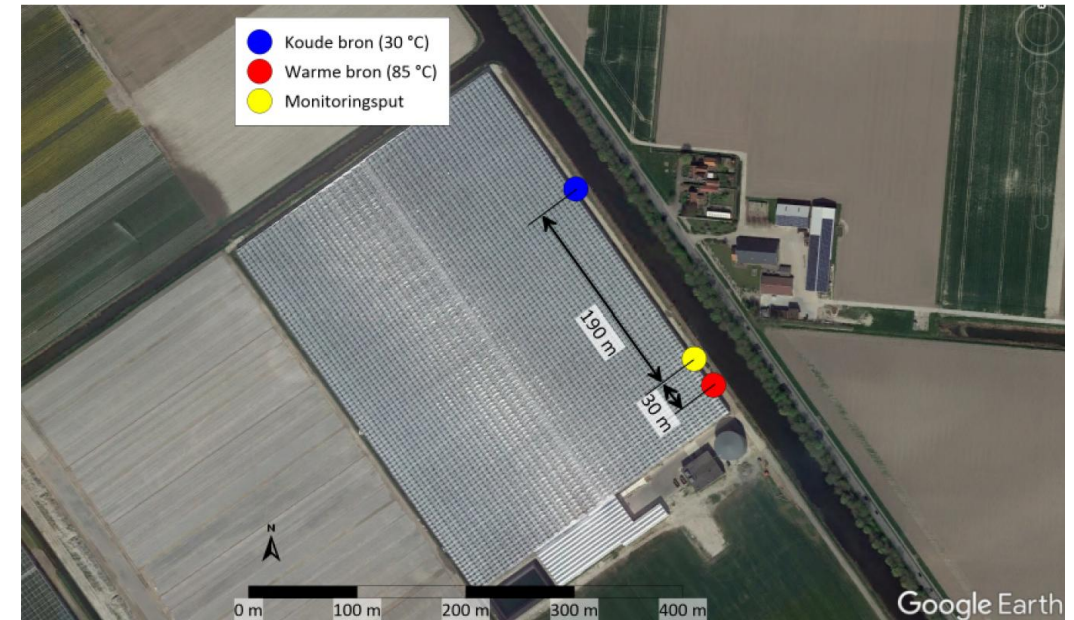
Er zijn geen directe aanwijzingen voor verslechtering van de grondwaterkwaliteit, maar een zorgvuldige locatiespecifieke hydrologische en hydrochemische beoordeling blijft noodzakelijk om ongewenste verzilting en effecten op andere grondwaterfuncties te voorkomen. Het TKI HTO-PEN-programma heeft na vier jaar monitoring bij Middenmeer resultaten gedeeld die dit beeld verder aanscherpen.

HTO kan effect hebben op de ondergrond, zoals mobilisatie van sporenelementen en kalkneerslag, doordat hoge temperaturen (40-90 °C) chemische en microbiologische processen beïnvloeden. Monitoring bij het HTO-systeem in Middenmeer laat zien dat bepaalde stofconcentraties tijdelijk verhoogd waren, met name door lekkage uit een diepere laag en temperatureffecten in de ondergrond. Dit soort lekkage is te voorkomen met een zorgvuldig putontwerp en zorgvuldige putconstructie, waarbij extra aandacht wordt besteed aan de afdichting tussen watervoerende lagen. Ook kan in sommige gevallen vermenging van zout en zoet water optreden, wat tot verzilting kan leiden; de eerder genoemde locatiespecifieke beoordeling helpt dit risico vooraf goed in te schatten en te beperken. Doorlopende monitoring van temperatuur, pH en chemische parameters maakt het mogelijk om eventuele afwijkingen vroeg te signaleren en hier tijdig op te reageren. Daarnaast kan waterbehandeling, zoals CO₂-dosering, helpen om kalkneerslag te beperken, al wordt de dosering hiervan met aandacht afgestemd om ongewenste pH-verlaging te voorkomen.

Ruimtelijke inpassing in de bovengrond

HTO-bronnen zelf nemen bovengronds weinig ruimte in beslag, slechts ongeveer 2 x 1 x 2 m per put. De bovengrondse installatie is te zien op pagina 16. In de ondergrond kan dan wel 1.000 weq aan warmte worden opgeslagen. Het totale ruimtebeslag is groter: voor de aanleg is tijdelijk p een booropstelling nodig vergelijkbaar met die voor geothermie. Voor de exploitatie moet daarnaast ook een technische ruimte met onder meer warmtewisselaars, pompen en waterbehandeling (zoals een CO₂-tank tegen kalkneerslag) worden aangelegd. Vanwege de dalende temperaturen die HTO levert is er eventueel ook behoefte aan een warmtepomp, wat extra ruimte vraagt. Daarnaast is een veilige scheiding van het warmtenet verplicht via dubbele warmtewisselaars om lekkages te voorkomen.

Tot slot is afstemming nodig met netbeheerders en vergunningverleners, omdat HTO en warmtepompen het elektriciteitsnet belasten en veiligheids-eisen in acht moeten worden genomen.



Satellietfoto van de kas met daarnaast de locaties van de HTO-bronnen en de monitoringsput.

Bron: First results of one year full scale HT-ATES operation in the Netherlands, (IF Technology, 2022).

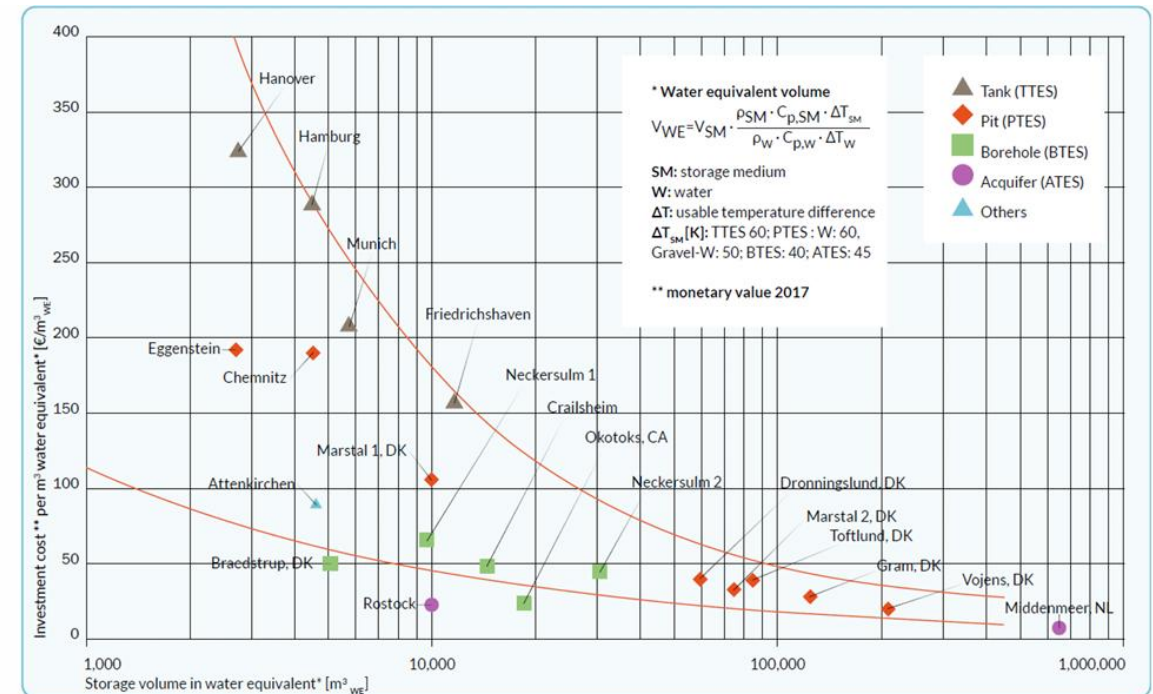
Kosten

Een HTO-systeem is geschikt voor het realiseren van warmteopslag met grote opslagvolume (tot 1.000.000 m³). Doordat het gebruik maakt van de ondergrond als opslagmedium zijn de investeringskosten beperkt tot het aanboren van de juiste ondergrondse aardlagen, de benodigde voorbereidingen en bovengronds hydrauliek en regeltechniek. HTO kent daardoor een van de laagste specifieke investeringskosten (€/m³) van alle beschikbare warmteopslagtechnieken.

Dit is duidelijk zichtbaar in de rechter grafiek waarin HTO (ATES) vergeleken wordt met andere opslagtechnieken (Heatstore rapport 6.4). De HT-systemen in Middenmeer (NL) en Rostock (DE) scoren het beste als het gaat om specifieke investeringskosten. Bij kleinere HTO-systemen (<10.000 m³) zullen de vaste investeringskosten er voor zorgen dat deze niet meer kan concurreren met alternatieven zoals buffertank of pitstorage.

Tegenover de relatief lage investeringskosten staat wel dat het energetisch rendement met 40 tot 80% lager is dan de alternatieven (80-95%) vanwege de relatief hoge warmteverliezen naar de omliggende ondergrond.

De kosten van een HTO-systeem dienen dan ook beoordeeld te worden door de eenmalige investeringskosten en jaarlijkse exploitatiekosten te berekenen. De resultaten hiervan hangen af van de systeemgrootte, de benodigde diepte, het debiet en de configuratie (met of zonder warmtepomp).



Overzicht van relatieve investeringskosten ten opzichte van opslag volume voor verschillende warmteopslagstechnieken en projecten. Bron: Heatstore rapport 6.4.

