

# HTO op de TU Delft

Effectenstudie open bodemenergiesysteem (Hoge Temperatuur Opslag) op de TU Delft





**Datum** 14 mei 2024  
**Referentie** PR09968/RK/20240514  
**Betreft** Effectenstudie HTO TU Delft  
**Behandeld door** S. van der Wilk, J.H. Kleinlugtenbelt  
**Gecontroleerd door** B.C. Drijver, P.J.A. Oerlemans, N. F. Pinto  
**Versienummer** Definitief V2.0

**VERGUNNINGAANVRAGER**

Technische Universiteit Delft



**ADVISEUR BODEMENERGIE**

IF Technology bv



Dit document is uitsluitend opgesteld als onderbouwing voor de aanvraag van de vergunning in het kader van de Waterwet en maakt onderdeel uit van de BRL SIKB 11000, scope 1a. Dit document is nadrukkelijk geen ontwerpdocument voor het open bodemenergiesysteem in relatie tot detailengineering conform BRL SIKB 11000, scope 2a.

# Samenvatting

## Inleiding

Op de campus van de TU Delft (TUD) wordt actief gewerkt aan de warmtetransitie. Voor de levering van duurzame warmte wordt een geothermiesysteem aangelegd dat warmte met een temperatuur van zo'n 75 °C kan produceren uit zandsteenlagen op ruim 2 km diepte. In de zomerperiode is de warmtevraag beperkt en produceert het geothermiesysteem meer warmte dan gevraagd wordt: er is sprake van een overschot aan duurzame warmte. In het winterseizoen is het omgekeerde het geval: de warmtevraag is veel groter en het geothermiesysteem kan slechts een deel van de gevraagde warmte leveren, ofwel de capaciteit van het geothermiesysteem is niet toereikend. De TUD wil gebruik maken van een Hoge Temperatuur Opslag (HTO) systeem om de beschikbare duurzame warmte uit de zomer op te slaan in de ondergrond, zodat het in de winter ingezet kan worden als duurzaam alternatief voor fossiele warmte.

Een HTO-systeem is een open bodemenergiesysteem (OBES) met (sterk) verhoogde infiltratietemperaturen (tot ca. 90 °C) vergeleken met gangbare OBES (tot 25 °C). In perioden dat het geothermiesysteem een overcapaciteit heeft, wordt het HTO-systeem ingezet om geothermische warmte op te slaan in de (ten opzichte van de diepte van de geothermie bronnen) ondiepere ondergrond. In perioden met een grote warmtevraag wordt de opgeslagen warmte weer terug gewonnen en ingezet voor verwarming. Op deze manier kan een groter deel van de totale warmtevraag worden ingevuld met duurzame warmte uit het geothermiesysteem en een verdere verduurzaming van de Campus van de TU Delft worden bereikt.

Om HTO op het TUD campusterrein mogelijk te maken zijn ondergronds maximaal drie hete en vier lauwe bronnen voorzien. De hete bronnen zijn voorzien op de groenstrook ten noorden van de Balthasar van der Polweg, gelegen direct ten noordoosten van de kruising met de Rotterdamseweg. De lauwe bronnen zijn voorzien bij de inrit van de huidige parkeergarage P5, ten noordoosten van de kruising van de Rotterdamseweg en de Cornelis Drebbelweg in Delft.

## Bodemenergie

De maximaal zeven bronnen van het open bodemenergiesysteem zijn beoogd in het derde waterloerende pakket in het traject van 95 - 240 m-mv. Het systeem onttrekt en infiltreert maximaal 1.440.000 m<sup>3</sup>/jaar met een maximaal debiet van 275 m<sup>3</sup>/uur.

## Energiebesparing en emissiereductie

Door het toepassen van een HTO kan jaarlijks circa 45.458 GJ aan primaire energie worden bespaard. Deze energiebesparing leidt tot een jaarlijkse emissiereductie van 2.074 ton CO<sub>2</sub> en 3.050 kg NO<sub>x</sub>. De SPF van de HTO bedraagt 4,9.

Mogelijk wordt in de toekomst een warmtepomp toegevoegd. In dat geval kan door het toepassen van een HTO jaarlijks circa 46.648 GJ aan primaire energie worden bespaard. Deze energiebesparing leidt tot een jaarlijkse emissiereductie van 1.977 ton CO<sub>2</sub> en 3.429 kg NO<sub>x</sub>. De SPF van de HTO bedraagt dan 3,5.

### Hydrologische effecten

Het berekende hydrologische invloedsgebied reikt tot maximaal 2.700 m van de bronnen. De maximale grondwaterstand- en stijghoogteverandering bedraagt 0,02 m en 17,42 m. Negatieve hydrologische invloed op andere grondwatergebruikers en overige belanghebbenden is niet aan de orde. De maximale stijghoogteverandering van 17,42 is berekend zonder rekening te houden met de hogere temperaturen van het grondwater. In de praktijk wordt grondwater met een relatief hoge temperatuur onttrokken en geïnfiltrerd, door de hogere temperatuur neemt de viscositeit van het water af waardoor ook de stijghoogteveranderingen fors afnemen.

### Grondmechanische effecten

De berekende maximale totaalzetting bedraagt 39 mm en het daarmee gepaard gaande zettingsverhang is 1 m per 1.100. Deze mate van zetting en het bijbehorende verhang is echter een overschatting van de zetting die werkelijk aan maaiveld verwacht mag worden. Dat komt omdat in werkelijkheid demping van de zetting optreedt, waardoor de zetting aan maaiveld aanzienlijk kleiner is dan de hierboven berekende totaalzetting. Bovendien is bij de zettingsberekening uitgegaan van de maximaal berekende hydrologische effecten. In de praktijk zullen de hydrologische effecten tijdens gebruik kleiner uitvallen doordat grondwater met een hoge temperatuur onttrokken en geïnfiltrerd wordt. Deze hoge temperatuur zorgt voor een lagere viscositeit en daardoor een hogere doorlatendheid. De berekende maximale totaalzetting is daarom op meerdere vlakken worst case.

Op basis van de Nederlandse Norm voor Geotechniek ontwerp (NEN-EN 1997-1+C1+A1, Eurocode 7), wordt ook op basis van de worst case berekende totaalzetting, geen schade aan gebouwen, funderingen, waterkeringen, wegen en constructies verwacht.

Ter hoogte van het spoor ( $\pm 580$  m ten westen) bedraagt de berekende totaalzetting 3 mm met daarmee gepaard gaande zettingsverhang van 1 m per 450.000. Daarmee wordt de norm van Pro-Rail van het maximale zettingsverhang van 1 m per 1.000 m niet overschreden, waardoor geen schade aan het spoor verwacht wordt.

### Hydrothermische effecten

Beïnvloeding van de grondwatertemperatuur kan na 20 jaar energieopslag optreden tot maximaal 275 m van de bronnen. De veroorzaakte temperatuurveranderingen hebben geen nadelige gevolgen voor andere grondwatergebruikers en overige belanghebbenden.

### Effecten op de grondwaterkwaliteit

Het zoet-/brakgrensvlak wordt niet negatief beïnvloed zodat geen sprake is van verzilting van het zoete grondwater. In het opslagpakket zijn geen verontreinigingen bekend.

Een verandering van de temperatuur van het grondwater kan het chemisch evenwicht van reacties veranderen. Onderzoek naar HTO van het afgelopen decennium laat zien dat verhoging van concentraties van bepaalde chemische parameters verwacht kan worden als deze parameters zich in het sediment bevinden (zoals DOC, Arseen, Silicium), terwijl voor andere elementen een afname van de concentratie mag worden verwacht (zoals Nikkel, Cobalt). Specifiek voor hoge temperatuuropslag is de neerslag van carbonaten. Om de calciëten in oplossing te houden wordt beoogd om zuur (in de vorm van  $\text{CO}_2$  danwel  $\text{HCl}$ ) aan het te infiltreren water toe te voegen. Door toevoeging van zuur wordt de pH van het grondwater verlaagd, waardoor verstopping van de bronnen door kalkneerslag (gedeeltelijk) verhinderd wordt. Uit onderzoek blijkt dat bij lage temperaturen ( $< 35^\circ\text{C}$ ) geen significant effect op de microbiologische activiteit en groei in zijn geheel verwacht mag worden. Bij

hogere temperaturen (>70-80°C) zal er waarschijnlijk ook geen groei en toename in activiteit plaatsvinden, en neemt de microbiologische populatie juist af. In het tussenliggende temperatuurinterval is de groei theoretisch het grootst, maar in de praktijk vaak beperkt doordat er niet voldoende eenvoudig afbreekbaar organisch materiaal (de energiebron voor micro-organismen) aanwezig is. De precieze verschuiving is sterk locatieafhankelijk en laat zich daardoor moeilijk op voorhand voorspellen.

Na verlening van de vergunning Waterwet zal de vergunninghouder een monitoringsplan opstellen dat moet worden goedgekeurd door het bevoegd gezag vóór ingebruikname van het systeem. In het monitoringsplan is de meetopstelling en een meetprogramma opgenomen voor de monitoring van onder andere de temperatuur en de samenstelling van het grondwater nabij de warmteopslag. De monitoring zal plaatsvinden in overeenkomst met en als uitbreiding op de monitoringseisen voor OBES zoals is opgenomen in de BUM. Zo worden peilbuizen in de bronnen én de monitoringsput geplaatst ter hoogte van het bronfilter en in bovenliggende watervoerende pakketten. Deze peilbuizen worden gebruikt voor het bepalen van stijghoogtes en het bemonsteren van de grondwaterkwaliteit om zo de chemische en microbiologische kwaliteit van het grondwater te monitoren. Aanvullend aan de peilbuizen wordt een DTS kabel in de monitoringsput geïnstalleerd om zo de verspreiding van de warmte te analyseren. Door nauwlettend de grondwaterkwaliteit van het meest opgewarmde grondwater én de verspreiding van de warmtepluim te monitoren worden de belangrijkste effecten als gevolg van de HTO inzichtelijk gemaakt.

## INHOUDSOPGAVE

<b>1 Inleiding</b>	<b>8</b>
1.1 Verduurzaming van de warmtevoorziening in Delft	8
1.2 Vergunningprocedure voor HTO	9
1.3 Definities en terminologie	9
1.4 Projectplanning en EU onderzoeksprogramma 'PUSH-IT'	10
1.5 Onderzoeksdoelstellingen voor het HTO-systeem op de TU Delft	10
1.6 HTO TU Delft in lijn met beleid van provincie Zuid-Holland	11
1.7 Proces voor het toewerken naar een doeltreffend monitoringsplan	12
1.8 Monitoring op hoofdlijnen	13
1.9 Vergunningstermijn	15
<b>2 Systeembeschrijving</b>	<b>16</b>
2.1 Uitgangspunten HTO-systeem	16
2.2 Opzet open bodemenergiesysteem	23
2.3 Seasonal performance factor, energiebesparing en emissiereductie	25
<b>3 Geohydrologie en effectberekeningen</b>	<b>27</b>
3.1 Bodemopbouw	27
3.2 Geohydrologische kenmerken	30
3.3 Hydrologische effecten	31
3.4 Grondmechanische effecten	36
3.5 Hydrothermische effecten	39
<b>4 Invloed op de omgeving</b>	<b>43</b>
4.1 Grondwaterkwaliteit	43
4.2 Verzilting	46
4.3 Verontreinigingen	46
4.4 Grondwatergebruikers	47
4.5 Gesloten bodemenergiesystemen	50
4.6 Bodemenergieplan	51
4.7 Grondwaterbescherming	51
4.8 Bebouwing en infrastructuur	51
4.9 Natuur en openbaar groen	53
4.10 Cultuurhistorie, archeologische en aardkundige waarden	53

## Figuren

- 2.1 Schematische weergave energieconcept geothermiesysteem
- 2.2 Schematisatie tijdens Warmte laden in de HTO
- 2.3 Schematisatie tijdens Warmte terugleveren uit de HTO
- 2.4 Schematisatie tijdens Warmte terugleveren vanuit de HTO met extra warmtepompcentrale
- 2.5 Voorbeeld bronlocaties binnen hete en lauwe zones
- 2.6 Overzichtskaart met bronlocaties
- 2.7 Voorbeeld verloop rendement HTO-systeem
- 3.1 Schematische weergave bodemopbouw
- 3.2 Berekende stijghoogteveranderingen in het tweede watervoerende pakket
- 3.3 Berekende stijghoogteveranderingen in het derde watervoerende pakket
- 3.4 Berekende temperaturen in de bovenkant van het opslagpakket na 20 jaar energieopslag
- 3.5 Berekende temperaturen in de bovenkant van het tweede watervoerende pakket na 20 jaar energieopslag
- 3.6 Berekende temperaturen in de bovenkant van het eerste watervoerende pakket na 20 jaar energieopslag
- 3.7 Dwarsdoorsnede van de ondergrond in noord/zuid richting met de berekende temperaturen na 20 jaar energieopslag
- 3.8 Dwarsdoorsnede van de ondergrond in west/oost richting met de berekende temperaturen na 20 jaar energieopslag
- 3.9 Dwarsdoorsnede van de ondergrond met de berekende temperaturen na 50 jaar stilstand
- 4.1 Cumulatieve hydrologische invloed
- 4.2 Temperatuurverloop bronnen Kabeldistrict
- 4.3 Temperatuurverloop bronnen EWI
- 4.4 Temperatuurverloop bronnen 3mE
- 4.5 Spreiding van bodemdaling over het maaiveld

## Bijlagen

- 1 PUSH-IT Research plan HTO TUD
- 2 SPF berekening en verklaring
- 3 Berekening van de eindzetting
- 4 Berekening tijdsafhankelijke zetting
- 5 Berekening van de eindzetting als gevolg van bestaande open bodemenergiesystemen
- 6 Berekening tijdsafhankelijke zetting deklaag als gevolg van bestaande open bodemenergiesystemen

# 1 Inleiding

## 1.1 VERDUURZAMING VAN DE WARMTEVOORZIENING IN DELFT

### Geothermie op de campus TU Delft

Op de campus van de TU Delft (TUD) wordt actief gewerkt aan de warmtetransitie. De TUD kent vele gebouwen. Deels worden de gebouwen van duurzame warmte en koude voorzien door middel van warmte- en koudeopslagsystemen. Een ander deel van de gebouwen heeft hogere temperaturen nodig voor effectieve verwarming en is daarvoor aangesloten op een warmtenet van de TUD. Voor de verduurzaming van het warmtenet zijn een aantal ontwikkelingen beoogd. In de eerste plaats worden de aangekoppelde afgiftesystemen aangepast, zodat de eindgebruikers ook warmte uit het net kunnen gebruiken als de temperatuur van het warmtenet lager wordt. De tweede grootschalige ontwikkeling is het realiseren van een geothermiesysteem op de campus, inclusief warmtepompcentrale, die grote hoeveelheden duurzame warmte kan produceren en aan het warmtenet kan leveren. Het geothermiedoublet gaat daarnaast ook warmte leveren aan het Open Warmtenet Delft (OWD). Dit is een nog aan te leggen warmtenet buiten de campus, waarmee gebouwen en woningen in de stad Delft van duurzame (aard)warmte kunnen worden voorzien. In hoofdstuk 2 wordt dieper ingegaan op de vraag en aanbod van warmte.

### Warmteopslag als essentiële component in de warmtetransitie

Met het geothermiesysteem, inclusief warmtepompcentrale, kan gedurende het gehele jaar een grote hoeveelheid duurzame warmte worden geproduceerd uit een gesteentelaag op ruim 2 km diepte, met een constant debiet en een constante temperatuur (circa 75°C). De capaciteit van het geothermiesysteem om warmte te leveren is daardoor constant. De warmtevraag is echter sterk seizoensafhankelijk. Daardoor heeft het geothermiesysteem in het zomerseizoen een overcapaciteit: de capaciteit van het geothermiesysteem om warmte te leveren is groter dan de warmtevraag. Tegelijkertijd is de capaciteit in het winterseizoen juist te laag: de warmtevraag is zodanig groot dat het geothermiesysteem slechts een deel van de gevraagde warmte kan leveren, waardoor verbranding van fossiele brandstoffen nodig is om aan de vraag te voldoen.

De TUD kan de warmtevoorziening sterk verduurzamen als de overtollige duurzame geothermische warmte in de zomer kan worden opgeslagen en in de winter kan worden ingezet. Daarmee wordt de inzet van fossiele warmte, en de bijbehorende emissie van broeikasgassen en stikstoffen (CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub>) significant gereduceerd.

### Warmteopslag met HTO

Deze grootschalige warmteopslag is mogelijk met de techniek Hoge Temperatuur Opslag (HTO): een type Open Bodemenergiesysteem (OBES) dat zich kenmerkt door hogere opslagtemperaturen (tot ca. 90°C) dan voor OBES gangbaar is (25°C). Bij toepassing van HTO worden warmte-overschotten, die tijdens de zomerperiode beschikbaar zijn vanuit het geothermiesysteem met behulp van een open bodemenergiesysteem opgeslagen in de ondergrond, en in de winter teruggewonnen en ingezet voor verwarming. Door gebruik te maken van HTO kan een groter deel van de jaarlijkse warmtevraag worden ingevuld met geothermie, waardoor de warmtelevering door fossiele energiebronnen significant afneemt. Daarnaast biedt HTO als grootschalige warmtebuffer flexibiliteit en leveringszekerheid in het warmtesysteem, in tijden van volatiele gasprijzen en grote schommelingen in warmtevraag en aanbod.



In Delft levert de toepassing van HTO dus een belangrijke bijdrage aan de verduurzaming van de warmtevoorziening van zowel het huidige warmtenet op de TUD als het nog te ontwikkelen OWD. Door het opslaan van warmte op hogere temperatuur kan per kubieke meter grondwater een aanzienlijk grotere hoeveelheid thermische energie worden opgeslagen en teruggewonnen vergeleken met opslag op een lagere temperatuur (zoals bij WKO-systemen het geval is). Bovendien blijft de kwaliteit van de warmte hoog omdat het hier om opslag van hogere temperaturen gaat. Het systeemconcept voor de inpassing van het HTO systeem is in hoofdstuk 2 in meer detail toegelicht.

## 1.2 VERGUNNINGPROCEDURE VOOR HTO

Het onttrekken en infiltreren van grondwater ten behoeve van de HTO (een open bodemenergiesysteem met verhoogde infiltratietemperaturen) is in het kader van de Waterwet vergunningplichtig. In aanvulling daarop is het in de provincie Zuid-Holland alleen mogelijk om vergunning (Waterwet) te verlenen voor een HTO-systeem, indien dit systeem vanuit Gedeputeerde Staten is aangemerkt als pilotproject. Die aanmerking is reeds in 2021 door GS gedaan (zie besluitenlijst GS d.d. 23 maart 2021).

In het verleden is gebleken dat de vergunningprocedure (Waterwet) voor HTO-systemen complex en langdurig kan zijn. Dit komt met name doordat HTO op twee aspecten afwijkt van de meer gangbare OBES: een hogere opslagtemperatuur (tot wel 90 °C) en een warmteoverschot in de ondergrond. Om vergunningsprocedures voor HTO-systemen te stroomlijnen, is in samenwerking met enkele provincies het 'Voorlopig Afwegingskader voor vergunningverlening HTO' opgesteld, binnen het WarmingUP programma. Dit afwegingskader is een handreiking voor het toetsen en beschikken van aanvragen voor HTO-systemen. De provincie Zuid-Holland is bevoegd gezag en heeft aangegeven dat het afwegingskader in deze aanvraag gebruikt kan worden aanvullend aan hun bestaande kaders. De verwachting is dat daarmee het proces wordt gestroomlijnd, en tegelijkertijd wordt het voorlopige afwegingskader in de praktijk getest zodat aanscherping mogelijk wordt in de toekomst.

Voor de aanvraag van de vergunning Waterwet dient een studie naar de effecten van het open bodemenergiesysteem en de invloed hiervan op de omgeving opgesteld te worden. Deze studie moet voldoen aan de eisen die zijn opgenomen in het SIKB BRL protocol 11001 (versie 3.0) Ontwerp, realisatie, beheer en onderhoud ondergronds deel van bodemenergiesystemen.

De voorliggende effectenstudie geeft een overzicht van de effecten van het open bodemenergiesysteem op de bodem, het grondwater en de omgeving. Bij het opstellen van de effectenstudie is rekening gehouden met de eisen aan een aanvraag vergunning Waterwet voor HTO-systemen, zoals beschreven in het Voorlopige Afwegingskader.

## 1.3 DEFINITIES EN TERMINOLOGIE

Een belangrijke opmerking ten opzichte van het afwegingskader is dat in deze effectenstudie voor de bronnen van de HTO de terminologie hete en lauwe bronnen gehanteerd wordt, in tegenstelling tot de in het afwegingskader gebruikte terminologie hete en warme bronnen. Hiervoor is gekozen om verwarring met reguliere open bodemenergiesystemen (OBES, ook wel WKO) te voorkomen, waarin gesproken wordt over warme en koude bronnen. Bij HTO is de hete bron de bron met de hoogste infiltratietemperatuur en de lauwe bron de bron met de laagste infiltratietemperatuur. In beide bronnen is de infiltratietemperatuur hoger dan de natuurlijke achtergrondtemperatuur.

#### 1.4 PROJECTPLANNING EN EU ONDERZOEKSPROGRAMMA 'PUSH-IT'

De ontwikkeling van HTO op de TUD is onderdeel van en wordt gedeeltelijk gefinancierd vanuit het internationale onderzoeksprogramma PUSH-IT. Daarin worden verschillende warmteopslagtechnieken ontwikkeld en onderzocht, waaronder ook het HTO-systeem op de TUD. Binnen het PUSH-IT programma is het streven om in 2024 een vergunning Waterwet voor de HTO te hebben ontvangen zodat deze daarna definitief ontworpen en gerealiseerd kan worden. Doel is om de HTO in 2025/2026 in bedrijf te nemen zodat de TU Delft en haar partners vanuit het PUSH-IT programma in dat jaar uitgebreid onderzoek kunnen uitvoeren naar de effecten en het functioneren van het HTO-systeem.

#### 1.5 ONDERZOEKSDOELSTELLINGEN VOOR HET HTO-SYSTEEM OP DE TU DELFT

De HTO op de campus van de TU Delft heeft behalve een operationele functie nadrukkelijk ook een onderzoeksfunctie: wat zijn de effecten van de HTO op de omgeving? De ligging op deze gerenomeerde campus biedt veel onderzoeksmogelijkheden naar HTO op zowel de korte als de lange termijn, en een belangrijke bijdrage te leveren aan het optimaliseren van deze techniek. Daarom werken Campus Real Estate en de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de TU Delft samen in dit project. Daarnaast investeren ook de Nederlandse overheid en de Europese commissie in dit project, met als doel om HTO te demonstreren, monitoren en verbeteren. De HTO op de TU Delft campus is daarmee van groter belang dan alleen voor de TU Delft en haar samenwerkingspartners: ook Nederland en de Europese Unie hechten belang aan de uitkomsten die de demonstratie en het onderzoek zal genereren. Door deze brede betrokkenheid van overheden en onderzoekspartijen geldt de ontwikkeling van een HTO-systeem op de TU Delft als een belangrijke stap in de ontwikkeling van HTO wereldwijd. Door het delen van kennis en ervaring van deze pilot kan HTO ook op andere plekken succesvol worden geïmplementeerd, met de bijbehorende verduurzamingsimpact tot positief gevolg.

Het onderzoek rondom de HTO richt zich op de volgende thema's: verbeteren integratie en aansturing van de HTO in energiesysteem om de energie kosten te verlagen en duurzaamheid te vergroten, verbeteren van bron- en boortechniek voor goedkopere/robuustere bronnen, public engagement, monitoring en beheersen van effecten op de waterkwaliteit, en monitoren warmteverspreiding in de ondergrond. Een uitgebreide omschrijving van de onderzoeksactiviteiten die vanuit PUSH-IT zijn voorzien is opgenomen in bijlage 1.

Kort samengevat concentreren de meetdoelen zich rondom de volgende twee categorieën:

1. Wat zijn de effecten van het HTO-systeem op de omliggende ondergrond? De focus daarbij ligt op onderzoek naar de thermische effecten op de omgeving van de HTO en de chemische en microbiologische veranderingen van het grondwater in de opgewarmde zones.
2. Wat is de technische prestatie van het HTO-systeem? Dit onderzoek focust zich op de energetische prestatie van de HTO als buffer van het regionale warmtesysteem, de (optimale) aansturing ervan en op processen en risico's die van invloed zijn op de technische prestatie van HTO (zoals verstopping in putten of warmtewisselaars).

## 1.6 HTO TU DELFT IN LIJN MET BELEID VAN PROVINCIE ZUID-HOLLAND

Bovenstaande onderzoeksthema's komen ook terug in de Omgevingsvisie en het Omgevingsprogramma van de provincie Zuid-Holland. Dat betekent dat de realisatie van een HTO-systeem op de Campus TU Delft, de exploitatie ervan ten behoeve van de verduurzaming van het warmtesysteem, en de uitgebreide monitoring aan de prestatie en de effecten die voor dit systeem voorzien wordt, gezamenlijk maken dat dit project in lijn is met de Omgevingsvisie en Omgevingsprogramma van de provincie Zuid-Holland. Niet alleen door de duurzame impact van dit HTO-systeem, maar specifiek ook de zware onderzoeksfunctie die dit systeem bekleedt, maakt dat de belangen van de TU Delft als vergunninghouder en de provincie als vergunningverlener samenvallen in dit unieke project. Hieronder zijn een aantal voor dit project relevante passages uit de Omgevingsvisie en het Omgevingsprogramma opgesomd.

Als startpunt in de Omgevingsvisie (1 april 2023) geldt dat de provincie ambitieuze duurzame doelstellingen stelt, en zich committeert aan het Klimaatakkoord. Om dat te bereiken wil de provincie inzetten op onder meer 'bodemenergie'. Zie Hoofdstuk 'Bevorderen Energietransitie'.

**Beleidskeuze:**

De uitstoot van het broeikasgassen willen we in 2030 hebben teruggedrongen met 49% van de uitstoot in 1990 en in 2050 naar 5% van de uitstoot die we in 1990 hadden. (...)

**Aanleiding:**

Het Klimaatakkoord hebben wij onderschreven en wordt met deze herziening verwerkt in de beleidskeuze in het provinciale Omgevingsbeleid. (...)

**Toelichting:**

De provincie wil de doelstellingen bereiken door in te zetten op windenergie, **warmte**, **bodemenergie**, biomassa, hydro- en zonne-energie. Vanwege de onderlinge relaties en de ruimtevraag is de provincie samen met haar partners op regionaal niveau regionale energiestrategieën aan het opstellen. Ook zet de provincie in op energietransitie en besparing bij industrie, gebouwde omgeving en mobiliteit.

In het hoofdstuk 'Optimaal benutten, beschermen en beheren van bodem en ondergrond' wordt de ambitie van de provincie genoemd om het aandeel duurzame energie in de vorm van aardwarmte en bodemenergie, te vergroten.

**Beleidskeuze:**

De provincie bevordert het duurzaam beschermen, benutten en beheren van de bodem & de ondergrond (...)

De provincie zet voor deze beleidskeuze in op:

- het optimaal benutten en beheren van bodem en ondergrond;
- het beschermen en beheren van het bodem- en grondwatersysteem;

(...)

**Aanleiding:**

Optimaal benutten en beheren van de bodem en de ondergrond

De provincie heeft geconstateerd dat kwaliteiten van bodem en ondergrond nog onvoldoende worden meegenomen bij het oplossen van maatschappelijk opgaven. **Zo heeft de provincie de ambitie om het aandeel duurzame energie, in de vorm van aardwarmte en bodemenergie, te vergroten.**

In het hoofdstuk 'Warmtetransitie in de gebouwde omgeving' wordt expliciet gesteld dat de provincie onderzoek met HTO ondersteunt, en onderzoekt hoe HTO kan worden ingepast in het energiesysteem, in de bodem en aan de oppervlakte. De HTO op de TU Delft biedt die mogelijkheid op een unieke locatie die bekend staat om haar onderzoek.

*Beleidskeuze:*

*(...) Het klimaatakkoord benadrukt dat een forse opschaling van de duurzame warmtevoorziening nodig is. In vrijwel alle steden, dorpen en glastuinbouwgebieden zullen duurzame warmtebronnen, warmtesystemen en opslagsystemen tot ontwikkeling komen wat grote impact zal hebben voor gebouw eigenaren en de leefomgeving.(...)*

*De provincie heeft de ambitie om een regierol te ontwikkelen voor bovenlokale warmtenetwerken past een afwegingskader Warmtekeuze toe bij de te maken keuzes in de warmtetransitie. (...)*

*Toelichting (...)*

*Afwegingskader Warmtekeuze*

*De provincie ondersteunt experimenten met o.a. hoge temperatuur opslag (HTO) en onderzoekt de inpassing van warmte opslag in het energiesysteem, de bodem en de openbare ruimte.*

Het Omgevingsprogramma, dat nadere invulling geeft aan de Omgevingsvisie, beschrijft het doel om kennisontwikkeling rondom grondwaterkwaliteit en -kwantiteit te stimuleren. In 'Ad 5' is het doel geformuleerd om de effecten van HTO op de grondwaterkwaliteit nader te onderzoeken met andere partijen. In 'Ad 6' staat de participatie van de provincie in het onderzoeksprogramma WIN-DOW, waar Delft ook onderdeel van was, benoemd.

*Ad 5 Onderzoek naar gevolgen van energietransitie voor de grondwaterkwaliteit*

*In het streven naar een schone, betaalbare en toekomstbestendige energievoorziening worden ook mogelijkheden in de bodem en het grondwater verkend. Samen met andere partijen onderzoekt de provincie wat de gevolgen voor de grondwaterkwaliteit zijn van warmteopslag in de bodem met temperaturen hoger dan 30° C.*

*Ad 6 Stimuleren van innovaties*

*Veel vraagstukken maken maatwerk en samenwerking tussen partijen (overheden, bedrijfsleven, kennisinstellingen) noodzakelijk. De provincie participeert daarom in verschillende projecten en samenwerkingsverbanden op het gebied van kennis en innovatie, zoals COASTAR, Urban waterbuffer en WINDOW (Warmtevoorziening In Nederland Duurzamer met Ondergrondse Warmteopslag). Toepassing van ondergrondse warmteopslag met hoge temperatuur opslag vindt nog zeer beperkt plaats in Nederland. Het WINDOW-programma gaat over het wegnemen van technische, juridische en bedrijfseconomische belemmeringen, zodat ondergrondse warmteopslag in 2025 als bewezen techniek kan worden toegepast.*

## 1.7 PROCES VOOR HET TOEWERKEN NAAR EEN DOELTREFFEND MONITORINGSPLAN

De verwachting is dat vanuit de vergunning Waterwet eisen worden gesteld aan de monitoring van de HTO. Op basis van het Voorlopig Afwegingskader en de wensen van de vergunningverlener (ODH en PZH), wordt in deze aanvraag het volgende voorgesteld m.b.t. monitoringseisen:

- In deze aanvraag wordt reeds op hoofdlijnen ingegaan op de uit te voeren monitoring. Dit is niet alleen van belang voor de beoordeling van de aanvraag, maar ook voor eventuele belanghebbenden. Die monitoring op hoofdlijnen wordt hieronder kort beschreven.
- Een meer gedetailleerd monitoringsplan wordt door de vergunninghouder opgesteld nadat de vergunning Waterwet is ontvangen. Dat plan dient te worden ingediend door de vergunninghouder en vervolgens goedgekeurd door het bevoegd gezag, vóórdat het HTO-systeem in gebruik mag worden genomen.

Door deze proces-wijze ontvangt de vergunninghouder via de vergunning Waterwet (voorliggende aanvraag) op korte termijn toestemming voor het boren van de HTO-bronnen, en kan hij vervolgens de bodeminformatie uit die boringen benutten voor het opstellen van een goed onderbouwd en doeltreffend monitoringsplan dat aansluit bij de werkelijke situatie en recht doet aan de gestelde meetdoelen uit hoofdstuk 1.5.

## 1.8 MONITORING OP HOOFDLIJNEN

Om de meetdoelen te kunnen behalen is een bepaalde meetopstelling nodig, en dienen bepaalde monitoringsacties te worden uitgevoerd. Het ligt voor de hand om deze basale zaken via de voorschriften in de vergunning Waterwet voor te schrijven, want dan is duidelijk hoe de HTO-bronnen, die moeten voldoen aan de eisen uit de vergunning Waterwet, moeten worden uitgerust. Hieronder is beschreven hoe het grootste deel van de meetopstelling en monitoringsacties reeds zijn opgenomen in het 'Voorlopig Afwegingskader Vergunningverlening HTO'. Daarnaast is nog een aanvullende meetopstelling en meetacties nodig om te voldoen aan de meetdoelen rondom de thermische effecten (zie 'Meting thermische effecten ondergrond').

### Voorlopig Afwegingskader vergunningverlening HTO

De vergunninghouder (TU Delft) is partner in het WarmingUP project. Binnen WarmingUP is een Voorlopig Afwegingskader opgesteld waarin de zorgen en wensen van provincies en initiatiefnemers zijn samengebracht, via verschillende kennissessies en workshops met deze partijen. Voor wat betreft de voorschriften voor het HTO-systeem wordt door de vergunningaanvrager daarom uitgegaan van het in WarmingUP opgestelde Voorlopige Afwegingskader ([link](#)). In het Voorlopig Afwegingskader wordt voorgesteld om voor elk HTO-systeem de standaard OBES voorschriften uit de Modelvergunning van de BUM BE deel 1 (die ook voor gangbare OBES gelden) toe te passen, en om daarnaast een aantal aanvullingen en aanpassingen toe te voegen zodat HTO-specifieke aspecten worden gedekt. Zie het Voorlopig Afwegingskader (hoofdstuk 3.3) voor de voorgestelde voorschriften en de daarin verwerkte eisen ten aanzien van de monitoring.

*In deze aanvraag is het voorstel om de voorschriften uit het Voorlopig Afwegingskader te hanteren of in ieder geval als uitgangspunt te nemen.*

Voor wat betreft monitoring, hebben die voorschriften uit het Voorlopig Afwegingskader op hoofdlijnen de volgende strekking:

- **Peilbuizen:** Net als voor gangbare OBES worden peilbuizen geplaatst die geschikt zijn voor het meten van de stijghoogtes, watertemperaturen en voor de bemonstering van grondwater ter hoogte van:
  - Het filtertraject van de bronnen;
  - De freatische grondwaterstand
  - in het onderste deel van het watervoerende pakket dat gelegen is direct boven het watervoerend pakket waaraan het grondwater wordt onttrokken en waarin dit wordt geretourneerd. Omdat de HTO-bronfilters worden geplaatst onder een afsluitende kleilaag, betreft dit het watervoerende pakket boven deze afsluitende kleilaag.

Door dit zo vast te leggen in de vergunning, wordt via de voorschriften geborgd dat de verschillende putten zodanig worden gebouwd, dat een breed scala aan monitoringsacties mogelijk wordt.

- **Referentiemeting:** vóór ingebruikname dient een referentiemeting te worden uitgevoerd op de peilfilters bij de hete en lauwe bron. Daarbij worden minimaal de parameters geanalyseerd die

zijn opgenomen in HTO voorbeeldvoorschrift 2.4 van het Voorlopig Afwegingskader (zie hoofdstuk 3.3, tabel 1, linker kolom). Circa 2 jaar na ingebruikname van de HTO wordt deze referentiemeting herhaald.

Dit voorschrift stelt een uitgebreide referentiemonitoring vóór in gebruikname verplicht, en een herhaling ervan na twee opslag-terugwincycli.

- **Monitoringsplan:** Er wordt een monitoringsplan opgesteld en opgestuurd naar het bevoegd gezag, vóórdat het systeem in gebruik kan worden genomen. De minimale eisen voor dat plan zijn opgenomen in het Voorlopig Afwegingskader (zoals: toelichting meetdoelen, meetopstelling, meetfrequentie en lijst met meetparameters). In het monitoringsplan wordt ook concreet gemaakt hoe de intensiviteit van de monitoring wordt aangepast gedurende de operationele fase. Zo kan bijvoorbeeld de eerste jaren een uitgebreidere set monitoring worden toegepast, maar als negatieve effecten uitblijven kan dit worden beperkt omwille van doelmatige inzet van middelen. Door dit in het monitoringsplan op te nemen, en niet in deze aanvraag vergunning Waterwet, wordt de procedure voor deze aanpassing eenvoudiger, terwijl het bevoegd gezag toch grip houdt op de uit te voeren metingen.

- **Monitoring tijdens bedrijfsfase:** minimaal 1x per jaar wordt grondwater bemonsterd bij de hete bron en geanalyseerd op de parameters in Tabel 1 het Voorlopig Afwegingskader (H3.3, rechterkolom).

Hiermee wordt al een minimumeis m.b.t. de meetacties aangekondigd.

- **Rapportage:** conform standaard OBES regels worden jaaropgaven ieder jaar ingediend en wordt na 2 jaar, en vervolgens elke 5 jaar, een monitoringsrapportage toegestuurd naar het bevoegd gezag. In aanvulling op deze standardeisen uit de BUM worden in de ze rapportage ook de monitoringsresultaten opgenomen en toegelicht, en wordt de effectiviteit van de waterbehandelingsmethode beschreven.

Hiermee wordt geregeld dat de monitoringsdata en inzichten van een HTO-systeem ook met het bevoegd gezag worden teruggekoppeld, om kennisontwikkeling te stimuleren.

#### Meting thermische effecten ondergrond

Een belangrijk meetdoel is het in kaart brengen van de omvang van de thermische effecten in de ondergrond. Daarvoor is een aantal meetpunten in en rondom de HTO-bronnen nodig. De minimale meetopstelling waar de TU Delft zich aan committeert voor het meten van temperaturen in de ondergrond, en die daarom ook in de vergunningvoorschriften kunnen worden opgenomen, is hieronder beschreven. Meer details over de inzet van deze meetopstelling (zoals exact aantal meetpunten in de apparatuur, meetfrequenties, etc.) volgt in het monitoringsplan.

- Er wordt speciale apparatuur geïnstalleerd in het boorgat van de monitoringsput (proefboring), én in minimaal één boorgat van de hete bronnen, én in minimaal één boorgat van de lauwe bronnen, waarmee temperatuurmetingen kunnen worden uitgevoerd op verschillende dieptes in het betreffende boorgat, met een hoge frequentie (bijv. dagelijks). Momenteel wordt daarvoor gedacht aan de glasvezel-Distributed Temperature Sensing (DTS) techniek, maar het is onderdeel van het onderzoek om de waarde en effectiviteit van verschillende temperatuurmonitoringstechnieken te testen.
- Mogelijk worden nog meer meetpunten geïnstalleerd, maar omdat daar nog geen zekerheid over bestaat, zijn die niet opgenomen in deze vergunning. Wel kan dit worden opgenomen in het monitoringsplan, dat na realisatie van de putten en vóór ingebruikname, wordt voorgelegd aan het bevoegd gezag ter goedkeuring.

De monitoringsput die momenteel wordt gerealiseerd tijdens de proefboring ligt circa 15 m ten zuidoosten van de hete bronzone. Dit is dichtbij genoeg om gedegen monitoring van de hete bel mogelijk te maken. De positie is zodanig gekozen dat de meetdoelen kunnen worden behaald, ook

als de werkelijk verpompte watervolumes kleiner zijn dan de maximale of gemiddelde volumes uit deze vergunningaanvraag (zie Tabel 2.1). Met deze meetopstelling kunnen de thermische effecten in het opslagpakket en ondiepere lagen nauwkeurig en hoogfrequent worden gemonitord. Door dit grote aantal meetpunten wordt verzekerd dat het meetdoel, van het in kaart brengen en volgen van de omvang van de warme zone, kan worden behaald.

#### Zaken die aan bod komen in het Monitoringsplan

De vergunning Waterwet borgt via de voorschriften reeds dat een bepaalde minimale meetopstelling wordt gerealiseerd bij het boren van de bronnen. Daarmee wordt geborgd dat bepaalde metingen mogelijk worden gemaakt in de toekomst. De precieze meetactiviteiten die dienen te worden uitgevoerd met die meetopstelling, en de details daarvan (frequentie, meetintervallen, etc.) worden nader uitgewerkt in het monitoringsplan. Zie het Voorlopige Afwegingskader voor het voorgestelde voorschrift omtrent dit monitoringsplan.

#### Andere onderzoeksactiviteiten niet in vergunningaanvraag opgenomen

Buiten de monitoring die vanuit de vergunning wordt geëist, is vanuit het PUSH-IT onderzoeksprogramma ook budget beschikbaar voor aanvullende monitoringsactiviteiten in het kader van wetenschappelijk onderzoek. Zo kan in de monitoringsbron en de HTO-bronnen met grotere regelmaat watermonsters worden genomen en geanalyseerd dan in de vergunning staat, om diepgaander wetenschappelijk onderzoek mogelijk te maken. Echter, omdat de wetenschappelijke vraagstukken onderhevig zijn aan voortschrijdend inzicht, worden de daarvoor beoogde meetactiviteiten niet opgenomen in de vergunningaanvraag. Wel is toelichting van de meetactiviteiten die vanuit PUSH-IT beoogd worden in Bijlage 1 toegelicht.

## 1.9

### VERGUNNINGSTERMIJN

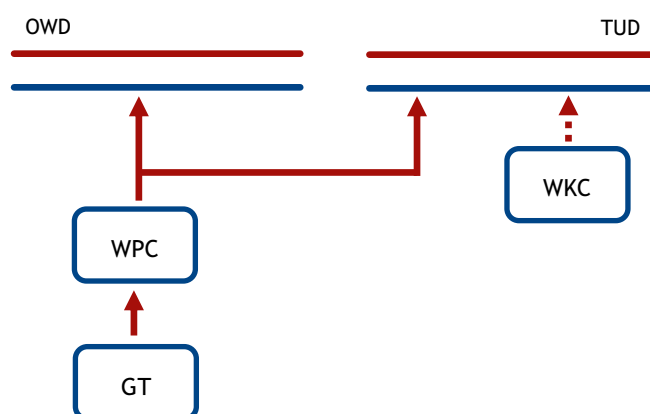
Om de HTO in de praktijk te kunnen realiseren is een solide business case ook noodzakelijk. Een HTO-systeem vraagt aan de voorkant een grote investering, die volgens de business case over een langere periode wordt terugverdiend en daarom is een vergunning voor een langere periode noodzakelijk. In dit geval is het gebruik van de HTO gekoppeld aan de productieperiode van de Geothermiebron. Daarom wordt voor dit HTO-systeem een vergunningstermijn van 20 jaar aangevraagd. In deze aanvraag zijn thermische effecten tot 20 jaar berekend. Het ligt voor de hand dat de vergunninghouder na circa 20 jaar een toelichting geeft aan het bevoegd gezag op de werkelijk gemeten thermische effecten en de verwachte thermische effecten na 20 jaar, zodat vervolgens gezamenlijk kan worden gekeken hoe en onder welke voorwaarden de vergunning na 20 jaar kan worden verlengd.

## 2 Systeembeschrijving

### 2.1 UITGANGSPUNTEN HTO-SYSTEEM

#### Integratie HTO in het warmtesysteem

Geothermie Delft (GTD) is momenteel bezig met de realisatie van een geothermiesysteem. Naast een geothermisch doublet wordt ook een warmtepompcentrale ontwikkeld. De warmtepompcentrale koelt de geothermische bron verder uit, waardoor meer geothermische warmte onttrokken kan worden. Het geothermiesysteem gaat warmte leveren aan het bestaande warmtenet op de TUD en het nog te ontwikkelen Open Warmtenet Delft (OWD). De bestaande warmtekrachtcentrale dient als piekvoorziening van het warmtenet van TUD en als (gedeeltelijke) backup voor beide warmtenetten. Voorgaande is schematisch weergegeven in Figuur 2.1.



Figuur 2.1 | Schematische weergave energieconcept geothermiesysteem. WPC = warmtepompcentrale, GT = geothermie doublet, OWD = Open Warmtenet Delft, TUD = Technische Universiteit Delft, WKC = warmtekrachtcentrale.

Op het bestaande warmtenet op de TUD worden oudere gebouwen van de TU Delft aangesloten die nu met gas verwarmd worden en nu nog hoge temperaturen nodig hebben. Het gaat om 28 gebouwen, gebruikt door faculteiten en ondersteunende diensten, met een gezamenlijk oppervlak van ca. 470.000 m<sup>2</sup> BVO. De totale warmtevraag bedraagt ca. 45.000 MWh per jaar. OWD is een warmtenet dat door Netverder samen met de gemeente Delft en de woningcorporaties DUWO, Stedelink, Vidomes en Woonbron wordt ontwikkeld. Dit project richt zich voornamelijk op het aansluiten van de wijken Voorhof en Buitenhof in Delft, uiteindelijk kunnen ca. 15.000 afnemers worden aangesloten. Bij de ontwikkeling van beide warmtenetten zijn onzekerheden. Dit heeft invloed op het aansluittempo en de totale omvang van de warmtevraag. Bij de ontwikkeling van de HTO wordt hier zo goed mogelijk flexibel mee omgegaan. Wanneer de warmtevraagontwikkeling langzamer gaat, zal de inzet van de HTO worden verlaagd. Dit betekent dat de watervolumes lager uit zullen vallen. Wanneer de uiteindelijke warmtevraag groter wordt dan gepland, zal de inzet van de HTO verhoogd worden richting de maximaal vergunde hoeveelheden.



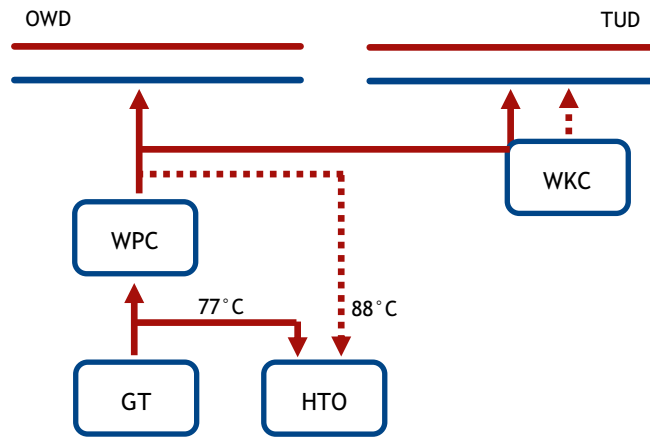
Om hoge temperatuuropslag (HTO) in de bodem mogelijk te maken wordt een grondwatersysteem (Open Bodemenergiesysteem) aangelegd. Het grondwatersysteem bestaat uit hete en lauwe bronnen waar grondwater aan kan worden onttrokken en in geïnfiltrerd. Het doel van de hoge temperatuuropslag is om als seizoensbuffer voor de geothermiebron te fungeren. Als het aanbod van warmte uit het geothermische systeem groter is dan de warmtevraag (de zomer) zal een deel van de warmte opgeslagen worden in het hoge temperatuuropslagsysteem. Als de warmtevraag groter is dan het aanbod (de winter), zal warmte uit de hoge temperatuuropslag onttrokken en geleverd worden aan de warmtenetten.

De geothermiebron heeft een temperatuur van 79°C. In de basis wordt geothermische warmte, via een warmtewisselaar, opgeslagen in de HTO met een temperatuur van circa 77°C<sup>1</sup> (zie Figuur 2.2). Tijdens het opslaan van warmte in de HTO wordt water onttrokken aan de lauwe bronnen, om hier vervolgens warmte aan toe te voegen en het opgewarmde water weer te infiltreren in de hete bronnen. Het is de verwachting dat er momenten in de zomer zullen optreden dat de stroomprijs laag (of zelfs negatief is) vanwege een overschot aan duurzame zonne- en windenergie. In dat geval kan de warmtepompcentrale aanvullend warmte onttrekken aan de geothermiebron en dit opslaan in de HTO. Dit wordt ook wel power-to-heat genoemd. De warmtepompcentrale kan de geothermische opwaarderen naar 90°C. Hierdoor kan in tijden van lage elektraprijzen ('s zomers) warmte worden opgeslagen in de HTO met een temperatuur van 88°C. Hoeveel warmte in de toekomst via power-to-heat kan worden opgeslagen is onzeker. COMCAM Energy heeft een voorspelling gemaakt van de ontwikkeling van negatieve elektriciteitsprijzen in Nederland tot en met 2026<sup>2</sup>. De HTO wordt geladen in de maanden mei - augustus. In deze periode is de verwachting dat het aandeel dat de elektriciteitsprijzen negatief zijn toeneemt van 9% in 2024 naar 16% in 2026. Aangenomen is dat dit in de jaren daarna nog verder groeit. Voor de HTO is gerekend met 25%. Dit betekent dat circa 25% van de warmte wordt opgeslagen via power-to-heat op een temperatuur van 88°C. De overige 75% van de warmte is afkomstig uit het geothermiesysteem en kan met een temperatuur van 77°C worden opgeslagen. Dit resulteert samen in een gemiddelde opslagtemperatuur van 80°C voor de HTO. Wanneer het aandeel in negatieve elektriciteitsprijzen boven de 25% komt in de toekomst, zal de inzet van power-to-heat voor de HTO beperkt moeten worden op 25%, zodat de gemiddelde injectietemperatuur niet hoger wordt dan 80°C.

---

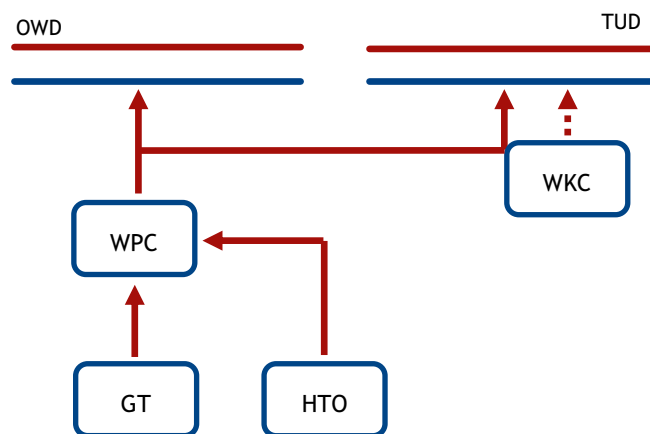
<sup>1</sup> De opslagtemperatuur in de HTO ligt altijd wat lager dan de brontemperatuur van de geothermie door temperatuurverlies over de warmtewisselaar.

<sup>2</sup> <https://www.comcamenergy.com/blog/negatieve-stroom-uren-2023-verwachting-mogelijke-oplossingen/>



Figuur 2.2 | Warmte laden in de HTO. WPC = warmtepompcentrale, GT = geothermie doublet, OWD = Open Warmtenet Delft, TUD = Technische Universiteit Delft, WKC = warmtekrachtcentrale.

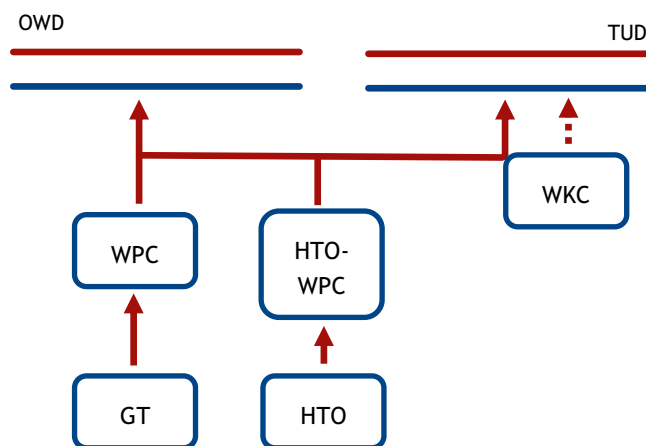
In de winterperiode zal de HTO warmte terugleveren. De HTO wordt ingekoppeld met de rest van het systeem via de warmtepompcentrale (zie Figuur 2.3). Heet water wordt onttrokken aan de hete bronnen en na warmteoverdracht wordt het afgekoelde water geïnfiltreerd in de lauwe bronnen. Er is warmtelevering vanuit de HTO mogelijk totdat de afkaptemperatuur<sup>3</sup> wordt bereikt. De warmte vanuit de HTO wordt via de warmtepompcentrale doorgeleverd aan OWD en (via de WKC) het warmtenet van de TUD.



Figuur 2.3 | Warmte terugleveren vanuit de HTO. WPC = warmtepompcentrale, GT = geothermie doublet, OWD = Open Warmtenet Delft, TUD = Technische Universiteit Delft, WKC = warmtekrachtcentrale.

<sup>3</sup> De afkaptemperatuur is de laagste temperatuur van het teruggewonnen water uit de hete bron die nog bruikbaar is. Als de onttrekkingstemperatuur de afkaptemperatuur bereikt, wordt warmtelevering vanuit de HTO stopgezet/afgekap.

Mogelijk wordt in de toekomst nog een warmtepompcentrale toegevoegd aan het HTO systeem<sup>4</sup> (zie Figuur 2.4). Door het toevoegen van een warmtepompcentrale aan het HTO systeem kan meer van de opgeslagen warmte terug gewonnen worden, omdat ook de lagere temperaturen uit de HTO kunnen worden benut. Zowel de afkaptemperatuur als temperatuur van de lauwe bron gaan dan omlaag. Met het toevoegen van een warmtepomp kan dus meer warmte worden geleverd aan beide warmtenetten en kan het terugwinrendement van de HTO worden verhoogd. Vooral nog is vanwege de hoge extra investeringen op korte termijn nog geen extra warmtepompcentrale voorzien. Maar omdat deze in de toekomst mogelijk wordt toegevoegd, zijn in dit document wel de effecten op de SPF en CO<sub>2</sub>-besparing inzichtelijk gemaakt. Om tot een inschatting van de SPF en CO<sub>2</sub>-besparing te komen is gebruik gemaakt van de studie die is uitgevoerd in het WarmingUp<sup>5</sup> programma. Hierin zijn diverse varianten met en zonder warmtepomp doorgerekend. Bij de varianten met warmtepomp wordt ongeveer de helft van de warmte op directe wijze geleverd en de andere helft wordt door de warmtepomp opgewaardeerd en vervolgens geleverd aan het warmtenet. De COP van de warmtepomp is in deze studie ingeschat op 3,8<sup>6</sup>.



Figuur 2.4 | Warmte terugleveren vanuit de HTO met extra warmtepompcentrale. WPC = warmtepompcentrale, GT = geothermie doublet, OWD = Open Warmtenet Delft, TUD = Technische Universiteit Delft, WKC = warmtekrachtcentrale.

### Bronlocaties

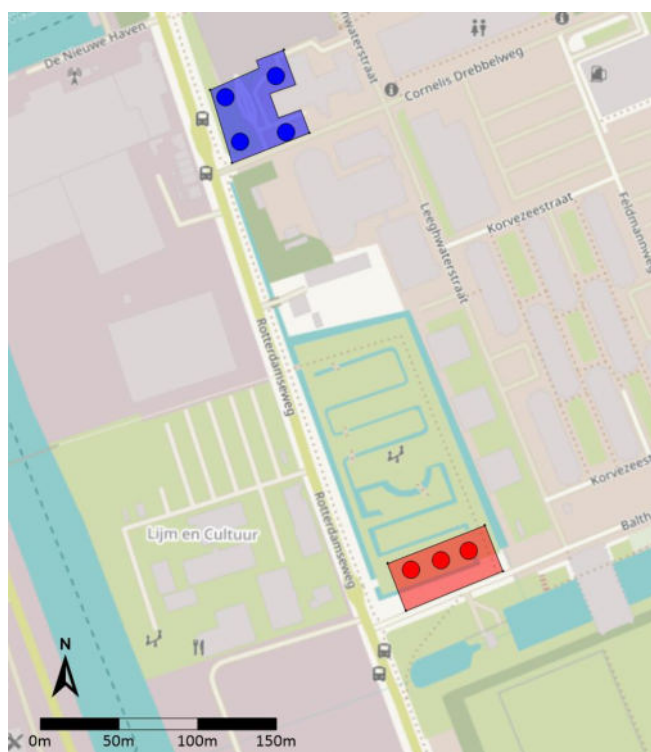
Voor de locaties van de hete en lauwe bronnen zijn twee zones aangewezen op het TU Delft terrein. De hete bronnen worden gerealiseerd in de hete bronzone, en de lauwe bronnen in de lauwe bronzone (zie Figuur 2.5 en Figuur 2.6 achterin de effectrapportage voor meer detail). De exacte posities van de bronnen binnen de betreffende zones is nog niet definitief vastgesteld omdat deze mede afhankelijk is van inpassingsmogelijkheden (leidingwerk, kabels, etc.). De bronnen worden

<sup>4</sup> Dit is dus een extra warmtepompcentrale, naast de reeds geplande warmtepompcentrale voor het geothermiesysteem.

<sup>5</sup> <https://www.warmingup.info/documenten/haalbaarheid-en-uitwerking-systeemconcept-hto-tu-delft.pdf>

<sup>6</sup> De COP is een conservatieve waarde. In de ontwerpfase kan in meer detail gekeken worden naar de optimale inpassing van een warmtepomp met een hogere COP. Dit zal afgezet dienen te worden tegen de investeringskosten, zodat een balans gevonden kan worden tussen duurzaamheid en kosten.

dus binnen de zone geplaatst, maar kunnen binnen de zone nog wel geschoven worden op basis van praktische overwegingen. In hoofdstuk 3.3 is nader onderbouwd dat verschuiven van de bronnen binnen de zone niet leidt tot significant andere beïnvloeding van andere belangen.



Figuur 2.5 | Voorbeeld bronlocaties binnen hete en lauwe zones

#### Grondwaterzijdige uitgangspunten

De grondwaterzijdige uitgangspunten voor de vergunningaanvraag zijn opgenomen in Tabel 2.1. De uitgangspunten gelden voor het totale HTO-systeem. Er worden maximaal drie hete en vier lauwe bronnen gerealiseerd. Het maximale debiet bedraagt 250 m<sup>3</sup>/uur tijdens het laden van warmte (zomer) en tijdens warmtelevering 275 m<sup>3</sup>/uur (winter). Per bron wordt in deze effectrapportage de maximale broncapaciteit gebaseerd op het debiet van 275 m<sup>3</sup>/uur (winter) en de daarbij horende maximale capaciteit van 92 en 69 m<sup>3</sup>/uur voor respectievelijk de hete en lauwe bronnen.

Tussen de hete en de lauwe bronnen wordt een transportleiding aangelegd, waarop alle bronnen zijn aangesloten. Door deze transportleiding stroomt grondwater van de hete naar de lauwe bronnen en omgekeerd. Het debiet wordt gelijkmatig verdeeld over alle bronnen. Via warmtewisselaars wordt de warmte uitgewisseld tussen de HTO en het geothermiesysteem en tussen de HTO en beide warmtenetten.

#### Mogelijk minder bronnen nodig voor hetzelfde maximale debiet

In de praktijk bestaat de optie om het maximale debiet met minder bronnen te behalen. Dit kan het gevolg zijn doordat in de proefboring een gunstige bodemopbouw aangetroffen wordt en/of doordat tijdens ontwikkeltesten blijkt dat op een veilige en duurzame wijze de NVOE-richtlijnen voor ondergrondse energieopslag overschreden kunnen worden. Om het maximale debiet te kunnen behalen, zullen minimaal 2 hete en 2 lauwe bronnen nodig zijn, en maximaal 3 hete en 4 lauwe.

Ongeacht de hoeveelheid bronnen die werkelijk gerealiseerd worden voor het HTO-systeem, is het uitgangspunt dat de werkelijk optredende effecten kleiner zijn dan in deze effectrapportage berekend. Per effectberekening wordt toegelicht hoe met de onzekerheid over het aantal bronnen is omgegaan bij het berekenen van de worst case effecten in horizontale en verticale zin.

Tabel 2.1 | Uitgangspunten open bodemenergiesysteem t.b.v. de vergunningaanvraag Waterwet

parameter	eenheid	zomer (warmte opslag)	winter (warmte levering)
gemiddeld te verpompen waterhoeveelheid <sup>a</sup>	[m <sup>3</sup> /seizoen]	550.000	600.000
maximaal te verpompen waterhoeveelheid <sup>b</sup>	[m <sup>3</sup> /jaar]		1.440.000
maximaal totale debiet	[m <sup>3</sup> /uur]	250	275
gemiddeld debiet	[m <sup>3</sup> /uur]	220	220
maximaal debiet per bron <sup>c</sup>	[m <sup>3</sup> /uur/bron]	125	137,5
maximale hoeveelheid ontwikkelwater <sup>d</sup>	[m <sup>3</sup> ]		30.000
maximale spuihoeveelheid <sup>d</sup>	[m <sup>3</sup> /jaar]		5.000
gemiddelde infiltratietemperatuur	[°C]	80 <sup>e</sup>	58
maximale infiltratietemperatuur	[°C]	90 <sup>f</sup>	64
afkaptemperatuur	[°C]	n.v.t.	60
maximaal vermogen	[kW]	22.300 <sup>g</sup>	7.000 <sup>g</sup>
gemiddeld verplaatste energiehoeveelheid	[MWh <sub>t</sub> /seizoen]	31.000	15.500
maximaal warmteoverschot jaar 1 - 5 <sup>d</sup>	[%]		300
maximaal warmteoverschot vanaf jaar 5 <sup>d</sup>	[%]		200

<sup>a</sup> De gemiddeld te verpompen waterhoeveelheid wordt bepaald door het moment waarop de afkaptemperatuur bereikt wordt. Het uitgangspunt is dat voor de opslag van warmte gemiddeld 550.000 m<sup>3</sup>/seizoen wordt verpompt en dat in de winter warmte geleverd kan worden totdat de afkaptemperatuur, of de maximale waterverplaatsing van 720.000 m<sup>3</sup>/seizoen bereikt wordt.

<sup>b</sup> Tijdens opstartjaar of extreme seizoenen

<sup>c</sup> Het maximale debiet wordt met minimaal twee hete en twee lauwe bronnen verpompt. In dat geval bedraagt het debiet maximaal 137,5 m<sup>3</sup>/uur/bron tijdens warmtelevering en 125 m<sup>3</sup>/uur/bron tijdens warmte opslag.

<sup>d</sup> Zie toelichting in onderstaande tekst.

<sup>e</sup> De temperatuur na overdracht van warmte vanuit de geothermiebron bedraagt 77°C. Omdat deze warmte op sommige momenten in de zomer kan worden opgewaardeerd middels een warmtepomp tot circa 88°C zal de gemiddelde infiltratietemperatuur hoger liggen: de gemiddelde infiltratietemperatuur is op 80°C geschat.

<sup>f</sup> Mogelijk wordt een deel van de geothermische warmte verder opgewaardeerd met een warmtepomp tot 88°C. Rekening houdend met enige uitschieters wordt uitgegaan van een maximale infiltratietemperatuur van 90°C. Dit is dus de maximale temperatuur op te nemen in een voorschrift.

<sup>g</sup> Berekend op basis van het maximale debiet en het maximale temperatuurverschil tussen de hete en lauwe bron. Bij warmteopslag is dat het verschil tussen de maximale infiltratietemperatuur (90°C) en de natuurlijke grondwatertemperatuur (13°C). Bij warmtelevering is dat het verschil tussen de maximale temperatuur van de hete bron na laden (80°C) en de infiltratietemperatuur in de lauwe bron (58°C).

### Ontwikkelen bronnen

Nadat een bron geboord is, het filter en de peilbuizen zijn ingebouwd en het boorgat is aangevuld, wordt de bron ontwikkeld. Doel van het ontwikkelen is het schoonmaken van de bron. Hierbij wordt de verstopping op de boorgatwand, die bij het boren is ontstaan, zo goed mogelijk verwijderd door het schoonpompen van de bron.

Tijdens dit proces wordt grondwater (ontwikkewater) onttrokken en geloosd. Het grondwater wordt onttrokken met een maximaal debiet van 100 tot 130% van het ontwerpdebiet, in dit geval 69 tot 90 m<sup>3</sup>/uur/bron voor de lauwe bronnen en 92 tot 120 m<sup>3</sup>/uur/bron voor de hete bronnen. Gezien het ontwerpdebiet vast staat met 275 en 250 m<sup>3</sup>/uur tijdens respectievelijk warmte levering en warmte opslag heeft de hoeveelheid bronnen waarover dit ontwerpdebiet verdeeld wordt geen invloed op de maximale hoeveelheid ontwikkel- en spuiwater. Met dit maximale debiet wordt slechts gedurende korte tijd (maximaal 15 minuten) gepompt tijdens de laatste fase van het ontwikkelen. Voor het ontwikkelen van de maximaal zeven beoogde bronnen wordt in totaal maximaal 30.000 m<sup>3</sup> grondwater onttrokken en geloosd. De bronnen worden één voor één ontwikkeld waardoor het grondwater gefaseerd wordt onttrokken en geloosd. Door deze gefaseerde aanleg kan het zijn dat de eindsituatie van het HTO-systeem niet binnen één jaar bereikt kan worden en dat het vrijkomen van het ontwikkelwater daarom gedurende meerdere jaren plaatsvindt.

De lozingsroute van het ontwikkelwater, is op dit moment nog niet definitief. De meest waarschijnlijke optie voor het lozen van het ontwikkelwater is lozen op het vuilwaterriool van de TU Delft. Een vergunning voor het lozen van het ontwikkelwater wordt in een later stadium aangevraagd bij het bevoegd gezag.

#### **Spuihoeveelheid**

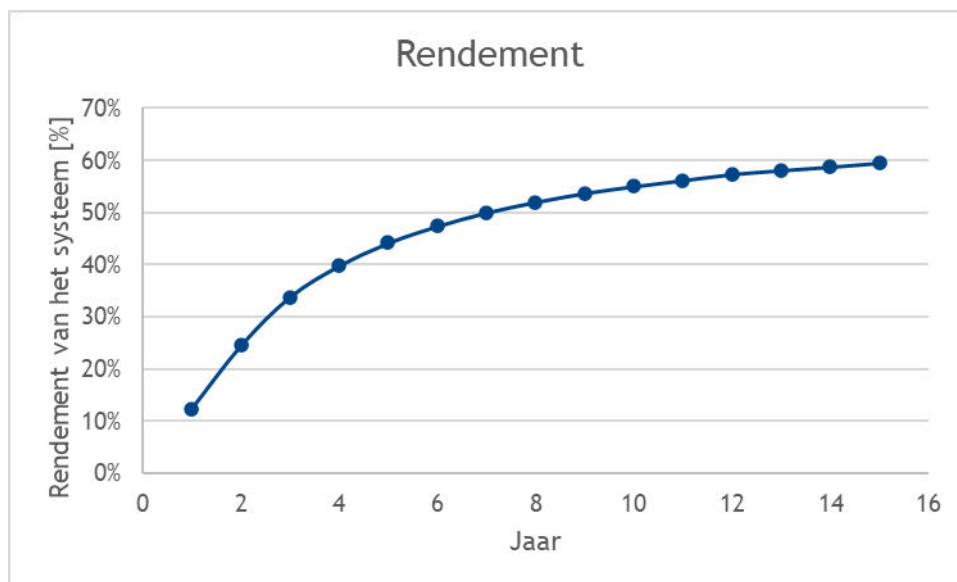
In verband met preventief onderhoud van de bronnen worden deze een aantal keer per jaar gespuid. Bij deze actie wordt uit de bronnen enige tijd grondwater onttrokken met het maximale debiet. Per jaar wordt niet meer dan 5.000 m<sup>3</sup> grondwater gespuid. Het onttrokken grondwater zal na filtering met een kaarsenfilter in de bodem teruggebracht worden. Net als voor het ontwikkelwater geldt dat, indien het terugbrengen in de bodem (tijdelijk) niet mogelijk is, het grondwater lokaal geloosd wordt. Indien gekozen wordt voor het (tijdelijk) lozen van het spuiwater wordt daarvoor toestemming gevraagd bij het bevoegd gezag.

#### **Warmteoverschot**

Het warmteoverschot is naar verwachting in de opstartjaren relatief groot met 300%. Dit komt doordat in de beginjaren de ondergrond nog niet opgewarmd is, waardoor de zandkorrels uit het opslagpakket veel warmte opnemen en waardoor de warmteverliezen relatief groot zijn. Pas na enkele jaren warmteopslag is de ondergrond dusdanig opgewarmd dat het merendeel van de opgeslagen warmte kan worden teruggewonnen uit de HTO. Het minimale warmteoverschot (gerelateerd aan het maximaal haalbare terugwinrendement) wordt bepaald door de aangetroffen bodemopbouw en operationele keuzes vanuit het energiesysteem. Het laagste rendement van het HTO-systeem wordt behaald op het moment dat géén warmtepomp toegevoegd wordt en relatief weinig warmte geladen wordt. Rendementen voor het HTO-systeem zijn in een haalbaarheidsfase inzichtelijk gemaakt voor diverse scenario's. Een voorbeeld van het verloop van het rendement voor een scenario zonder warmtepomp (worst-case aanname v.w.b. rendement) waarbij gemiddeld 600.000 m<sup>3</sup> grondwater geladen wordt is weergegeven in Figuur 2.7. Zoals in de figuur bedraagt het gemiddelde rendement in de eerste vijf jaar circa 33% en groeit het in de jaren daarna door tot boven de 50%.

Op basis van deze ontwikkeling van de rendementen wordt voor de eerste 5 jaar een warmteoverschot van 300% aangevraagd, en voor de jaren daarna van maximaal 200%. Als rendementen in de praktijk hoger liggen (bijvoorbeeld door toepassing van warmtepomp) leidt dit tot een lager warmteoverschot in de ondergrond, en kleinere thermische effecten dan in deze

studie is weergegeven. Deze studie bevat dus een worst-case beeld van de thermische effecten (grote warmteverliezen) en een bijbehorend worst-case uitgangspunt voor warmteoverschot.



Figuur 2.7 | Voorbeeld verloop rendement HTO-systeem TUD

## 2.2 OPZET OPEN BODEMENERGIESYSTEEM

Het grondwatersysteem bestaat uit maximaal drie hete en vier lauwe bronnen. De bronnen worden in de door de TU Delft aangewezen zones gerealiseerd. De precieze locaties van de bronnen binnen deze zones zijn afhankelijk van praktische aspecten en daarom op dit moment nog niet exact vastgelegd, maar in de hydrologische, grondmechanische en hydrothermische berekeningen zijn de bronlocaties zodanig geplaatst dat de berekende effecten een worst case situatie representeren.

In de modelberekeningen wordt aan de positionering van de bronnen aandacht besteed. De zones zijn weergegeven in Figuur 2.6 achterin het rapport. In Tabel 2.2 is de opzet van het bronsysteem beschreven. De hoekpunten van de zoekgebieden zijn met coördinaten in de tabel én in de figuur opgenomen.

Tabel 2.2 | Opzet bronsysteem

parameter	eenheid	waarde
filterdiepte	[m-mv]	95 - 240 <sup>a</sup> (3 <sup>e</sup> watervoerend pakket)
verwachte minimale bronfilterlengte <sup>b</sup>	[m]	20
minimale afstand tussen de hete en lauwe bronclusters	[m]	273
afstand tussen het middelpunt van de hete en lauwe bronclusters	[m]	320
gemiddelde afstand tussen bronnen binnen cluster <sup>c</sup>	[m]	20
RD coördinaten hoekpunten zoekgebied hete bronnen		
Noordwest	[m]	X = 85.202 / Y = 445.776
Noordoost	[m]	X = 85.264 / Y = 445.800
Zuidwest	[m]	X = 85.213 / Y = 445.746
Zuidoost	[m]	X = 85.275 / Y = 445.771
Middelpunt	[m]	X = 85.238 / Y = 445.772
RD coördinaten zoekgebied lauwe bronnen		
1	[m]	X = 85.089 / Y = 446.077
2	[m]	X = 85.120 / Y = 446.091
3	[m]	X = 55.119 / Y = 446.096
4	[m]	X = 85.136 / Y = 446.102
5	[m]	X = 85.143 / Y = 446.080
6	[m]	X = 85.127 / Y = 446.075
7	[m]	X = 85.133 / Y = 446.060
8	[m]	X = 85.147 / Y = 446.065
9	[m]	X = 85.152 / Y = 446.050
10	[m]	X = 85.103 / Y = 446.030
Middelpunt	[m]	X = 85.115 / Y = 446.063

<sup>a</sup> op basis van de meest nabijgelegen boorbeschrijvingen wordt het derde watervoerende pakket (formatie van Maassluis) verwacht vanaf een diepte tussen 95 en 105 m-mv. De exacte diepteligging van het derde watervoerende pakket wordt nader onderzocht bij de proefboring. De verwachting is dat de filters bovenin het derde watervoerende pakket geplaatst worden.

<sup>b</sup> op basis van de nu ingeschatte conservatieve waarde van de doorlatendheid is minimaal 20 meter filter benodigd bij toepassing van 3 hete en 4 lauwe bronnen. Indien een hogere doorlatendheid aangetroffen wordt kan mogelijk voldaan worden met een kortere filterlengte. Het uitgangspunt is dat de in deze effectenstudie berekende effecten niet overschreden worden. Doordat maximale stijghoogteverhoging gelimiteerd wordt door de maximale injectiedruk heeft een kortere filterlengte geen effect op de hydrologische en grondmechanische effecten. Hydrothermisch is ook gerekend met 20 meter bronfilterlengte, maar is sprake van een worst case scenario omdat gerekend is met één bron.

<sup>c</sup> de exacte inpassing van de bronnen vindt plaats op basis van beschikbare ruimte in de ondergrond en op maaiveld. Op basis van een eerste inschatting is het een reële aanname dat de bronlocaties gemiddeld circa 20 meter van elkaar af komen te liggen. In de effectberekeningen zijn aannames voor onderlinge afstand gedaan zodat sprake is van een worst case berekening.

Het grondwatercircuit wordt luchtdicht en onder een overdruk ten opzichte van de atmosfeer gehouden, zodat geen lucht in het grondwatercircuit kan toetreden.

Tijdens het ontwerp worden corrosiebestendige materialen geselecteerd waarbij onder andere GRE, RVS en GVK worden overwogen. Opgemerkt wordt dat het geothermiesysteem zijn warmte via een warmtewisselaar afstaat aan het warmtenet. Deze warmte wordt vervolgens via een andere warmtewisselaar (mogelijk na verdere opwaardering middels een warmtepomp) afgestaan aan het HTO systeem. Er is dus géén sprake van menging of uitwisseling van grondwater uit het geothermie-systeem met het grondwater uit het HTO systeem.



## 2.3 SEASONAL PERFORMANCE FACTOR, ENERGIEBESPARING EN EMISSIEREDUCTIE

### Seasonal Performance Factor

Het energierendement van het HTO systeem wordt uitgedrukt als de Seasonal Performance Factor (SPF). Deze Seasonal Performance Factor is gedefinieerd als de totaal door het open bodemenergiesysteem geleverde hoeveelheden aan warmte en koude per jaar in  $MWh_t$ , gedeeld door het jaarlijks elektraverbruik van het open bodemenergiesysteem in  $MWh_e$  (Waterregeling art. 6.29 lid 2). Bij HTO wordt alleen warmte geleverd. Tot het open bodemenergiesysteem behoren, in het geval van HTO, de bronpompen van de ondergrondse installatie, eventuele warmtepompen, hulpenergie en de energie die nodig is om bronwarmte (geothermie) op te slaan.

De SPF van het open bodemenergiesysteem behorende bij deze vergunningaanvraag bedraagt 4,9. Wanneer in de toekomst een HTO warmtepompcentrale wordt toegevoegd aan het HTO-systeem heeft dit effect op de SPF. In dat geval bedraagt de SPF 3,5. De berekeningen van de SPF is bijgevoegd in Bijlage 2. Merk op dat bij het bepalen van de SPF voor de situatie met warmtepomp gerekend is met een conservatieve waarde voor de COP van de warmtepomp (zie paragraaf 2.1). Door het toevoegen van de warmtepomp neemt ook het vermogen geleverd aan beide warmtenetten toe. Ook met de conservatieve COP-waarde voor de warmtepomp is dit nog altijd veel duurzamer dan het toepassen van een gasketel. Een ander bijkomend voordeel van het toepassen van een warmtepomp is dat ook de lagere temperaturen uit het HTO-systeem (aan het einde van de ontlaadcycli) kunnen worden benut, omdat de warmtepomp deze warmte kan opkrikken. Dit draagt bij aan de flexibiliteit en leveringszekerheid van de warmtelevering in de winter.

### Energiebesparing en emissiereductie

Voor het bepalen van de jaarlijkse primaire energiebesparing en de jaarlijkse emissiereductie zijn het laden en het leveren van warmte met het open bodemenergiesysteem (inclusief warmtepompen, warmtebronnen en hulpenergie) vergeleken met een referentie-installatie bestaande uit gasgestookte ketels voor verwarming.