De hieraan voorafgaande studie over Stand der techniek van HTO door EBN & IF Technology (2023) heeft prijsformules* opgeleverd om de CAPEX en OPEX van een HTO-systeem te kunnen berekenen. Deze formules zijn opgesteld door het bestuderen van diverse bronnen zoals offertes, studies en werkelijke investeringskosten (prijspeil 2023).

De investeringskosten variëren van € 2,5 tot 3,4 mln. per HTO-systeem met jaarlijkse exploitatiekosten van 400 €k tot 900 €k per jaar voor een enkel-doublet-systeem met een vermogen van 3,5 tot 7 MW op basis van variërende diepte 100-200 m en debieten 100-200 m³/hr.

De investeringskosten zijn bepaald aan de hand van de volgende componenten: proefboring, bronnen, bronpompen, technische ruimte, leidingwerk, ontwerp, advies en vergunningstraject, en een post onvoorzien. Aan de hand hiervan is de volgende formule afgeleid voor investeringen:

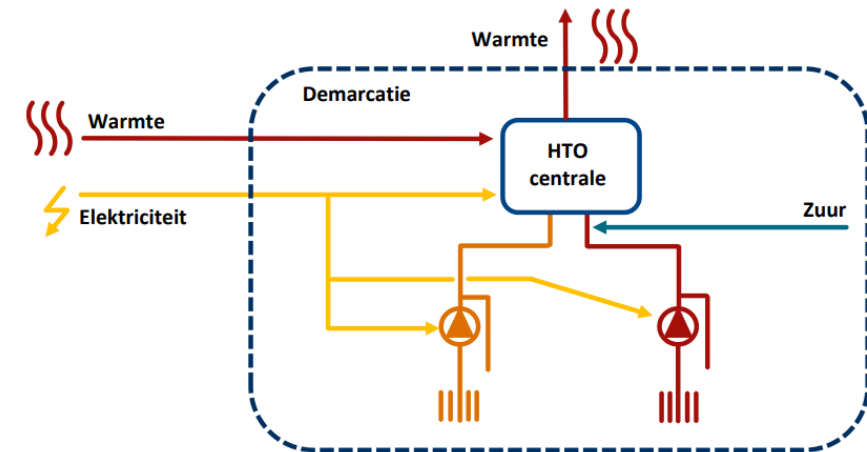
* Diverse experts in het veld van HTO hebben bij oplevering van deze leidraad feedback gegeven dat de uitkomsten van de CAPEX-formule te optimistisch is. In de praktijk liggen investeringen een factor 1,5-2x hoger (zoals bij Middenmeer en TU Delft). Auteurs van dit document zijn niet in de gelegenheid geweest dit verder te onderzoeken om te verklaren waar deze verschillen vandaan komen. Geadviseerd wordt om bij vervolgstudies ook een scenario te beoordelen waarin in een opslag van minstens +/- 50% op investeringen is opgenomen of om zo snel als mogelijk richtprijzen op te halen bij marktpartijen voor de specifieke casus.

CAPEX*

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

De jaarlijkse exploitatiekosten worden berekend aan de hand van de volgende componenten: opgeslagen warmte, elektriciteitsverbruik, waterbehandeling, onderhoud en beheer van bronnen, pompen en technische ruimte, monitoring & BLR en abandonneren (reservering). Ook hiervoor is een formule afgeleid:

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

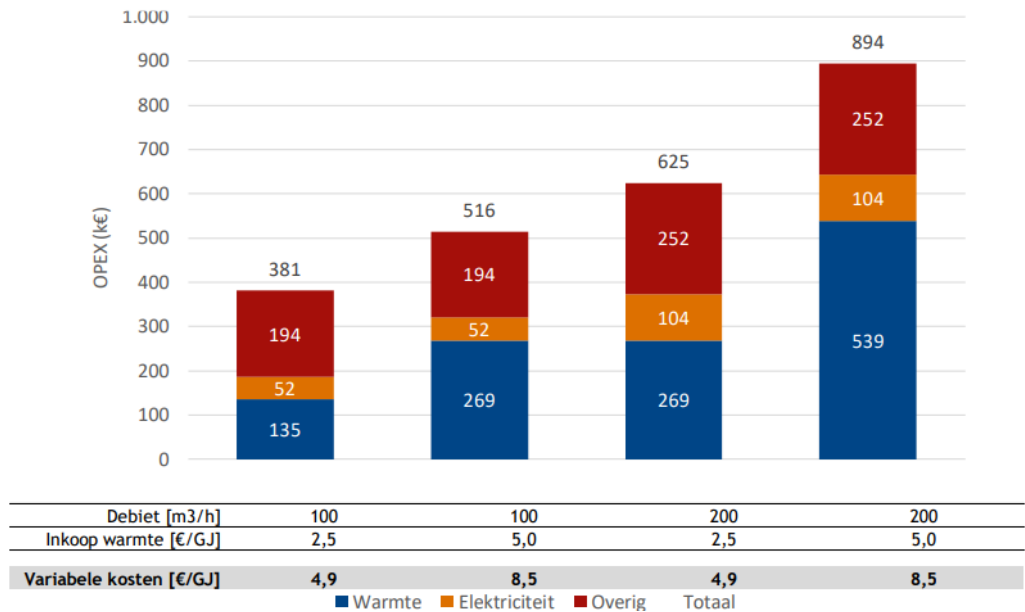


Demarcatie HTO-systeem ten behoeve van kostencalculaties (EBN & IF Technology, 2023).

Voorgaande prijsformules geven een eerste indicatie van de verwachte investerings- en exploitatiekosten. De volgende punten zijn belangrijke aspecten die uiteindelijk van invloed zijn op de daadwerkelijke kosten:

- **Gewenste configuratie:** Een HTO wordt vanwege economische redenen idealiter ingezet zonder warmtepomp. In sommige situaties is een warmtepompcombinatie noodzakelijk om het systeemrendement of de integratie te verbeteren. Deze kosten zijn niet inbegrepen in voorgaande prijsformules.
- **Leercurve:** De ontwikkeling van HTO is nog relatief nieuw waardoor voorbereidingskosten relatief hoog zijn (tot ca. 20% van de investering). De verwachting is dat deze gaan dalen in de toekomst naarmate er meer ervaring komt. Ook is er nog veel potentie voor standaardisatie in oplossingen op het gebied van HTO-projecten.
- **Ontwikkeling wet- en regelgeving:** Bijvoorbeeld de NVOE-norm voor WKO-systemen schrijft een maximale stroomsnelheid voor op de boorgatwand. Er wordt onderzocht of deze norm aangepast kan worden. Daarmee kan het debiet vergroot worden, wat uiteindelijk tot een kostenreductie van wel 35% op de boringen kan leiden.
- **Schaalgrootte:** Hoe groter het beoogde vermogen hoe lager de specifieke investeringskosten. Een systeem van 3,5 MW resp. 7 MW kent een investeringsratio van ca. 0,7 M€/MW resp. 0,4 M€/MW.

- **Inkoopprijs warmte:** Mogelijk de belangrijkste parameter voor de businesscase van een HTO-systeem. Vanwege het lage opslagrendement voor HTO is altijd een overmaat aan warmte nodig. Onderstaande grafiek laat de impact zien van een verdubbeling van de inkoopprijs van 2,5 naar 5 €/GJ op de totale jaarlijkse exploitatiekosten.



Exploitatiekosten per case, illustratief (EBN & IF Technology, 2023).

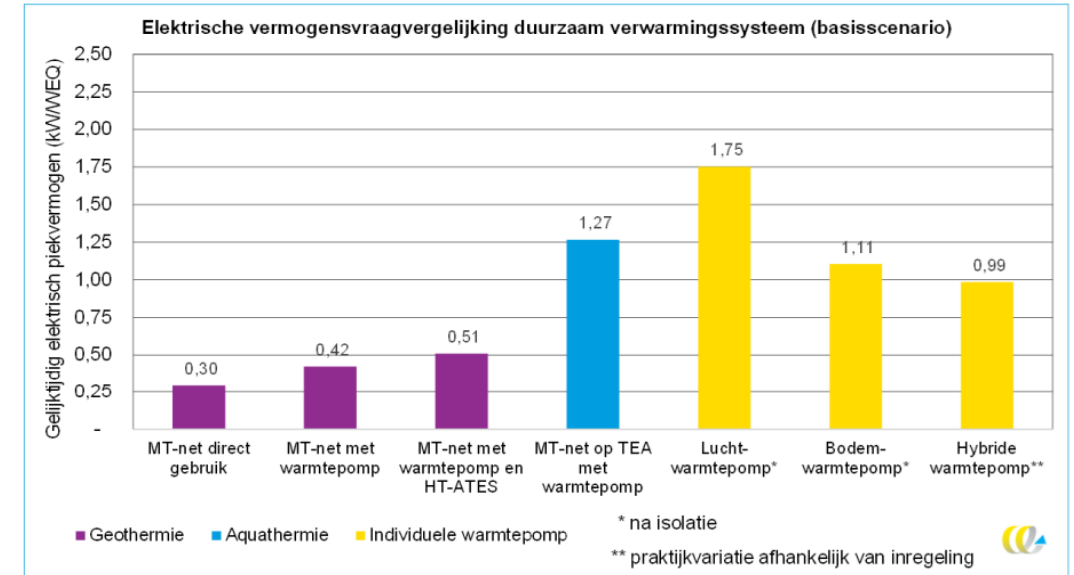
Netcapaciteit elektriciteit

In Nederland leidt netcongestie tot knelpunten in de warmtetransitie.

CE Delft heeft onderzocht hoe verschillende warmteopties het elektriciteitsnet belasten. In alle verschillende configuraties is de netbelasting van een warmtenet, ook met HTO, significant lager dan individuele oplossingen.

Het transportvermogen dat de netbeheerder voor netten met geothermie en HTO moet reserveren is lager dan voor all-electricwarmtepompen. Een bijkomend voordeel is dat een warmtenet op hoger netvlak (MS) capaciteit vraagt dan een wijk met all-electricoplossingen (MS + LS). Dit maakt de benodigde investering in het elektriciteitsnet lager.

Om een HTO te installeren is ruimte op het elektriciteitsnet nodig. Het toepassen van HTO in combinatie met geothermie en warmtepompen verhoogt de impact op het net, maar in deze combinatie is er minder piekwarmte met (voorlopig) gasketels nodig, waardoor significante CO₂-winst wordt behaald. Als alternatief zouden elektrische boilers gebruikt kunnen worden, maar deze hebben ook een zeer hoge netbelasting. Het elektriciteitsgebruik van geothermie met HTO en warmtepomp is lager (één derde tot de helft) dan de netbelasting van individuele oplossingen. HTO's zijn daarmee een netbewuste oplossing.



Benodigd piekvermogen voor verschillende duurzame verwarmingssystemen.

Geothermienetten hebben een lagere elektrische vermogensvraag dan all-electricwarmtepompen.

Meer informatie: [Warmten\(i\)et vastgelopen. Analyse naar de netimpact van geothermie en alternatieven voor de gebouwde omgeving - CE Delft](#) (CE Delft, 2025).

Wet- en regelgeving

De provincie is het bevoegd gezag verantwoordelijk voor vergunningverlening en monitoring van HTO-systemen. Hierbij werkt de provincie samen met waterschappen en drinkwaterbedrijven om de effecten op de ondergrond en grondwaterkwaliteit te waarborgen.

HTO valt onder de Omgevingswet als Open bodemenergiesysteem (OBES). Het Wijzigingsbesluit bodemenergiesystemen stelt een maximale injectie-temperatuur van 25 °C voor reguliere OBES, maar voor HTO gelden specifieke afwegingskaders uit het [Voorlopig Afwegingskader Vergunning-verlening HTO](#) (KWR & IF Technology, 2021) dat ontwikkeld wordt binnen WarmingUp-GOO. Hierin worden leidende principes meegenomen, zoals de bescherming van grondwaterkwaliteit, prioriteit voor drinkwaterwinning in beschermde gebieden, en evenredige afweging van belangen zoals natuur en andere ondergrondse functies.

Voor de aanleg van de HTO gelden additionele eisen. Zo moet bij de materiaalkeuze rekening worden gehouden met de verwachte opwarming om functieverlies van componenten te voorkomen. Daarnaast moet een proefboring, indien uitgevoerd, worden afgewerkt als monitoringsput om temperaturen te meten en grondwatermonsters te nemen.

De resultaten hiervan, inclusief een kwalitatieve beschouwing van de verschillen tussen de aangetroffen en aangehouden bodemopbouw, moeten worden gedeeld met de vergunningverlener.

Waar is HTO nuttig?



De rol van HTO in het regionale toekomstbeeld

De belangrijkste warmtebronnen in de Energieregio Rotterdam - Den Haag zijn industriële restwarmte en geothermie. Geothermie produceert een constante hoeveelheid warmte en is daarmee een basislastvoorziening. Industriële restwarmte levert warmte via het regionaal transportnet en kan makkelijker variëren. Het functioneert daarom zowel als basislast- en middenlastbron.

Warmteoverschotten in de zomer (wanneer de vraag naar warmte laag is), kunnen met een MTO/HTO opgeslagen worden tot het stookseizoen in de winter. Verschillende toepassingen zijn denkbaar:

- MTO/HTO om geothermielevering optimaal te benutten;
- MTO/HTO om restwarmtelevering optimaal te benutten;
- MTO/HTO om additionele groei mogelijk te maken;
- MTO/HTO om behoefte aan piek en back-up te verminderen.

Deze inzetstrategieën worden verder onderzocht in dit hoofdstuk om te onderzoeken en inzicht te geven op de toegevoegde waarde van HTO voor de Energieregio Rotterdam - Den Haag.



Aanbevolen toekomstbeeld warmtesysteem Rotterdam-Den Haag: Een grootschalig regionaal transportnet met lokale warmteproductie (geothermie).
Voor meer info: [Toekomstbeeld regionaal warmtesysteem Rotterdam-Den Haag](#) (Greenvis, 2024).

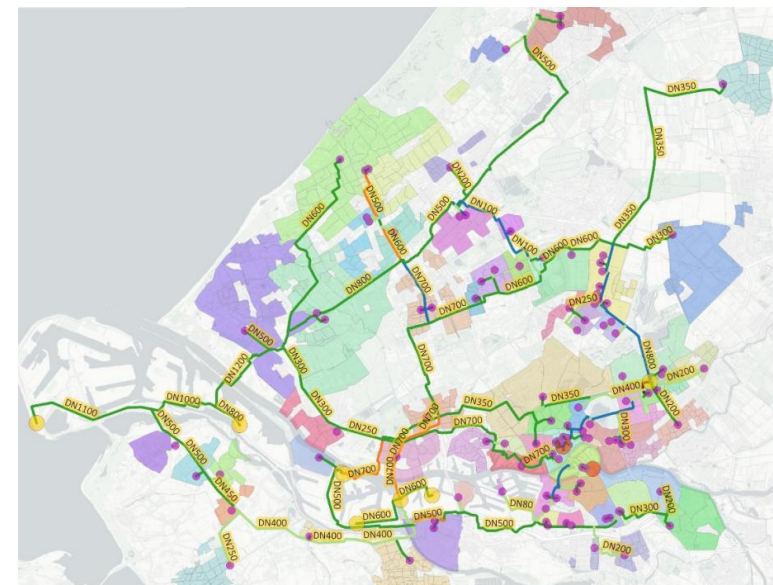
De inpassing van warmteopslag in het warmtesysteem

MTO/HTO wordt bij voorkeur lokaal ingepast in het warmtesysteem achter de hoofdaansluitpunten (HAP) of nabij grootverbruikers in het warmtenet.

Op deze manier belast de HTO het transportnetwerk niet tijdens het stookseizoen en zorgt het zelfs voor ontlasting van het warmtenetsysteem door decentrale invoeding in de haarvaten van het warmtenet.

Als een HTO dichtbij afnemers wordt geplaatst met een lagere aanvoertemperatuur dan de bron, is er ook significant minder thermische opwaardering nodig. Hierdoor kan een warmtepomp worden uitgespaard.

Hoge laadtemperaturen zijn gewenst om zoveel mogelijk warmte in een HTO op te slaan (tot ca. 95 °C) en zo lang mogelijk te kunnen ontladen. Om temperatuurverliezen te vermijden is het nuttig om de HTO zo dicht mogelijk bij een geothermiebron te plaatsen (zie figuur plaatsing Delft). De plaatsing nabij een HAP is minder belangrijk omdat het warmtetransporttemperaturen levert hoger dan 95 °C.



Max-scenario [toekomstbeeld regionaal warmtetransport](#) (Greenvis, 2024). De paarse bolletjes zijn de hoofdaansluitpunten (HAP).



Plaatsing HTO-boorlocaties en geothermiebron in Delft.

Voordelen van HTO aan de hand van usecases

Om de voordelen van HTO te onderzoeken zijn de volgende usecases onderzocht. Dit zijn mogelijke inzetstrategieën waarvoor de ontwikkeling van een HTO mogelijk interessant kan zijn.

Usecases	Succesfactoren	Potentiele voordelen
Leveringsprofiel geothermie verbeteren	- Overcapaciteit geothermiebron in de zomer - Onbenut SDE-volume geothermiebron	- Een HTO-doublet kan inzet geothermie met 10 tot 20% vergroten en tegelijk het aandeel fossiele inzet verminderen - Vollooprisico's op exploitatie kunnen gereduceerd worden doordat de geothermiebron zijn warmte vanaf het begin kwijt kan - Investeringskosten kunnen gereduceerd worden door de lagere CAPEX voor HTO (0,6 M€/MW) t.o.v. GEO (1,4-2,4 M€/MW)
Leveringsprofiel restwarmte verbeteren	- Overcapaciteit restwarmte in de zomer 'Zomer'-tarief restwarmte <30% TTF	1 HTO kan ~7 MW duurzaam en additioneel vermogen leveren in stookseizoen - Verlaging integrale kostprijs warmtelevering door benutten goedkope restwarmte in de zomer
Additionele groei mogelijk maken bij beperkte transportcapaciteit	Levering aan secundair net met geoptimaliseerde aanvoer- en retourtemperaturen	1 HTO-systeem kan tot 1.500 woningen van warmte voorzien zonder inzet transportnet in stookseizoen, dit maakt modulaire groei van een warmtenet mogelijk - Transportnet kan mogelijk kleiner gedimensioneerd worden bij aanleg en/of onvoorziene groei (tot 11.000 WEQ) kan bediend worden
Inzet fossiele piek en back-up reduceren	Beheerste inzet HTO voor continue levering stookseizoen	- Afhankelijk van inzet strategie ~7 MW extra piekvermogen, eventueel uit te breiden met dag/nachtbuffer - Knelpunten transportsysteem oplossen door decentrale invoeding en vergroting flexibiliteit en robuustheid systeem - Afhankelijkheid van gas voor piek en back-up wordt verkleind