Vanaf 1 januari 2021 geldt dat alle nieuwbouw moet voldoen aan de eisen voor Bijna Energie Neutrale Gebouwen (BENG). Bij het berekenen van de jaarlijkse primaire energiebesparing en emissiereductie is dan ook gebruik gemaakt van de hierbij behorende kentallen uit de NTA8800.

De berekende besparing in het primair energiegebruik behorende bij deze vergunningaanvraag bedraagt 45.458 GJ per jaar en komt neer op een energiebesparing van 73% ten opzichte van wanneer een gasketel zou worden ingezet. Deze energiebesparing resulteert in een jaarlijkse emissiereductie van 2.074 ton (66%) koolstofdioxide ( $CO_2$ ) en 3.050 kg (87%) stikstofoxiden ( $NO_x$ ).

Wanneer in de toekomst een HTO warmtepompcentrale wordt toegevoegd, bedraagt de berekende besparing in het primair energiegebruik behorende bij deze vergunningaanvraag 46.648 GJ per jaar en komt neer op een energiebesparing van 63% ten opzichte van wanneer een gasketel zou worden ingezet. Deze energiebesparing resulteert in een jaarlijkse emissiereductie van 1.977 ton (52%) koolstofdioxide ( $CO_2$ ) en 3.429 kg (81%) stikstofoxiden ( $NO_x$ ). Door het toevoegen van een warmtepomp wordt iets meer primair energieverbruik voorkomen. Het effect is vooralsnog beperkt. Dit komt doordat ook hier nog conservatief is gerekend. In de variant met warmtepomp is nu aangenomen dat de injectietemperatuur in de koude bron gelijk blijft. In de praktijk zal de injectietemperatuur bij de lauwe bron dalen door integratie van een warmtepomp. Daarmee zal de hoeveelheid warmte die geleverd wordt en de primaire energiebesparing toenemen en zullen de thermische effecten bij de lauwe bron én de hete bron lager uitvallen dan in deze studie is berekend: er kan meer warmte

uit de hete bel worden teruggewonnen (lagere afkaptemperatuur) en het afgekoelde water wordt met een lagere temperatuur in de lauwe bron geïnfiltreerd. Omdat de precieze temperaturen echter pas bekend zijn wanneer er een detailontwerp van de warmtepompinstallatie wordt gemaakt, is hier gekozen voor een conservatieve inschatting van de inzet van de warmtepomp, en daarmee wordt een worst-case beeld van de thermische effecten en warmteoverschot in de bodem verkregen.

## 3 Geohydrologie en effectberekeningen

### 3.1 BODEMOPBOUW

De bodemopbouw in de directe omgeving van de locatie is beschreven op basis van de volgende gegevens:

- Grondwaterkaart van Nederland;
- Regionaal Geohydrologisch Informatie Systeem (REGIS);
- Boorbeschrijvingen uit het archief van TNO Bouw en Ondergrond via DINOLoket representatieve boorbeschrijvingen:
  - B37E0581
- Boorbeschrijving van de proefboring bij Kabeldistrict en proefboring Technopolis;
- Boorbeschrijving van de bronnen van het open bodemenergiesysteem van TNW en de monobron aan de röntgenweg.

Op basis van deze gegevens is de bodemopbouw geschematiseerd weergegeven in onderstaande Figuur 3.1 en in Tabel 3.1. Belangrijk om te benoemen is dat van het derde watervoerende pakket aanzienlijk minder informatie beschikbaar is dan van het tweede watervoerende pakket. Daarnaast is op basis van de beschikbare diepe boorbeschrijvingen in de stad Delft te zien dat het derde watervoerende pakket (vanaf circa 100 m-mv) heterogeen is. Middels interpolatie van de meest nabijgelegen boorgegevens van het derde watervoerende pakket is de schematisatie van Figuur 3.1 gemaakt. De scheidende laag op circa 118-120 m-mv die in de omgeving van de projectlocatie veelal aangetroffen wordt tussen wat voorheen watervoerend pakket 2B en watervoerend pakket 3 genoemd werd, wordt niet consequent aangetroffen. Zo ontbreekt deze laag in bron K3b van TNW en is deze laag visueel niet aangetroffen in de proefboring van Kabeldistrict. Op basis van een dwarsdoorsnede van omliggende bodemenergiesystemen is de verwachting dat deze laag niet regionaal aanwezig is, maar dat er sprake is van klei inschakelingen op diverse dieptes. Deze klei inschakelingen is typerend voor de heterogeniteit van het derde watervoerende pakket.

De proefboring die nabij de bronlocaties uitgevoerd wordt, is bedoeld om de bodemopbouw met bijbehorende parameters nauwkeuriger te bepalen, mogelijk wijkt dit af van onderstaande schematisatie. Aangezien sprake is van onzekerheden met betrekking tot de exacte bodemopbouw en eigenschappen, waren keuzes nodig om te komen tot de aan te houden schematisatie. Bij die keuzes zijn worst-case aannames gedaan, om onderschatting van de te verwachten effecten te voorkomen en ervoor te zorgen dat de werkelijke effecten van het HTO systeem binnen de hier berekende effecten blijven.

De naamgeving van de verschillende watervoerende pakketten en scheidende lagen en welke bodemlagen daartoe behoren wijkt af van de schematisatie zoals die tot voor kort gebruikt werd in Delft en omgeving. Op basis van voortschrijdend inzicht is de bodemlaag onder de tweede scheidende laag (vanaf circa 95 à 100 m-mv) toegewezen aan de Formatie van Maassluis in verband met de consequent aangetroffen schelpenresten vanaf deze diepte.

Aanvullend op het aantreffen van schelpenresten vanaf circa 95 à 100 m-mv kunnen de twee watervoerende pakketten aan elkaar gekoppeld worden door vergelijkbare stijghoogtes. In de omgeving van de projectlocatie zijn twee proefboringen uitgevoerd in het verleden, ten behoeve van Kabeldistrict en Technopolis. In beide proefboringen is één peilbuis in het traject 110-120 m-mv geplaatst en ten minste één peilbuis in het diepere deel van het watervoerende pakket (>130 m-mv). In de proefboring van Technopolis zijn de stijghoogtes in rust voor beide dieptes (118-120 en 177-179 m-mv) bepaald op 2,7 m-mv, terwijl de stijghoogte in rust op een diepte van 79-81 m-mv bepaald is op 2,85 m-mv. In de proefboring van Kabeldistrict is de stijghoogte op een diepte van 110-112, 130-132 en 181-183 m-mv bepaald op respectievelijk 3,49, 3,61 en 3,51 m-mv. De stijghoogte in het tweede watervoerende pakket is in deze proefboring per abus niet gemeten. Vergelijkbare stijghoogtes tussen het traject 110-112 en het diepere watervoerende pakket is een teken dat beide watervoerende lagen hydrologisch met elkaar in verbinding staan.

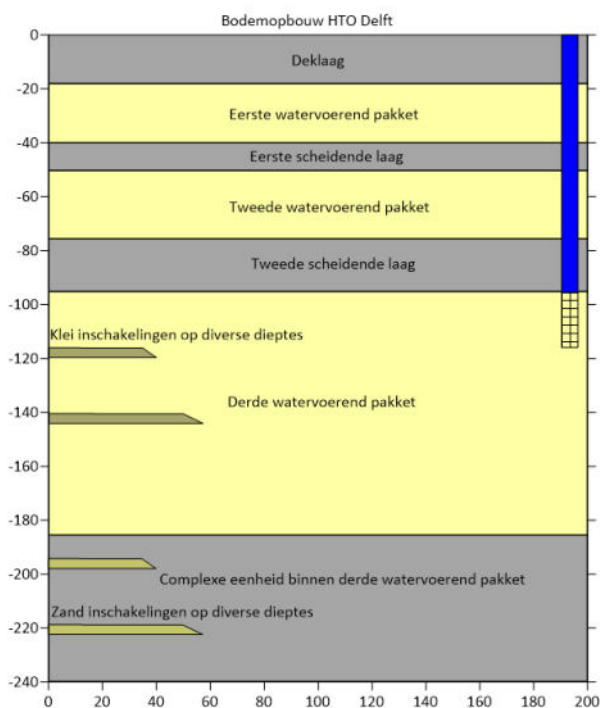
Ten slotte is gekeken naar grondwaterkwaliteit in het derde watervoerende pakket. In de meest recente proefboring van Kabeldistrict is het chloride-, nitraat-, ijzer- en het sulfaatgehalte gemeten op een diepte van 110-112, 130-132 en 181-183 m-mv. Uit deze metingen blijkt dat het chloridegehalte gelijdelijk in de diepte toeneemt van 2.300 naar 3.590 mg/l. Het sulfaatgehalte is laag op een diepte van 110-12 en 130-132 (< 10mg/l) en neemt toe in het diepere deel van het watervoerende pakket tot 130 mg/l. Nitraat en ijzer wordt op geen van de dieptes aangetroffen (respectievelijk <0,2 en <10 mg/l). Op basis van de grondwaterkwaliteitgegevens kan gesteld worden dat het grondwater op een diepte van 110-112 en 130-132 m-mv een vergelijkbare grondwaterkwaliteit heeft en zich in één redoxtoestand (methanogeen) bevindt. Het diepste deel van het derde watervoerende pakket heeft een lichtelijk afwijkende grondwaterkwaliteit doordat een verhoogde hoeveelheid sulfaat aangetroffen wordt. Het dieptse deel van het derde watervoerende pakket bevindt zich door de aanwezigheid van een kleine hoeveelheid sulfaat op de grens van een methanogene en een sulfaat-reducerende redoxtoestand. Omdat het een grensgeval betreft wat enkel onderin het watervoerende pakket aangetroffen wordt is geen sprake van een duidelijke overgang van grondwaterkwaliteit binnen het derde watervoerende pakket.

In het derde watervoerende pakket zijn binnen enkele kilometers van het voorziene HTO-systeem enkele open bodemenergiesystemen al voor langere tijd actief. Uit onderzoek naar de werking van deze open bodemenergiesystemen blijkt dat geen van deze systemen tekenen van bronverstopping vertoont als gevolg van sulfaatreductie. Op basis van dit onderzoek is geconcludeerd dat menging van het grondwater boven- en ondering het derde watervoerende pakket een beperkt risico vormt voor putverstopping als gevolg van sulfaatreductie. De realisatie van het HTO-systeem in het derde watervoerende pakket wordt daarmee niet beperkt door de overgang van methanogeen naar sulfaat-reducerend grondwater.

In Delft en bij de TUD zijn open bodemenergiesystemen gerealiseerd in watervoerende pakket 2A (dit komt overeen met het tweede watervoerende pakket in onderstaande schematisatie) én wat voorheen gezien werd als watervoerende pakket 2B (komt overeen met het bovenste deel van het derde watervoerende pakket in onderstaande schematisatie). Het meest nabijgelegen open bodemenergiesysteem dat van beide watervoerende pakketten gebruik maakt is TNW. Dit open bodemenergiesysteem ligt op ruim 800 meter van de hete bronlocaties van de HTO waardoor géén menging van grondwater afkomstig uit beide open bodemenergiesystemen optreedt. Uitgaande van de onderstaande schematisatie is er bij de HTO dan ook geen sprake van menging van grondwater uit het tweede watervoerende pakket en grondwater uit het derde watervoerende pakket.

Voor de vergunningaanvraag in het kader van de Waterwet voor het HTO-systeem wordt het volledige dieptetraject van het derde watervoerende pakket aangevraagd (95 - 240 m-mv), terwijl in de praktijk naar verwachting circa 20 meter aan zandlagen nodig zijn voor de realisatie van het systeem. Het rendement en daarmee het doelmatig gebruik van de ondergrond door een HTO-systeem wordt in grote mate bepaald door de mate waarin opgeslagen warmte ook weer teruggewonnen kan worden. Om het doelmatig gebruik van de bodem te stimuleren worden de bronfilters van het HTO-systeem direct onder een dikke kleilaag geplaatst. Deze kleilaag zorgt in de praktijk voor het (groten)deels tegengaan van het opdrijven en daarmee verliezen van opgeslagen warmte. Door het HTO-systeem onder een kleilaag te plaatsen wordt op deze manier een zo groot mogelijk rendement en zo klein mogelijk warmteoverschot bereikt. Hierdoor worden hydrothermische effecten ook zoveel als mogelijk beperkt.

In het geval van de nabijgelegen proefboring Kabeldistrict wordt vanaf circa 180 m-mv een afwisseling van zand- en kleilagen aangetroffen. De verwachting is dat deze lagen minder geschikt zijn voor de toepassing van het HTO-systeem dan het traject direct onder de tweede scheidende laag. De proefboring zal hierover uitsluitsel geven. Om de optie open te houden om het HTO-systeem op grotere diepte te plaatsen en daarmee de invloed op omliggende belangen verder te verkleinen wordt in deze aanvraag het hele dieptetraject van het derde watervoerende pakket aangevraagd. Na de proefboring kan dit dieptetraject verkleind worden naar een werkelijk te verwachten dieptetraject. Door de rest van het dieptetraject op een later moment te laten vervallen komt deze ruimte vrij voor omliggende initiatieven en sluit de vergunning beter aan op het werkelijke bronontwerp.



Figuur 3.1 | Visualisatie van de verwachte bodemopbouw ter hoogte van de zoekgebieden voor de bronlocaties. Zandlagen zijn weergegeven in geel, kleilagen in grijs. Aan de rechterkant is een schematische weergave gemaakt van de bronfilters (geruit) en de stijgbuis (blauw).

Tabel 3.1 | Gehanteerde bodemopbouw

diepte [m-mv] <sup>a</sup>	lithologie	geohydrologische benaming	doorlaatvermogen of weerstand <sup>b</sup> [m <sup>2</sup> /d] of [d]
0 - 19	klei, veen en matig fijn zand	deklaag	1.200 d / 50 m <sup>2</sup> /d
19 - 40	matig grof tot zeer grof zand	1 <sup>e</sup> watervoerend pakket	400 m <sup>2</sup> /d
40 - 50	klei en leem	1 <sup>e</sup> scheidende laag	500 d
50 - 75	matig fijn tot matig grof zand	2 <sup>e</sup> watervoerend pakket	500 m <sup>2</sup> /d
75 - 95	klei afgewisseld met enkele lagen fijn zand	2 <sup>e</sup> scheidende laag	2.000 d
95 - 118	matig fijn tot matig grof zand met kans op kleibijmenging	3 <sup>e</sup> watervoerend pakket	230 m <sup>2</sup> /d
118 - 120 <sup>c</sup>	klei of zand met verhoogde kleibijmenging	klei inschakeling	50 d
120 - 185	matig fijn tot matig grof zand met klei-inschakelingen	3 <sup>e</sup> watervoerend pakket	650 m <sup>2</sup> /d
185 - 240	klei en kleihoudend zand binnen het derde watervoerend pakket	complexe eenheid binnen het 3 <sup>e</sup> watervoerend pakket	∞

<sup>a</sup> maaiveldhoogte: circa -0,3 m NAP

<sup>b</sup> doorlaatvermogen: bepaald op basis van beschikbare informatie zoals pomp- en putproeven en korrelgroottes / gemiddelde weerstand: 100 d/m voor klei en 200 d/m voor veen aangehouden.

<sup>c</sup> bij de proefboring Kabeldistrict (250m afstand) is een weerstand biedende laag aangetroffen op deze diepte. Deze was niet zichtbaar in de boorbeschrijving maar wel in de boorgatmeting. Omdat onzeker is of deze laag ook ter plekke van de HTO aangetroffen wordt is een lage hydraulische weerstand aangehouden. Voor deze weerstand zijn in de berekeningen andere waarden aangehouden voor een worst-case berekening.

### 3.2 GEOHYDROLOGISCHE KENMERKEN

De laagste, gemiddelde en hoogste grondwaterstand en de stijghoogte in de watervoerende pakketten zijn weergegeven in Tabel 3.2.

Tabel 3.2 | Grondwaterstand en stijghoogte [m NAP]

	bron	laagste	gemiddelde	hoogste
grondwaterstand <sup>1</sup>	peilbuis B37E0668-001, B37E0677-001	-	-1,3	-
1 <sup>e</sup> watervoerende pakket	peilbuis B37E3503	-5,8	-5,5	-5,2
2 <sup>e</sup> watervoerende pakket	REGIS	-	-4,8	-
3 <sup>e</sup> watervoerende pakket <sup>2</sup>	REGIS	-	-3,5	-

<sup>1</sup> de diepte van de grondwaterstand kan beïnvloed worden door de maaiveldhoogte en maatregelen aan maaiveld (zoals ophogen terrein en wijze van afwatering). Hierdoor kan de grondwaterstand anders zijn dan op basis van historische gegevens bepaald.

<sup>2</sup> Deze diepte is gebaseerd op het isohypsenpatroon van REGIS. In de proefboring van kabeldistrict is in het derde watervoerende pakket (tussen 118 en 183 m-mv een vergelijkbare stijghoogte aangetroffen)

Op circa drie kilometer ten noordwesten van de projectlocatie bevindt zich de grondwateronttrekking bij DSM. Het isohypsen patroon van de stijghoogtes in het eerste en het tweede watervoerende pakket wordt sterk beïnvloed door deze grondwateronttrekking. De invloed van de grondwateronttrekking is in het derde watervoerende pakket niet terug te zien in het isohypsen patroon.

Het is bekend dat de grondwateronttrekking bij DSM afgebouwd wordt. Verder afbouwen van de onttrekking betekent dat de aanzuigende werking vanuit DSM in het eerste en tweede

watervoerende pakket afneemt. Omdat de HTO voorzien is in het derde watervoerende pakket, en de tweede scheidende laag een hoge hydraulische weerstand heeft, is de verwachting dat het afbouwen van de grondwateronttrekking bij DSM geen merkbare invloed heeft op de grondwaterstroming ter hoogte van de HTO en de effecten van de HTO.

De lokale en regionale geohydrologische kenmerken zijn opgenomen in Tabel 3.3.

Tabel 3.3 | Lokale en regionale geohydrologische kenmerken

parameter	eenheid	
grondwaterstroming 1 <sup>e</sup> watervoerende pakket (snelheid) <sup>a</sup>	[m/jaar]	45
grondwaterstroming 1 <sup>e</sup> watervoerende pakket (richting) <sup>a</sup>	[-]	noordnoordwestelijk
grondwaterstroming 2 <sup>e</sup> watervoerende pakket (snelheid) <sup>a</sup>	[m/jaar]	5
grondwaterstroming 2 <sup>e</sup> watervoerende pakket (richting) <sup>a</sup>	[-]	noordnoordwestelijk
grondwaterstroming opslagpakket (snelheid) <sup>a</sup>	[m/jaar]	< 5
grondwaterstroming opslagpakket (richting) <sup>a</sup>	[-]	oostelijk
verticale stroming (deklaag)	[mm/d]	12 (neerwaarts)
verticale stroming (1 <sup>e</sup> scheidende laag)	[mm/d]	5 (opwaarts)
verticale stroming (2 <sup>e</sup> scheidende laag)	[mm/d]	2 (opwaarts)
grondwatertemperatuur (opslagpakket) <sup>b</sup>	[°C]	13,5
zoet-/brakgrensvlak (chloridegehalte 150 mg/l) <sup>c</sup>	[m-mv]	12
brak-/zoutgrensvlak (chloridegehalte 1.000 mg/l) <sup>c</sup>	[m-mv]	20

<sup>a</sup> bron: gebaseerd op het isohypsenpatroon uit REGIS. Verwacht wordt dat de snelheid van de grondwaterstroming in het eerste en het tweede watervoerende pakket, door het afbouwen van de grondwateronttrekking bij DSM, in de toekomst zal afnemen.

<sup>b</sup> bron: Database bodemtemperatuurprofielmetingen TNO en IF Technology

<sup>c</sup> bron: Grondwaterkaart van Nederland

### 3.3 HYDROLOGISCHE EFFECTEN

Om de hydrologische effecten van het open bodemenergiesysteem te berekenen, is gebruik gemaakt van het hydrologische softwarepakket MLU voor Windows (Multi Layer Unsteady state). Meer informatie over MLU is te vinden op [www.microfem.com](http://www.microfem.com).

De bodemopbouw in het model is gebaseerd op de geohydrologische schematisatie in Tabel 3.1. De bronnen in de hydrologische berekening zijn gepositioneerd overeenkomstig Figuur 2.5 waarbij drie hete en vier lauwe bronnen zijn gemodelleerd.

Het voorkomen en de diepte van de lokaal scheidende laag van 118 - 120 m-mv is op dit moment onzeker. Deze weerstand biedende laag wordt in verschillende boorbeschrijvingen op verschillende dieptes aangetroffen. Voor een optimaal gebruik van het HTO systeem wordt bij voorkeur aan de boven- en onderzijde van de gebruikte bodemlaag klei gevonden. De filterstelling van het HTO systeem zal daarom zoveel als mogelijk bovenin het derde watervoerende pakket plaatsvinden en indien mogelijk ondieper dan een lokaal scheidende kleilaag op circa 120 m-mv blijven. Om de hydrologische effecten worst-case te bepalen is voor de weerstand van de lokale weerstandbiedende laag op 120 m-mv een wat hogere waarde aangehouden dan de waarde uit Tabel 3.1, namelijk een weerstand van 200 dagen. Mocht bij de proefboring blijken dat deze kleilaag niet aanwezig is of zich veel ondieper bevindt, dan wordt het filtertraject aan de onderzijde niet begrensd door een kleilaag waardoor de hydrologische effecten naar het oppervlak en in horizontale zin afnemen. Het

uitgangspunt is dat de bodemopbouw geldt voor het totale gemodelleerde gebied. In Tabel 3.4 is de modelopbouw weergegeven.

Tabel 3.4 | Modelopbouw

diepte [m-mv]	toelichting	doorlaatvermogen [m <sup>2</sup> /d]	weerstand [d]
1 <sup>a</sup>	gesloten bovenrand	-	-
1 - 7	fictief freatisch watervoerend pakket	50 <sup>b</sup>	-
7 - 19	deklaag	-	1.200
19 - 40	1 <sup>e</sup> watervoerende pakket	400	-
40 - 50	1 <sup>e</sup> scheidende laag	-	500
50 - 75	2 <sup>e</sup> watervoerende pakket	500	-
75 - 95	2 <sup>e</sup> scheidende laag	-	2.000
95 - 97	3 <sup>e</sup> watervoerende pakket (boven filter)	20	-
97	fictief scheidende laag	-	0,2 <sup>c</sup>
97 - 117	3 <sup>e</sup> watervoerende pakket (filter)	200	-
117	fictief scheidende laag	-	0,1 <sup>c</sup>
117 - 118	3 <sup>e</sup> watervoerende pakket (onder filter)	10	-
118 - 120	lokaal weerstand biedende laag	-	200
120 - 185	3 <sup>e</sup> watervoerende pakket	650	-
> 185	hydrologische basis	-	∞

<sup>a</sup> de gemiddelde grondwaterstand bedraagt circa 1 m-mv (zie Tabel 3.2)

<sup>b</sup> geschat doorlaatvermogen van de deklaag

<sup>c</sup> voor de weerstand is uitgegaan van de weerstand als gevolg van de gelaagdheid van het pakket (verticale anisotropie). De weerstand is berekend met de formule:  $\frac{1}{2} \times$  dikte laag boven dan wel onder het filtertraject / verticale doorlatendheid. Verticale doorlatendheid = horizontale doorlatendheid / 2 (verticale anisotropiefactor van 2 aangenomen).

### Oppervlaktewater

In de omgeving van de locatie is oppervlaktewater aanwezig. In het grondwatermodel is een gesloten bovenrand gedefinieerd. Dit is een worst-case benadering.

### Schematisatie in tijd

Om de stijghoogte- en grondwaterstandveranderingen te berekenen is een berekening uitgevoerd waarbij het systeem gedurende een leveringsseizoen op maximaal debiet draait. Het maximale debiet wordt voorzien tijdens warmtelevering en bedraagt 275 m<sup>3</sup>/uur. Het systeem bestaat uit maximaal drie hete en vier lauwe bronnen. Tijdens warmtelevering bedraagt de maximale broncapaciteit van de hete en lauwe bronnen dan respectievelijk 92 en 69 m<sup>3</sup>/uur/bron.

### Verschuiving van de bronlocaties binnen de bronzones

De bronnen zijn in de hydrologische berekening gelijkmatig over de zoekgebieden verspreid waarbij de minimale onderlinge afstand van 20 meter is aangehouden. In de praktijk kunnen de werkelijke bronlocaties mogelijk afwijken ten opzichte van de gehanteerde bronlocaties in deze berekening. Omdat de bronlocaties in de berekening de minimale onderlinge afstand hebben is binnen de zoekgebieden sprake van een zo groot mogelijke cumulatie van hydrologische effecten in de kern van de HTO-bellen, met bijbehorende worst case effecten richting het oppervlak.

Daarnaast hoeft geen significant ander stijghoogtepatroon te worden verwacht direct buiten de bronzones, wanneer de bronlocaties binnen die zone iets verschuiven, mits natuurlijk het



totaaldebiet dat de bronnen samen verpompen hetzelfde blijft. Dat betekent dat aanwezige omgevingsbelangen, die (ver) buiten de rand van de bronzones liggen, geen significant andere hydrologische beïnvloeding zullen ervaren dan in de berekening is aangegeven.

### Berekeningen zijn Worst-case

In de hydrologische berekening is aangenomen dat grondwater met de natuurlijke temperatuur van 13,5°C verpompt wordt. In de praktijk zal het grondwater in zowel de hete als de lauwe bronnen een (veel) hogere temperatuur hebben. Grondwater met een hogere temperatuur heeft een lagere viscositeit, waardoor de doorlatendheid bij een hogere temperatuur significant hoger is en de stijghoogteveranderingen bij hetzelfde debiet significant lager zullen zijn dan in deze studie is berekend.

Aangezien het open bodemenergiesysteem in de praktijk slechts gedurende een zekere periode op maximaal debiet draait, en omdat grondwater met relatief hoge temperaturen rondgepompt wordt, zijn de berekende grondwaterstandveranderingen en stijghoogteveranderingen in het eerste, tweede en derde watervoerende pakket een overschatting van de werkelijke optredende effecten.

### Hydrologische effecten

In Tabel 3.5 zijn de berekende maximale hydrologische effecten per laag weergegeven.

Tabel 3.5 | Berekende maximale grondwaterstand- en stijghoogteveranderingen

watervoerende laag	diepte [m-mv]	eenheid	zomer- en wintersituatie
freatisch	1 - 7	[m]	0,02
1 <sup>e</sup> watervoerende pakket	19 - 40	[m]	0,04
2 <sup>e</sup> watervoerende pakket	50 - 75	[m]	0,12
3 <sup>e</sup> watervoerende pakket	95 - 97	[m]	14,36
3 <sup>e</sup> watervoerende pakket	97 - 117	[m]	17,42
3 <sup>e</sup> watervoerende pakket	117 - 118	[m]	15,67
3 <sup>e</sup> watervoerende pakket	120 - 185	[m]	0,65

De berekende maximale verandering van de grondwaterstand en de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket is kleiner dan 0,05 m. Derhalve zijn deze veranderingen niet in een figuur opgenomen. In Figuur 3.2 en Figuur 3.3 zijn de berekende stijghoogteveranderingen in respectievelijk het tweede en het derde watervoerende pakket gepresenteerd.

De grootste stijghoogteveranderingen in de putten treden op bij de drie hete bronnen omdat deze bronnen een grotere capaciteit per bron hebben dan de vier lauwe bronnen.

Het hydrologische invloedsgebied is het gebied waarbinnen het effect van het open bodemenergiesysteem op de stijghoogte groter dan 0,05 m is. De maximale afstanden tussen de bronnen en de rand van het berekende hydrologische invloedsgebied zijn in Tabel 3.6 vermeld.

Tabel 3.6 | Grootte invloedsgebieden

watervoerende laag	eenheid	zomer- en wintersituatie
freatisch	[m]	-
1 <sup>e</sup> watervoerende pakket	[m]	-
2 <sup>e</sup> watervoerende pakket	[m]	1.580
3 <sup>e</sup> watervoerende pakket (opslagpakket)	[m]	2.700

*Hydrologische effecten zijn een overschatting: Temperatuur speelt een rol*

De berekende stijghoogteverandering is in grote mate een overschatting van de verwachte effecten omdat met de natuurlijke temperatuur van het grondwater gerekend is. Warm grondwater heeft een lagere viscositeit dan grondwater met de natuurlijke temperatuur. Hoe hoger de temperatuur van het grondwater, hoe hoger de doorlatendheid van de zandlaag waar het water door stroomt. Over de mate van overschatting wordt het volgende toegelicht:

- Rond de hete en lauwe bronnen zal de doorlatendheid (m/d) van de opgewarmde zone in de omgeving van de bronfilters daarom (veel) hoger zijn dan de doorlatendheid die is gehanteerd in de berekeningen, waardoor ook de stijghoogteveranderingen in het opslagpakket nabij de bronnen (veel) kleiner zijn dan weergegeven in Tabel 3.5. In het model is namelijk de doorlatendheid ingevoerd die hoort bij de natuurlijke temperatuur.
- In de hete bronnen is die overschatting het grootst, omdat de temperatuur bij infiltratie daar gemiddeld 80°C is, en bij onttrekking minimaal 60°C vanwege de afkaptemperatuur.
- In de lauwe bronnen wordt tijdens warmtelevering met gemiddeld 58°C geïnfiltrerd. Tijdens warmteopslag wordt in het eerste jaar nog grondwater met de natuurlijke grondwatertemperatuur onttrokken (13,5°C). In de daarop volgende jaren ligt de temperatuur van het onttrokken water uit de lauwe bron eerst dichtbij de gemiddelde infiltratietemperatuur (bij start van de laadperiode) en daalt deze richting de natuurlijke bodemtemperatuur naarmate er meer grondwater wordt onttrokken. Uit de thermische berekeningen volgt dat de temperatuur van het onttrokken water in het tweede jaar daalt tot een temperatuur van circa 20°C en tot circa 40°C na 5 jaar.
- Omdat bij het uitvoeren van de hydrologische veldproef nog sprake is van de natuurlijke grondwatertemperatuur, zal bij de hydrologische veldproef een relatief grote stijghoogteverandering gemeten worden ten opzichte van de stijghoogteveranderingen die gedurende de verdere bedrijfsvoering van het HTO systeem te verwachten zijn.

*Maximale debiet en de maximale injectiedruk*

Mocht in de proefboring een gunstigere bodemopbouw aangetroffen worden waardoor minder bronnen benodigd zijn om te voorzien in de totale broncapaciteit, dan wordt nooit de berekende maximale stijghoogteverandering van 17,42 m overschreden. Dat is omdat de maximaal toelaatbare stijghoogteverhoging gelimiteerd wordt door de maximaal toelaatbare injectiedruk, die rond dezelfde waarde ligt. De maximaal toelaatbare injectiedruk wordt bepaald door de diepte van de top van het filtergrind. De horizontale korrelspanning op deze diepte bepaalt de maximaal toelaatbare injectiedruk in de bron. De bronfilters worden zo ondiep mogelijk in het derde watervoerende pakket geplaatst aangezien een afscheidende kleilaag boven de bronfilters nodig is. Afhankelijk van de diepte waarop de bronfilters en het filtergrind uiteindelijk geplaatst worden varieert de maximaal toelaatbare injectiedruk (met veiligheidsfactor 1,5) tussen circa 12 m op 100 m-mv en 21 m op 150 m-mv. Doordat sprake is van cumulatie met nabijgelegen bronnen wordt in de praktijk per bron geen hogere afpompingshoogte dan 17,42 m toegestaan zodat scheurvorming in de bodem te allen tijden

voorkomen wordt. Bij een relatief ondiepe filterstelling is de maximale stijghoogteverhoging gelijk aan de op die diepte geldende maximale injectiedruk. Ten tijde van het uitvoeren van de hydrologische veldproef is sprake van onttrekken en infiltreren van grondwater met natuurlijke temperatuur. Op dit moment is de maximale stijghoogteverhoging daarom groter dan tijdens het in werking hebben van het HTO-systeem.

In de praktijk resulteert een toename van de temperatuur van het grondwater van 13,5°C naar 80°C in een toename van de doorlatendheid met ruim een factor 3. Een temperatuuroptocht van 13,5°C naar circa 55°C resulteert in een toename van de doorlatendheid met ruim een factor 2. Om een indicatie te geven van welk effect dit heeft op de maximale stijghoogteveranderingen in de bron is een hydrologische berekening uitgevoerd waarbij de doorlatendheid ter hoogte van het filtertraject is aangepast van 10, naar 20 en 30 m/d. Bij een doorlatendheid van 20 en 30 m/d draagt de berekende maximale stijghoogteverandering in de bron respectievelijk 9,62 en 6,67 m. Vanwege de te verwachten temperatuurveranderingen zijn de grootste hydrologische effecten te verwachten tijdens het eerste seizoen dat het systeem in gebruik wordt genomen, want dan wordt uit de lauwe brongrondwater onttrokken met de lage natuurlijke grondwatertemperatuur van 13,5°C en is de doorlatendheid rond de onttrekkingsbronnen nog gelijk aan de oorspronkelijke doorlatendheid.

#### Minimaal 2 hete en 2 lauwe bronnen

Het minimale aantal bronnen dat nodig wordt geacht om het maximale debiet te kunnen behalen is 2 hete en 2 lauwe bronnen. Dat is alleen mogelijk als de bodemeigenschappen (doorlaatvermogen en de gevoeligheid voor deeltjesproductie tijdens onttrekking) gunstiger zijn dan in deze aanvraag als uitgangspunt wordt genomen. De proefboring levert de benodigde detailinformatie op om dit te kunnen beoordelen, maar indien de resultaten positief zijn dan kan met een kleiner aantal bronnen hetzelfde maximale debiet worden onttrokken (250 m<sup>3</sup>/u in de zomer en 275 m<sup>3</sup>/u in de winter). Vanwege de hoge kosten van HTO-bronnen kan dit een aanzienlijke kostenbesparing opleveren.

Bij toepassing van het maximaal vergunde debiet door een kleiner aantal bronnen (bv 2 hete en 2 lauwe) blijven de hydrologische effecten *buiten de bronzones* vergelijkbaar met de getoonde simulatie die uitgaat van 3 hete en 4 lauwe bronnen. Dat komt doordat het maximale debiet dat wordt onttrokken in het gebied van de bronzones hetzelfde blijft. Dit betekent dat een kleiner aantal bronnen niet tot grotere hydrologische effecten op de omgeving (buiten de bronzone) leidt, mits de bronnen binnen de bronzone worden aangelegd. Alleen dichtbij de bronnen, binnen de bronzone, zullen de stijghoogteveranderingen hoger liggen dan het model heeft berekend, vanwege het hogere debiet per bron. Echter, om opbarsting van de bron te voorkomen zal de maximale stijghoogteverandering in een put nooit de maximaal toelaatbare injectiedruk overschrijden (zie toelichting hierboven). Bovendien zal, zoals gezegd, de stijghoogteverandering in de bronnen niet zo hoog zijn als het model heeft berekend, vanwege het temperatuureffect.

#### **Invloed op verticale stroming**

De invloed van het open bodemenergiesysteem op de verticale grondwaterstroming door de deklaag en de scheidende lagen is in Tabel 3.7 weergegeven.

Tabel 3.7 | Verticale stroming en invloed daarop

	eenheid	natuurlijk	extra stroming door HTO
deklaag	[m/seizoen]	2,1 neerwaarts	0,0
1 <sup>e</sup> scheidende laag	[m/seizoen]	0,9 opwaarts	0,0
2 <sup>e</sup> scheidende laag	[m/seizoen]	0,4 opwaarts	2,6

Door het in werking hebben van het HTO systeem treedt een extra stroming door de tweede scheidende laag op. De richting waarin deze extra stroming optreedt is afhankelijk van de bedrijfsvoering van het HTO systeem op dat moment. Doordat het HTO systeem zowel wordt ingezet voor warmtelevering als voor warmteopslag, veroorzaakt het HTO systeem in het ene seizoen opwaartse stroming (wanneer de bronnen onder de tweede scheidende laag worden gebruikt voor infiltratie) en in het andere seizoen neerwaartse stroming (tijdens onttrekking uit de bronnen onder de tweede scheidende laag).

De netto invloed op de stroming op jaarbasis wordt bepaald door de hoeveelheid water die per jaar in de betreffende bronnen wordt geïnfiltrerd en de hoeveelheid die eruit wordt onttrokken. Daardoor hangt de netto invloed samen met de mate van wateronbalans. De netto extra stroming per jaar zal altijd kleiner zijn dan de berekende stroming in Tabel 3.7 doordat de berekende stijghoogteveranderingen een (sterke) overschatting zijn van de werkelijke stijghoogteveranderingen rond de bronnen (door het achterwege laten van de invloed van de temperatuur) en omdat sprake is van warmteopslag (infiltratie) én warmtelevering (onttrekking).

Uit Tabel 3.7 blijkt dat het HTO-systeem geen invloed heeft op de verticale stroming door de eerste scheidende laag. Aangezien het zoet-/brakgrensvlak zich boven de eerste scheidende laag bevindt, wordt dit grensvlak niet door de HTO beïnvloed en is geen sprake van het verzilten van zoet grondwater.

### 3.4 GRONDMECHANISCHE EFFECTEN

De stijghoogteveranderingen als gevolg van het open bodemenergiesysteem kunnen zetting veroorzaken. In welke mate deze zettingen daadwerkelijk optreden, hangt af van de zettingsgevoeligheid van de aanwezige bodemlagen en van de grootte van de stijghoogteveranderingen. Daarnaast zijn de eerder opgetreden bodembelastingen van belang. Deze zogenaamde voorbelastingen kunnen hebben plaatsgevonden bij extreem lage stijghoogten in droge jaren of door eerdere (tijdelijke) onttrekkingen en open bodemenergiesystemen.