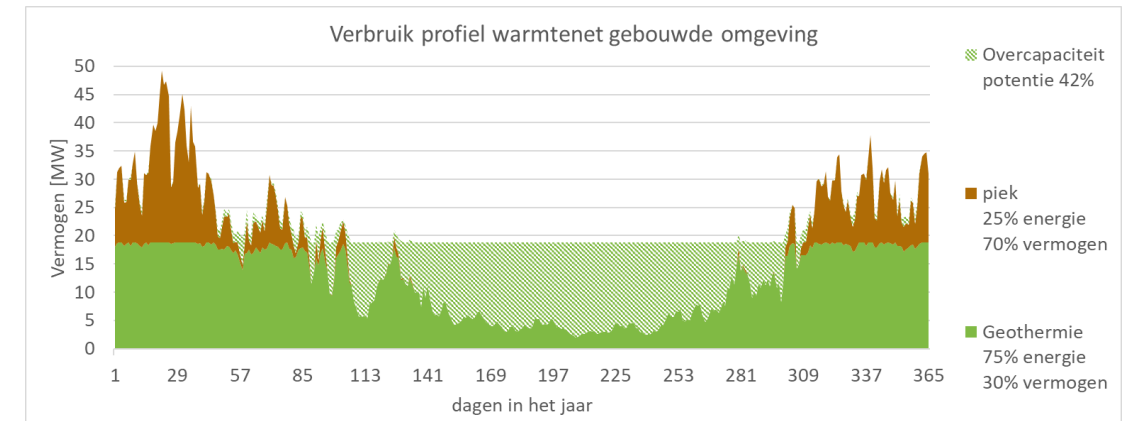
MTO/HTO met geothermie

Een MTO/HTO kan de overcapaciteit van geothermie in de zomer bufferen om deze aanvullend op de inzet van geothermie terug te leveren in het stookseizoen. Hierdoor verbetert de inzet van geothermie met 10 tot 20%. Een HTO-systeem is daarnaast in de aanschaf goedkoper (0,6 M€/MW voor HTO vs. 1,7 M€/MW voor geothermie), de combinatie maakt dat optimaal gebruik gemaakt wordt van de kwaliteiten van een geothermiesysteem.

Geothermische systemen draaien het liefst zo stabiel mogelijk en kunnen maar beperkt teruggeregeld worden bij weinig warmtevraag (tot ca. 50%).

Ook komt het voor dat nog onvoldoende warmte benut wordt van een geothermiesysteem. SDE-subsidie kan onbenut blijven doordat de ontwikkeling van de warmtevraag langer duurt of achterblijft. Een HTO-systeem zorgt dat overcapaciteit benut kan worden om uiteindelijk de inzet van piekinstallaties in het stookseizoen terug te brengen.

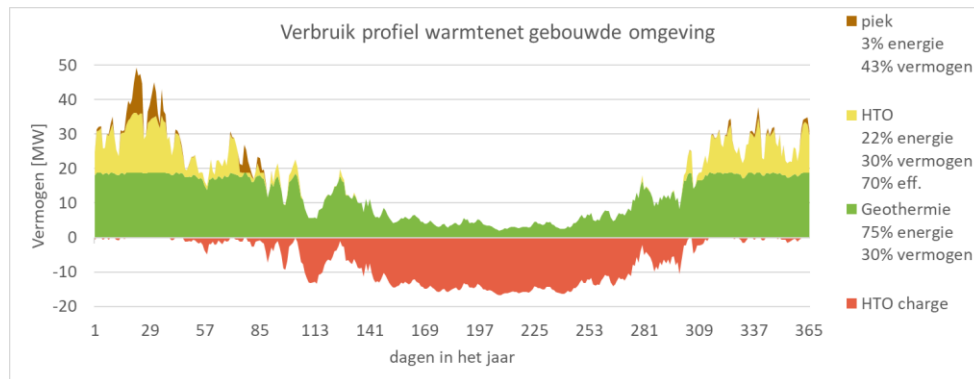
Onderstaande grafiek laat de potentie goed zien. Normaal zou geothermie enkel het groen gekleurde deel van de grafiek van warmte voorzien. In de zomerperiode is de vraag aanzienlijk minder dan de beschikbare capaciteit. De lichtgroene vlakken tonen overcapaciteit aan geothermie die onbenut blijft, in totaal 42% van de jaarlijkse geothermie capaciteit. Deze kan gebruikt worden om een HTO op te laden.



Illustratief 'Badkuipfiguur' van een warmtenet op een geothermiesysteem zonder opslag voor de gebouwde omgeving. Bron: Greenvis

Door de combinatie van een geothermiebron en HTO kan de overcapaciteit van geothermie benut worden. De figuur linksonder laat dit zien. In dit voorbeeld zijn zowel het HTO-systeem als de geothermiebron goed voor 30% van het totale vermogen. De optimale verhouding tussen basislast en HTO in een systeem moet voor het systeem bepaald worden. Typisch is de HTO iets kleiner dan de basislastbron. Het thermisch opslagrendement van het HTO-systeem is in deze casus 70%.

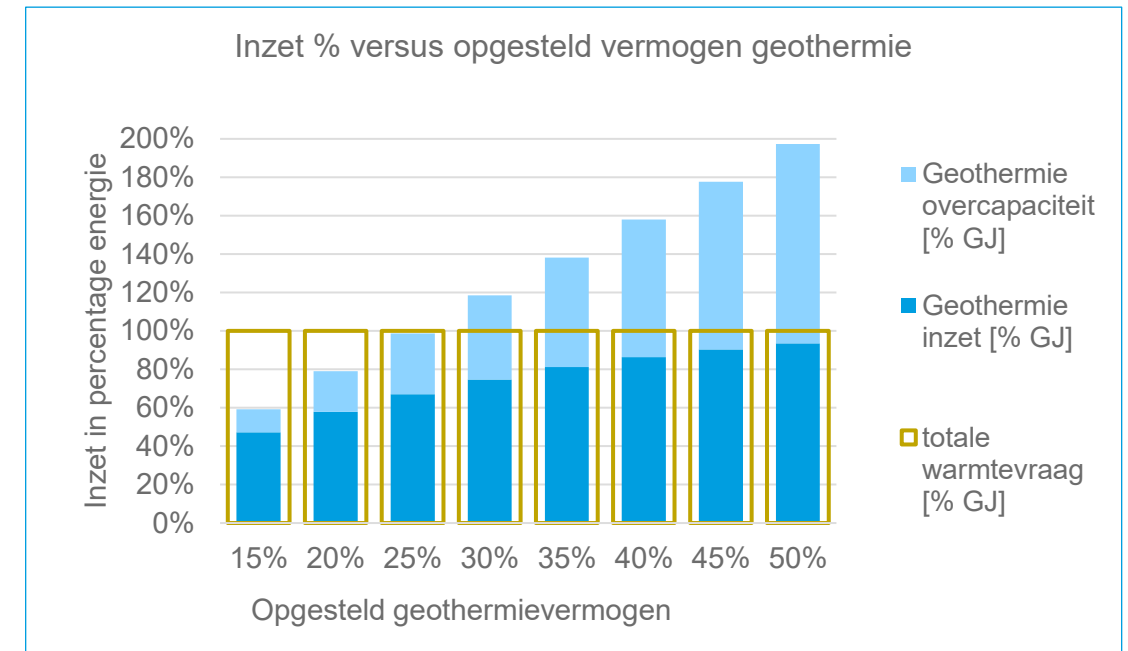
De overcapaciteit van de geothermiebron wordt benut voor het laden van het HTO-systeem (rood). De opgeslagen warmte kan in het stookseizoen ingezet worden als middenlast (geel) aanvullend op de inzet van geothermie (groen). Zo kan de inzet van fossiele piekinstallatie van 25% naar 3% teruggebracht worden (bruin). De piekinstallaties zijn nog steeds nodig om leveringszekerheid te kunnen garanderen, deze kunnen dus niet kleiner gedimensioneerd worden.



Illustratief 'Badkuipfiguur' van een warmtenet op een geothermiesysteem met opslag voor de gebouwde omgeving. (Bron: Greenvis)

De figuur rechtsonder laat zien wat de verwachte bijdrage is van geothermie ten opzichte van de totale warmtevraag afhankelijk van het procentueel opgesteld vermogen. Bij 30% opgesteld vermogen wordt 75% van de warmtevraag (okergeel) geleverd vanuit de geothermiebron (donkerblauw), en er is nog 44% overcapaciteit (lichtblauw), de resterende 25% van de warmtevraag zal vanuit piekbronnen geleverd moeten worden.

Hierin is geen rekening gehouden met eventuele downtime van de geothermiebron voor onderhoud. Iedere vier jaar is bijvoorbeeld een keurverplichting noodzakelijk die twee weken stilstand vraagt in de zomer.

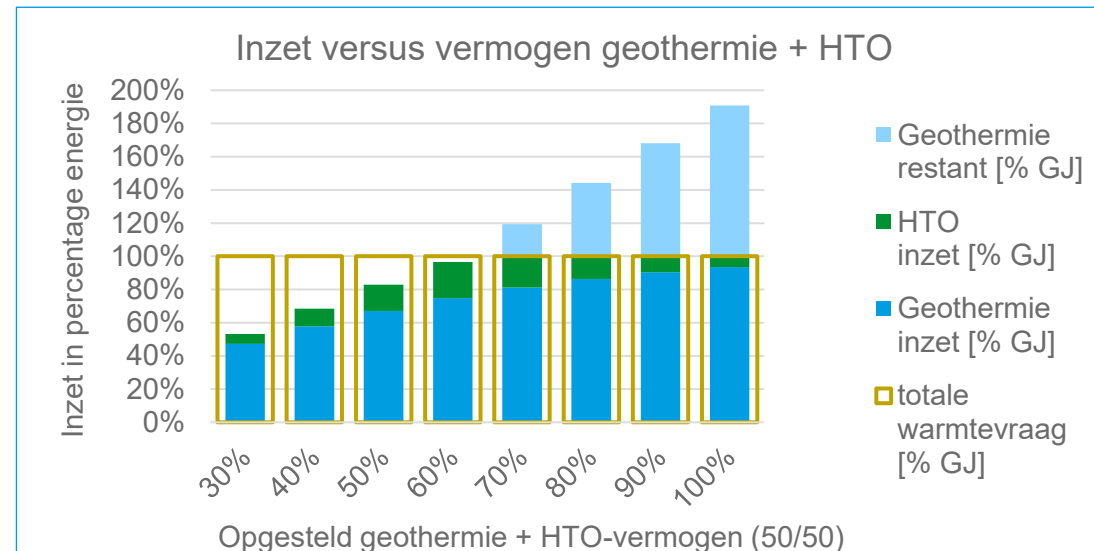


Bron: Greenvis

Een HTO heeft een vergelijkbaar vermogen met de basislastbron, maar levert in totaal minder energie.

De figuur laat het effect zien van de combinatie geothermie + HTO. Stel dat een even groot aandeel HTO wordt toegevoegd dan is het totaal opgesteld vermogen 60% (2 x 30%). Dit maakt mogelijk dat het aandeel geothermie groeit naar 97% (donkerblauw + groen).

Dit is mogelijk doordat er in eerste instantie 44% geothermiecapaciteit onbenut blijft. Bij 50% opgesteld vermogen voor geothermie is er zelfs 197% aan capaciteit beschikbaar waarmee 93% van de warmtevraag ingevuld kan worden.



Bron: Greenvis

De economische haalbaarheid van de combinatie van geothermie en HTO is berekend door de integrale en nationale systeemkosten te berekenen. Dit zijn de kosten van het hele systeem over 30 jaar, zonder belasting en subsidie.

In die tijd worden de investeringen afgeschreven, OPEX van de verschillende installaties en variabele kosten voor elektriciteit en aardgas. Waarbij:

- Elektriciteitstarief (basisscenario): 112 €/MWh
- Gastarief (basisscenario): 49 €/MWh

De installatie- en onderhoudskosten van de geothermieput, HTO en piek-installaties zijn in overeenstemming met getallen uit de SDE-documenten en (EBN & IF Technology, 2023).

Hierbij nemen we het volgende aan:

- Opslagrendement HTO: 70%
- Warmtevraag warmtenet: 500 TJ/jr gelijk aan 14.300 Weq
- Benodigd piekvermogen: 62,6 MWth

HTO als duurzame pieklast

Een MTO/HTO kan de duurzaamheid van een warmtenet significant verbeteren, bij dalende systeemkosten. Daarmee is dat veel goedkoper dan het vergroten van de basislastbron om de duurzaamheid te verbeteren.

Zowel de systeemkosten als de CO₂-emissie per configuratie GEO + HTO zijn berekend en in matrixen verwerkt (zie figuren). Dit maakt het mogelijk om de verschillende combinaties te vergelijken.

In het scenario van een geothermiebron met een vermogensaandeel van 25% en géén HTO (zie **blauw** omlijnde cellen) is de systeemkostprijs 13 €/GJ.

Dit scenario resulteert in een emissie van 22 kgCO₂/GJ. Om te voldoen aan de Wcw-doelstelling voor uitstoot in 2040 (12,5 kgCO₂/GJ), kunnen twee aanpakken gekozen worden:

1. Aandeel geothermie (zonder HTO) verhogen van 25 naar 40%.
Dit zorgt voor een stijging van de systeemkosten van 13 naar 14 €/GJ (zie **rood** omlijnde cellen).
2. Toevoeging van HTO met een aandeel van 20% van het totaal vermogen, voor gelijke systeemkosten van 13 €/GJ (zie **groen** omlijnde cellen).

Deze analyse laat zien dat de juiste configuratie van GEO + HTO-systeem de CO₂-prestaties kan verbeteren tegen gelijkblijvend of zelfs lagere systeemkosten dan enkel geothermie.

Systeemkosten (€/GJ) voor combi: GEO + HTO (70% eff.)												
		% opgesteld vermogen HTO										
		0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
% opgesteld vermogen GEO	0%	15	15	16	16	17	17	18	18	19	20	20
	5%	14	14	15	15	16	16	17	17	18	19	19
	10%	13	14	14	15	15	16	16	17	17	18	18
	15%	13	13	13	14	14	15	15	16	16	17	17
	20%	13	13	13	13	14	14	15	15	16	16	17
	25%	13	13	13	13	13	14	14	15	15	16	16
	30%	13	13	13	13	14	14	14	15	15	16	16
	35%	14	14	14	14	14	15	15	16	16	17	17
	40%	14	14	15	15	15	16	16	17	17	18	18
	45%	15	15	15	16	16	17	17	18	18	19	19
	50%	15	16	16	17	17	18	18	19	19	20	20

CO ₂ emissie (kg/GJ) voor combi: GEO + HTO (70% eff.)												
		% opgesteld vermogen HTO										
		0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
% opgesteld vermogen GEO	0%	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
	5%	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
	10%	38	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
	15%	32	29	28	28	28	28	28	28	28	28	28
	20%	27	23	21	19	19	19	19	19	19	19	19
	25%	22	18	15	13	11	11	11	11	11	11	11
	30%	18	15	12	10	9	8	7	6	6	6	6
	35%	15	12	10	9	8	7	6	6	6	6	5
	40%	12	10	9	7	7	6	6	6	5	5	5
	45%	10	8	7	7	6	6	6	5	5	5	5
	50%	8	7	6	6	6	5	5	5	5	5	5

HTO als duurzame pieklast met een warmtepomp

Dezelfde analyse is gemaakt voor de combinatie GEO + HTO + WP. Waarbij de HTO ondersteund wordt door een warmtepomp (WP). Als de MTO/HTO met een warmtepomp ontworpen wordt, dan blijven de duurzaamheidsvoordelen. De kostenvoordelen vervallen in dat scenario.

Het scenario van een geothermiebron met een vermogensaandeel van 30% en géén HTO (zie **blauw** omlinjende cellen) laat een systeemkostprijs zien van ca. 13€/GJ en een emissiefactor van 18 kgCO₂/GJ. Om hier de doelstelling van 12,5 kgCO₂/GJ in 2040 te realiseren kan ook hier het aandeel geothermie (**rood**) of HTO (**groen**) vergroot worden. Dit resulteert voor beide scenario's in dezelfde systeemkostprijs van 14 €/GJ. De combinatie van GEO met MTO/HTO + WP presteert in dit geval niet beter dan enkel een geothermiesysteem van 40%.

Wat opvalt is dat de ruimte voor optimalisatie in deze configuratie met HTO + WP beperkter is dan zonder warmtepomp. Dit komt voornamelijk door de investering in de warmtepomp en de benodigde elektrische energie. De indruk bestaat dat deze configuratie moeilijk kan renderen zonder aanvullende subsidie.

In de praktijk is er mogelijk wel een optimalisatie te realiseren met de warmtepomp door het vergroten van de geothermiecapaciteit, door het verlagen van de retourtemperatuur en het beter benutten van de SDE++-subsidie op geothermie. De effecten hiervan zijn in deze analyse niet meegenomen vanwege de systeemgrenzen gekozen in deze studie.

Systeemkosten (€/GJ) voor combi: GEO + HTO (70% eff.) + WP											
	% opgesteld vermogen HTO + WP										
	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
0%	15	15	16	16	16	17	17	17	18	18	18
5%	14	15	15	15	16	16	16	17	17	17	18
10%	13	14	15	15	15	16	16	16	17	17	17
15%	13	14	14	15	15	16	16	16	17	17	17
20%	13	13	14	15	15	16	16	16	17	17	17
25%	13	14	14	15	15	16	16	17	17	17	18
30%	13	14	14	15	15	16	16	17	17	18	18
35%	14	14	15	15	16	17	17	18	18	19	19
40%	14	15	15	16	17	17	18	19	19	20	20
45%	15	15	16	17	17	18	19	19	20	21	21
50%	15	16	17	17	18	19	19	20	21	21	

CO2 emissie (kg/GJ) voor combi: GEO + HTO (70% eff.) + WP											
	% opgesteld vermogen HTO + WP										
	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
0%	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
5%	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46
10%	38	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
15%	32	29	28	28	28	28	28	28	28	28	28
20%	27	23	21	19	19	19	19	19	19	19	19
25%	22	18	15	13	11	11	11	11	11	11	11
30%	18	15	12	10	9	8	7	6	6	6	6
35%	14	12	10	9	8	7	6	6	6	6	5
40%	12	10	9	7	7	6	6	6	5	5	5
45%	10	8	7	7	6	6	6	5	5	5	5
50%	8	7	6	6	6	5	5	5	5	5	5

MTO/HTO met restwarmte

Als de basislast van de warmte uit de WarmtelinQ komt, dan kan het gebruik van een HTO ervoor zorgen dat zo goed als de gehele warmtelevering duurzaam ingevuld kan worden. Hierdoor wordt het vermogen uit de WLQ veel efficiënter gebruikt.