De potentiële zetting is berekend met de formule van Koppejan. Hiervoor is de bodem geschematiseerd conform Tabel 3.4. Aanvullend aan de schematisatie van de bodem is voor de tweede scheidende laag een dikte van 30 meter aangehouden waarbij de kleilaag van 65 - 95 m-mv loopt. Kleilagen zijn relatief zettingsgevoelig en de voornaamste stijghoogteverandering treedt op onder de tweede scheidende laag. De tweede scheidende laag bepaalt daarmee in grote mate de totale zetting als gevolg van het HTO-systeem. Als de kleilaag een grotere dikte heeft neemt ook de hydraulische weerstand toe, waardoor stijghoogteveranderingen ondieper dan de tweede scheidende laag afnemen. Voor een worst case berekening is wél de maximale stijghoogteverandering in het tweede watervoerende pakket zoals berekend in paragraaf 3.3 gebruikt in de zettingsberekening. Daarbij wordt ook aangenomen dat het filter direct onder de kleilaag geplaatst wordt, zodat de maximale

stijghoogteverandering in de bron gelijk is aan de maximale stijghoogteverandering aan de onderzijde van de kleilaag.

De zettingsconstanten zijn ontleend aan NEN-blad 6740 - bladzijde 20. Via deze methode wordt een eindzetting berekend, dat wil zeggen een zetting die zal optreden bij een onttrekking van oneindig lange duur (zie bijlage 3). Voor de tweede scheidende laag is een tijdsafhankelijke berekening van de zetting uitgevoerd, omdat deze laag het grootste aandeel in de totale zetting heeft (zie bijlage 4). Aangezien de berekende stijghoogteveranderingen in grote mate een overschatting zijn van de werkelijke effecten, is de berekende zetting eveneens in enige mate een overschatting van de werkelijk optredende zetting. Daarnaast is voor de tijdsafhankelijke zettingsberekening aangenomen dat de maximale stijghoogteveranderingen gedurende het hele seizoen optreden. Bij deze aanname is geen rekening gehouden met een hogere doorlatendheid door de opwarming van het grondwater. De berekende maximale stijghoogteverandering zal vanwege de hogere doorlatendheid van het warme grondwater nooit gedurende een heel seizoen optreden. Alleen in het eerste seizoen dat het systeem wordt gebruikt, kunnen de verlagingen rond de onttrekkingsbronnen (lauwe bronnen) in de buurt komen van de berekende verlagingen.

Voor het gebied direct naast de lauwe bronnen is een maximale totaalzetting van 39 mm berekend nabij de lauwe bronnen (zie bijlage 3). Het zettingsverhang bedraagt in de directe nabijheid van de bronnen (binnen 10 m rondom de bronnen) maximaal 1 m per 1.100 m. Aan de rand van het berekende hydrologische invloedsgebied bedraagt de berekende maximale totaalzetting 2 mm. Voor de maximale totaalzetting zijn de berekende stijghoogteveranderingen voor het gebied direct naast de lauwe bronnen gebruikt. De lauwe bronnen onttrekken in het eerste seizoen grondwater met de natuurlijke temperatuur waardoor de hydrologische effecten bij deze bronnen het grootst kunnen zijn.

De voornaamste zetting (31 mm) treedt op in de tweede scheidende laag op een diepte van 65 - 95 m-mv. In de berekening van de totaalzetting wordt aangenomen dat de zetting van alle individuele lagen bij elkaar opgeteld mogen worden om de zetting aan maaiveld te verkrijgen. In werkelijkheid zal de zetting, die op een bepaalde locatie en diepte optreedt, aan maaiveld worden uitgesmeerd over een gebied met een straal die ongeveer even groot is als de diepte waarop de zetting optreedt. Dit betekent dat de zettingen, die op de diepte van de tweede scheidende laag optreden, aan maaiveld sterk zijn uitgevlakt.

Ten tweede is bij de zettingsberekeningen uitgegaan van de stijghoogteveranderingen uit Tabel 3.5 die gedurende een heel seizoen optreden. Aangezien bij de berekening van de stijghoogteveranderingen de invloed van de temperatuur op de doorlatendheid achterwege is gelaten, is sprake van een sterke overschatting van de hydrologische effecten. Tijdens het uitvoeren van de hydrologische veldproef (voorafgaand aan het laden van warmte) is nog wel sprake van de natuurlijke grondwartertemperatuur en kunnen dergelijke stijghoogteveranderingen optreden, maar dat is dan van veel kortere duur. In de praktijk zal warmer grondwater met een lagere viscositeit rondgepompt worden, waardoor zowel de hydrologische effecten, als de grondmechanische effecten kleiner uitvallen.

#### *Cumulatie van zetting*

Zetting als gevolg van een open bodemenergiesysteem kan optreden als gevolg van stijghoogteverlaging. Door het afnemen van de waterspanning neemt de kracht op de korrels toe, hierdoor kan compactie van het korrel skelet optreden. Compactie van het korrel skelet is op te delen in

elastische (omkeerbare) en plastische (permanente) deformatie. Bij een toename van de korrelspanning vindt in eerste instantie elastische en in tweede instantie plastische deformatie op. De grootte van elastische deformatie is grofweg een factor 20 tot meer dan 100 keer kleiner dan de potentiële grootte van plastische deformatie (Borchers and Carpenter, 2014). Als over zetting als gevolg van hydrologische effecten van een open bodemenergiesysteem gesproken wordt, spreekt men over plastische deformatie.

Plastische deformatie treedt enkel op als het korrelskelet een grotere kracht te verdragen krijgt dan een vorig maximum<sup>7</sup>. Dit kan het gevolg zijn van een open bodemenergiesysteem als tijdens het onttrekken van grondwater stijghoogteverlaging optreedt. Plastische deformatie treedt dan enkel op als de stijghoogteverlaging (en daarmee toename van korrelspanning) groter is dan ooit in het verleden is opgetreden. Stijghoogteverlagingen in het verleden kunnen optreden hebben door grondwateronttrekkingen, andere open bodemenergiesystemen of als gevolg van periodes van droogte.

Op het moment dat een cumulatie van hydrologische effecten optreedt, kan zetting optreden als gevolg van deze cumulatieve hydrologische stijghoogteverlaging. De zetting die optreedt bij een cumulatie van een stijghoogteverlaging treedt daarbij enkel op over het cumulatieve deel ofwel de extra stijghoogteverlaging, en niet opnieuw over de totale stijghoogteverlaging. In het geval van het HTO-systeem van de TUD zijn in de omgeving diverse open bodemenergiesystemen al diverse jaren actief. Als gevolg van deze open bodemenergiesystemen heeft in het verleden op diverse momenten een stijghoogteverlaging opgetreden waardoor zetting opgetreden kan zijn.

Zoals eerder genoemd wordt de voornaamste zetting als gevolg van het HTO-systeem verwacht ter hoogte van het zoekgebied van de lauwe bronnen. Om de grootte van de reeds opgetreden zetting ter hoogte van de lauwe bronnen te bepalen is een aanvullende zettingsberekening uitgevoerd waarbij de bestaande omliggende open bodemenergiesystemen in het tweede en het derde watervoerende pakket actief zijn.

Voor het gebied rondom de lauwe bronnen is een reeds opgetreden zetting van 5 mm berekend (zie bijlage 5). De verwachting is dat de voornaamste zetting in het verleden is opgetreden in de deklaag, daarom is voor de deklaag een tijdsafhankelijke zettingsberekening uitgevoerd (zie bijlage 6).

De zetting opgetreden in het verleden van 5 mm en de nieuw berekende zetting als gevolg van het HTO-systeem van 39 mm geeft een totale zetting van 44 mm. Het grootste deel van de totale zetting treedt op in de tweede scheidende laag (31 mm) op een diepte van circa 65 - 95 m-mv. De aanname in de zettingsberekening is dat de zetting van alle individuele lagen bij elkaar opgeteld mogen worden om de zetting aan maaiveld te verkrijgen. In werkelijkheid zal de zetting die op een bepaalde diepte optreedt aan maaiveld uitgesmeerd worden over een gebied met een straal die ongeveer even groot is als de diepte waarop de zetting optreedt. Dit betekent dat de zettingen die op diepte optreden aan maaiveld sterk uitgevlakt zijn<sup>8</sup>. De werkelijk te verwachten zetting aan maaiveld is daardoor significant kleiner dan de totaal berekende cumulatieve zetting van 44 mm.

---

<sup>7</sup> Borchers and Carpenter, 2014. Land Subsidence from Groundwater Use in California. [https://cawaterlibrary.net/wp-content/uploads/2017/04/1397858208-SUBSIDENCEFULLREPORT\\_FINAL.pdf](https://cawaterlibrary.net/wp-content/uploads/2017/04/1397858208-SUBSIDENCEFULLREPORT_FINAL.pdf)

<sup>8</sup> Geertsma, 1973. A basic theory of subsidence due to reservoir compaction: the homogeneous case.

### 3.5 HYDROTHERMISCHE EFFECTEN

#### Software

De berekeningen van de thermische effecten van het open bodemenergiesysteem zijn uitgevoerd met het programma HstWin-3D. Met het programma HstWin-3D worden warmte- en stoftransport berekend in een verzadigd driedimensionaal grondwatersysteem.

#### Gehanteerde bodemeigenschappen

De randvoorwaarden in het HstWin-3D-model zijn gebaseerd op de geohydrologische beschrijving in paragraaf 3.1. HstWin-3D simuleert de grondwaterstroming en het warmtetransport in meerdere lagen. In Tabel 3.8 zijn de belangrijkste geohydrologische en geothermische invoerparameters opgenomen die bij de berekeningen zijn gebruikt. De warmtegeleidingscoëfficiënten zijn ontleend aan de VDI 4640, Blatt 1/part 1. De warmtecapaciteit is bepaald met de methode van de Vries (1963), waarbij een porositeit van 35% is aangehouden. De filterdieptes van de bronnen zijn in het model van 97 - 117 m-mv geplaatst.

Voor de lokale kleilaag van 118 - 120 m-mv is, voor een stoorlaag, een relatief hoge doorlatendheid aangehouden. Hierdoor is de stoorlaag hydraulisch niet goed scheidend. Deze aanname zorgt ervoor dat een worst-case beeld wordt berekend van de thermische effecten van de HTO in zowel horizontale als verticale richting. Thermische effecten naar diepere lagen worden in het model groter dan verwacht, omdat tijdens de infiltratie het hete water ook naar diepere lagen kan stromen. Een belangrijke consequentie van een slecht scheidende kleilaag op 118-120 m, is dat er makkelijker dichtheidsgedreven stroming kan optreden. Daardoor kan tijdens de ontlaadperiode dieper gelegen, kouder grondwater de HTO bronfilters bereiken, wat ervoor zorgt dat de afkapt temperatuur sneller wordt bereikt en waardoor de onttrekking van warmte stopt. Dat betekent dus dat er meer warmte in het pakket achterblijft. De achtergebleven warmte drijft omhoog naar de bovenkant van het opslagpakket, waar het tegen de kleilaag aan komt te 'hangen'. Als in het volgende jaar weer nieuwe warmte wordt geïnfiltrerd, wordt de eerder achtergebleven warmte voor het 'vers geïnfiltrerde' hete grondwater uit geduwd. Dit proces herhaalt zich in het model ieder jaar. Door dit proces wordt dus het horizontale invloedsgebied in het opslagpakket naar verloop van tijd groter, zelfs als de kleilaag onder het opslagpakket ook water doorlaat. Daarom levert dit een worst-case berekening op voor de optredende hydrothermische effecten in horizontale en verticale richting in het opslagpakket.

Daarnaast is in de bodemopbouw voor de tweede scheidende laag een dikte van 20 meter aangehouden. Op basis van omliggende boorbeschrijvingen is de verwachting dat deze kleilaag minimaal 28 en mogelijk 30 meter dik is. Door de aanname dat de tweede scheidende laag minder dik is, is sprake van een worst case berekening voor wat betreft de opwaartse hydrothermische effecten naar ondiepere lagen. In werkelijkheid zal zowel de temperatuur in het gebied boven de hete bronfilters gemiddeld lager zijn (want minder opdrijving en dus meer warmte teruggewonnen), én de kleilaag zal dikker zijn waardoor de afstand tot het ondiepere pakket in de praktijk groter is. Dit tezamen zorgt in werkelijkheid voor een lagere warmteflux door de kleilaag heen, en dus ook kleinere effecten op ondiepere lagen, dan in deze modellering is weergegeven.

In deze fase is het onzeker hoeveel hete en lauwe bronnen gerealiseerd worden voor het HTO-systeem en welke filterlengte en diepte de bronnen hebben. De hydrothermische modellering is uitgevoerd met één hete en één lauwe bron in het middelpunt van de zoekgebieden. Dit levert een representatief beeld op van de thermische effecten, omdat het midden van de bellen in de praktijk

ook nabij het midden van de zoekgebieden zal liggen. Immers, vanwege een minimale bronafstand van 15-20 m en een relatief klein zoekgebied is er weinig ruimte om met de bronnen te schuiven en zullen de bronnen rondom het middelpunt van de bronzone worden gecentreerd. Bovendien zijn andere parameters worst case gekozen waardoor, ondanks een mogelijke verplaatsing van de bronnen, het hydrothermische invloedsgebied in werkelijkheid niet groter wordt dan nu berekend is.

In een eerdere fase van het project is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd van verschillende modelparameters op de verspreiding van de hydrothermische effecten in horizontale en verticale richting. Een van de parameters die onderzocht is, is het effect van een variatie in de dikte van de tweede scheidende laag. De tweede scheidende laag is zowel met een dikte van 20 als met een dikte van 30 meter hydraulisch goed scheidend. Hydrothermische verspreiding ter plaatse van het filtertraject vindt daarom, ongeacht de dikte van de tweede scheidende laag, met name plaats in horizontale richting.

De dikte van de scheidende laag heeft wel een beperkte invloed op de horizontale verspreiding door de variatie in warmtecapaciteit. Als de dikte van de kleilaag toeneemt, kan meer warmte opgeslagen worden voordat dit doorgegeven wordt aan de ondiepere watervoerende lagen. Dit betekent dat een dikkere kleilaag resulteert in een kleiner warmteverlies vanuit het opslagpakket en daarmee een hoger terugwinrendement. Aan het eind van de modelrun van 20 jaar zorgde dit echter slechts in een variatie van enkele meters op het totale hydrothermische invloedsgebied, waaruit geconcludeerd werd dat andere processen, en dan met name de oprijving van warmte, een grotere invloed heeft op de grootte van het hydrothermische invloedsgebied. Er is daarom voor gekozen om in deze effectrapportage de meest kritische parameters worst case te kiezen waardoor een realistisch beeld in horizontale zin verkregen is en een worst case beeld in neerwaartse zin.

Tabel 3.8 | Modelopbouw HstWin-3D

diepte [m-mv]	hydrologische beschrijving	horizontale doorlatendheid [m/d]	verticale anisotropie [-]	warmtegeleiding- coëfficiënt [W/(mK)]	volumetrische warmtecapaciteit [MJ/(m <sup>3</sup> K)]
0 - 19	deklaag	0,1	10	1,7	2,8
19 - 40	1 <sup>e</sup> watervoerende pakket	19	4	2,4	2,8
40 - 50	1 <sup>e</sup> scheidende laag	0,2	10	1,7	2,8
50 - 75	2 <sup>e</sup> watervoerende pakket	16	4	2,4	2,8
75 - 95	2 <sup>e</sup> scheidende laag	0,1	10	1,9	2,8
95 - 118	3 <sup>e</sup> watervoerende pakket	10	4	2,3	2,8
118 - 120	lokale kleilaag	0,4	10	2,0	2,8
120 - 185	3 <sup>e</sup> watervoerende pakket	10	4	2,3	2,8

### Pompschema van HTO en omliggende systemen

In Tabel 3.9 is het onttrekkings-/infiltratiepatroon weergegeven. De waterverplaatsing tijdens warmtelevering wijkt af van Tabel 2.1 omdat in het hydrothermische model de waterhoeveelheid tijdens warmtelevering bepaald wordt door het moment waarop de afkaptemperatuur bereikt wordt. Warmtelevering kan plaatsvinden totdat de waterverplaatsing van 650.000 m<sup>3</sup> bereikt is, of totdat de afkaptemperatuur bereikt is.

In het model zijn ook de open bodemenergiesystemen actief in de directe omgeving van de HTO: 3mE, EWI en de meest dichtbijzijnde doubletten van Kabeldistrict. In de modelberekening zijn 3mE en EWI vijf jaar actief voordat de HTO en de doubletten van Kabeldistrict actief worden. Alle



bronnen zijn vervolgens nog 20 jaar actief, waarna het model nog 50 jaar actief blijft zonder dat de open bodemenergiesystemen grondwater verplaatsen.

Tabel 3.9 | Onttrekkings-/infiltratiepatroon

seizoen	bedrijfstoestand	periode	waterhoeveelheid	infiltratietemperatuur
			[m <sup>3</sup> /seizoen]	[ ° C]
zomer	warmteopslag	mei t/m augustus	550.000	80
herfst	rust	september	-	-
winter	warmtelevering	oktober t/m april	650.000	58

In het model is rekening gehouden met een afkaptemperatuur van 60°C. Dit betekent dat de warmtelevering stopt wanneer de onttrekkingstemperatuur uit de hete bron lager wordt dan 60°C. Deze afkaptemperatuur heeft invloed op de verplaatste waterhoeveelheid bij warmtelevering. Aangezien de bodem rondom de HTO bronnen in de jaren steeds wat verder opwarmt heeft het toepassen van de afkaptemperatuur tot gevolg dat in de opeenvolgende jaren tijdens warmtelevering steeds meer water onttrokken kan worden voordat de afkaptemperatuur bereikt wordt. Dit betekent ook dat in de opstartjaren relatief veel warmte achterblijft in vergelijking met de situatie na enkele jaren bedrijfsvoering omdat in deze eerste jaren de afkaptemperatuur snel bereikt wordt. Dit is de reden dat eerder in deze studie wordt gevraagd om in de eerste 5 jaar een hoger warmteoverschot toe te staan dan voor de periode daarna. Gedurende de modelrun wordt tijdens warmtelevering gemiddeld circa 600.000 m<sup>3</sup> verpompt, overeenkomstig met Tabel 2.1.

#### Hydrothermische effecten

De berekende thermische effecten na 20 jaar energieopslag ter hoogte van de bovenkant van het opslagpakket (op een diepte van 97 m-mv), aan de bovenkant van het tweede watervoerende pakket (op een diepte van 70 m-mv) en bovenin het eerste watervoerende pakket (op een diepte van 40 m-mv) zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 3.4, Figuur 3.5 en Figuur 3.6. Het hydrothermische invloedsgebied is het gebied waarbinnen de temperatuur 0,5°C afwijkt van de natuurlijke grondwatertemperatuur (13,5°C). Het hydrothermische invloedsgebied van de HTO reikt na 20 jaar energieopslag in het derde, het tweede en het eerste watervoerende pakket tot respectievelijk 275, 170 en 90 m van de bronnen. De maximale temperaturen na 20 jaar energieopslag in het derde, het tweede en het eerste watervoerende pakket bedragen respectievelijk 90, 39 en 16°C.

Op de diepte van de HTO bevinden zich geen overige grondwatergebruikers binnen het hydrothermische invloedsgebied. Het hydrothermische invloedsgebied van de warme bronnen van de ontwikkeling van Kabeldistrict overlapt met dat van de hete bronnen van de HTO. Om de mogelijke invloed van de HTO op de temperaturen in de bronnen van Kabeldistrict te beoordelen zijn berekeningen uitgevoerd voor de situatie met en zonder de HTO en zijn de berekende onttrekkingstemperaturen vergeleken (zie paragraaf 4.4).

Naast de ontwikkeling van Kabeldistrict valt het zoekgebied voor de ontwikkeling van Nieuwe Haven in het hydrothermische invloedsgebied, een mogelijke beïnvloeding op de ontwikkeling van Nieuwe Haven wordt in paragraaf 4.4 verder toegelicht.

Een dwarsdoorsnede van de ondergrond met daarin de temperatuurverdeling aan het einde van het levering- en opslagseizoen na 20 jaar warmteopslag is in noord/zuid richting weergegeven in Figuur 3.7. Een extra dwarsdoorsnede in west/oostelijke richting door de bronnen van Kabeldistrict en de hete bronnen van de HTO is weergegeven in Figuur 3.8. Figuur 3.7 laat zien dat de grootste temperatuursveranderingen in het opslagpakket plaatsvinden. Daarnaast is voor deze worst-case situatie na 20 jaar ook sprake van hydrothermische invloed in het tweede en zeer lokaal ook in het eerste watervoerende pakket. Het hydrothermische invloedsgebied van de HTO is in het tweede en eerste watervoerende pakket significant kleiner dan in het opslagpakket.

#### **Hydrothermische effecten na stopzetting hoge temperatuuropslag**

Om te berekenen hoe de temperatuur zich ontwikkelt na stopzetting van de HTO is in het model na de eerste periode van 20 jaar, waarin de HTO actief is, nog een periode van 50 jaar doorgerekend waarin de HTO is stopgezet. Belangrijk om daarbij te vermelden is dat in het laatste jaar de HTO op de reguliere wijze warmte geleverd heeft tot de afkaptemperatuur van 60°C. In de praktijk kan ervoor gekozen worden om in het laatste jaar de warmte terug te winnen tot een lagere temperatuur, waardoor minder warmte achterblijft en de temperaturen in het opslagpakket verder afnemen. Doordat in de berekening de warmte van maximaal 60°C achtergebleven is, wordt dit gezien als een worst-case aanname.

Een dwarsdoorsnede van de ondergrond met daarin de temperatuurverdeling aan het einde van deze 50 jaar stilstand is weergegeven in Figuur 3.9. De ligging van deze dwarsdoorsnede is dezelfde snijlijn als opgenomen in Figuur 3.4. In Figuur 3.9 is te zien dat het hydrothermische invloedsgebied nagenoeg even ver reikt als na 20 jaar warmteopslag, maar dat het temperatuurverschil ten opzichte van de natuurlijke grondwatertemperatuur aanzienlijk is afgenomen. De hoogste temperatuur na 50 jaar stilstand bedraagt circa 24 graden en bevindt zich in de directe omgeving van de bronfilters.

## 4 Invloed op de omgeving

### 4.1 GRONDWATERKWALITEIT

#### Invloed van menging

Bij menging van grondwater met een verschillende samenstelling wordt de grondwaterkwaliteit beïnvloed. Een belangrijke conclusie van MMB<sup>4</sup> en het onderzoek door VU/KWR<sup>5,6</sup> is dat menging bij lage temperatuursystemen het meest bepalende proces is voor de grondwaterkwaliteit. De temperatuureffecten zijn bij temperaturen onder de 25°C ondergeschikt en worden pas bij hogere temperaturen belangrijker.

Menging heeft alleen effect op de grondwaterkwaliteit als de samenstelling van het gemengde water verschilt. Hierbij kan worden gedacht aan verschillen in zoutgehalte, hardheid en de redoxtoestand van het grondwater. De invloed van menging treedt alleen op in het gebied waar het mengwater zich bevindt: direct rond de bronnen en stroomafwaarts daarvan.

Het grondwater dat bij dit beoogde project gemengd wordt, is naar verwachting kalkverzadigd en gereduceerd (ijzerhoudend, zuurstof- en nitraatloos). Het grondwater dat uit het opslagpakket wordt onttrokken, wordt in hetzelfde pakket weer opgeslagen. Door aanwezigheid van scheidende lagen aan de boven- en onderkant van het opslagpakket wordt de menging met dieper/ondieper gelegen grondwater beperkt.

#### Invloed van de temperatuur

Het afgelopen decennium zijn er verschillende laboratorium- en praktijkonderzoeken uitgevoerd om de effecten van een verhoogde temperatuur op de grondwaterkwaliteit scherper in beeld te krijgen<sup>9,10,11</sup>. In januari 2021 is binnen het WINDOW project een overzicht opgesteld van deze effecten. Hieronder zijn enkele effecten van temperatuuroptocht op de ondergrond kort beschreven. Voor een uitgebreidere toelichting, zie het WINDOW-rapport in de voetnoot<sup>12</sup>.

Opwarming van de ondergrond kan leiden tot een verschuiving van de chemische evenwichten in het grondwater en het bodemmateriaal. De mate waarin de opwarming leidt tot verandering van de grondwaterkwaliteit hangt sterk af van de mate van opwarming, en van de natuurlijke samenstelling van de bodem en het grondwater.

Verschiedende onderzoeken hebben aangetoond dat effecten van opwarming tot een temperatuur van 25°C zeer beperkt zijn. Bij opwarming boven de 25°C komen zware metalen en opgelost organisch materiaal (Dissolved Organic Carbon, DOC) naar voren als parameters waarvan de concentratie mogelijk kan toenemen, mits deze stoffen zich van nature in het bodemmateriaal bevinden. Vaak is arseen een parameter die een rol speelt in de bepaling van grondwaterkwaliteit, omdat aan deze waarde een grenswaarde is gesteld in het Drinkwaterbesluit. Pas bij opwarming tot 60°C of

<sup>4</sup> Meer met Bodemenergie, 2012. [Rapport 3-4 Effecten op de ondergrond](#).

<sup>5</sup> KWR, 2019. [Prestaties en effecten van ondergrondse warmteopslag: een verkenning voor het P2X-project](#).

<sup>6</sup> Bonte, 2013. [Impacts of shallow geothermal energy on groundwater quality](#).

<sup>7</sup> WINDOW fase 1, 2020. [Rapport C3 - Effecten van hoge temperatuur warmteopslag op grondwaterkwaliteit](#).

hoger vinden er meer aanzienlijke veranderingen in de grondwatersamenstelling plaats. Chemische elementen zoals Si, Ca, Na, K kunnen toenemen door oplossing van silicaten, terwijl voor elementen als Ni en Co verlagingen van de concentraties zijn waargenomen bij toenemende temperatuur<sup>7</sup>. De effecten op de chemische samenstelling van de bodem en het grondwater lijken voor een belangrijk deel reversibel te zijn, ofwel, bij afname van de temperatuur nemen de concentraties weer af.

De effecten van temperatuur op de microbiologie blijken voor een belangrijk deel omkeerbaar te zijn. Uit onderzoek blijkt dat bij lage temperaturen (<35°C) geen significant effect op de microbiologische activiteit en groei in zijn geheel verwacht mag worden (zie rapport C3 van WINDOW fase 1). Bij te hoge temperaturen (>70-80°C) zal waarschijnlijk ook geen groei en toename in activiteit plaatsvinden, en neemt de microbiologische populatie juist af omdat de bacteriën dood gaan. In het tussenliggende temperatuurinterval is de groei theoretisch het grootst, maar in de praktijk vaak beperkt doordat niet voldoende eenvoudig afbreekbaar organisch materiaal (de energiebron voor micro-organismen) aanwezig is. De precieze verschuiving is sterk locatie specifiek en laat zich daardoor moeilijk op voorhand voorspellen. Wat betreft de omkeerbaarheid van het effect op de microbiologie, komt uit referentie 2 (Meer met Bodemenergie, 2012) een HTO-casus naar voren waarbij de aantallen en functies van de microben 8 jaar na stopzetting van de HTO niet significant meer afweken van de referentie, wat wijst op het herstel van het ondergrondse systeem.

Uit de onderzoeken komt ook naar voren dat toename van microbiologische activiteit met name impact kunnen hebben op de technische prestatie van het systeem. De impact van microbiologie op de grondwaterkwaliteit is beperkt, omdat de nadelige ondergrondse omstandigheden (zout, gereduceerd, nutriëntenarm en zuurstofloos grondwater) de groei van pathogene microben sterk beperken. In de praktijk is dan ook geen groei van pathogenen gevonden. Groei van microben door temperatuurverandering kan ook positieve uitwerking hebben, omdat de activiteit van microben die verontreinigen afbreken kan toenemen met toenemende temperatuur.

Het advies is om relevante meetparameters (chemisch, microbiologisch) en de locatie en frequentie waarmee gemeten moet worden, in een monitoringsplan nader af te stemmen, dat vervolgens uitgevoerd kan worden bij de HTO op de TUD.

### **Kalkneerslag**

Het risico op neerslag van calciumcarbonaat (ook wel 'kalkneerslag' genoemd) is afhankelijk van de kalkverzadigingsgraad van het oorspronkelijke grondwater, de mate waarin de temperatuur wordt verhoogd en de aanwezigheid en concentraties van stoffen die de neerslagreacties vertragen. Ook de zuurgraad (pH) van het grondwater is van belang.

Zowel uit onderzoek als uit de praktijk blijkt dat bij toepassing van warmteopslag tot 45 °C geen noemenswaardige kalkneerslag optreedt. Bij hogere temperaturen dient wel rekening te worden gehouden met kalkneerslag.

Om de calciëten in oplossing te houden kan een zuur aan het te infiltreren water worden toegevoegd, zoals waterstofchloride (HCl) of koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>). CO<sub>2</sub>-dosering is een beproefde methode die onder andere is toegepast in Duitsland. In eerdere projecten op hoge temperatuur is ook de werking van toevoeging van HCl aangetoond. Doel van de zuurdosering is het voorkomen van kalkneerslag. Vóór het opwarmen van het water wordt een afgemeten hoeveelheid zuur gedoseerd, waardoor de kalkverzadigingsgraad na opwarming gelijk is aan de kalkverzadigingsgraad vóór

opwarming. Als dit water weer wordt onttrokken ten behoeve van de volgende cyclus van de warmteopslag, is daardoor wederom zuurdosering nodig. De pH zal hierdoor weliswaar dalen, maar het effect is beperkt door de zeer sterke verdunning en doordat ook menging van grondwater optreedt. Ook de praktijkervaringen bij het HTO-systeem in Middenmeer laat zien dat de benodigde dosering in de praktijk afneemt tijdens de eerste cycli, en dat daarbij geen kalkneerslag optreedt.

De pH van het water dat wordt onttrokken aan de lauwe bronnen stabiliseert snel. De pH-daling is beperkt (circa 0,5 op basis van berekeningen bij het HTO project GEOMEC en veldmetingen bij het HTO project Zwammerdam). Bij toevoeging van HCl aan het te retourneren water wordt op lange termijn een netto hoeveelheid chloride-ionen ( $\text{Cl}^-$ ) aan het grondwater van het opslagpakket toegevoegd. Omdat het grondwater op de opslagdiepte reeds erg zout is, leidt dit naar verwachting niet tot negatieve beïnvloeding van andere grondwaterbelangen.

### Hot Push Pull Test

Een onderdeel van het PUSH-IT onderzoek is het uitvoeren van een Hot Push Pull Test (HPPT), ook bekend als een traceronderzoek. Het doel van een HPPT is om meer inzicht te krijgen in hydrothermische eigenschappen van de ondergrond rondom de HTO-bronnen en chemische reacties door opwarming van deze ondergrond. De HPPT is een belangrijke tool in het visualiseren van stromingspatronen en het kwantificeren van reistijden. Inzicht hierin helpt in het beheer van de HTO.

In het geval van het PUSH-IT onderzoek bestaat de HPPT uit de volgende stappen (genoemde hoeveelheden en tracerstoffen kunnen in het op te stellen monitoringsplan afwijken, maar onderstaande geeft een beeld van de beoogde onderzoeksacties):

1. Het onttrekken van 500 m<sup>3</sup> grondwater vanuit de diepte van het HTO-systeem.
2. Toevoeging van fluorescerende stoffen, zoals:
  - a. Eosine, 300 µg/L = 150 mg
  - b. Uranine, 300 µg/L = 150 mg
  - c. Naphtionate, 300 µg/L = 150 mg
3. Het injecteren van de 500 m<sup>3</sup> onttrokken grondwater, met bijgevoegde tracerstoffen, met een temperatuur van maximaal 90°C.
4. Na enkele dagen stilstand van het HTO-systeem wordt grondwater onttrokken. De hoeveelheid onttrokken grondwater betreft circa een factor 5 van het geïnfiltrerde grondwater. Het onttrokken grondwater wordt geanalyseerd en vervolgens geloosd.

De verwachting is dat door het onttrekken van meer grondwater dan het infiltreren, dat minimaal 90% van de geïnjecteerde tracers weer onttrokken worden. Er blijft dus maximaal 10% van de geïnjecteerde tracers achter in de bodem. Uit onderzoek van KWR blijkt dat de gebruikte stoffen ecotoxicologisch veilig zijn<sup>8</sup>.

Na verlening van de vergunning Waterwet zal de vergunninghouder in het monitoringsplan een plan van aanpak opstellen dat moet worden goedgekeurd door het bevoegd gezag vóór de HPPT test uitgevoerd mag worden.

<sup>8</sup> BTO Rapport. Betrouwbare en betaalbare tracerproeven, update 2017, KWR. <https://library.kwrwater.nl/publication/59216399/betrouwbare-en-betaalbare-tracerproeven-update-2017/>

#### 4.2 VERZILTING

Het brak-/zoutgrensvlak bevindt zich in de deklaag op circa 12 m-mv. In een cumulatieve berekening (zie paragraaf 4.4) blijkt dat door het toevoegen van het HTO-systeem de invloed op het brak-/zoutgrensvlak afneemt doordat uitdemping van hydrologische effecten plaatsvindt.

In de directe omgeving van de bronnen (met name de hete bronnen) kan de bodem opwarmen. De vraag is of dat lokaal kan leiden tot beïnvloeding (verplaatsing) van het brak-/zoutgrensvlak. Dit zou veroorzaakt kunnen worden door dichtheidsstroming die optreedt als gevolg van de opwarming van de bodem rond de bron, doordat door de stijgbuis van de bron grondwater stroomt met een temperatuur van circa 80°C. Echter, het verplaatsen van een grensvlak vraagt om een significante mate van verticale stroming, waardoor bijvoorbeeld dieper, zouter grondwater opdrijft naar ondiepere delen van bijvoorbeeld een zandlaag. Op basis van waterkwaliteitsgegevens bevindt het zoet-brakgrensvlak zich in de deklaag, die hoofdzakelijk uit klei bestaat. Hoewel dichtheidsverschillen de oorzaak kunnen zijn voor verticale verplaatsing van het grensvlak in de directe nabijheid van de hete put, is de slechte doorlatendheid van de deklaag een belangrijke remmende factor. Om die reden wordt niet verwacht dat operatie van HTO bijdraagt aan verplaatsing van dit grensvlak. Daarnaast is op de TUD slechts een zeer beperkte hoeveelheid zoet grondwater aanwezig tussen circa 1 en 12 m-mv. Een eventuele lokale verzilting van het zoete grondwater heeft daarom geen negatief effect op een winbare zoetwatervoorraad.

Het ligt voor de hand om na het boren van de proefboring en HTO-bronnen de bodemopbouw en waterkwaliteitsgegevens te bestuderen en op basis daarvan een besluit te maken voor het al dan niet opnemen van monitoring van het grensvlak in ondiepe peilbuizen.

#### 4.3 VERONTREINIGINGEN

Eind 2016 is door Arcadis een verkennend milieukundig bodemonderzoek uitgevoerd op de TU Delft (referentie: 079177898 A). In dit onderzoek is het grondwater en de bodem onderzocht aan de Balthasar van der Polweg (ter hoogte van de beoogde hete bronnen) én aan de Cornelis Drebbelweg (ter hoogte van de beoogde lauwe bronnen). Uit het onderzoek blijkt dat ter hoogte van de beoogde bronlocaties het grondwater licht verontreinigd is met barium concentraties boven de achtergrondwaarde. De bodem nabij de bronlocaties vertonen tevens lichte verontreinigingen met koper, kwik, lood, mineralie olie, PAK en Zink gehalten boven de achtergrondwaarde.

Ten behoeve van het boren van de bronnen dient de booraannemer zich te houden aan het SIKB BRL protocol 2101, Mechanisch boren. Hierin is opgenomen hoe de aannemer dient om te gaan met eventuele verontreinigingen om verspreiding van deze verontreinigingen tijdens het boren te voorkomen.

In het opslagpakket (derde watervoerend pakket) en de ondiepere watervoerende pakketten zijn geen grond(water)verontreinigingen bekend. Omdat de invloed van de HTO als gevolg van het onttrekken en infiltreren van grondwater op de verticale stroming in de deklaag en het eerste watervoerende pakket nihil is, worden eventueel ondiepe grondwaterverontreinigingen niet nadelig beïnvloed. Als gevolg van opwarming van de stijgbuis kan direct rondom de bronnen dichtheidsgedreven stroming optreden. Als gevolg van deze stroming kan zeer lokaal grondwater omhoog gevoerd worden in de nabijheid van de stijgbuis. Lichte grondwaterverontreinigingen van Barium bevinden zich ondiep en kunnen als gevolg van de opgewarmde stijgbuis zeer lokaal omhoog stromen. Op natuurlijke wijze vindt neerwaarts stroming plaats richting het eerste watervoerende

pakket (zie Tabel 3.7). Als gevolg van deze natuurlijke stroming kunnen ondiepe grondwaterverontreinigingen verspreiden naar het eerste watervoerende pakket. Dichtheidsgedreven stroming zorgt zeer lokaal voor het dempen van deze neerwaartse stroming en voorkomt daarmee lokaal dat verontreinigingen zich in de diepte verspreiden.

#### 4.4 GRONDWATERGEBRUIKERS

Van de provincie en het Hoogheemraadschap van Delfland is een overzicht ontvangen van grondwatergebruikers in de omgeving van de HTO locatie. Op basis van dit overzicht zijn de grondwatergebruikers geïnventariseerd die zich binnen het hydrologische invloedsgebied in het tweede en het derde watervoerende pakket bevinden (zie Figuur 3.2 en Figuur 3.3) en/of binnen het hydrothermische invloedsgebied in het eerste, tweede of derde watervoerende pakket.

Grondwatergebruikers uit het overzicht van het Hoogheemraadschap van Delfland die zich in het hydrothermische invloedsgebied bevinden blijken tijdelijke grondwateronttrekkingen te betreffen ten behoeve van bemalingswerkzaamheden. Deze grondwateronttrekkingen zijn voor een korte periode in gebruik en bemalen het freatische grondwater. Vanwege de zeer geringe invloed van het HTO-systeem op de grondwaterstand worden deze bemalingen niet beïnvloed door het HTO-systeem. Daarnaast duurt het ook verschillende jaren voordat hydrothermische invloed in het eerste watervoerende pakket kan optreden.

Tabel 4.1 geeft een overzicht van de betreffende open bodemenergiesystemen.