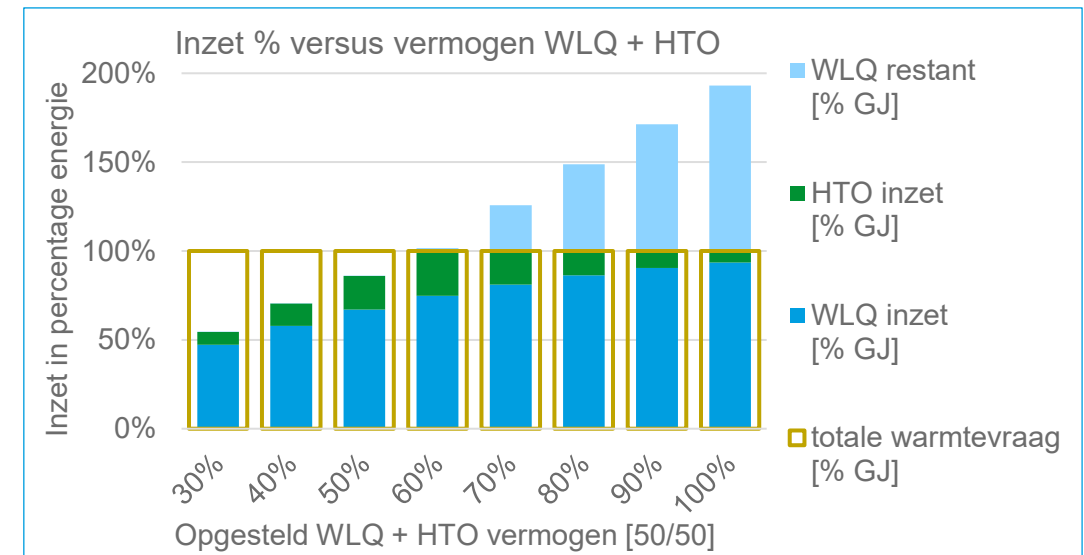
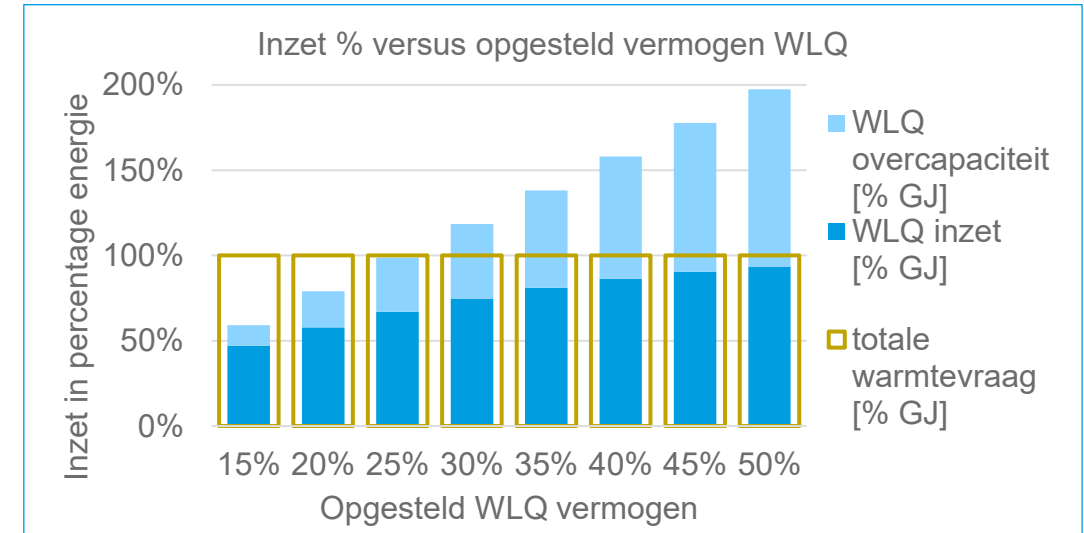
Dezelfde analyse als voor geothermie is uitgevoerd voor een scenario waarbij restwarmte wordt benut van WarmtelinQ (WLQ). De bovenste figuur laat zien hoeveel procent van de warmtevraag ingevuld kan worden in vergelijking met het opgesteld (of gecontracteerd) vermogen voor WLQ.

Bij een opgesteld vermogen van 50% van WLQ kan 93% van alle warmtevraag duurzaam ingevuld worden. Echter is er dan de capaciteit om tot 197% van de warmtevraag te leveren. De overcapaciteit van 97% blijft dan onbenut.

De onderste figuur laat het effect zien van de combinatie van WLQ + HTO. Stel dat in plaats van 50% WLQ-vermogen gekozen wordt voor 60% gecombineerd vermogen WLQ + HTO (30% WLQ-vermogen + 30% HTO). Dat maakt het mogelijk om bijna 100% van alle warmtevraag duurzaam in te vullen.

Voor de verdere economische analyse gaan we uit van dezelfde uitgangspunten als in het voorgaande voorbeeld met als aanvulling:

- Inkooptarief warmte WLQ: 70% TTF/17,5 €/MWh/4,9 €/GJ



De financiële voordelen voor een HTO bij de WLQ zijn relatief laag. HTO's kunnen hier het best worden ingezet om meer huizen aan te sluiten op dezelfde warmtebron en de capaciteit van het warmtenet te vergroten.

De financiële analyse voor WLQ in combinatie met HTO laat andere resultaten zien dan voorgaande analyses voor geothermie. De WLQ levert goedkopere warmte dan een typische geothermiebron. Hierdoor is het economisch gunstig om de WLQ voor een groot deel van de basislast in te zetten. De piekvoorziening (gas) is kleiner en de CO₂-doelstelling van de Wcw kan met een kleinere HTO gehaald worden.

Desalniettemin kan ook HTO hier van toegevoegde waarde zijn door capaciteit vrij te maken voor aanvullende groei. Dit is te zien bij het scenario met 50% opgesteld vermogen voor WLQ (zie **blauw** omlijnde cellen). Dit scenario resulteert in een systeemkostprijs van 9 €/GJ en een uitstoot van 4 kgCO₂/GJ.

Door het toevoegen van een HTO-systeem met een vermogen van 20% kan dezelfde uitstoot van 4 kgCO₂/GJ gerealiseerd worden (zie **groen** omlijnde cellen). Maar het benodigde WLQ vermogen kan teruggebracht worden van 50 naar 30%. Dat betekent wel dat 20% capaciteit van de WLQ kan worden vrijgespeeld voor aanvullende groei. In dit rekenvoorbeeld is dat gelijk aan ongeveer 12,5 MW: goed voor de levering van warmte aan 5.500-11.000 WEQ. Dit is opnieuw afhankelijk of de uitbreiding ook gecombineerd wordt met HTO.

		% opgesteld vermogen HTO											
		0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	
% opgesteld vermogen WLQ	20%	10	10	10	10	11	11	12	12	13	13	14	
	25%	9	9	9	9	10	10	11	11	12	12	13	
	30%	9	8	9	9	9	10	10	10	11	11	12	
	35%	8	8	8	8	9	9	10	10	11	11	12	
	40%	8	8	8	9	9	9	10	10	11	11	12	
	45%	8	8	9	9	9	10	10	11	11	12	12	
	50%	9	9	9	10	10	10	11	11	12	12	13	
	55%	9	9	10	10	11	11	12	12	13	13	14	
	60%	9	10	10	11	11	12	12	13	13	14	14	
	65%	10	10	11	11	12	12	13	13	14	14	15	

CO₂ emissie (kg/GJ) voor combi: WLQ + HTO (70% eff.)

		% opgesteld vermogen HTO										
		0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
% opgesteld vermogen WLQ	20%	24	20	17	15	15	15	15	15	15	15	15
	25%	18	14	11	8	6	6	6	6	6	6	6
	30%	14	11	8	5	4	2	2	1	1	0	0
	35%	11	8	5	4	2	2	1	1	0	0	0
	40%	8	5	4	2	2	1	1	0	0	0	0
	45%	5	4	2	2	1	1	0	0	0	0	0
	50%	4	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0
	55%	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	60%	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	65%	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

MTO/HTO als piek en back-up

MTO/HTO kunnen een groot deel van de piekvraag van een warmtenet invullen. Op het moment zorgt dat vooral dat er minder CO₂ uit gasketels wordt ingezet. Later kan dit ook worden ingezet voor de leveringszekerheid.

Piekinstallaties leveren tijdens het stookseizoen wanneer de basis- en middenlastbronnen al volledig ingezet worden. Ondanks dat de piekinstallaties vaak voor 50 tot 100% van de totale pieklast (vermogen) opgesteld staan leveren deze maar 5 tot 25% van de totale warmtevraag (energie) over het hele jaar. De piekinstallaties zijn vaak aardgasketels en daarmee niet duurzaam door de CO₂-emissies van de verbranding van aardgas.