Tabel 4.1 | Open bodemenergiesystemen in het hydrologisch invloedsgebied

bedrijfsnaam	afstand en richting t.o.v. project	watervoerend pakket	filterdieptes	maximaal debiet	waterhoeveelheid
	[m]		[m-mv]	[m <sup>3</sup> /uur]	[m <sup>3</sup> /jaar]
3mE - TUD	110 m ten noordoosten	2	43 - 69	80	200.000
Nieuwe Haven <sup>a</sup>	140 m ten noorden	2	45 - 90	onbekend	onbekend
EWI - TUD	215 m ten oosten	2	43 - 69	216	422.500
Pulse - TUD	240 m ten noorden	2	43 - 68	25	105.000
Kabeldistrict <sup>a</sup>	265 m ten westen	3	95 - 240	800	2.400.000
Haagse Hogeschool	350 m ten noorden	2	40 - 80	80	200.000
Technopolis II <sup>b</sup> - TUD	830 m ten zuiden	2 & 3	43 - 141	675	4.500.000

<sup>a</sup>Kabeldistrict en Nieuwe Haven zijn in ontwikkeling waardoor het maximale debiet en de bijbehorende waterhoeveelheden nog kunnen wijzigen (hebben nog geen vergunning)

<sup>b</sup>Technopolis II heeft in totaal 9 doubletten, waarvan momenteel 3 doubletten gerealiseerd zijn voor TNW. De bronfilters van deze bronnen van TNW bevinden zich in zowel het 2<sup>e</sup> als 3<sup>e</sup> watervoerende pakket. Uitgaande van de eerder gebruikelijke benaming van watervoerende pakketten, maken de WKO-systemen van Technopolis gebruik van WVP 2A en 2B (waarbij 2B op basis van voortschrijdend inzicht inmiddels bij WVP 3 wordt gerekend).

#### Hydrologische invloed bodemenergie

De hydrologische invloed van de HTO op het ondiepere tweede watervoerende pakket is beperkt en bedraagt maximaal 0,12 m. Dit is dusdanig klein dat de HTO géén negatieve hydrologische invloed heeft op open bodemenergiesystemen in het tweede watervoerende pakket. Uit een cumulatieve berekening met de omliggende bodemenergiesystemen in het tweede watervoerende pakket blijkt dat de maximaal berekende grondwaterstandverandering 0,02 m blijft.

In het derde watervoerende pakket bevindt zich op circa 140 en 265 m de ontwikkeling Kabeldistrict. Op circa 830 m bevinden zich de gerealiseerde bronnen van TNW (behorende tot de vergunning Technopolis II).

Ter hoogte van Kabeldistrict en de bronnen van TNW is een maximale stijghoogteverandering als gevolg van de HTO berekend van respectievelijk 1,01 en 0,29 m. Ter hoogte van TNW is dit dusdanig gering dat dit geen negatief effect heeft op het rendement en de bedrijfsvoering van de bronnen. Ter hoogte van Kabeldistrict is de hydrologische invloed wél significant. Omdat Kabeldistrict zich nog in de haalbaarheidsfase bevindt kan bij het ontwerp van het open bodemenergiesysteem van Kabeldistrict nog rekening worden gehouden met de extra stijghoogteveranderingen als gevolg van de HTO. In het ontwerp van de HTO wordt eveneens rekening gehouden met de ontwikkeling van Kabeldistrict, zodat nadelige onderlinge invloed zoveel mogelijk wordt beperkt.

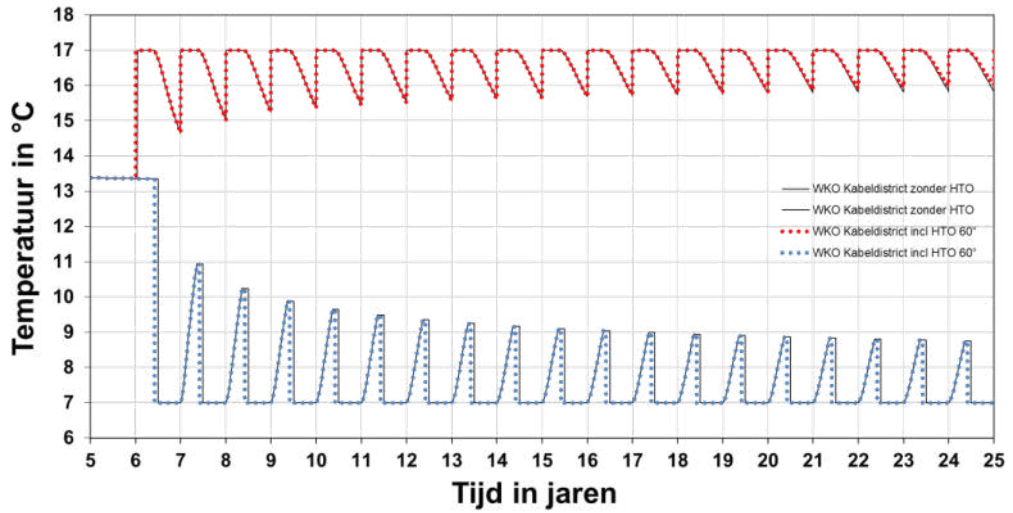
Vanwege de cumulatie van met name Kabeldistrict en de HTO is een cumulatieve hydrologische berekening uitgevoerd met deze twee systemen. Door het toevoegen van Kabeldistrict vindt ter plekke van de HTO een extra afpompings in het opslagpakket plaats van 2,29 m. Met deze extra afpompings wordt rekening gehouden bij het ontwerp van de HTO. Het cumulatieve hydrologische invloedsgebied in het opslagpakket van Kabeldistrict en de HTO ten opzichte van enkel Kabeldistrict is weergegeven in Figuur 4.1. In de cumulatieve berekening zijn de bronnen van TNW en de monobronnen in het derde watervoerende pakket niet meegenomen omdat de invloed van deze systemen op het cumulatieve hydrologische invloedsgebied zeer beperkt is.

In de cumulatieve berekening is te zien dat het hydrologische invloedsgebied van Kabeldistrict door de HTO lichtelijk verschuift, maar niet significant in grootte toeneemt.

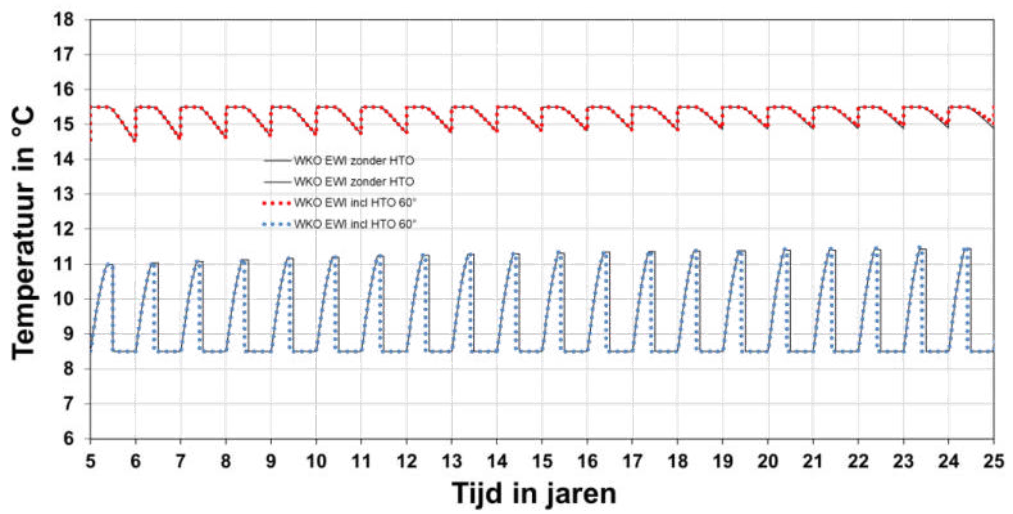
#### *Thermische invloed bodemenergie*

Binnen het berekende thermische invloedsgebied van de HTO bevinden zich geen overige open bodemenergiesystemen. Wel is sprake van overlap van hydrothermische invloedsgebieden met de ontwikkeling Kabeldistrict in het derde watervoerende pakket en de bestaande open bodemenergiesystemen EWI en 3mE, die zich in het tweede watervoerende pakket bevinden. Middels een hydrothermische berekening zonder HTO en een berekening met HTO is inzichtelijk gemaakt wat de invloed van de HTO op deze omliggende belangen is. In Figuur 4.2, Figuur 4.3 en Figuur 4.4 is het (met beide modellen) berekende temperatuurverloop in de bronnen weergegeven van respectievelijk de open bodemenergiesystemen Kabeldistrict, EWI en 3mE. Aanvullend is een dwarsdoorsnede van de ondergrond in west/oostelijke richting weergegeven in Figuur 3.8. In de dwarsdoorsnede is de overlap tussen het hydrothermische invloedsgebied van Kabeldistrict en de HTO te zien waardoor bij de warme bronnen van Kabeldistrict minder warmteverliezen optreden. Deze beperkte invloed is terug te zien in het temperatuurprofiel.

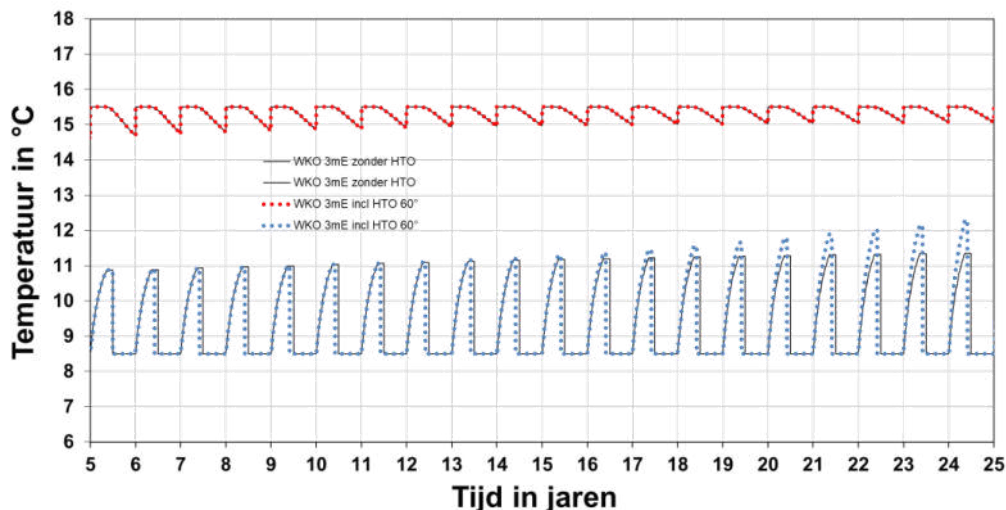




Figuur 4.1 | Temperatuurverloop bronnen Kabeldistrict met en zonder HTO



Figuur 4.2 | Temperatuurverloop bronnen EWI met en zonder HTO



Figuur 4.3 | Temperatuurverloop bronnen 3mE met en zonder HTO

In de grafieken met de temperatuurverloop van omliggende open bodemenergiesystemen is te zien dat de invloed van de HTO op de bronnen van Kabeldistrict en EWI zeer beperkt is. Bij de koude bronnen van 3ME is vanaf jaar 15 wel enige invloed te zien: de onttrekkingstemperatuur aan het einde van het zomerseizoen loopt in de situatie met HTO wat verder op dan in de berekeningen zonder de HTO. Deze invloed is afgestemd en akkoord bevonden door de vergunninghouder van het open bodemenergiesysteem 3mE: de TU Delft.

#### Ontwikkeling Nieuwe Haven

Met de gemeente Delft is overleg gevoerd over de ontwikkeling van Nieuwe Haven. In overleg is afgesproken dat een open bodemenergiesysteem ten behoeve van Nieuwe Haven gebruik zal maken van het tweede watervoerende pakket en niet van het derde watervoerende pakket. In Figuur 3.5 is het hydrothermische invloedsgebied van het HTO-systeem weergegeven in het tweede watervoerende pakket, in de figuur is te zien dat het hydrothermische invloedsgebied van het HTO-systeem in zeer beperkte mate een overlap heeft met het zoekgebied voor warme bronnen voor de ontwikkeling Nieuwe Haven in het tweede watervoerende pakket. Deze beperkte toename van temperatuur in het tweede watervoerende pakket van maximaal 14,5 °C zorgt voor positieve thermische beïnvloeding van een warme bron in het tweede watervoerende pakket. Het HTO-systeem staat daarmee een open bodemenergiesysteem op het terrein van Nieuwe Haven in het tweede watervoerende pakket niet in de weg.

#### 4.5 GESLOTEN BODEMENERGIESYSTEMEN

Van de gemeente Delft is een overzicht ontvangen van gesloten bodemenergiesystemen binnen 1.000 m van het beoogde bodemenergiesysteem. Deze gesloten bodemenergiesystemen zijn weergegeven in de figuren met daarin de resultaten van de hydrothermische en hydrologische modelberekeningen.

Conform de beslisbomen uit bijlage 4 van de BUM BE deel 1 is negatieve beïnvloeding van een gesloten bodemenergiesysteem mogelijk wanneer deze binnen het thermische invloedsgebied van een open bodemenergiesysteem ligt. Binnen het berekende thermische invloedsgebied (zie paragraaf

3.4) bevinden zich geen gesloten bodemenergiesystemen. Van negatieve beïnvloeding van gesloten bodemenergiesystemen is daarom geen sprake.

#### 4.6 BODEMENERGIEPLAN

Voor het campusterrein van de TUD is een bodemenergieplan opgesteld (Bodemenergieplan TU Delft en omgeving, referentie: 57466/DB/20130722). In het bodemenergieplan zijn ordeningsregels opgenomen voor open bodemenergiesystemen in het tweede watervoerende pakket. Omdat het hydrothermische invloedsgebied van de HTO lokaal ook effect heeft in het tweede watervoerende pakket moet rekening worden gehouden met toekomstige open bodemenergiesystemen in het tweede watervoerende pakket. De bronlocaties van de HTO zijn afgestemd met de eigenaar van het bodemenergieplan: de TU Delft.

In de nabijheid van de bronlocaties wordt in opdracht van de gemeente Delft het bodemenergieplan Schieoevers Noord opgesteld. Binnen dit gebied zijn twee ontwikkelingen concreet: Nieuwe Haven en Kabeldistrict. Met deze twee ontwikkelingen is rekening gehouden met de inpassing van het HTO-systeem en de invloed op deze ontwikkelingen is behandeld in deze aanvraag. Overige ontwikkelingen binnen het bodemenergieplan zijn in deze vergunningaanvraag niet meegenomen. Ten aanzien van de samenwerking tussen het HTO-systeem en het bodemenergieplan Schieoevers Noord wordt in een vervolgfase een notitie opgesteld waarin de mogelijkheden voor bodemenergie voor overige ontwikkelingen binnen het projectgebied Schieoevers Noord behandeld worden.

#### 4.7 GRONDWATERBESCHERMING

De locatie is niet gelegen in een waterwingebied, grondwaterbeschermingsgebied of boringsvrije zone van een milieubeschermingsgebied voor grondwater. De hydrologische of hydrothermische effecten reiken niet tot aan een grondwaterbeschermingsgebied. Tevens de cumulatieve hydrologische effecten reiken niet tot aan een grondwaterbeschermingsgebied.

#### 4.8 BEBOUWING EN INFRASTRUCTUUR

De berekende grondwaterstandveranderingen zijn zeer gering (0,02 m). Van grondwateroverlast en langdurige grondwaterstandverlaging als gevolg van de HTO is dan ook geen sprake. De optredende stijghoogteveranderingen kunnen van invloed zijn op bestaande bebouwing en infrastructuur via zettingen.

##### Zettingen

In de Nederlandse Norm voor Geotechniek ontwerp (NEN-EN 1997-1+C1+A1, Eurocode 7) zijn normen opgenomen om een ongewenst verlies aan bruikbaarheid, schade of hoge onderhoudskosten aan infrastructuur en constructies te voorkomen.

Volgens deze NEN-norm kan verlies van bruikbaarheid optreden wanneer de zetting groter is dan 50 mm en het zettingsverhang (rotatie) groter is dan 1:500. Bij de aanwezigheid van ondiepe zettingsgevoelige bodemlagen, zoals een deklaag, kunnen verschillen in de samenstelling van de betreffende laag aanleiding geven tot verschilzettingen aan maaiveld. Wanneer de veroorzaakte zetting in de deklaag groter is dan 15 mm, kunnen effecten van betekenis optreden (Krachtwerktuigen en IF Technology, 1992).

ProRail hanteert een maximaal zettingsverhang van 1 m per 1.000 m (6 mm per spoorstaaf van 6 m).

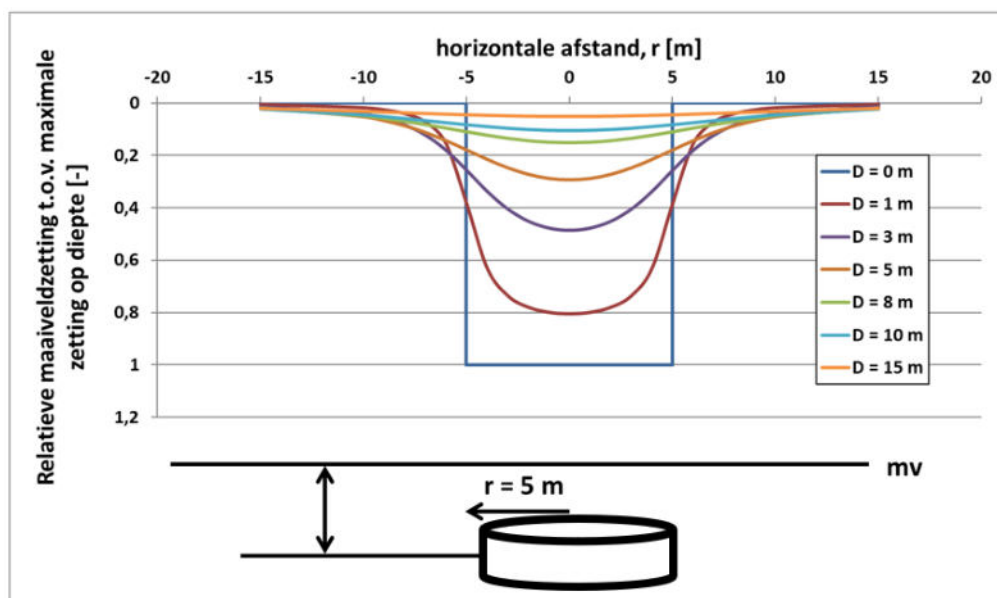
#### Invloed bodemenergie

De berekende maximale eindzetting van 39 mm (zie paragraaf 3.5) en de daarmee gepaard gaande verschilzetting van 1 m per 1.100 m veroorzaakt geen schade aan gebouwen, funderingen, spoor, wegen of constructies.

De voornaamste zetting (31 mm) treedt op in de tweede scheidende laag op een diepte van circa 65 - 95 m-mv. Door Geertsma en Van Opstal (J. Geertsma, Journal of Petroleum Technology, juni 1973, pp. 734-744 en G.H.C. van Opstal, Proc. 3rd Congr. ISRM, Denver, 1974, pp. 1102-111) is de bodemdaling aan maaiveld berekend als gevolg van compactie van een schijfvormig bodemdeel. Een voorbeeld van de relatieve maaiveldzetting t.o.v. maximale zetting op diepte is weergegeven in Figuur 4.5.

In Figuur 4.5 is een voorbeeld gegeven waarbij compactie plaatsvindt van een schijfvormig bodemdeel met een straal van 5m. In de figuur is te zien dat de zetting op een bepaalde diepte verspreidt wordt over een gebied met een straal die ongeveer even groot is al de diepte waarop de zetting optreedt. Bij een diepte van 0 meter is de relatieve maaiveldzetting 1, dus gelijk aan de berekende zetting. Bij een toename van de diepte waarop de zetting optreedt neemt de relatieve maaiveldzetting exponentieel af. Bij een berekende zetting van een bodemlaag op een diepte van 15 m-mv bedraagt de relatieve maaiveldzetting nog slechts 0,05.

Voor de tweede scheidende laag op een diepte van ca. 65 m-mv houdt dit in dat de zetting als gevolg van deze laag op maaiveld minder dan een factor 0,05 bedraagt van de berekende zetting op deze diepte (31 mm), ofwel < 1,55 mm. De werkelijk te verwachte zetting aan maaiveld als gevolg van het HTO-systeem, rekening houdende met uitdemping naar maaiveld, bedraagt daarom minder dan 5 mm.



Figuur 4.5 | Spreiding van bodemdaling over het maaiveld

De berekende maximale eindzetting ter hoogte van het spoor van 3 mm (zie hoofdstuk 3.5) en de daarmee gepaard gaande verschilzetting van 1 m per 450.000 m veroorzaakt geen schade aan het spoor.

#### *Cumulatieve zetting*

Zoals in paragraaf 3.4 benoemd wordt met name zetting verwacht als gevolg van de lauwe bronnen in het eerste bedrijfsjaar van de HTO. In dat seizoen wordt namelijk grondwater met de natuurlijke temperatuur onttrokken waardoor op dat moment de grootste hydrologische en daarmee grondmechanische effecten verwacht worden. Ná het eerste jaar waarin de HTO warmte opgeslagen en geleverd heeft is de viscositeit van het grondwater afgenomen waardoor ook kleinere stijghoogteveranderingen verwacht worden. Omdat permanente (plastische) deformatie van het korrelskelet enkel kan optreden op het moment dat de effectieve druk groter is dan ooit tevoren, treedt zetting als gevolg van het HTO-systeem zetting voornamelijk in het eerste jaar op waarin de grootste stijghoogteverlagingen optreden. In de jaren erna treden kleinere stijghoogteverlagingen op waardoor enkel verwaarloosbare omkeerbare (elastische) deformatie verwacht wordt.

Zoals in paragraaf 4.4 benoemd is sprake van hydrologische beïnvloeding tussen met name de ontwikkeling Kabeldistrict en de HTO van TUD. De voornaamste zetting wordt verwacht als gevolg van het onttrekken uit de lauwe bronnen. Deze onttrekking vindt plaats in het zomerseizoen wanneer sprake is van een overschot van warmte vanuit het geothermie systeem. De hydrologische beïnvloeding als gevolg van Kabeldistrict zijn het gevolg van de warme bronnen. Mocht (een deel van) de ontwikkeling van Kabeldistrict al in gebruik genomen zijn op het moment dat de HTO voor het eerst warmte laadt, dan zal sprake zijn van een dempend cumulatief hydrologisch effect omdat de warme en hete bronnen van kabeldistrict op hetzelfde moment geladen worden als dat er onttrokken wordt uit de lauwe bronnen van de HTO. Doordat sprake is van een dempend hydrologisch effect nemen de grondmechanische effecten in een cumulatieve situatie af.

#### **4.9 NATUUR EN OPENBAAR GROEN**

De invloed op de grondwaterstand (paragraaf 3.3) is zo gering (max 0,02 m) dat het open bodemenergiesysteem geen invloed heeft op natuurwaarden (zoals Vogel- en Habitatrichtlijngebieden, Natuurbeschermingswetgebieden, Natuurnetwerk Nederland of ecologische beschermingszones) en openbaar groen. Het thermische invloedsgebied aan maaiveld, als gevolg van warmte-uitstraling van de stijgbuis, is klein en heeft geen negatieve invloed op natuurwaarden.

Als gevolg van cumulatie van hydrologische effecten met open bodemenergiesystemen in het tweede watervoerende pakket bedraagt de maximaal berekende grondwaterstand ook 0,02 m. Ook in samenwerking met omliggende open bodemenergiesystemen is daarom geen sprake van getroffen natuurwaarden.

#### **4.10 CULTUURHISTORIE, ARCHEOLOGISCHE EN AARDKUNDIGE WAARDEN**

De invloed op de grondwaterstand (paragraaf 3.3) is zo gering (0,02 m) dat het open bodemenergiesysteem geen invloed heeft op eventueel aanwezige cultuurhistorie en archeologische waarden. De HTO bronnen zijn voorzien op gronden met archeologie waarde I. Ten behoeve van de aanvraag van de omgevingsvergunning wordt het benodigde archeologische onderzoek uitgevoerd.

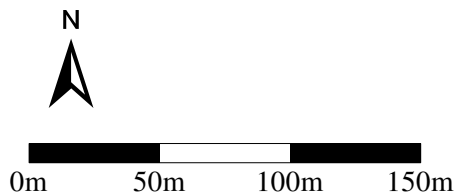
De bronnen van de HTO liggen niet in een aardkundig waardevol gebied.

Als gevolg van cumulatie van hydrologische effecten met open bodemenergiesystemen in het tweede watervoerende pakket bedraagt de maximaal berekende grondwaterstand ook 0,02 m. Ook in samenwerking met omliggende open bodemenergiesystemen is daarom geen sprake van getroffen archeologische waarden.

# Figuren



- Ontwikkeling Nieuwe Haven
- Warme bron
- Koude bron
- ◆ Gesloten bodemlus
- Geplande warme bron
- Geplande koude bron



Project: Bodemenergie HTO TU Delft

Datum: A: 21-12-2023  
B:

Onderwerp: Overzichtskaart met zones waarin hete (rood) en lauw (blauw) bronnen geplaatst worden

Figuur: 2.6

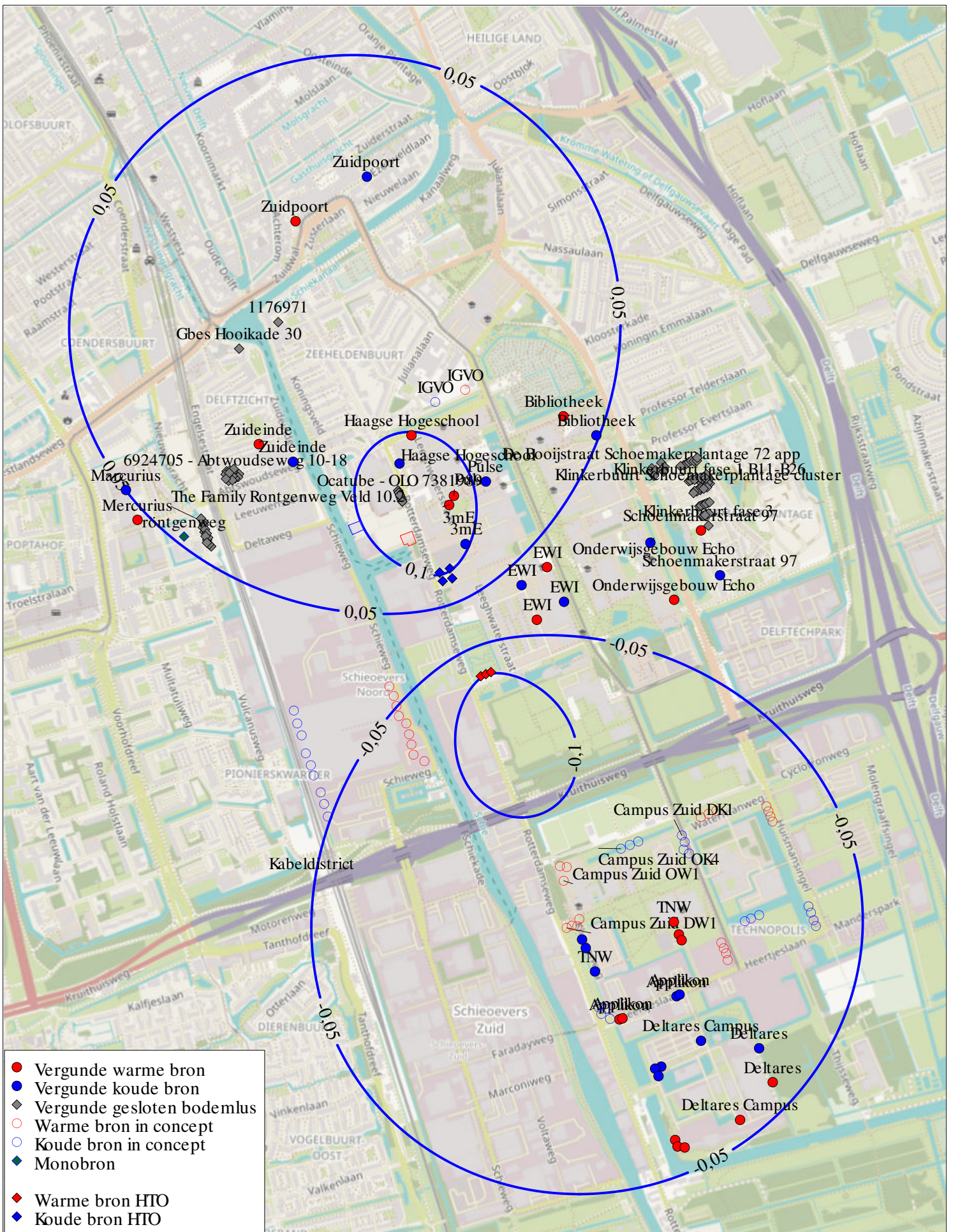
Stadium: effectenstudie

Referentie: PR09968/RK Getek.: SW

Form.: A4







Project: Bodemenergie HTO TU Delft

Datum: A: 21-12-2023  
B:

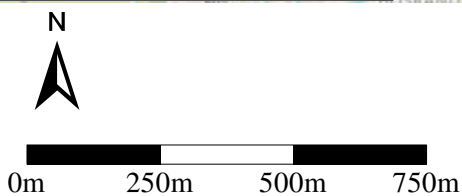
Onderwerp: Berekende maximale stijghoogteverandering in het tweede watervoerende pakket [m]

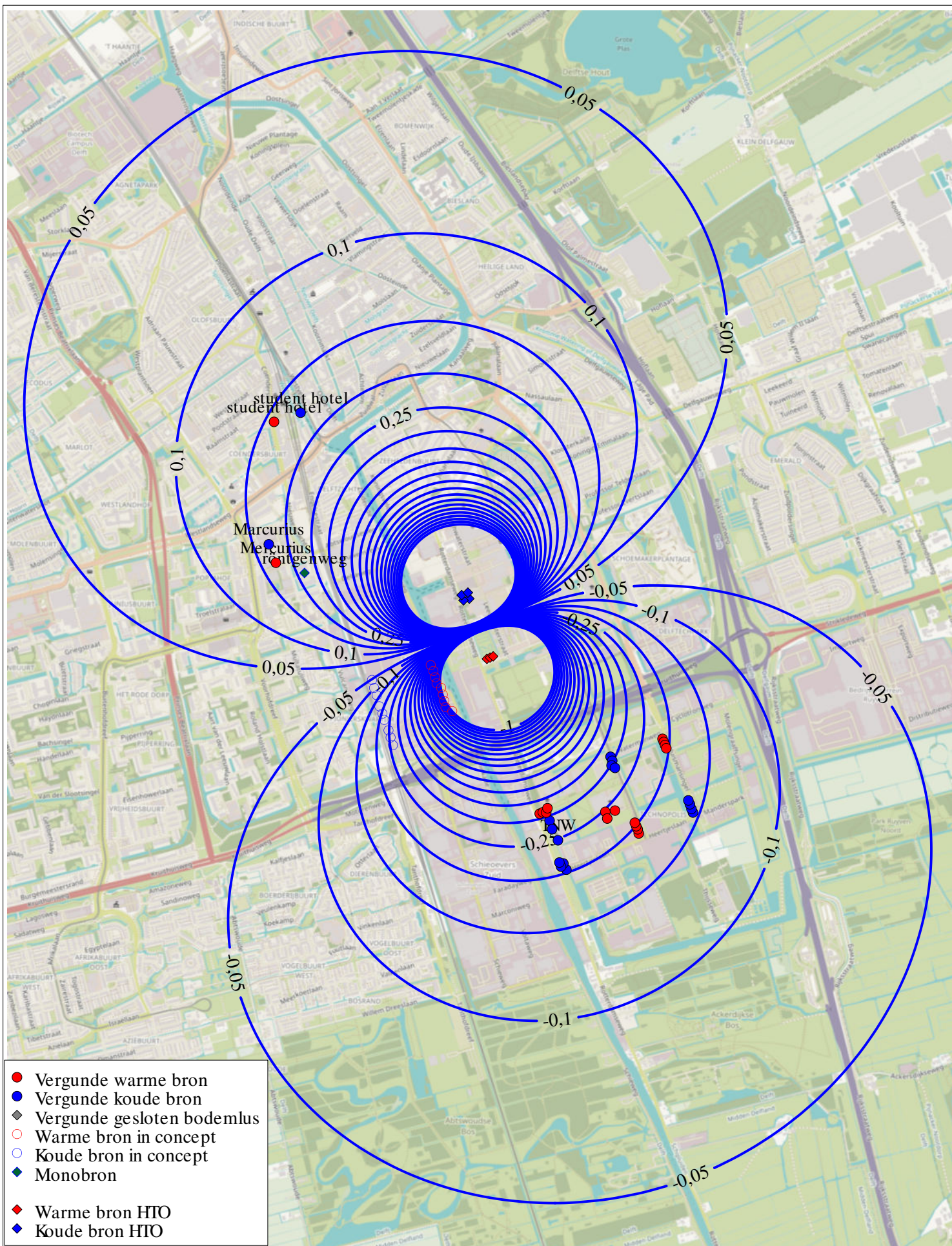
Figuur: 3.2

Stadium: effectenstudie

Referentie: PR09968/RK Getek.: SW

Form.: A4





Project: Bodemenergie HTO TU Delft

Datum: A: 21-12-2023  
B:

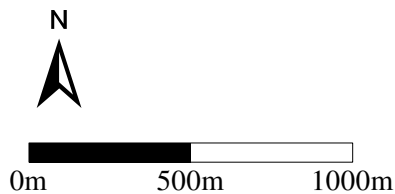
Onderwerp: Berekende maximale stijghoogteverandering in het derde watervoerende pakket [m]

Figuur: 3.3

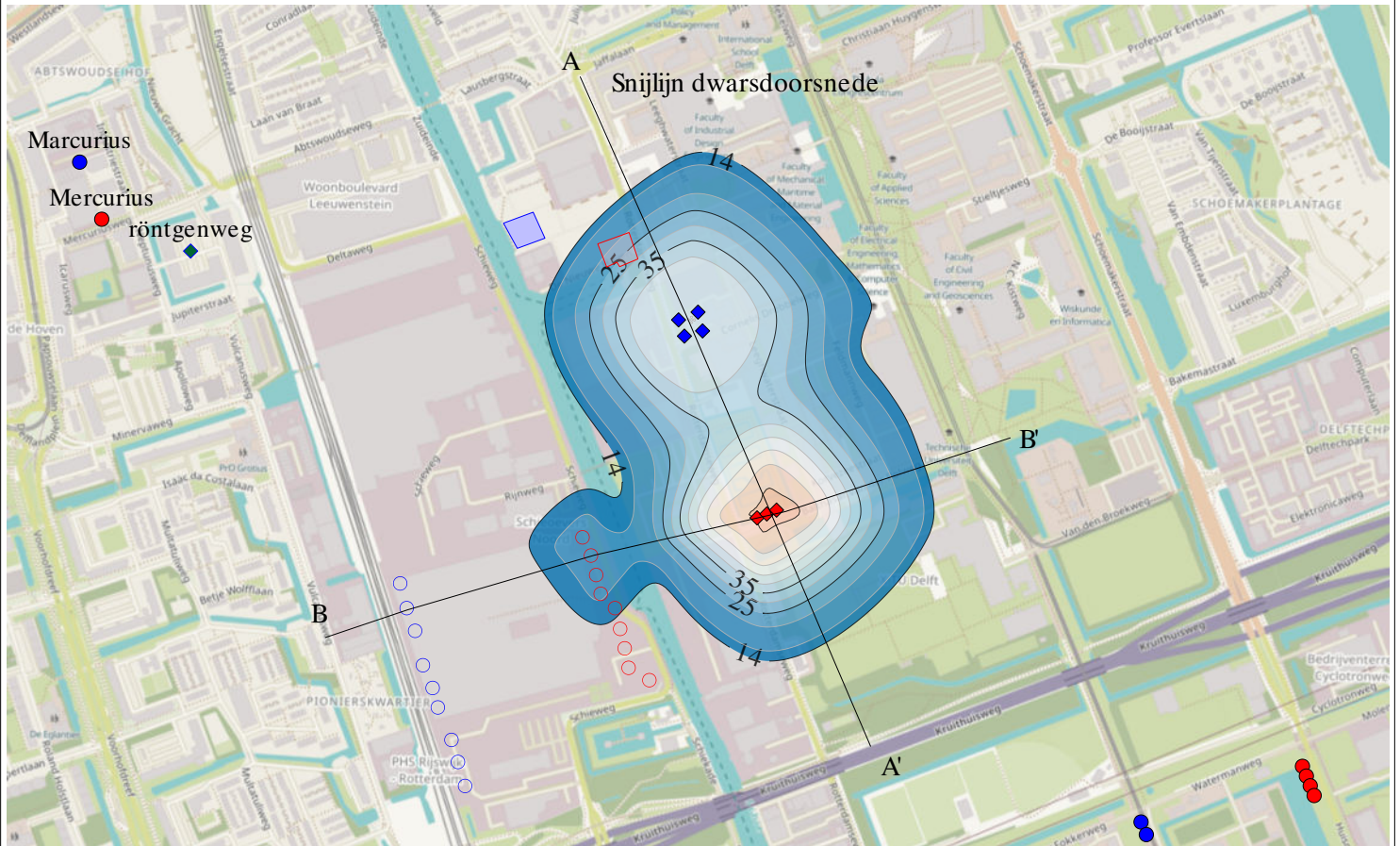
Stadium: effectenstudie

Referentie: PR09968/RK Getek.: SW

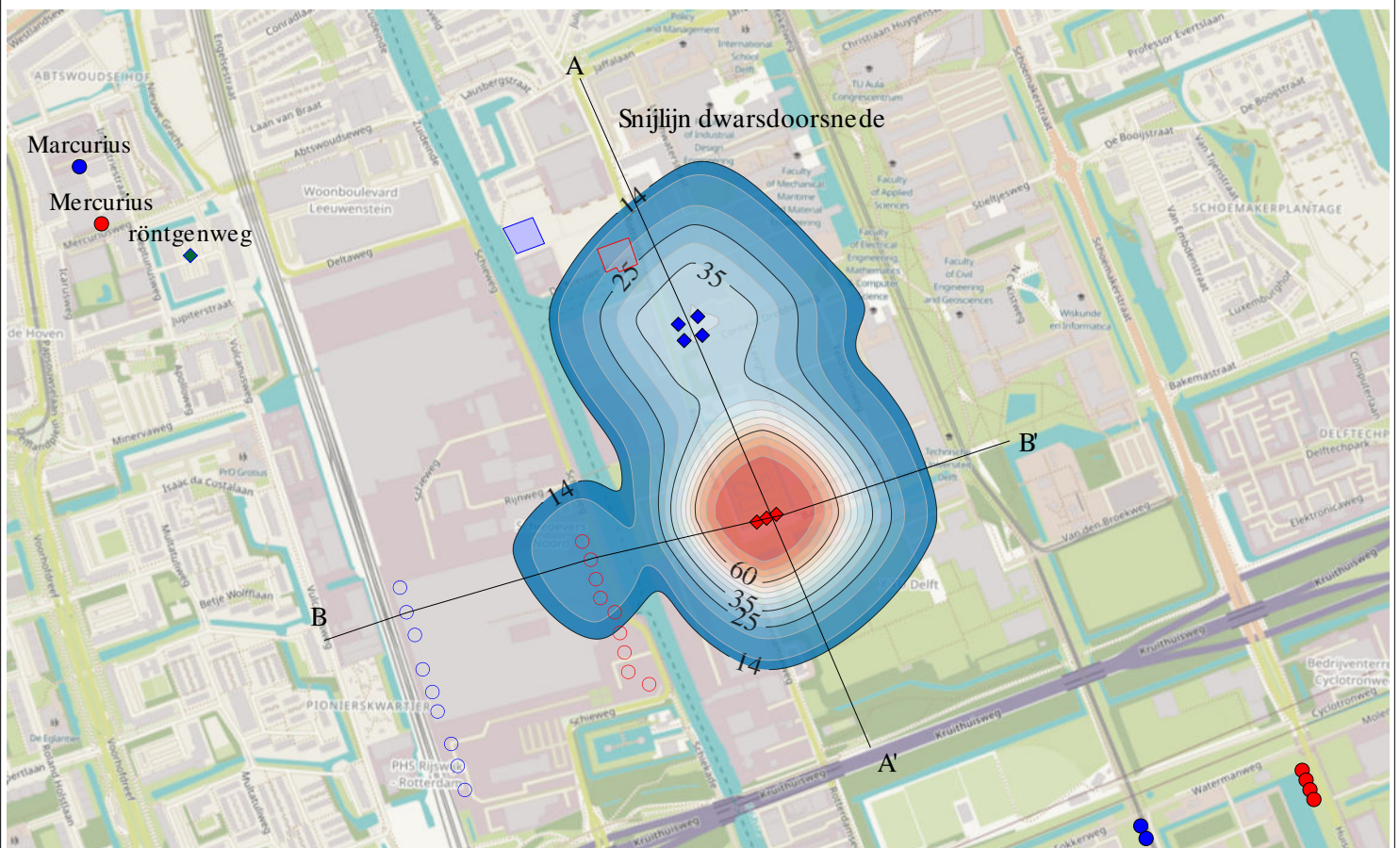
Form.: A4



situatie einde winter



situatie einde zomer



Project: Bodemenergie HTO TU Delft

Datum: A: 21-12-2023  
B:

Onderwerp: Berekende temperaturen in het opslagpakket (97 m-mv) na 20 jaar energieopslag [°C]

Figuur: 3.4

Stadium: effectenstudie

Referentie: PR09968/RK Getek.: SW

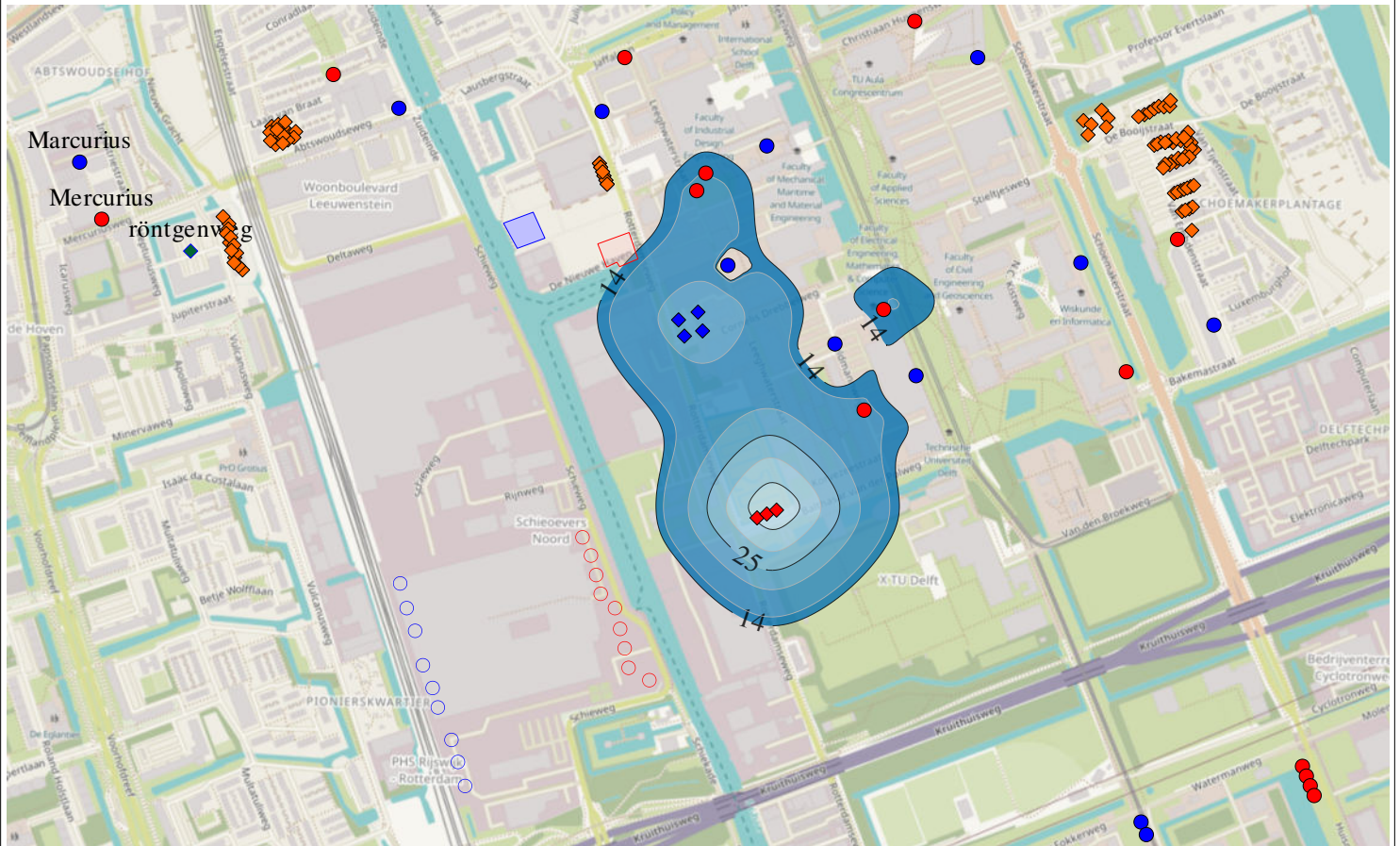
Form.: A4



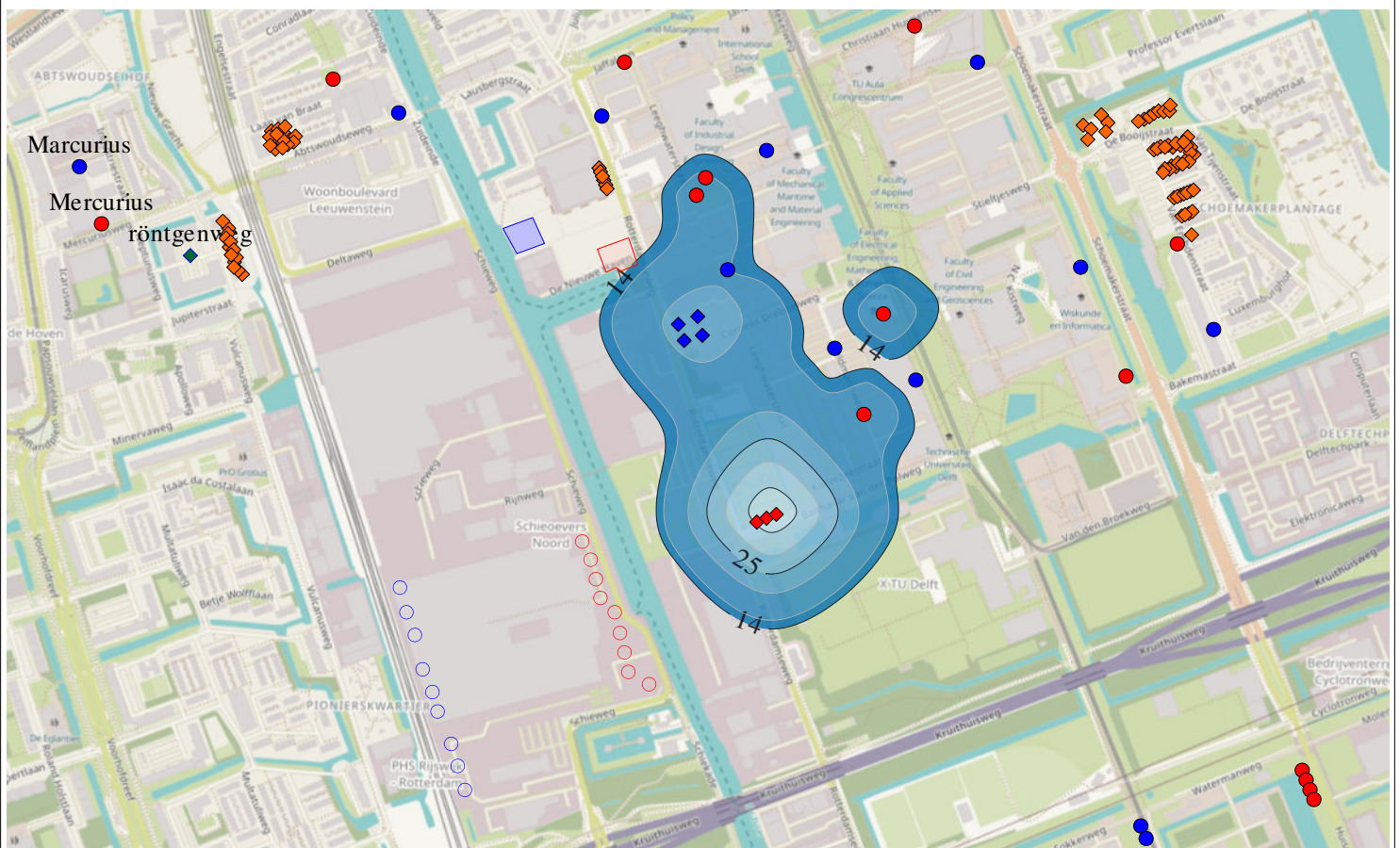
0m 200m 400m 600m



situatie einde winter



situatie einde zomer



0m 200m 400m 600m

Project: Bodemenergie HTO TU Delft

Datum: A: 21-12-2023  
B:

Onderwerp: Berekende temperaturen in het tweede wvp  
(70 m-mv) na 20 jaar energieopslag [°C]

Figuur: 3.5

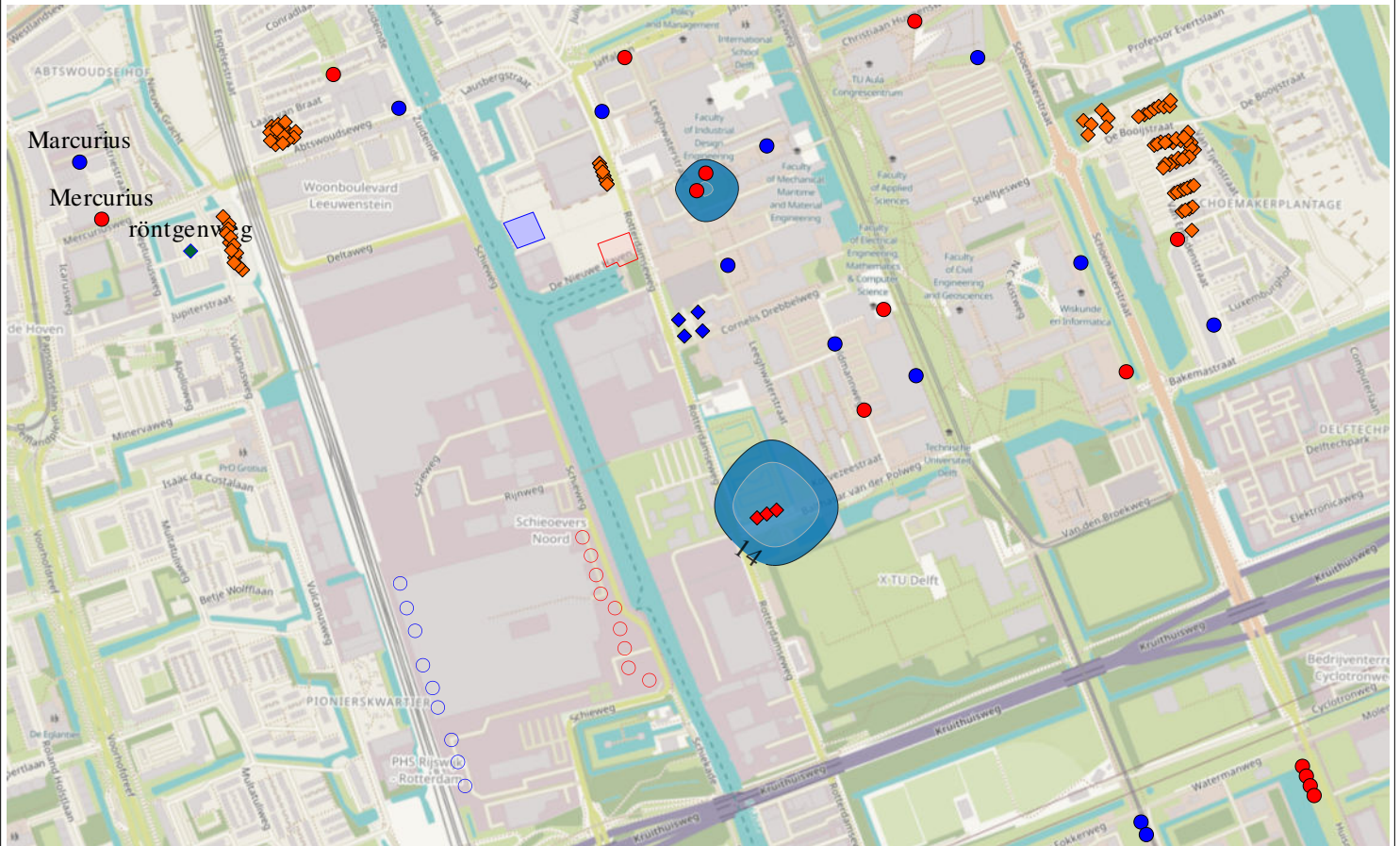
Stadium: effectenstudie

Referentie: PR09968/RK Getek.: SW

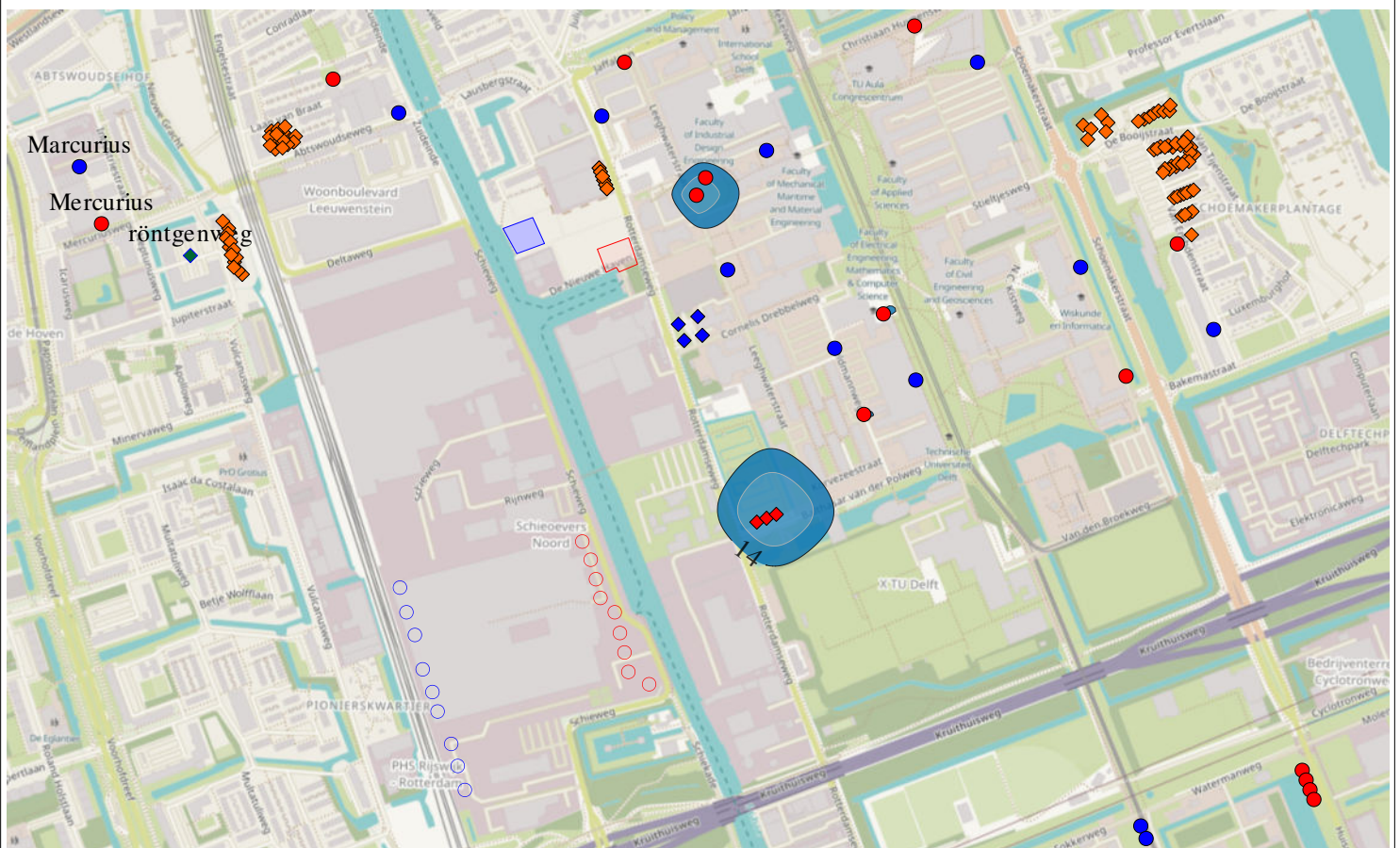
Form.: A4



situatie einde winter



situatie einde zomer



Project: Bodemenergie HTO TU Delft

Datum: A: 21-12-2023  
B:

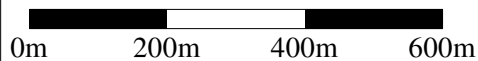
Onderwerp: Berekende temperaturen in het eerste wvp  
(40 m-mv) na 20 jaar energieopslag [°C]

Figuur: 3.6

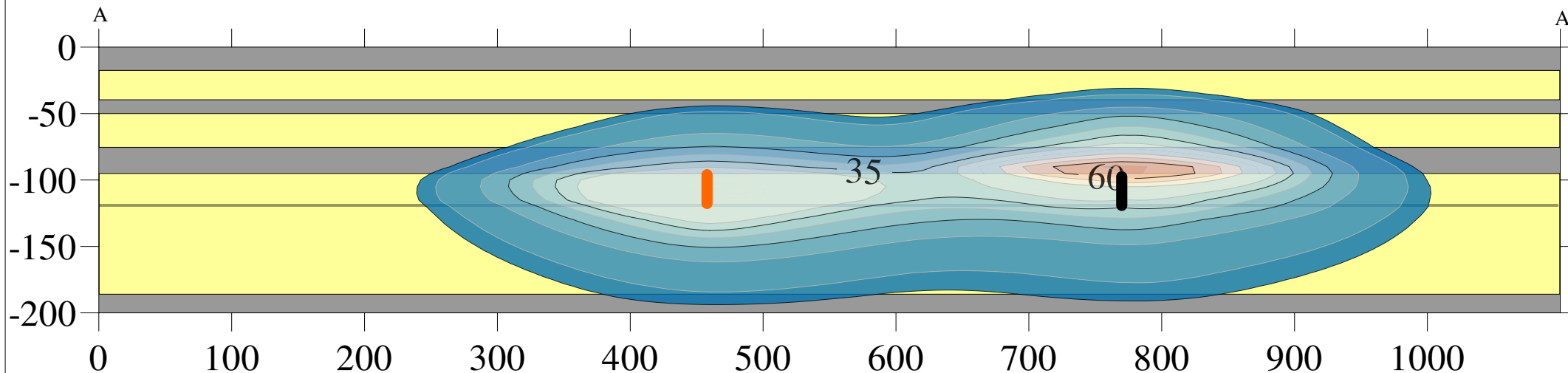
Stadium: effectenstudie

Referentie: PR0968/RK Getek.: SW

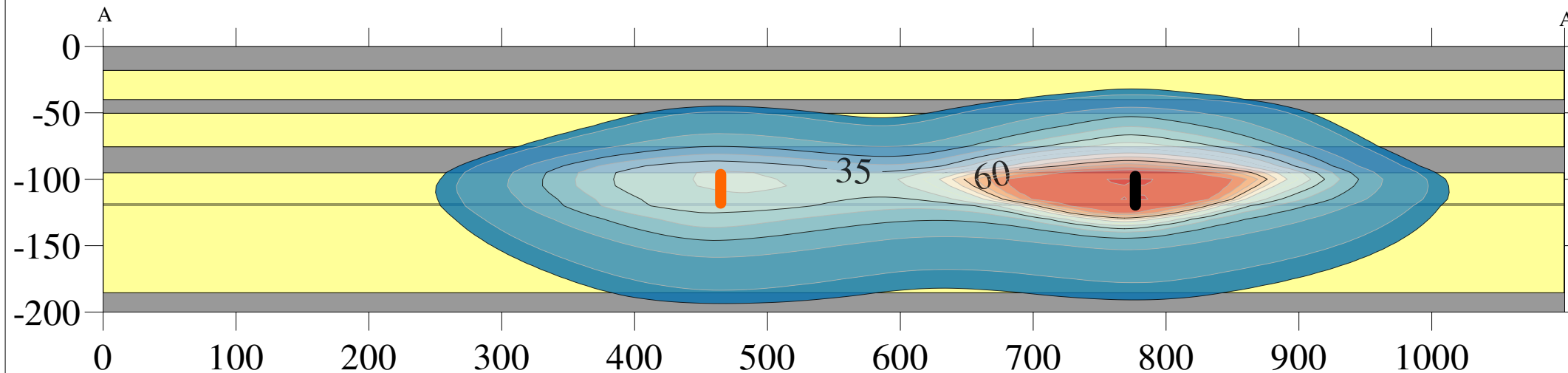
Form.: A4



### Temperatuurverdeling na 20 jaar (einde warmtelevering)



### Temperatuurverdeling na 20 jaar (einde warmte opslag)



-  Hete bron
-  Warme bron

Project: HTO TU Delft

Datum: A: 21-12-2023  
B:

Onderwerp: Berekende temperatuurverdeling na 20 jaar energieopslag  
in noord-zuidelijke richting [°C]

Figuur: 3.7

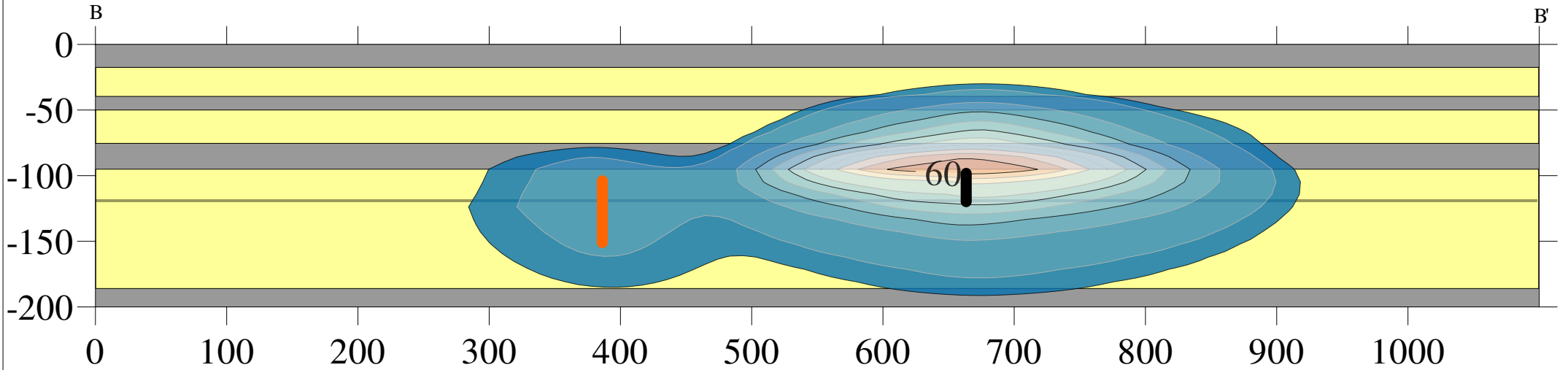
Stadium: effectenstudie

Referentie: PR09968/RK Getek.: SW

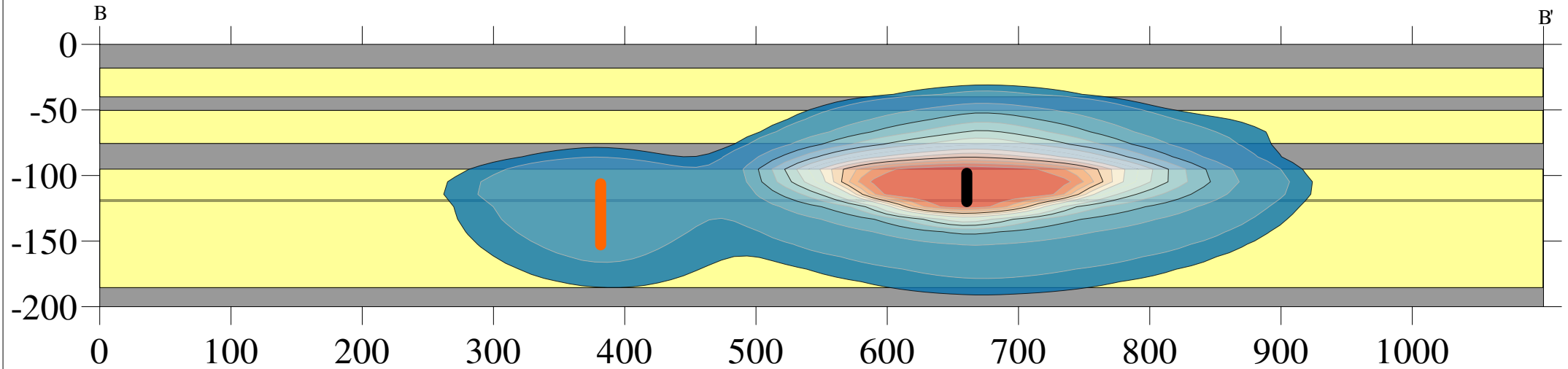
Form.: A4





### Temperatuurverdeling na 20 jaar (einde warmtelevering)



### Temperatuurverdeling na 20 jaar (einde warmte opslag)



-  Hete bron
-  Kabeldistrict

Project: HTO TU Delft

Datum: A: 21-12-2023  
B:

Onderwerp: Berekende temperatuurverdeling na 20 jaar energieopslag  
in west-oostelijke richting [°C]

Figuur: 3.8

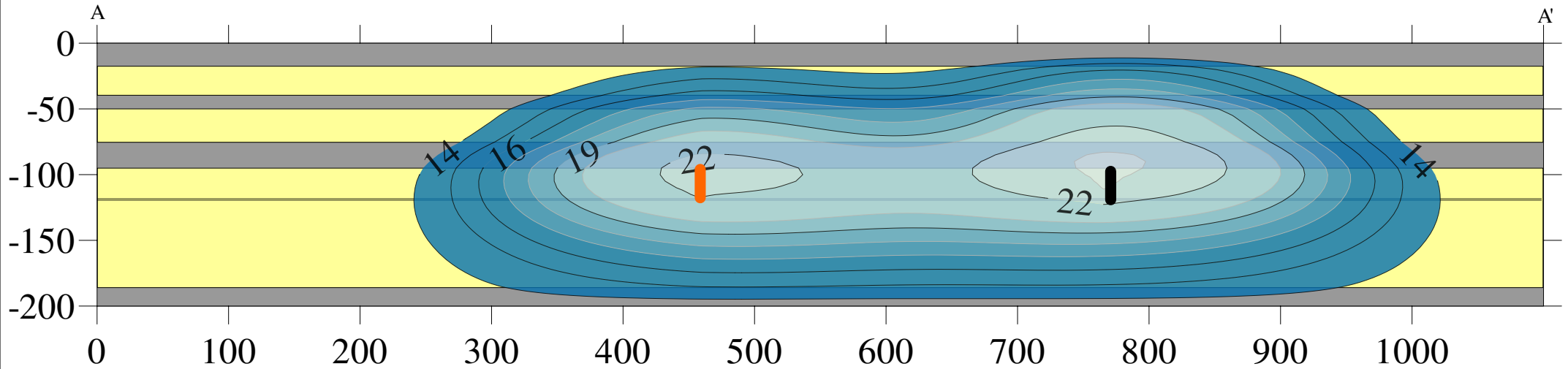
Stadium: effectenstudie



Referentie: PR09968/RK Getek.: SW

Form.: A4



# Temperatuurverdeling na 50 jaar stilstand



-  Hete bron
-  Warme bron

Project: HTO TU Delft

Datum: A: 21-12-2023  
B:

Onderwerp: Berekende temperatuurverdeling na 50 jaar stilstand  
in noord-zuidelijke richting [°C]

Figuur: 3.9

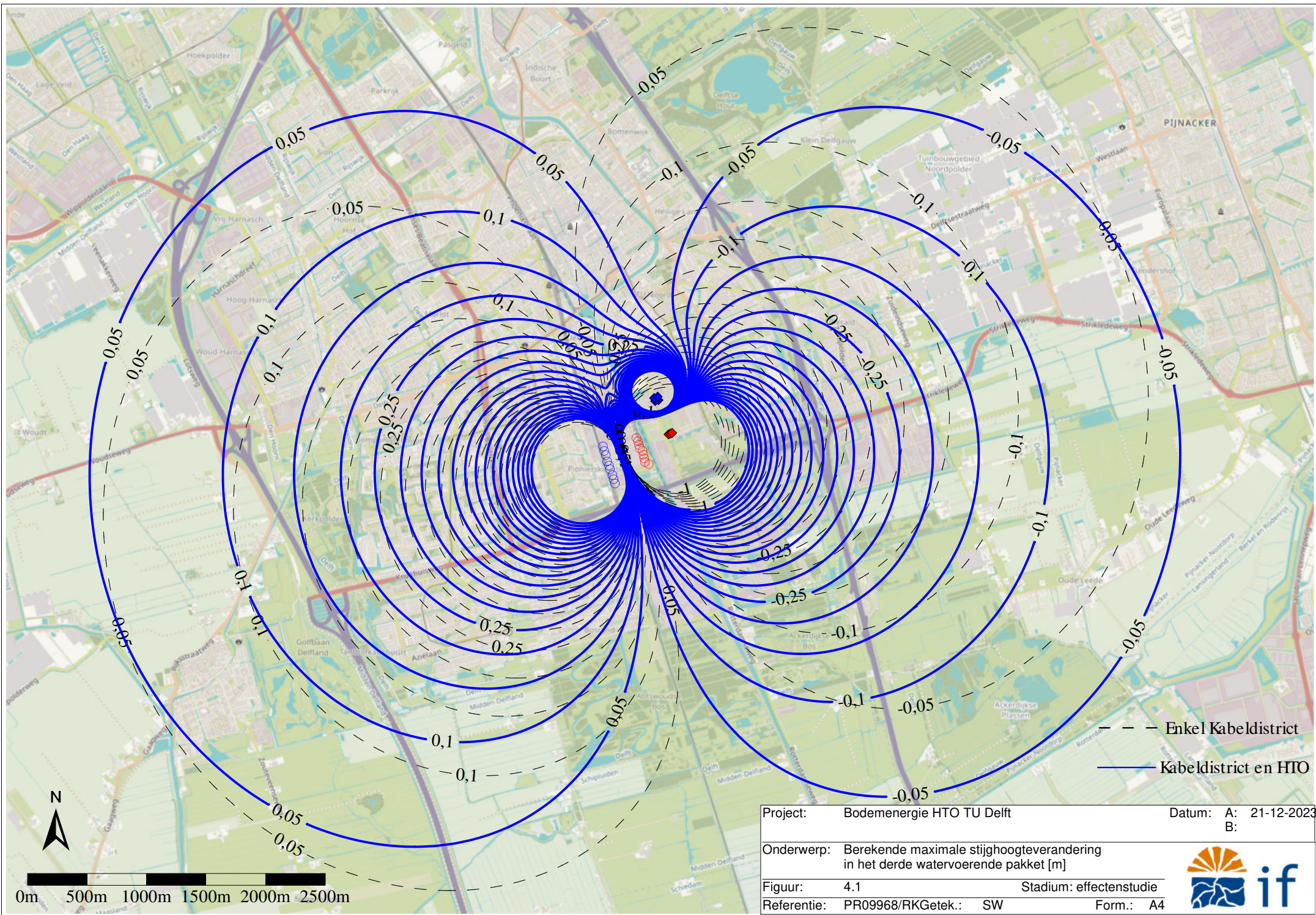
Stadium: effectenstudie

Referentie: PR09968/RK Getek.: SW

Form.: A4







# Bijlage 1

PUSH-IT WERKPLAN EN ONDERZOEKSPROGRAMMA



**PUSH-IT**

**Piloting Underground Seasonal Heat Storage In geothermal reservoirs**

**D1.1 Workplan Delft**



Funded by  
the European Union

<b>Grant agreement number</b>	101096566		
<b>Project title</b>	Piloting Underground Storage of Heat In geoThermal reservoirs		
<b>Project acronym</b>	PUSH-IT		
<b>Start date</b>	01-01-2023	<b>DURATION</b>	48 months
<b>End date</b>	31-12-2026		
<b>Work Package No. and Title</b>	WP1 Demonstration and follower sites		
<b>Deliverable number</b>	D1.1		
<b>Deliverable title</b>	Workplan Delft		
<b>Actual date of delivery</b>	31-08-2023		
<b>Nature</b>	R	<b>DISSEMINATION LEVEL</b>	Sensitive
<b>Deliverable Leader</b>	Technische Universiteit Delft		
<b>Author</b>	M.Bloemendal		
<b>Co-authors and contributors</b>	M.L. van der Schans, J.van Bael, N.Hartog, S.Kranz, M.L. van der Schans, P.Vardon, C.Willems, K.Kieling, W.Liu, A.Daniilidis, I.Soutar, M.Rose, S.Ryder, T. van Oort, R.Folders, A.G.Quiros, A.Loschetter		
<b>Cite as</b>	Bloemendal, M., van der Schans, M., et al. (2023), Deliverable D1.1, PUSH-IT project		

#### Disclaimer



**Funded by  
the European Union**

Funded by the European Union under the Horizon Europe programme (grant no. 1011096566). Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union. Neither the European Union nor CINEA can be held responsible for them.

Copyright message

© **PUSH-IT Consortium, 2023**

This deliverable contains original unpublished work except where clearly indicated otherwise. Acknowledgement of previously published material and of the work of others has been made through appropriate citation, quotation or both. Reproduction is authorised provided the source is acknowledged.