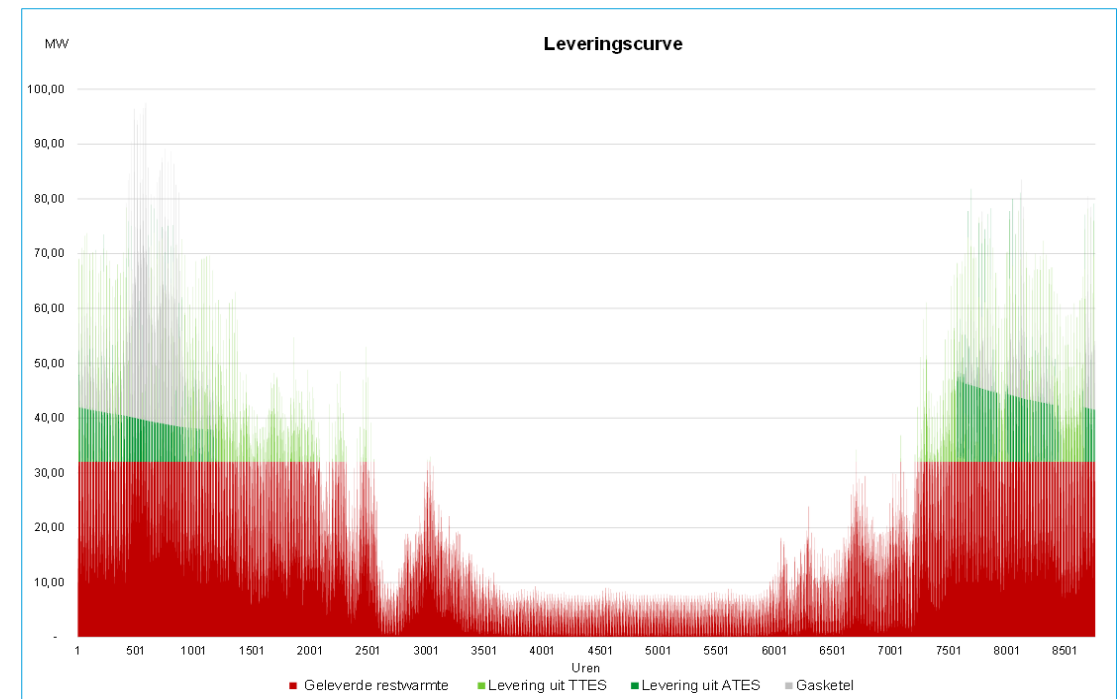
Zoals ook aangetoond in voorgaande analyses is een CO₂-reductie van wel 50% mogelijk op de resterende inzet aardgas voor de pieken door de combinatie van een duurzame warmtebron met HTO. Alleen voor de absolute piekmomenten zijn de piekinstallaties nodig.

Een verdere optimalisatie voor inzet van HTO voor pieklast is de combinatie van HTO met bijvoorbeeld een warmtebuffer (korte cycli, hoog vermogen) zodat deze samen een groter deel van de vraag kunnen leveren (zie figuur).

In de toekomst als er meer ervaring is met HTO kan HTO mogelijk de rol als piek en back-up ook overnemen van de traditionele technieken. Het advies is

om tot die tijd de (gas)piekinstallaties niet, of slechts beperkt, kleiner te dimensioneren om de leveringszekerheid niet in gevaar te brengen.

Een HTO kan, ondanks zorgvuldige dimensionering en bedrijfsvoering, niet constant leveren doordat deze langzaam uitgeput raakt tot aan het einde van het stookseizoen.



Een grote tankopslag (lichtgroen) zorgt ervoor de HTO minder vaak warmte kan leveren in het stookseizoen.

Een grote TTES halveert de vollasturen van een HTO (Greenvis, 2024) (Greenvis, 2025).

Hoe verder met HTO?



Hoe verder met HTO?

Om de ontwikkeling van HTO verder te stimuleren kunnen verschillende partijen actie ondernemen.

Dit hoofdstuk beschrijft de belangrijkste obstakels en kansen voor de ontwikkeling van HTO.

Vervolgens is in verschillende werksessies input opgehaald over de mogelijkheden die partijen hebben om deze obstakels weg te nemen en de kansen te benutten.



Verschillende rollen in de ontwikkeling van HTO

Actor	Oriëntatie en Verkenningfase	Ontwikkelfase	Realisatiefase	Exploitatiefase
Gemeenten	- Koppeling met warmteprogramma's en uitvoeringsplannen - Mogelijkheid tot deelname in een publiek warmtebedrijf	- Concessieverlening warmtenet - Regie ondergrond interactie gesloten bodemsystemen - Regie bovengrondse infrastructuur	Toezicht en handhaving	
Provincies	- Visie ontwikkeling energiesystemen - Beleidsontwikkeling HTO	- Beoordeling vergunningsaanvraag Omgevingswet - Regie ondergrond open bodemsystemen	Toezicht en handhaving	Toezicht en handhaving
Omgevingsdiensten			Toezicht en handhaving	Toetsing eisen verleende vergunning
RES-regio Rotterdam - Den Haag	- Visie op HTO - Regionaal warmtenetontwerp inclusief bronnenstrategie			
Rijksoverheid	Landelijke handreiking HTO	Subsidieverlener	Lessons learned - kennisdeling	Lessons learned - kennisdeling
Netbeheerder	Netcongestie	Realiseren aansluiting		
Warmtebedrijven	Opdrachtgever haalbaarheidsstudie	- Investeringsbeslissers - Businesscase	Opdrachtgever realisatie	- Eindverantwoordelijk exploitatie - Optimaliseren exploitatie
Projectontwikkelaar en bronhouder	- Vergunningsaanvrager - Omgevingsmanager		Opdrachtnemer realisatie	- Onderhoud en beheer - Monitoring: meten en rapporteren prestaties
Branchevereniging	- Standaardisatie technologieën of totaal concepten MTO/HTO - Kennisdeling successen - Verbinden van markt			
Kennisinstellingen	- Onderzoek, ontwikkeling en optimalisatie van MTO/HTO-techniek over het hele ontwikkelproces qua techniek, businesscase, regel- en wetgeving en monitoring - Kennis bundelen, borgen en delen			
Advies & ingenieursbureaus	Opdrachtnemer haalbaarheidsstudies	- Ontwerper HTO-systeem - Begeleiden aanbesteding	Toezicht houden op uitvoering	Meten en rapporteren prestaties

Obstakels

Categorie	Obstakels	Mogelijke oplossingsrichtingen
Marktontwikkeling Marktrijpheid	Er is koudwatervrees doordat MTO/HTO nog in pilotfase is met slechts één operationeel HTO-systeem in Nederland.	- Realiseer meer systemen in verschillende ondergrondsituaties zoals (klei)laagdikttes en warmtenet-configuraties. Dit verhoogt de investeringszekerheid en kan kostenreductie mogelijk maken. - Stimuleer de eerste projecten om opschaling mogelijk te maken. Er zijn meer pilotboringen nodig om wetenschappelijk aantoonbaar te maken dat HTO veilig en te verantwoorden is.
Marktontwikkeling Kennisdeling	Kennis over onderzoek, ontwikkeling, realisatie en beheer van MTO/HTO-systemen is verspreid en beperkt toegankelijk.	- Deel kennis met leidraden of overzichtsstudies geschreven voor verschillende stakeholders. - Richt een centraal ecosysteem of kennisplatform op.
Prikkels Investeringsrisico's ondergrond	Bij een HTO is er hoge onzekerheid over ondergrond tot proefboring en realisatie. Met een tankbuffer weet het warmtebedrijf a priori welke obstakels er zijn.	Derisk de ondergrondverkenning met bijvoorbeeld een garantiefonds voor MTO/HTO-systemen. (Gedeeltelijke) dekking van vooronderzoekskosten MTO/HTO (haalbaarheidsstudie en proefboring) verhoogt de investeringszekerheid.
Prikkels Vraag- en bron-ontwikkeling van warmtenetten	De volgende voorwaarden maken het interessant om een HTO te ontwikkelen: - een overschot van warmteproductie in de zomer; - én voldoende vraag naar warmte in de winter; - deze situatie dient ook langjarig zo te zijn. Momenteel zijn de warmtenetten in de regio erg in ontwikkeling, waarbij onduidelijk is hoe sterk de vraag zal groeien en bronnen zullen ontwikkelen. Bij concurrentie tussen investeren in een opslag of extra warmtebronnen ontwikkelen bieden warmtebronnen vaak meer voordelen, bijvoorbeeld om toekomstige groei mogelijk te maken.	- Ontwikkel een helder beeld over de toekomstige warmtevraag, warmtebronnen en koppeling bestaande netten met regionale netten. - Start de ontwikkeling van warmteopslag bij uitontwikkelde onderdelen van warmtenetten waar de voorwaarden gelden. Bijvoorbeeld in een geothermienet of achter een HAP waar uitbreiding van de vraag niet of beperkt zal plaatsvinden. - Ontwikkel één helder toekomstbeeld voor warmtevraag, warmtebronnen en koppeling bestaande netten met regionale netten. Hierbij kan een warmtenet ontwerp en bronnenstrategie opgesteld worden, inclusief tijdspad. Aan de hand van deze realistische en toekomstbestendige bronnenmix kan ook de nodige omvang van warmtebuffering in de regio inzichtelijk gemaakt worden. Deze kan gedeeld worden met potentiële leveranciers en ontwikkelaars om marktpotentie zichtbaar te maken.
Prikkels Financiële haalbaarheid	De businesscase is onzeker en kan vaak nog niet uit zonder subsidie. De ontwikkelkosten zijn relatief hoog met een lange doorlooptijd tot realisatie en warmtelevering. De flexibiliteit die MTO/HTO biedt wordt beperkt gewaardeerd. De baten van een HTO zijn op systeemniveau terwijl de kosten op projectniveau liggen.	- Toets de 'onrendabele top' in projectontwikkelingen, en voorzie indien nodig aanvullende subsidies. - Bekijk HTO als een systeemoplossing en organiseer het zodat de baten ook efficiënt terecht komen bij de partij die de investering maakt. Zie ook split incentive. - Introduceer een fast-track in energieregio Rotterdam - Den Haag, zodat behandeling van projectaanvragen versneld beoordeeld kunnen worden door vergunningsverleners.
Prikkels Duurzaamheidseisen piekvoorziening	Er is nog geen wettelijke verplichting/normering die MTO/HTO of andere warmteopslag stimuleert. De geleidelijk oplopende duurzaamheidseisen vanuit de warmtewet leiden eerst tot verduurzaming van basislastwarmtebronnen. Piekvoorziening komt pas veel later aan bod.	Eis dat nieuwe warmtenetprojecten duurzaam worden ontwikkeld. Net zoals nieuwbouw ook toekomstbestendig (zero-emissie) worden ontwikkeld. Dit leidt ertoe dat MTO/HTO overwogen wordt in ontwikkelfase van een warmtenet om ook de piekvoorziening te verduurzamen.