## Document history

Version	Description	Author	Organisation
V0.1	First Draft	M.Bloemendal	TUD
V0.2	Working version delivered to Task leaders	M.Bloemendal, J.van Bael, N.Hartog, S.Kranz, M.L. van der Schans, P.Vardon, C.Willems, K.Kieling	TUD, VITO, KWR, GFZ, Huisman,
V0.3	First full version	M. van der Schans	KWR
V0.4	Draft delivered to Quality Assurance Manager (QAM)	M.Bloemendal	TUD
V0.5	Draft after quality control, delivered to CEO	M.Bloemendal, M. van der Schans	TUD
V1.0	Final version	D. van Heusden-van Winden	TUD

## Quality control

Author	Role	Organisation	Date
S. Kranz, G. Blocher, K.Kieling, Simona Regenspurg	Internal Reviewer 1	GFZ	11-08-2023
N. Meier	Internal Reviewer 2	F-IEG	09-08-2023
J.M. Bloemendal	Scientific and technical coordination	TUD	11-08-22023
D. van Heusden-van Winden	Non-technical project coordination	TUD	22-08-2023

## Table of Contents

List of Abbreviations.....	5
List of Organizations .....	6
1. Introduction.....	7
1.1. The PUSH-IT project.....	7
1.2. Goal of this report .....	7
1.3. Relation with the TUD-HTO project.....	8
2. Site description: HT-ATES in Delft .....	9
2.1. General site & technology description .....	9
2.2. Detailed characteristics of location.....	11
2.3. HT-ATES system .....	17
2.4. Stakeholders.....	25
2.5. Status Q2- 2023.....	26
3. Public engagement, social benefits and risks.....	27
3.1. Societal engagement .....	27
3.2. Regulation and governance .....	32
3.3. Finances .....	35
4. Enabling technologies.....	38
4.1. Drilling and completion.....	38
4.2. Control & Integration .....	43
4.3. Water Quality and environmental effects.....	45
4.4. Performance assessment and optimisation.....	49
5. Plan of action .....	52
5.1. Organisation .....	52
5.2. Planning.....	54
5.3. Milestones/deliverables.....	54
6. Risks and mitigation.....	55
References .....	58
Annex I Export of microbial water quality samples .....	59

### List of tables

Table 1: Overview of advantages and disadvantages of HT-ATES systems	11
Table 2. Depth, thickness and horizontal hydraulic conductivity ( $K_h$ ) of the different formation layers up to a depth of 270 m at HT-ATES site in Delft. Hydraulic conductivity are literature values from REGIS (TNO 2017)	16
Table 3: Intended characteristics of the wells	21
Table 4: Intended instrumentation of the wells	22

Table 5: Intended fibre optics cables	23
Table 6: From legal perspective recommended water quality parameters (Bloemendal et al 2021)	24
Table 7: Pre-engagement (Months 1-9)	28
Table 8: Early engagement activities (Months 6-12)	29
Table 9: Ongoing activities [Months 6-48]	30
Table 10: activities	31
Table 11: activities	34
Table 12: activities	36
Table 13: activities	38
Table 14: activities	38
Table 15: activities	39
Table 16: activities	40
Table 17: activities	40
Table 18: activities	41
Table 19: activities	42
Table 20: activities	42
Table 21: activities	42
Table 22: activities (PS: details of involvement of CRE need to be resolved)	43
Table 23: activities	47
Table 24: Amount of tracer to be added (extrapolation of amounts during Berlin Experiment; for permitting purpose at Delft site)	50
Table 25: Tracer analysis during HPPT (To be determined)	50
Table 26: activities	50
Table 27: activities	51
Table 28: Roles and contact persons (July 2023)	52
Table 29. Milestones and deliverables for the Delft site	54
Table 30. Project risks for HT-ATES in Delft	55

## List of figures

Figure 1. Overview of different geothermal technologies as applied in The Netherlands and the subject of research and education at TU Delft (Bloemendal 2018)	10
Figure 2. Overview of the district heating network tracks at the TU Delft campus, including the combined heat and power plant (CHP) location, which is also the location of the Geothermal well and HT-ATES	11
Figure 3. Hourly heating demand and load duration curve of OWD and TUD DHN combined in 2026	13
Figure 4. Worst-case supply and return temperatures required at different outside air temperatures in the TU Delft (top) and OWD (bottom) DHN	13
Figure 5. A cross-section of the Maassluis formation based on (Kingsnorth 2022) a) The REGIS II model, showing the model's interpolated interpretation of the subsurface from A (Technopolis) to the DE-08 at 1.12 km across and then to DAPGEO-02-200m and DAPGEO-02-500m at A'. The blue layer indicated the Maassluis formation with the lighter and the darker shading representing the sandy and clayey layers, respectively; b) An extension of the 1D lithological columns of Technopolis, DE-08, and DAPGEO-02-200m & DAPGEO-02-500m. The yellow layers correspond to the sandy layers and the green to the clayey layers	15
Figure 6. Intended HT-ATES well locations at TU Delft campus	17
Figure 7. Intended placement of the wells and boreholes	17
Figure 8. Depth plot of the production, monitoring, and fibre optic wells	19

Figure 9. Illustration of the pilot borehole during the test phase (left), in the waiting phase after initial testing but before the HPPT (middle) and after backfilling the production casing after the test phase (right) 20

Figure 10. Dimensions of the sensor prototype (left) and its installation on the pump tubing (right). Real dimensions will be designed to fit in particular for the Delft well casing 41



## List of Abbreviations

ATES	Aquifer thermal energy storage
BUM	Besluitvorming Uitvoerings Methode
CEG	Faculty of Civil Engineering and Geosciences
CHP	Combined heat and power plant
CRC	Carbon reduction cost
CRE	Campus Real Estate
DAPwell	TU Delft campus geothermal well
DHN	District heating network
DHW	Domestic hot-tap water
DTS	Distributed temperature sensing
ESP	Electrical submersible pump
GTD	GeoThermie Delft, the company owning and operating DAPwell
HPPT	Hot Push Pull Test
HT	High temperature
LT	Low temperature
LCOE	Levelised cost of energy
OWD	Open Warmtenet Delft
P50	50 <sup>th</sup> percentile
WP	Work Package

## List of Organizations

### PUSH-IT partners

TUD	Delft University of Technology	CGS	Ceska Geologicka Sluzba
EQS	Equans	BRGM	Bureau De Recherches Géologiques Et Minières
KWR	KWR Water Research institute	BGS	United Kingdom Research and Innovation
TDA	Technische Universität Darmstadt	UU	Universiteit Utrecht
UXT	University of Exeter	GBBH	Grondoorbedrijf Haitjema b.v.
F-IEG	Fraunhofer-IEG	ARU	Anglia Ruskin University
RUB	Ruhr-Universitaet Bochum	UGN	Université de Genève
GFZ	GeoForschungsZentrum Helmholtz Zentrum Potsdam	UKR	Univerzite Karlova
VITO	Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek	GEL	Geothermal Engineering LTd.
HGEO	Huisman Geo b.v.	AARD	Aardyn (Equans)

### Other organisations

EBN	Energiebeheer Nederland	IFT	IF-Technology
CRE	Delft Campus Real Estate	SGT	Shell Geothermie

## 1. Introduction

### 1.1. The PUSH-IT project

PUSH-IT will showcase full-scale application of high temperature heat storage (up to 90°C) in geothermal reservoirs using 3 different technologies, aquifers, boreholes and mines, at 6 different sites. The 3 technologies addressed in PUSH-IT are relevant for different geophysical conditions, which are widely available in Europe. In PUSH-IT we will develop, deploy and test our technologies for a variety of configurations of heat sources, heat storage technologies, geological conditions, distribution systems, stakeholder populations and market and legal conditions. Hence, PUSH-IT provides a unique scope on demonstration, integration and advances for seasonal heat storage. These results will enhance the utilisation of sustainable energy and create a balanced system for sharing benefits and burdens tied to sustainable heat generation, storage and distribution activities.

In PUSH-IT we will reduce environmental impact, levelized cost of energy and risks and improve performance and robustness via development and demonstration of several enabling technologies, i.e., newly developed monitoring and water quality control and novel drilling and completion and novel control systems. Societal engagement is a key element and achieved via citizen engagement, analysing motivations and perceptions of heat storage, and investigating governance policies and business models that engage citizens in decision making regarding urban heating systems including storage. The PUSH-IT consortium combines heat suppliers, well drillers, public planning offices and academic partners. Through our transdisciplinary collaboration we will realise operational projects and use these to generate generic solutions and practices relevant across Europe. All activities will be monitored and reported, yielding a valuable comprehensive dataset on the technical and social real-world performance.

### 1.2. Goal of this report

The goal of PUSH-IT is to realize the successful implementation and operation of the pilot sites. This implies preparation, installation and operation of infrastructure, and engagement with local stakeholders, analysing and evaluating economical value and relevance, assessing geological aspects of storage sites, integration and control.

One of the 6 sites where the PUSH-IT project develops and demonstrates heat storage in geothermal reservoirs is Delft. In Delft a high temperature aquifer thermal energy storage (HT-ATES) system is applied and developed. The goal of this report is to describe, detail and coordinate the proposed PUSH-IT activities at the site in Delft, as well as how activities outside but relevant for PUSH-IT are coordinated with the PUSH-IT activities.

To do so, the following aspects are discussed in this report:

- In chapter 2 the site description is provided, including general description of the characteristics of the heating system as a whole, as well as stakeholder landscape. Together with the system integration and ongoing developments and plans, this chapter provides an overview of the current status of the site/heating system and how the HT-ATES should fit in.
- Chapter 3 and 4 then lists the proposed PUSH-IT activities in Delft related to the public engagement (WP2) and enabling technologies (WP3) respectively.
- The project organization is brought together in a plan of action in chapter 5.
- Finally, in chapter 6 the Risks and corresponding mitigation measures are described.

### 1.3. Relation with the TUD-HTO project

Paragraph 2.3 contains an overview of what activities will be conducted in conjunction with the TUD-HT-ATES-project of GTD. This paragraph thus provides input to the Terms of Reference for parties involved in TUD-HTO and their sub-contractors. All activities that are not mentioned in paragraph 2.3 must be implemented entirely by the PUSH-IT partners.

## 2. Site description: HT-ATES in Delft

### 2.1. General site & technology description

#### 2.1.1. Summary

The HT-ATES is to be installed at the TU Delft campus. It will be integrated in the TU Delft district heating network (DHN). This DHN is currently being fed with heat from gas fired boilers and a combined heat and power (CHP) unit. But this will soon be replaced by a geothermal well, producing heat at around 75-80°C, together with a heat pump to boost temperature level to 90°C when needed to meet demand. The DHN will also be extended to the city of Delft, this is scheduled to start around 2025. Starting with a limited demand, but steadily increasing towards 2040.

- **Location:** TU Delft campus
- **Energy infrastructure**
  - TU Delft district heating network with current gas fired boiler and CHP à to be replaced by geothermal heat by 2024. TU-Delft Demand: currently 190-160 TJ/y, to be reduced by insulation measures to around 80 TJ/y by 2040.
  - Extended DHN towards Eastern part of Delft from around 2025 onwards Demand ramping up to 120 TJ/y by 2030, further increasing to 200-400 TJ/y towards 2040.
  - Temperatures: supply 75-90°C / return 50-55°C
- **HT-ATES heat source:** Geothermal well (+ Heat pump)
- **HT-ATES in heating system:**
  - Heat surplus in summer is stored and supplied in winter, this reduces fossil fired sources for peak supply
  - Create flexibility and robustness in heat supply system
  - Target storage capacity: 25-50TJ (400,000 – 800,000 m<sup>3</sup> storage volume)
- **Current Status:**
  - Preliminary design phase for HT-ATES, including a pilot drilling for detailed well design and monitoring
  - Permitting procedure has started, pre-approval from authority, now formal procedure with environmental impact analysis.
  - Final well locations selection and integration in energy system is ongoing.

#### 2.1.2. HT-ATES at (TU) Delft

An HT-ATES system at the TU Delft campus will provide both a demonstration of this technology integrated in a heat network with a geothermal well, as well as a site for fundamental research to answer key outstanding questions which need to be answered for development of this novel technology.

Geothermal energy is one of the key technologies that will be used in the heat transition and beyond. Of the different geothermal technologies (Figure 1), each requires several fundamental research activities to allow and support the safe and efficient large scale and sustainable scale-up of the utilisation of subsurface resources. Therefore, a strategic theme / expertise centre exists and is under further development within the faculty of Civil Engineering and Geosciences (CEG).

HT-ATES is one of these technologies requiring considerable investigation and development before widespread adoption. However, in principle, all aspects are similar to low-temperature ATES and a small number of pilot projects have been or are being implemented. Therefore, a well-monitored HT-ATES pilot/research well will boost research and education on geothermal

energy at TU Delft. In addition, this will be one of the first combinations of geothermal heat production with seasonal storage using ATES in the world and including the envisioned monitoring and research of both systems, this will be a unique site in the world.

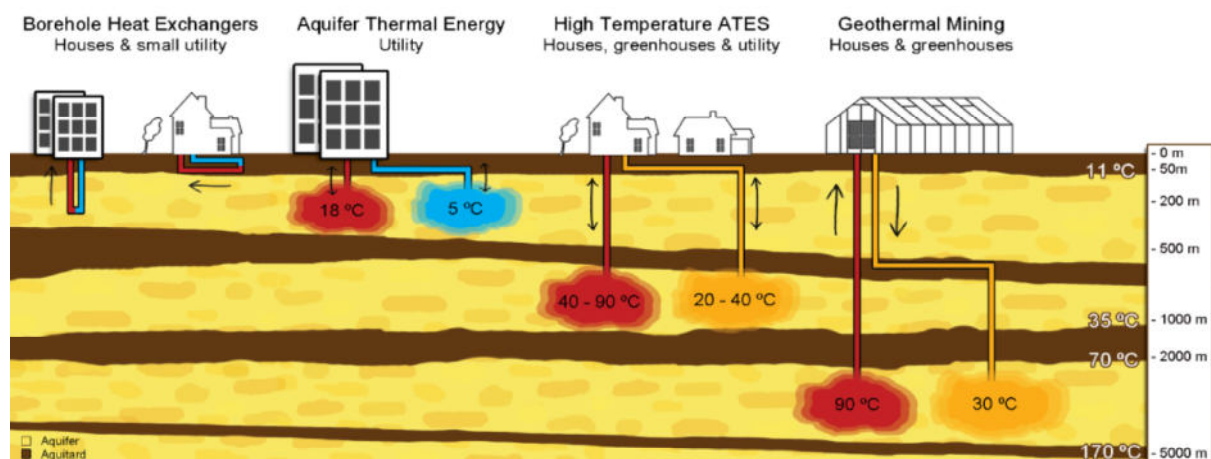


Figure 1. Overview of different geothermal technologies as applied in The Netherlands and the subject of research and education at TU Delft (Bloemendal 2018)

### 2.1.3. HT-ATES

In moderate climates such as found in the Netherlands, during winter months there is a large heat demand, while in the summer months there is a net heat surplus. During the summer months excess energy is available, e.g. from wind, solar, cooling, geothermal energy or residual heat from industries. There is a considerably greater seasonal mismatch in thermal energy than for electricity. To not let the excess thermal energy go to waste, this heat can be stored and used in the winter months where there is demand for this heat. Aquifers provide space to store large amounts of heat in systems called aquifer thermal energy storage (ATES) systems. ATES systems are commonly applied in the Netherlands, with over 3000 systems installed, and are typically installed in buildings with a cooling demand in the summer and a heating demand in the winter.

The general principle of ATES systems is that excess energy is stored as thermal energy in the groundwater, i.e. by increasing the temperature of the groundwater. The excess energy is mostly available in summer months where heat demand is low. When the heat demand is high, mostly in the winter months the heat extracted and used. Storage temperatures vary depending on project-specific heat supply and demand, but for commonly applied ATES systems are limited by permitting to a maximum of 25°C.

When combined with geothermal systems (and several other sources of excess heat) the water may be stored at a higher temperature (to increase its thermal efficiency. These systems are known as high-temperature aquifer thermal energy storage systems (HT-ATES) (Drijver, Bakema et al. 2019, Kallesøe and Vangkilde-Pedersen 2019). At the present time, provinces are granting pilot licences for projects, to test the wider applicability (SIKB 2015).

There are several potential advantages of HT-ATES systems but also potential disadvantages. Table 1 gives an overview of these pro and cons.

Table 1: Overview of advantages and disadvantages of HT-ATES systems

Advantages	Disadvantages
Reduction of energy cost	Possible impact on groundwater quality
Positive climate effect (reduction of CO <sub>2</sub> emissions)	Feasible only for large capacity storage
Little space needed at the surface	Feasible only for certain energy systems
Efficient use of heat sources	

## 2.2. Detailed characteristics of location

### 2.2.1. Demand for heat

#### TU Delft heat demand

About 27000 people work on the TU Delft campus every day: students, scientists, visitors, and employees of the university and the companies on campus. The heating of the majority of the buildings used by these people is delivered from the central production plant via boilers and a combined heat and power plant (CHP). The geothermal well (called DAPwell) will connect to the current heat distribution network from this location. The district heating network (DHN) stretches out around the campus in four branches, as shown in Figure 2. Due to the high quality of insulation, limited network length, the large average building size and subsurface concrete ducts in which the pipes are installed, the heat losses in the heat network are limited to a maximum of 10%.

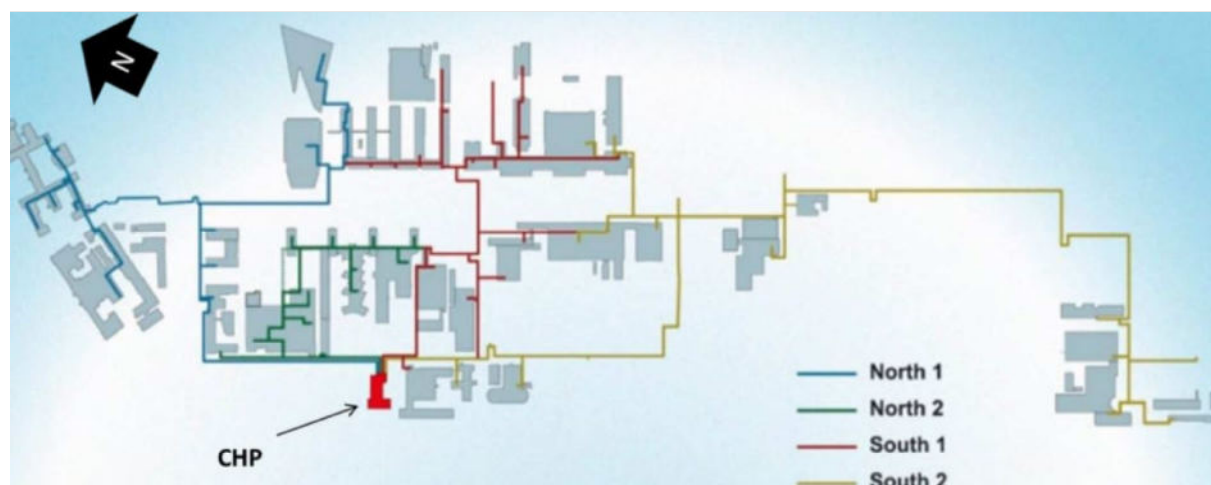


Figure 2. Overview of the district heating network tracks at the TU Delft campus, including the combined heat and power plant (CHP) location, which is also the location of the Geothermal well and HT-ATES

There are various developments planned for the TU Delft campus, including the expansion of the campus with new buildings and renovation of existing buildings. In addition, existing buildings that are located on the campus but are not property of TU Delft (e.g. inHolland and the student housing of DUWO) are planned to be connected to the heat network of TU Delft (the so-called track 5 development). This implies an increase of the heat demand of the campus. On the other hand, the insulation of the existing buildings will be improved which will decrease the peak load and total energy demand. All in all the heating demand of TU Delft will decrease the coming decades from about 180 TJ/y in 2021 to 80 TJ/y in 2040

The current total heat demand of TU Delft has been derived from measured hourly demand and translated to an average expected energy use for a reference year (NEN5060) reflecting average

heating demand. The following key points are noted (Bloemendal, Vardon et al. 2020, Techniplan 2020):

- During the months July and August, the heating system is switched off. There is no heat demand in these two months.
- The current working temperatures of the TU Delft DHN are supply of 130 – 110 °C depending on demand, and a return of approximately 70 °C. During the summers of 2020, 2021 and 2022, various changes have been implemented allowing supply temperatures of 90 – 75 °C and target return temperatures of 55 °C which is compatible with temperatures from the geothermal well delivering heat to the TU Delft DHN. The higher input temperature is needed during negative external temperatures.
- During summers of 2023 and 2024, the last substations will be replaced by new heat exchangers and pressure compensated valves, to improve the level of control possibilities and ensure as low as possible return temperatures in the network.
- The current maximum required capacity is 20 MW. CRE is considering peak shaving strategies in the buildings that will reduce the peak capacity and peak boilers, and consequently will increase the (potential) supply from the HT-ATES. Hence, the business case will further improve with these peak shaving strategies in place.

### City of Delft heat demand

TU Delft and the municipality of Delft signed an agreement that the city will use heat from the TU Delft campus supply. Delivery of heat from the TU Delft campus to the city of Delft will take place when a city DHN (called Open Warmtenet Delft (OWD)) is installed. The expected starting date of construction of the DHN to/at the city of Delft is the end of 2023. Actual heat delivery may take a few years to start/ramp-up, which is currently uncertain. The capacity of the transport line to the city is assumed to be around 22 MW. The total expected demand of the Delft DHN is uncertain and depends on the speed at which houses are connected. Contracted heat delivery is 120 TJ/y in 2025, growing to 220 TJ/y in 2040. But given the potential in the city of Delft, this could also be towards 400 TJ/y in 2040

The demand profiles of the city of Delft will differ from the TU Delft campus as a result of the following differences:

- The TU Delft campus mostly contains office buildings while Delft city is mostly residential.
- For residential areas there is a baseload (continuous demand) required for Domestic Hot Water (DHW), sanitation and cooking, which is a significant fraction (40 – 50%) of the total heat demand in new buildings.
- Peak demands are in the evenings and weekend for newly built residential areas, while in office buildings this is in the morning and during weekdays.

The combined hourly heating demand of OWD and TUD DHN's is depicted in Figure 3.



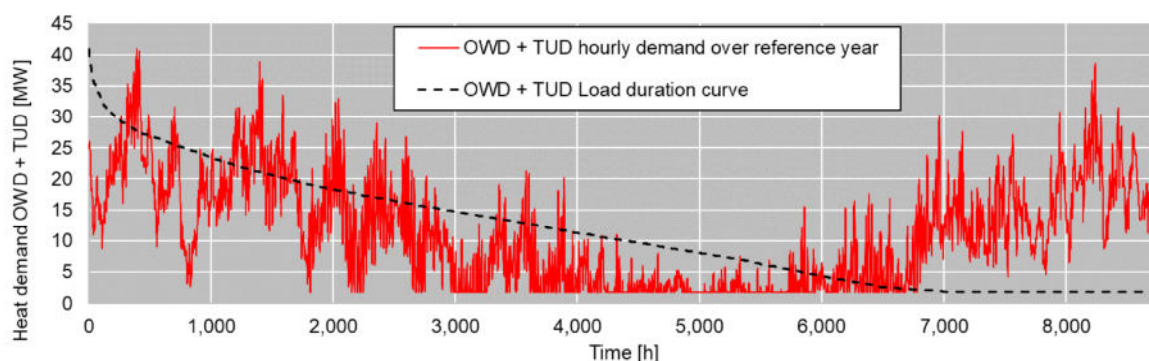


Figure 3. Hourly heating demand and load duration curve of OWD and TUD DHN combined in 2026

### Capacity and limitations of the DHN

The district heating network has the following characteristics:

- The maximum flow capacity is 855 m<sup>3</sup>/h.
- The temperature range of the TU Delft DHN (after modifications in summer 2023 and 2024) is a 90-75°C supply and 55-65°C return, depending on the external air temperature (see Figure 4 – top).

The required supply temperatures in Figure 4 are worst-case as they are established from a capacity test in the network and worse-case return temperatures at different outside-air temperatures (Techniplan 2020). The return temperatures are likely to be lower in practice and are likely reduce when buildings are refurbished.

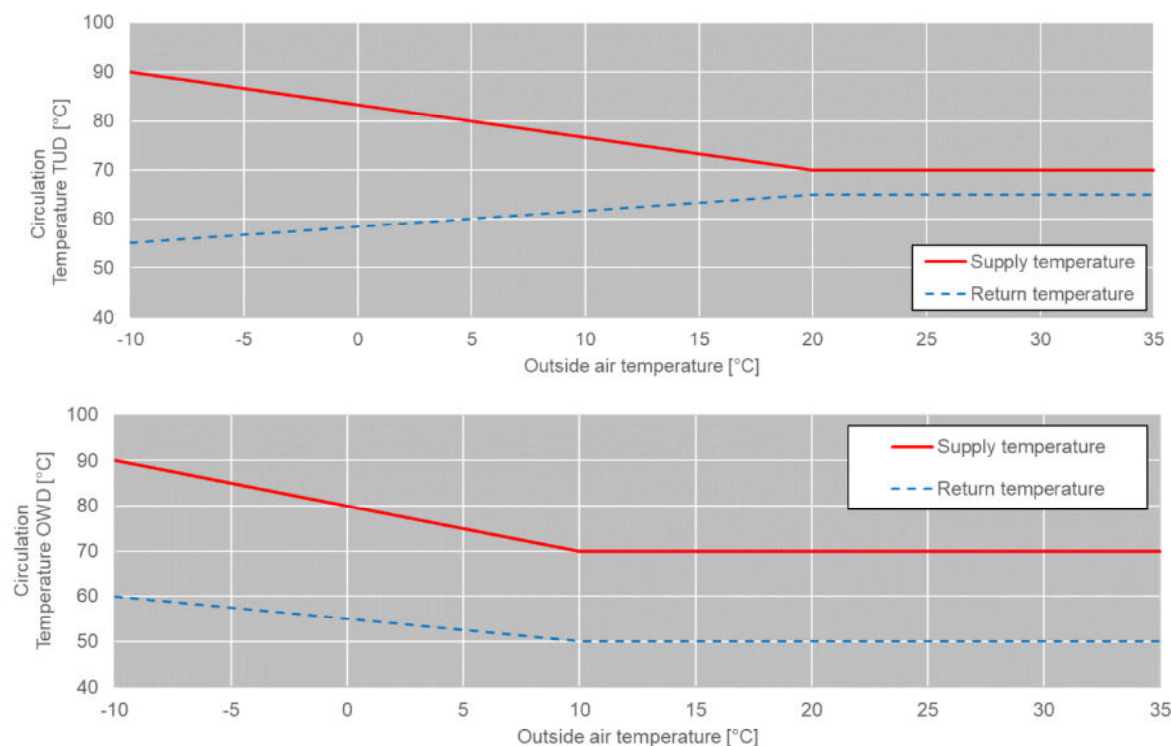


Figure 4. Worst-case supply and return temperatures required at different outside air temperatures in the TU Delft (top) and OWD (bottom) DHN

### 2.2.2. Sources of Heat

#### **Current heat producers: Boilers and CHP**

The campus is equipped with a set of boilers and a CHP, which supply heat to the heating network of the campus. The CHP used to supply baseload and the boilers peaks. Currently the CHP is no longer used because all power the TU Delft needs is generated by PV and wind. Currently the gas fired boilers provide all the heat.

#### **Geothermal well: DAPwell**

The TU Delft campus geothermal wells or “Delft Aardwarmte Project” wells (DAPwell) will replace the boilers as the primary heat source for the campus district heating network and will also be the main source to load an HT-ATES system. The DAPwell is drilled in 2023 to a depth of several kilometres and will deliver heat mid-2024. The well can produce heat during the whole year, with a flow capacity of 320 m<sup>3</sup>/h (this P50 value is the regulatory limited capacity but actual yield may be higher), at an approximate temperature of 75°C. During low demand, heat production can be reduced, but not more than the minimum flow rate (80 m<sup>3</sup>/h) designed for the DAPwell pumps. As the HT-ATES needs to be charged during low demand condition, it is not the intention to ramp down DAPwell flow rate.

Due to the required 70-90 °C in both DHN, a heat pump will be placed between the DAPwell and the DHN, which will increase the supply temperature to the DHN to the required level. In summer the heat pump will be largely idle. At times of peak power supply from local TU Delft PV, or power use at negative price levels on the grid, the heat pump will also be used to increase temperature level of HT-ATES during charging conditions and balance the electricity grid.

### 2.2.3. Local Geohydrology

For integration in the heating system, the HT-ATES system can best be located near the DAP wells and heat pump facility. Subsurface data for this location was gathered from nearby drillings and subsurface model REGIS (TNO 2017) provide insight in the local geohydrology. The inventory was initially carried out to a total depth of 1000m. The main datasets and models that were used for this projection are listed below and presented in Figure 5:

- A. REGIS II Model: general subsurface condition to a depth of 420m
- B. Drilling at TU campus (Technopolis) and Delft NS station: Detailed insight to a depth of 240m
- C. SP-Logging at Jaffalaan (DELFT-07): rough indication of various layers up to 1000m depth
- D. Test drilling at Delftse Hout until 500m depth
- E. Test drilling at Kabeldistrict until 270m depth

Based on analysis and interpretation of the off-set drilling data, the subsurface composition at intended HT-ATES well locations are estimated and listed in Table 2. In the earlier feasibility study (Bloemendal, Vardon et al. 2020) various aquifers until 500m depth have been evaluated. Then also the Maassluis formation (140 – 180 m) appeared most suitable.

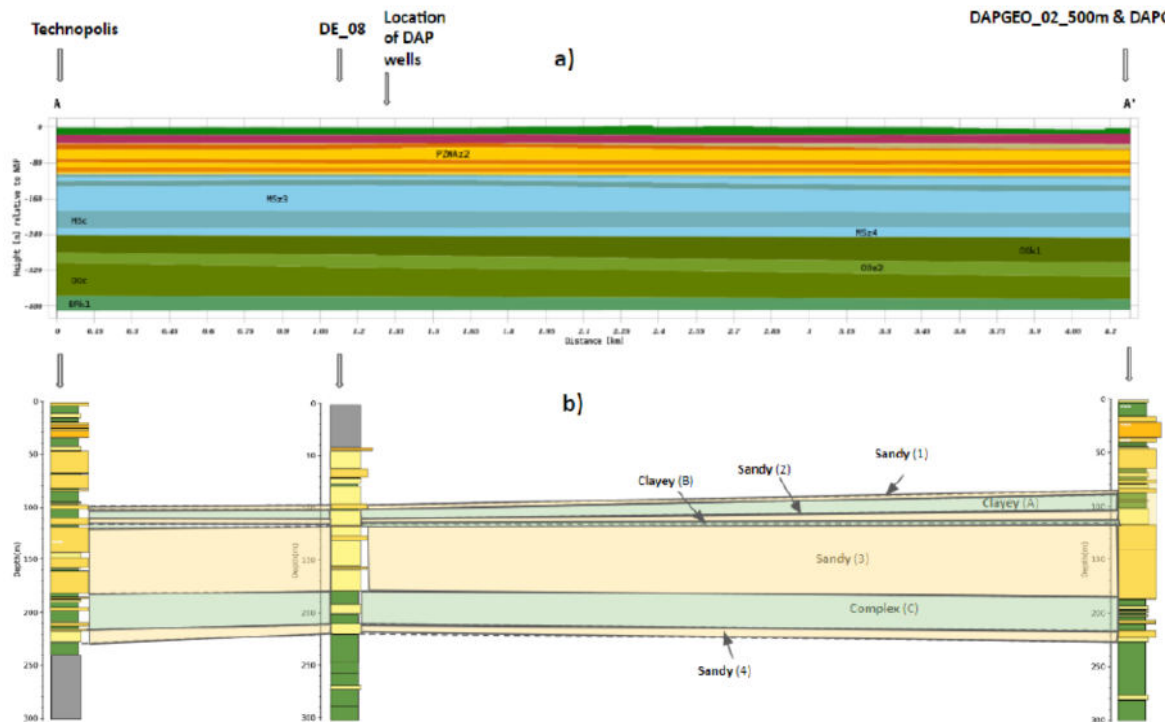


Figure 5. A cross-section of the Maassluis formation based on (Kingsnorth 2022) a) The REGIS II model, showing the model's interpolated interpretation of the subsurface from A (Technopolis) to the DE-08 at 1.12 km across and then to DAPGEO-02-200m and DAPGEO-02-500m at A'. The blue layer indicated the Maassluis formation with the lighter and the darker shading representing the sandy and clayey layers, respectively; b) An extension of the 1D lithological columns of Technopolis, DE-08, and DAPGEO-02-200m & DAPGEO-02-500m. The yellow layers correspond to the sandy layers and the green to the clayey layers

## Maassluis formation

A more in-depth analysis of the Maassluis formation has been performed based on existing drilling data and the REGIS II model. The results indicate four different sandy layers (1 – 4) and two different clayey layers (A and B), see Figure 5. The most optimal aquifers within the Maassluis formation are the sandy layers 2 and 3 (s2, s3) at a depth of 140 – 180 m at the location of the DAP wells. Its predominant lithology is coarse sand, however, finer sediment as well as clay content has also been identified.

However, there is a lack of data at the exact location of the HT-ATES and the resulting uncertainties regarding the exact thickness of the aquifer, geohydrological properties, and the thickness of confining layers (Kingsnorth 2022). Moreover, the Maassluis formation in this part of the Netherlands is known for its strong heterogeneity. Therefore, first, an observation well will be drilled to obtain less uncertain insight of the subsurface at the HT-ATES location. The drilling of the observation well is used to obtain the exact depth of the aquifers and a pumping test will be performed to get a good estimate of the hydraulic properties. This information is then used to optimize well design.

Table 2. Depth, thickness and horizontal hydraulic conductivity ( $K_h$ ) of the different formation layers up to a depth of 270 m at HT-ATES site in Delft. Hydraulic conductivity are literature values from REGIS (TNO 2017)

Top [m-sl]	Bottom [m-sl]	Type	Name	$K_h$ min [m/d]	$K_h$ max [m/d]
0	45	Complex	Urk / KreftenHeye		
45	50	Aquitard	Waalre	0.001	0.005
50	70	Aquifer	Waalre	10	25
70	80	Aquitard	Waalre	0.001	0.005
80	85	Aquifer	Waalre	10	25
82	109	Aquitard	Waalre/Maassluis	0.001	0.005
109	115	Complex	Maassluis	?	?
115	117	Aquitard	Maassluis	0.001	0.005
117	137	Aquifer	Maassluis (s1)	5	10
137	139	Aquitard	Maassluis	0.001	0.005
139	158	Aquifer	Maassluis (s2)	5	10
158	162	Aquitard	Maassluis	0.001	0.005
162	182	Aquifer	Maassluis (s3)	5	10
182	215	Complex	Maassluis	?	?
215	227	Aquifer	Maassluis (s4)	2.5	5
227	270	Aquitard	Maassluis/Oosterhout	0.001	0.005

#### 2.2.4. Well field locations

To limit costs and heat losses for transportation of heat, HT-ATES wells are usually best located near to main heat source or users of heat. As main source and main users are both located at TU Delft campus, current projected well locations at TU Delft campus are near the geothermal well, which is also the place where the current heat generator feeds the network and where the heat pump facility is projected, Figure 6.

Given the required storage volume of 400,000 – 800,000 m<sup>3</sup> and the aquifer thickness of about 40 m, the required distance between hot and cold wells needs to be around 200m to prevent thermal interactions/short circuit flow.

The total required flow rate for charging is about 320 m<sup>3</sup>/hr but could be higher. This requires 2-3 hot wells and 3-4 warm wells, depending detailed subsurface conditions. The flowrate per well will thus vary be in the range of 80 to 160 m<sup>3</sup>/hr. For discharging heat, the flowrate could be somewhat higher to supply the peaks. The wells will in any case be designed to be able to inject and extract largest flow rate. The mutual distance between individual wells of the same type is about 10m. Search areas for the wells are indicated on the map in Figure 6.

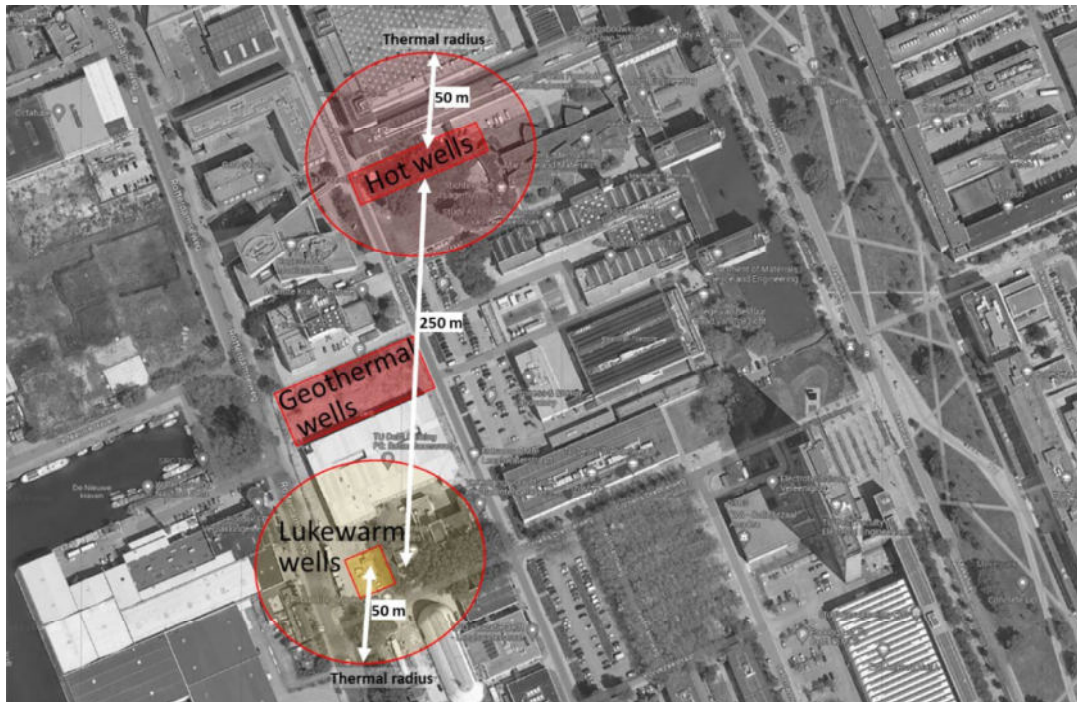


Figure 6. Intended HT-ATES well locations at TU Delft campus

### 2.3. HT-ATES system

The subsurface infrastructure includes 7 HT-ATES wells, an observation well (pilot well), fibre optic boreholes and possibly a borehole with EM-cable (EM-borehole). Their positioning and depth ranges are shown in Figure 7 and Figure 8 and detailed in the next sections.



Figure 7. Intended placement of the wells and boreholes

### 2.3.1. Pilot well

A pilot well (O1 in Figure 7) will be drilled at the site, located 20 m from the future production well. Next, a pumping test is performed to determine the transmissivity of the target aquifer and the confining layer. This provides a better insight into the potential flow rate in the aquifer and heat losses through the confining layers. Also, water quality samples will be taken and analysed. The pilot well will then be transformed into an observation well by injecting sand in the production filter and grout the casing (with e.g. bentonite pellets). A drawback of this construction is that there may be short circuit flow within the lang annulus of the filter screen, which could impact the water quality samples.

#### **Pilot borehole**

Before drilling the HT-ATES wells, a pilot borehole will be drilled into the target aquifer in order to better characterize the formation and detail the well design.

- Borehole log (visual observation by driller)
- Borehole logging tools (it is currently anticipated to perform EM, GR, SONO, LONO and SPR)
- Sampling (coring) of approximately 100 cm length and 10 cm diameter at 6 depths (2 per target aquifers)

#### **Temporary production filter for pumping test**

All 3 anticipated target aquifers will have a production casing (assuming the geology is in line with the forecast). The production casing is only intended for a pumping test in the exploration phase and will therefore be made of PVC. This saves costs compared to stainless steel, but makes the well not suited for tests at temperatures > 60 °C. It must therefore be backfilled before heat injection starts in the hot wells. The idea is that the PVC might get somewhat soft, but that the integrity of the clay seals will remain intact.

The PVC-casing must meet the following requirements:

- a KIWA-ATA to limit expedited migration of organic micro pollutants due to the higher temperatures.
- Preferably withstand a temperature up to 60 °C for the Hot Push Pull Test (HPPT).

In the waiting phase (after initial testing in Q4 2023 but before the HPPT in Q1 2025) a packer must be installed between the aquifers to prevent water quality disturbance due to short-circuit flow. Such leakages could have impact on the water quality and thus disturb water quality measurements during the HPPT which is scheduled after construction of the production casing.