Obstakels

Categorie	Obstakels	Mogelijke oplossingsrichtingen
Prikkels Restwarmte	Restwarmte kan kosteloos geloosd worden in het milieu, terwijl restwarmte opvangen en nuttig gebruiken geld kost. Dit verhoogt de kosten van opgeslagen restwarmte in een HTO.	• Introduceer een lozingsheffing, voor verspilling van (rest)warmte, die vermeden kan worden door warmte te leveren voor laagwaardige toepassing elders. Dit vermindert de prijs van restwarmte.
Netcongestie	Netaansluiting nodig voor de realisatie van MTO/HTO in netcongestiegebieden.	• Plaats MTO/HTO hoog op het prioriteringskader voor netcongestie.
Onderzoek Ondergrond/ ontwikkeling	Onzekerheid in de opbouw van de ondergrond: warmteverlies, geochemische eigenschappen, potentie.	• Standaardiseer proefboringen zodat deze goedkoper uitgevoerd kunnen worden. • Breng bij een geothermieboring ook de eerste 500 m in kaart. • Investeer in betere ondergrondse data van potentiële MTO/HTO-lagen (zoals wordt onderzocht WarmingUp-GOO).
Onderzoek Interferentie	Risico op negatieve thermische interactie met nabijgelegen WKO-systemen.	• Goed inzicht in ondergronds ruimtegebruik en eventuele regie op toekomstige ordening. • Opstellen bodemenergieplan.
Onderzoek Monitoring	Onzekerheid in ondergrondgedrag bij MTO/HTO en de gerealiseerde duurzaamheidsbijdrage aan het warmtesysteem.	• Monitoringsdata en protocollen ontwikkelen voor ondergrondgedrag, prestatiestandaarden ontwikkelen voor duurzaamheidsbijdrage. • Meer HTO-systemen in verschillende omstandigheden geven ook een breder inzicht in de effecten, bijvoorbeeld in situaties met een dunnere kleilaag dan in Middenmeer of in de prestatieverbeteringen voor verschillende situaties.
Onderzoek Ontwerp	Materiaalgedrag (corrosie en scaling) bij hoge temperaturen.	• Stel standaard ontwerprichtlijnen op.
Onderzoek Optimalisatie	De HTO in Middenmeer gebruikt pompen die alleen geschikt zijn voor seizoensopslag, deze zijn niet flexibel inzetbaar op korte termijn.	• Onderzoek korte termijn opslag: flexibele inzet van HTO kan de businesscase verbeteren. In Delft worden bijvoorbeeld andere typen pompen toegepast.
Organisatie Ruimtegebruik	Ruimtegebrek nabij warmtebronnen met zomeroverschotten.	• Reserveer extra ruimte voor een HTO bij het zoeken naar een locatie voor geothermie of bij het plaatsen van een WOS, zowel bovengronds als ondergronds. Bovengronds bevoegd gezag is de gemeente, deze heeft hier sturingsmogelijkheden in het bestemmingsplan. Ondergronds bevoegd gezag is de deels gemeente (gesloten systemen) en deels provincie (open systemen).
Organisatie/Prikkels	Split incentive van bronhouder en eigenaar MTO/HTO. De restwarmte uit bijvoorbeeld de WarmtelinQ heeft een even hoog zomertarief als wintertarief.	• Streef naar eigenaarschap van zowel bronhouder en eigenaar door één partij. Hierdoor blijft de complexiteit in de exploitatie beperkt tot één partij die actief kan sturen en duurzame warmte zo efficiënt mogelijk kan inzetten.

Wat zijn kansen?

Op basis van gesprekken met projectpartners zijn de volgende kansen geïdentificeerd die de opschaling en uitrol van HTO verder kunnen helpen voor verschillende initiatiefnemers.

Ontwikkelaars/adviesbureaus - Biedt een eenvoudige verkenning met standaard proefboring aan. - Standaardiseer de product-combinatie geothermie/rest-warmte/... met HTO tot een eenvoudig, aantrekkelijk en integraal aanbod.	RES-regio - Schep marktkaders door duidelijkheid over de regionale bronnenstrategie inclusief de behoefte aan HTO-opslag. - Stimuleer de ontwikkeling van een volledig duurzaam warmtecluster door een systeemaanpak waarin ook de piekvoorziening wordt meegenomen. - Onderzoek in warmteprogramma's of HTO meerwaarde heeft in het warmtesysteem.	Gemeentes - Stuur op techniek via publieke deelname in warmtebedrijven. - Creëer vraag in warmtenetten uitvoeringsplannen te realiseren. - Neem HTO op in verschillende plannen: bodemenergieprogramma, warmteprogramma, Wcw-kavels, omgevingsplan, omgevingsver-ordering.	Warmtebedrijf Neem het initiatief voor de ontwikkeling van HTO in bestaande en nieuwe warmtenetten.
Provincies Voer een pilot uit naar het standaardiseren van de vergunningverlening.			Warmtebronhouders - Biedt tijdsafhankelijke en/of goedkopere zomerwarmte-levering aan. - Breid de rol van de partijen die havenwarmte leveren uit met HTO, Dit verbetert de synergie tussen leveringen opslag.

| Bijlagen

Literatuur

CE Delft, 2025. *Warmten(i)et vastgelopen.*

EBN & IF Technology, 2023. *Hoge Temperatuur Opslag van warmte, Stand der techniek en bodempotentie, RES Rotterdam Den Haag & omgeving Leiden.*

Energy Innovation NL, 2024. *HTO Middenmeer. Een Rolls-Royce op het gebied van warmteopslag.*

Greenvis, 2025a. *Toekomstbeeld regionaal warmtesysteem Rotterdam – Den Haag.*

Greenvis, 2025b. *Toekomstbeeld regionaal warmtesysteem Holland Rijnland.*

IF Technology, 2024. *HTO op de TU Delft. Effectenstudie open bodemenergie (Hoge Temperatuur Opslag) op de TU Delft.*

IF Technology, TNO, Deltares, KWR, 2020. *Verkenning HTO Rotterdam Nesselande.*

IF Technology, 2023. *Middelhoge temperatuur opslag voor overtollige warmte van zonnewarmtepark.*

IPLO, 2026. *Sturen op bodemenergie in de ondergrond.*

KWR, 2023. *Waterkwaliteitseffecten bij monitoring van HTO-systemen. Synthese en update op basis van de monitoring bij HTO Middenmeer.*

KWR & IF Technology, 2021. *Voorlopig afwegingskader voor vergunning-verlening HTO. Juridisch afwegingskader ondergrondse warmteopslag.*

KWR & IF Technology, 2025. *Potentie voor verbeteren open bodemenergie-systemen door verhogen warme brontemperatuur: twee casussen in de gemeente Utrecht.*

KWR, IF Technology, TNO & Deltares, 2020. *Verkenning HTO. Leeuwarden.*

M. Bloemendal, P. Vardon, A. Medema, 2020. *HT-ATES at the TU Delft campus.* TU Delft

Peter Oerlemans, Benno Drijver, Mariëlle Koenen, Joris Koornneef, Dorien Dinkelman, Wim Bos & Bas Godschalk, 2022. *First field results on the technical risks and effectiveness of mitigation measures for the full scale ht-ates demonstration project in middenmeer* European Geothermal Congress 2022, Berlin.

TNO, 2026. *KEEN. Evaluatie van effecten HTO Middenmeer op grondwater-kwaliteit.*

Lijst van afkortingen

Afkorting	Betekenis
ATES	Aquifer Energy Storage
CAPEX	Investeringskosten
COP	Coefficient of performance (maat voor de efficiëntie)
EIA	Energie-investeringsaftrek
MJ, GJ, TJ, PJ	Mega-, Giga-, Tera-, Petajoule
Ha	Hectare
HAP	Hoofdaansluitingspunten
HTO	Hogetemperatuuropslag
LS, MS, HS	Laag-, Midden-, Hoogspanning
MTO	Middentemperatuuropslag
KWh, MWh	Kilo-, Megawattuur
OBES	Open bodemenergiesystemen
OPEX	Operationele kosten
SDE	Subsidie Duurzame Energie
TRL	Technology readiness level
WKO	Warmte-koudeopslag
WOS	Warmte onderstations

Colofon

Dit rapport is geschreven door:

Koen van Dam, Joram Dehens, Laurens Vergroesen (CE Delft)

Andries Lof, Frans Soons, Niek de Wit (Greenvis)

Delft, CE Delft, juli 2026

Publicatienummer: 26.250503.104

Opdrachtgever: Gemeente Barendrecht

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider
Koen van Dam (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft – Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al sinds 1978 werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.

In dit rapport is mogelijk generatieve AI gebruikt als hulpmiddel bij het genereren, analyseren of structureren van tekstuele inhoud. Alle inhoud is zorgvuldig gecontroleerd op juistheid en volledigheid. De inhoud voldoet aan de geldende wet- en regelgeving, zoals AVG en auteursrechten.