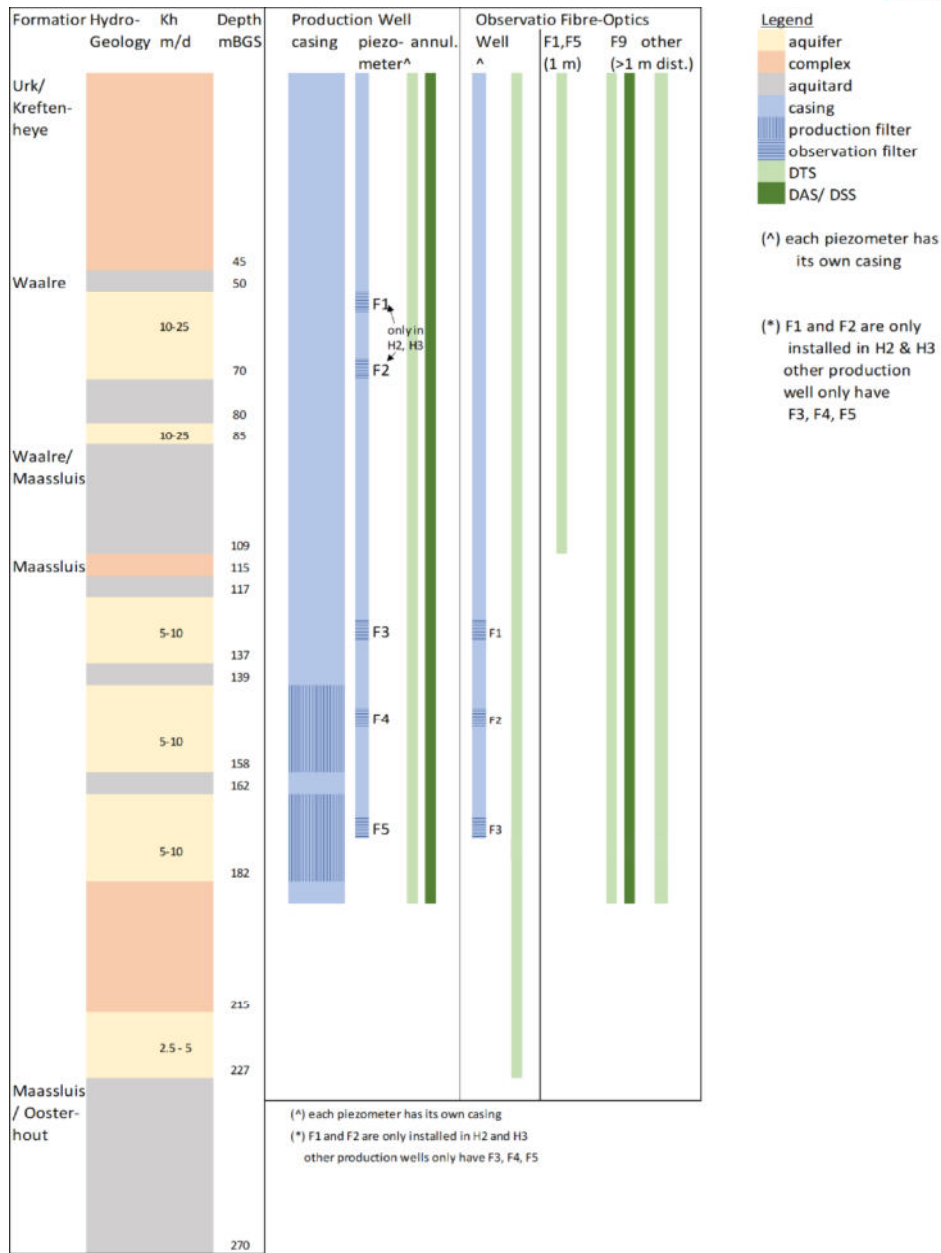


Figure 8. Depth plot of the production, monitoring, and fibre optic wells

## Piezometers in pilot borehole

The pilot borehole will have at least 3 piezometers (the number of piezometers is still under discussion), one in each target aquifer.

## Piezometer housing

The housing of the piezometer must meet the following requirements for the WP4.3 study on microbial communities:

- Electrical connection to operate pump (240 V). This may be a temporary connection during core-flooding experiments of several weeks anticipated in Q1 2024.
- Water quality sampling point.
- Temporary extra housing to put a core + pump.
- Sewage to discharge effluent of core. Alternative options are to return it in other layers through other piezometers or store it in a temporary buffer tank).

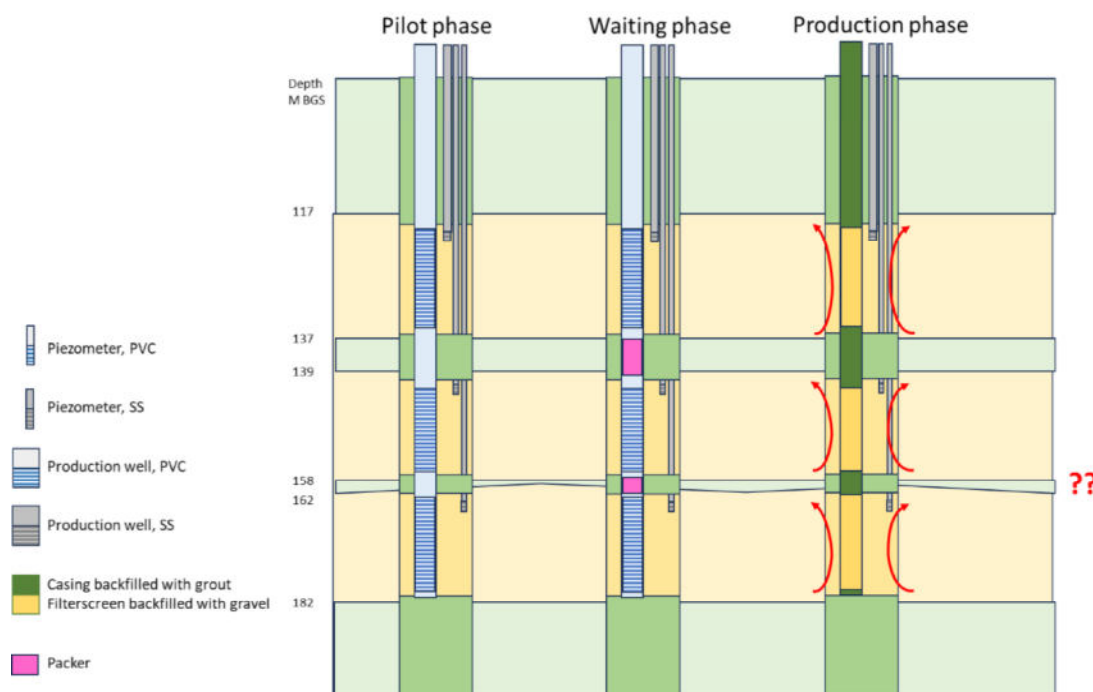


Figure 9. Illustration of the pilot borehole during the test phase (left), in the waiting phase after initial testing but before the HPPT (middle) and after backfilling the production casing after the test phase (right)

### 2.3.2. Production wells

#### Location and construction of the production wells

The hot wells are placed in an area with many existing buildings and a park (to the south) that will be landscaped in the coming year. There are thus only few options to place the wells. The lukewarm wells are located near the entry of a parking garage, also with little room for manoeuvre. In keeping with the thermal radius of approximately 50 m, the ‘hot’ and ‘luke warm’ well fields are located at 250 m distance. The distance between the production wells is approximately 10 m.



Two wells (L3, L4) will be drilled with an extended diameter in the target aquifer. These locations have the least impact on the surrounding area if they unfortunately collapse. L1 and L2 are close to a dike/ levy. W1 – W3 are close to a building. Apart from borehole expansion/ diameter, there will also be a comparison of different drilling muds. Finally, different casing materials will be compared: Stainless steel (SS), Glassfibre reinforced (GRE), vacuum casing (VAC). The vacuum casing will only be tested in the top 50 m, since its purpose is to validate its working in the field, isolation values can be measured in lab. A decision still needs to be taken on whether to put a GRE-casing in H1 or L2. To maintain operational flexibility, a GRE will only be placed in the hot well if the temperature rating exceeds 90 °C.

The drilling mud also needs to be determined. "Mud A" is a conventional mud that is based on bentonite with Polyanyonic Cellulose (PAC). Alternative muds indicated as "mud B" and "mud C" in Table 3 still need to be investigated.

Table 3: Intended characteristics of the wells

Drilling	Hot wells (90 °C)			Luke warm wells (60 °C)			
	H1	H2	H3	L1	L2	L3	L4
Borehole diameter	800 mm	800 mm	800 mm	>>800 mm (EDGW)	800 mm	>>800 mm (EDGW)	800 mm
Drilling mud	mud B	mud B	mud A	mud C	mud A	mud C	mud A
<b>Production filters</b>							
Screen depth		139-182	m BGS		139- 182	m BGS	
Casing diameter	300 mm	300 mm	t.b.d.	300 mm	t.b.d.	300 mm	t.b.d.
Casing type	SS/GRE <sup>^</sup>	Vacuum	SS	SS	SS/GRE <sup>^</sup>	SS	GRE

(\*) vacuum casing in top 30 - 50 m (3 -5 lengths), remaining depth range Stainless steel.

## Well housing

Due to low density of hot water in casing, water table in well could be several meters higher than surface level. In need of ESP failure or similar removing the well head will cause the well to freely flow with water. The detailed well design will therefore include a Heat Induced Production Prevention facility. Currently, we are anticipating placing the well head elevated from ground surface (on a structure referred to as the "Spanish Steps").

All well housing must meet the following requirements for the WP4 studies:

- Electrical connection (240 V)
- Water quality sampling point
- Connect to university Wi-Fi
- Space for a laptop
- Space to store logging equipment (e.g. DTS interrogator)

The well housing at H1 must meet additional requirements for flushing cores:

- Space to put a core
- Sewage to discharge effluent of core

The well housing at H1 must meet additional requirements for monitoring pump performance:

- Laptop with MS teams connection

### Piezometers in HT-ATES well

The HT-ATES wells will be equipped with piezometers (2 inch observation filters) in the target aquifer (F4 and F5) to facilitate ground water sampling and measure heads to monitor clogging. There is also a piezometer just above the target aquifer (F3) to allow interpretation of the pumping test in the leaky target aquifer. Filters F1 and F2 are only installed in H2 and H3 and are intended to measure heat induced buoyancy flow due to heat emission from the casing.

#### 2.3.3. Other boreholes

### Fibre optics boreholes

Two transects of fibre optic (FO) boreholes are anticipated from the wells H2 and H3 to the thermal radius of the stored hot water. The borehole at 1 m of the well (F1, F5) is meant to measure thermal losses from the casing and resulting heat induced buoyancy in the overburden. It is not extended into the target aquifer, in order to prevent damage to the production filter. The other FO boreholes are extended into the target aquifer. F9 (near the EDGW) also has DAS in order to measure the acoustic signal of different well development methods. Verticality well be measured in all FO boreholes to ensure a known distance of the instruments from the production wells.

(NB: transect near H2 is optional, subject to enough funding)

### EM boreholes (Optional)

TUD is currently evaluating to also place an EM-borehole close to the observation well. This is still subject to funding outside PUSH-IT.

#### 2.3.4. Monitoring equipment

The preliminary design of the monitoring equipment is outlined in the next paragraphs.

### Instrumentation of HT-ATES and observation wells

Table 4 shows what instruments will be placed in the production casing and piezometers. (PS: this is the intended instrumentation subject to that the cables and installation fall within budget).

Table 4: Intended instrumentation of the wells

Location	Amount	Instrument
Production wells	7x	Flow transmitter (m <sup>3</sup> /h)
	7x	Pressure transmitter at top of casing
	7x	Temperature transmitter at top of casing
Piezometers in production wells	15x (5x3 + 2x5)	Pressure transmitter
Piezometers in observation wells	3x	Pressure transmitter
Central location	1x	Atmospheric pressure transmitter

The piezometers require correction for the density of the water. The density depends on salinity and temperature. Therefore, TUD will perform periodic check of the salinity (EC) in piezometer casing. Also, they will double check if the temperature inside the piezometer casing follows the temperature profile as the DTS-cable mounted on the production casing by letting down a temperature sensor.

## Fibre optics cables

Table 5: Intended fibre optics cables

Location	Amount	Instrument
Production wells	7x	2x sm on casing for DAS + DSS
	7x	1x mm or 1x sm on casing for DTS
	2x	AH-DTS outside filter screen
	2x	AH-DTS inside filter screen
Observation well	1x	1x mm or 1x sm for DTS
FO boreholes	7x	1x mm or 1x sm for DTS
FO borehole D9 (next to EDGW)	1x	1x mm or 1x sm for DTS
	1x	2x sm for DAS + DSS
FO boreholes in D5-D9 transect	4x	Cross-hole ERT (optional, TUD decide in Q3 2023)
EM borehole	1x	optional, TUD decide in Q3 2023

sm = single mode cable

mm = multi mode cable

DAS = Distributed Acoustic Sensing

DSS = Distributed Strain Sensing. There are special DSS cables with gel that harden out after installation. Howeverm these have little additional value for this project. Therefore we anticipate standard DSS cables.

DTS = Distributed Temperature Sensing

AH-DTS = Active heating DTS. PS: it still needs to be checked if the AH-DTS works at the 60-90 Celsius temperature range.

## Fibre optics interrogator

The DTS cables will be permanently connected. Depending on the type of interrogator there will be 2 or 3 cable loops. interrogator must be placed in one of the wellheads or monitoring well and

### 2.3.5. Monitoring required to meet operational and/ or legal demands and contribute to PUSH-IT research

## Temperatures and flows

The following parameters will be recorded and stored every minute using the Data management system of Campus Real Estate:

- Flowrate
- Temperature of abstracted and injected water
- Heads in production casing and piezometer of all HT-ATES wells
- Heads in piezometers of observation well
- Amperage of all submersible pumps
- Voltage of all submersible pumps,
- Frequency of all submersible pumps
- Temperature of all submersible pumps

Table 6: From legal perspective recommended water quality parameters (Bloemendal et al 2021)

Additional parameters for HT-ATES Delft / PUSH-IT are mentioned in respectively *red* and *green*.

	Parameter	Baseline	Annually	Every 2 years
General	Temperature, pH, EC, O <sub>2</sub> , <i>redox potential</i>	X	X	
Macro-chemistry	Cl, HCO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub> , Br, DOC	X	X	
	Na, Ca, Fe, Mn, K, Mg, Si, NH <sub>4</sub> , <i>Sulfide</i>	X	X	
Gasses	CH <sub>4</sub>	X	X	
Trace metals	As	X	X	
	Ba, <i>Br</i> , Cd, Co, Cr, Cu, <i>F</i> , <i>Li</i> , Mo, Ni, Pb, V	X		X
Microbiology	ATP	X	X	X

Measurement locations for each monitoring round:

- Baseline: pilot well >> 4 filters/ samples
- 1 Hot well >> 1 filter/sample
- 1 Lukewarm well >> 1 filter/ sample
- Combined Lukewarm / hot water >> 1 filter/ sample
- Total: 7 samples. Baseline is conducted partly in 2023 (pilot well), partly in 2024 (hot and cold production well) and in 2025 (combined hot/lukewarm well).

### 2.3.1. Monitoring required for PUSH-IT research

The following section contains an overview of activities that are mentioned in chapter 4, that are most efficient to combine with the normal operation of the HT-ATES system.

The following parameters will be **recorded and stored** by the Civil Engineering and Geoscience department of TUD (CEG):

- Readings of fibre optics cables.
- AH-DTS measurements

Also, the following **water quality** sampling rounds will be conducted.

- Water quality samples for HPPT
- Monitoring of water quality in Hot Wells in 2025. The exact number of samples and sampling location needs to be confirmed in a detailed workplan.

### 2.3.2. Connection to plant

The wells will be connected to the heat exchanger after construction.

### 2.3.3. Operational testing

It is anticipated that the HT-ATES wells will start to deliver heat to the district heating network before the end of the project, so that it's operation can be tested.

### 2.3.4. Other requirements from the PUSH-IT to the TUD-HTO project

- CRE/ IFT: request permit for Hot Push Pull Test (HPPT) (see chapter 4.4)
- CRE: facilitate HPPT in hot well and pilot well in Q1 2025
- CRE: facilitate activities mentioned in paragraph 3.1 and 3.2 about societal engagement and legal requirements
- CRE: facilitate activities mentioned in paragraph 4.2 about control integration of the HT-ATES system with the district heat network and monitoring of buildings.

## 2.4. Stakeholders

There are several stakeholder groups which are of importance at the site in Delft. Each stakeholder (group) is listed and described in the following list:

- TU Delft
  - CEG: Faculty of civil engineering and geosciences  
Coordinator of the PUSH-IT project and doing the research on the HT-ATES system
  - CRE: Campus Real Estate  
Responsible for buildings and physical environment at the campus. Responsible for the heat supply of the buildings, so they will have a role in the design and operation. Furthermore, CRE also manages the subsurface infrastructure and physical environment. CRE is also a key stakeholder in identifying the well locations and trace for connecting pipes. CRE also owns and operates low temperature ATES (10-25 Celsius) at campus, of which some are close to the HT-ATES well, but in a shallower aquifer.
  - TDS: TU Delft services  
The holding that takes part in enterprises on behalf of TU Delft.
- GTD: Geothermie Delft  
GTD is a joint venture of TDS, Shell, EBN and Aardyn/Equans, who jointly own the geothermal well at the campus. On behalf GTD, Aardyn is the intended operator of the geothermal well. It is the intention that GTD will also own and have Aardyn operate the HT-ATES, as their operation is strongly interconnected. However, Equans is divesting Aardyn and its associated operations. As a result of this divestment, the role of Aardyn and Equans in activities related to their role in GTD is pending.  
Shell and EBN are able and willing to invest in the HT-ATES. Until the end of the realisation phase of the TU Delft, Shell and EBN agreed to equally contribute to the required costs of the HT-ATES (on top of the costs funded by the EC in PUSH-IT, and additional ~4.5 m€ is needed to make the system). In the course of the realisation it is expected that a new owner of Aardyn is willing to invest, to get everything aligned with GTD. If not, a separate entity owned by TDS, Shell and EBN will be made to own and operate the HT-ATES.  
Aardyn and Equans are both partner in PUSH-IT and currently have a special role in GTD and development of HT-ATES. They will carry out the required activities needed to realise the HT-ATES, within and outside PUSH-IT.
- Students and employees of TU Delft and other institutes on campus
- Neighbours

- There are some existing and to be built houses just outside campus near the HT-ATES wells.  
The to be built houses will also get an ATES system in a shallower layer.
- There are various companies at campus and just outside.  
There is one major real estate development at about 700m distance, at the other side of the canal. They will make a large LT-ATES in the same aquifer as the HT-ATES of the TU Delft.

## 2.5. Status Q2- 2023

At the start of the PUSH-IT project final detailed preparations are ongoing. Arrange the TU Delft internal administration and collaboration with Shell and EBN to be able to invest in the HT-ATES. Key in the preparations are the permitting and the drilling of the observation well:

- Although pre-approval has been provided, we need definitive approval by definitive permit procedure and show that the HT-ATES will not negatively affect other subsurface interests. We cannot start drilling before
- Due to strong known heterogeneity of target aquifer an observation well is drilled first. This observation well is needed anyway for the permit and gives detailed insight in the subsurface at the intended well locations which allows to optimize the well design. This is needed because within PUSH-IT also some new drilling methods will be tested/developed, so knowing the details of the subsurface conditions is key to properly manage and de-risk the drilling process.

Furthermore, well locations are finalized TU Delft internally.

The details on the PUSH-IT activities are described in the following chapters.

### 3. Public engagement, social benefits and risks

The goal of the Public engagement activities is to create societal conditions that support realising the proposed demonstrations as a pathway for achieving a just and sustainable energy transition. PUSH-IT's technology will ensure heating systems with geothermal heat storage are integrated in society, including both engagement from societal stakeholders and recommendations of how to include in legislative frameworks.

#### 3.1. Societal engagement

##### 3.1.1. Rationales for engagement

Effective community and public engagement are widely recognised as a critical component in the development of local energy projects, and sustainable and equitable energy transitions more broadly. Support of or opposition to projects and related technologies can be crucial to the success or failure of deployment, and engagement (or lack thereof) can influence levels of public support for projects (Shaw et al. 2015). While engagement may typically be designed to ensure social acceptance of projects, effective engagement might also improve decision-making processes (e.g. by incorporating local knowledge) and ensure that transitions are inclusive and just (Ryder et al 2023).

Engagement around novel technologies, with which the public may not be familiar, presents specific challenges and opportunities for engagement. Lack of familiarity with technologies such as geothermal storage may lead to ambivalence among publics (Boudet 2019), and there is an opportunity to shape perceptions through engagement practices. However, perceptions are also likely to be formed and shaped by broader social networks of peers, media outlets, as well as historical experiences (positive and negative) with technologies perceived to be similar (Westlake et al 2023).

##### 3.1.2. Approach to societal engagement within PUSH-IT

The relative similarity between the three technologies being developed within PUSH-IT mean that there are transferrable principles of engagement that can be readily applied across all sites. However, public perceptions of emerging technologies are also shaped by specific contexts, i.e. reflecting local socio-economic, cultural, regulatory and historic conditions, as well as the technology in question (Petersen et al 2015). As such, the plans set out here comprise both 'best practice' as well as more site-specific considerations.

In broad terms, 'best practice' principles for community engagement typically include Inclusivity, Timeliness, Transparency and Participation, all of which can be applied to PUSH-IT:

- **Inclusive**, accounting for a diverse set of voices and interests from across the community.
- **Timely**, allowing for early and sustained opportunities for meaningful engagement.
- **Transparent**, e.g. openness around project plans, intended outcomes and potential risks.
- **Participative**, involving deliberative modes of engagement where the public can be involved in and influence decision-making - rather than one-way provision of information.

Given that technologies and sites within PUSH-IT are fixed, there may be limits to the degree to which publics are able to influence projects, e.g. in terms of use of specific technologies, or in the siting of demonstrations. As such, it is important that site partners 1) consider opportunities for

the public to influence decisions and 2) are transparent about the potential (and limits) for the public to influence projects.

Engagement strategies and plans formulated at the start of projects can be affected by internal and external events (e.g. changes in project personnel, supply chain issues, delays in obtaining regulatory consent etc.), and may have adverse effects on engagement processes and outcomes (Gooding et al 2023). Recognising that effective engagement is a key component of PUSH-IT, efforts will be made to reflect on how emerging events will affect engagement, and to mitigate any negative impacts.

A key part of WP2 is the development of effective approaches to community and wider public engagement of relevance to projects beyond PUSH-IT. While the plans set out here can act as an initial framework, we expect the sites to generate learning about what works (and what turns out to be less effective) within specific contexts, as well as across the project as a whole. As such, the initial broad plans set out here can be expected to evolve over the course of PUSH-IT.

### 3.1.3. Activities

Building on the principles outlines above, the following tables set out engagement actions and responsibilities. This is structured across:

- **Pre-engagement activities** to establish site-specific context for engagement
- **Early engagement activities** focused on building infrastructure for engagement within the site, and making first contact with key stakeholders
- **Ongoing activities** to continue throughout the project

Table 7: Pre-engagement (Months 1-9)

Action	Detail	Responsibility
Identify site-specific stakeholders	Identify key individuals, residents, community groups and other organisations may have interest/influence over the site plans. It is likely that additional stakeholders may be identified throughout the course of the project  Identify key intermediary organisations whose established reputation, trusted social networks and expertise in engagement may help access parts of the community. May include local groups with interests in climate/energy but also other non-energy organisations.	WP4 (stakeholder mapping)
Review previous engagement activities and related issues	Identify successful/unsuccessful engagement activities from related local or regional energy projects across the sites  Identify historic or live local issues relating to geothermal technologies	WP2 (interviews)
Establish rationales for engagement	Articulate goals and priorities for societal engagement within the site – to include local goals as well as broader goals relating to the sector.  Consider how engagement might bring benefits to stakeholders. Stakeholders may be easier to	WP2 (interviews)



Action	Detail	Responsibility
	engage if the benefits of doing so (e.g. having agency to affect aspects of projects) are obvious.	

Table 8: Early engagement activities (Months 6-12)

Activity	Detail	Responsibility
Identify person(s) responsible for engagement at the site	Identify key individuals within the site with a core responsibility for engagement. This could be the same person identified as comms lead for the site. This person will work with the lead for the site from within WP2 (Societal engagement) and representatives from WP4 (Communication and dissemination)	WP1
Establish comms material	Site website, social media presence, etc.	WP4 / WP1
Identify single point of contact	Establish single point of contact for the site for incoming queries (email, phone and postal address)	WP1
Engage key stakeholders	Identify and brief key stakeholders (e.g. local government leaders) who may be well-placed to engage the public on behalf of the project	WP1 / WP4
Community launch	<p>Hold launch event to:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Provide information about the project, technologies, and processes within PUSH-IT.</li> <li>Understand views and concerns</li> <li>Understand how the community would like to engage in future</li> </ul> <p>This is particularly important for those sites who haven't had a history of engagement with the local community.</p> <p>Could take the form of a 'Town Hall' style event, publicised through multiple channels (e.g. leaflets, traditional media, social media) to reach multiple audiences</p>	WP1
Online webinar	Online webinar with Q&A to launch project to access wider audience	WP1 / WP4
Produce FAQs document	Create a set of Q&As on project details and refine using feedback from launch activity.	WP1 / WP4
Attend GEL webinar	Attend webinar organised by GEL (United Downs) on their experience with community/public engagement	WP1

Table 9: Ongoing activities [Months 6-48]

Activity	Detail	Responsibility
Establish drop-in facility for visitors	Create physical space to host ad-hoc group visits from schools, university groups, community groups etc.	WP1
Maintain local in-person presence	Identify local and remain visible at local events (e.g. agricultural shows, community days etc)	WP1
Maintain opportunities for two-way engagement	Identify frequent points for community engagement.  If calendar based (e.g. quarterly), we encourage information-sharing and engagement efforts to ramp up prior to any major site plan milestones and/or new development phases  Keep FAQs up to date	WP1
Maintain active comms	Maintain presence in local/regional media, including social media, community newsletters etc., providing updates on project progress and milestones	WP1 / WP4
Document engagement activities, feedback and responses	Track engagement activities, recording: Type of activity, date, purpose participant info, including number and diversity of participants engaged in-person and online Feedback from participants Site responses to participant feedback	WP1 / WP2 to provide template
Establish a community liaison group or employ a local community member to join the engagement team	Establishing a group of community members that liaises with the project team on a regular basis who can relay concerns and can further distribute information within the community is useful in facilitating inclusive practices and for ensuring the project considers the local community at each stage of the project. This might consist of local community members already interested in energy and climate issues and/or those who live or work closest to the site.	WP1/WP2/WP3
Determine what if any local benefits can be supported	In some cases, communities will benefit directly from geothermal energy projects. When they do not, it is important to ensure that they receive some benefit as a result of dealing with the impacts of development. This includes consideration of reducing impacts (i.e. a quieter drill, even if it comes at a higher price point), training and hiring local staff, accommodating reasonable requests to reduce project impacts, acts of good will (e.g. providing compensation or a gift in particularly inconvenient circumstances), or direct economic benefits through community funds that are designed to support local community organizations in addressing self-identified community issues. It is	WP1 supported by WP2

Activity	Detail	Responsibility
	important that funds are actually going to support community causes and/or those directly impacted, and it is important that the expectations set for benefits are realistic and there is follow through.	

### 3.1.4. Site contributions to WP2

Milestones and deliverables relating to societal engagement (Task 2.1) are illustrated below.

#### Societal engagement: Deliverables & milestones

- M2.2 Baseline survey, interview and focus group data collected and analysed [Short report: Month 20]
- M2.6 Follow-up survey, interview and focus group data collected and analysed [Short report: Month 42]
- M2.7 Cross-site comparative analysis of risk perceptions & effective engagement strategies [Report: Month 46]
- D2.4 'Best practices' recommendation for engagement and acceptance of geothermal heat storage & future energy interventions [Report: Month 40]
- D2.5 Final work package report summarizing societal aspects of geothermal underground storage & recommendations for developing spatial multi-criteria analysis in sustainable energy development (T4.5) [Report: Month 48]

	2023				2024				2025				2026			
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
WP1 sites																
Internal survey																
Internal interviews																
Site visits <sup>1</sup>																
Regional surveys																
Monitoring & evaluation																
Milestones							M2.2							M2.6	M2.7	
Deliverables													D2.4			D2.5

<sup>1</sup> Two site visits across project as a minimum from WP2 representatives working on societal engagement

Each site will contribute towards Task 2.1 through the following actions:

Table 10: activities

Who	What	Where	When
TUD	Complete internal stakeholder survey	Delft	2023 Q2, 2025 Q4
TUD	Participate in follow-up internal interviews		2023 Q2-Q3, 2025 Q4
TUD	Input into design of baseline and follow-up regional surveys		2023 Q4, 2025 Q4
TUD	Host site visits from WP2 representatives Two site visits as a minimum, although additional site visits could be planned as required around key site milestones. Site visits will be timed to participate in, observe and collect data at key engagement		2023 Q4, 2025 Q2

Who	What	Where	When
	activities (e.g. launch event, town hall meeting, milestone event)		
TUD	Monitoring meetings with WP2 to document stakeholder activities and stakeholder feedback/responses		Throughout project

## 3.2. Regulation and governance

### 3.2.1. Background and Rationale

The goal of PUSH-IT WP2 is to create societal and regulatory conditions that support realisation of the proposed demonstration projects as a pathway for achieving a just and sustainable energy transition.

Task 2.2, Regulation and Governance has as main objective to evaluate and reduce the potential regulatory barriers to project success. As high-temperature underground storage technologies are not standard in both the geothermal industry and built environment, there is a need to understand how regulation and licencing procedures are applied in the different countries and project sites and what improvements could be made to ensure consistent and fit-for-purpose regulations.

Specifically, and related to HT-ATES technology and the local conditions in Delft, we aim to review the current regulation in the region, identify gaps, inconsistencies, and difficulties in the planning permission application and during the different stages of the project development (in consultation with the main stakeholders) that can hold back the development of HT-ATES projects, and, finally, compare with the conditions in other countries, and specially with those relevant in the other HT-ATES site within the PUSH-IT project (Berlin, Germany) and provide recommendations for improvement.

### 3.2.2. General overview of activities

As part of Task 2.2 the regulatory landscape relevant to the HT-ATES project in Delft will be reviewed, evaluated and compared with the conditions in other European countries, with the objective of developing recommendations for future regulation of high-temperature heat storage systems in geothermal reservoirs and to improve the licencing procedure at the selected sites.

The general approach will include the following activities:

1. Desk-based review of existing regulations at pertinent administrative level(s) for high temperature aquifer thermal energy storage (and relevant related activities as part of the project) with focus on:
  - o Legal obligations:
    - § Temperature limits.
    - § Well placement and drilling.
    - § Monitoring and control.
    - § Abandonment and dismantling.
  - o Enabling aspects:
    - § Guidelines, best practices, masterplans.
    - § Public databases.
    - § Supporting policies. Subsidies, incentives.
    - § Decision-making tools.

- § Groups of experts.
  - o Workflows for project development, including permitting procedure and timeline of activities.
- 2. Identification and mapping of potential stakeholders related with the HT-ATES project in Delft. Initial stakeholders identified include:
  - o The province of South-Holland, that constitutes the governing authority for HT-ATES.
  - o The Ministry of Infrastructure, who develops the laws for the uses of the subsurface and the related environmental.
  - o IF technology, consultant, who has requested all the permits for HT-ATES in the Netherlands on behalf of the owner.
- 3. Together with site leaders we will develop targeted interviews and questionnaires to evaluate different aspects of the regulatory landscape in Delft. At the same time we will incorporate lessons learned during the Delft project development into the analysis.
- 4. Planning of site visits to undertake the interviews in consultation with Delft site leaders, and coordinated with other activities in WP2, especially with those in task T2.1. In parallel online questionnaires will be sent to relevant stakeholders and players in the project to compliment the site-specific information and data obtained in the desk-based review.
- 5. Visit to Delft for collection of site-specific data, including interviews and site visits to complement information of the review and obtain inputs for further comparison and recommendations.
- 6. Identification of barriers and drivers, gaps, uncertainties and inconsistencies in the existing regulatory framework relevant to the HT-ATES in Delft and comparison with regulatory practices across the study sites (specifically relevant to HT-ATES in Berlin, Germany).
- 7. Developments of a general set of recommendations for the regulation of high temperature thermal energy storage facilities and identification of how the general recommendations compare with the current framework in Delft.

### 3.2.3. Integration with other activities in WP2 (Tasks 2.1 and 2.3)

One of the objectives of PUSH-IT is to enable joint decision making of citizens, regulatory and operators to increase social acceptance. The project through a joint approach in the activities in WP2 aims to develop a set of good practices by comparing approaches between the different sites and to avoid barriers related to societal opposition, such as objections from the general public to planned projects. Together with WP2 T2.1 we will evaluate channels for public enquires and objections to projects in the Netherlands, and we will identify previous experiences related to geothermal and energy projects in the past to extract lessons from those actions and how (if it is the case) influenced the regulatory framework.

We aim to understand the impact of national policies on economic viability of high temperature energy storage. As countries are at different stages of decarbonisation, we will identify and evaluate the key policies developed by government authorities in the Netherlands and what initiatives have been used to encourage or support any behavioural and/or technological change for the adoption of greener energy technologies.

By linking with WP3 we will target some relevant questions:

- a. How national policies support/impede adoption of geothermal / heat storage technologies?

- b. How have policies changed over time as the Netherlands progressed on their decarbonisation journey?
- c. What policy changes would be required (or are recommended) for geothermal/ thermal storage to expand in the Netherlands and how these interact with the interests and regulatory conditions of other subsurface users (for example groundwater)?

### 3.2.4. Outline Workplan and main activities relevant to Delft (with approximate timescale)

1. **Desk based review** of regulatory frameworks in Delft and the Netherlands for aquifer thermal energy storage (ATES) and additional relevant regulation (Q2 2023 – Q1 2024).
2. **Collection of Delft site-specific data**, including site visit to the Netherlands for interviews with relevant stakeholders (Q3 2023 – Q4 2024).
  - a. Coordination with Delft site leaders to provide a fast-track channel for inputs of information of lessons learned during project development, including the permitting procedure, in order to identify barriers and difficulties as lessons learned that will be assessed for future recommendations.
  - b. Identification of stakeholders and development of targeted interviews in coordination with WP1 Delft site and the other WP2 leaders.
  - c. Interview and collection of site-specific data obtained directly from selected stakeholders involved in the process and related to
    - i. Current permitting / regulatory process.
    - ii. Identification of gaps / uncertainties/ inconsistencies.
    - iii. Suggestions for improvements.
    - iv. Policy mechanisms that support / hinder thermal energy storage.
3. **Comparison of regulatory practices** with other countries (especially those relevant to the other HT-ATES site in Berlin, Germany) and development of a set of **recommendations** (2024 Q4 – 2025 Q4).
4. **Reporting:**
  - a. Review of State of the Art. **D2.1** (feeding into T4.2) (2024 Q3 – Q4).
  - b. Best practices recommendations. **D2.2** (2026 Q1 – Q2).
  - c. Final WP2 report. **D2.5** (2026 Q3 – Q4).

Table 11: activities

Who	What	Where	When
BGS	Desk Based review	Remote	Q3 - Q4 2023
BGS	Collection of Delft site-specific data,	Delft	Q3 2023 – Q4 2024
TUD/BGS	Plan/ organise meetings for researchers with key-stakeholders	Delft	Q3 - Q4 2023
BGS	Comparison of regulatory practices	Remote	Q4 2024 – Q4 2025
BGS	Reporting: Reviews state of art Best practices recommendations Final report	Remote	Q3 - Q4 2024 Q1 - Q2 2026 Q3 – Q4 2026



- Development of an open-source simulation and optimization tool specifically designed to simulate the techno-economic performance of the heating system. This tool will enable the optimization of LCOE and CRC by incorporating heat storage in geothermal reservoirs.
- Identification of the LCOE and carbon emissions levels associated with the existing heating system without heat storage, which will serve as the reference point for comparison. The validity of this reference system will be discussed and analysed.
- Application of the simulation and optimization tool to the Delft site to validate its predictive capabilities for LCOE. Based on the optimization results, recommendations will be proposed to reduce LCOE and CRC, ensuring a more sustainable and cost-effective system.
- Assessment of quantitative risks associated with business case developments. By considering the range and probability of technical and economic parameters, the model will generate a probability distribution of LCOE, offering detailed insights into the economic performance and facilitating effective risk management.
- Based on the model's outputs and recommendations, a pathway to a future decarbonized district heating system in Delft that is both cost-effective and sustainable will be created. This pathway will serve as a roadmap for implementing the necessary changes and improvements.
- Re-evaluation of the LCOE and CRC for each demonstration site after the implementation of recommended measures. This evaluation will help identify the impacts of local energy policies on further LCOE reduction, such as taxes and subsidies. Input from T2.2 will be considered to propose alternative policies that can further enhance LCOE reduction.

Through the development and application of this model, the aim is to provide site owners with valuable insights and guidance on achieving sustainable practices in a financially responsible manner, while also facilitating ongoing assessments and improvements to optimize energy systems.

Table 12: activities

Who	What	Where	When
UU	Development LCOE generating model	remote	Q1 2023 – Q4 2024
UU	Techno-economic data collection from the Delft site	Delft, remote	Q3 2024- Q2 2025
UU	Validation model using data from Delft site	Remote (using data from site)	Q3 2024 – Q2 2025
UU	Identify LCOE and carbon emission level and reduction strategies	remote	Q1 2025 – Q4 2025
UU	Risk assessment	remote	Q3 2025 – Q1 2026
UU	Reporting LCOE Model documentation LCOE reduction report & risk assessment Final report	remote	Q2 2026 - Q4 2026

#### **Deliverables** [month of delivery]

**D2.2.** Open-source framework for LCOE and CRC assessment code and documentation [M28]

**D2.3.** Risk assessment and LCOE reduction report [M36]



**D2.5** Final work package report summarizing societal aspects of geothermal underground storage & recommendations for developing spatial multi-criteria analysis in sustainable energy development (T4.5) [M48]

### 3.3.1. [Links to other sites](#)

In addition to Delft, the developed model will be applied to PUSH-IT sites Darmstadt and Bochum. By comparing the simulation and optimization results on LCOE and CRC in different sites, insights will be gained on the market position of different underground seasonal thermal energy storage technologies.

## 4. Enabling technologies

The HT-ATES wells and operational monitoring equipment is described in [paragraph 2.3](#). This chapter describes what information the Delft site will provide to WP3 activities. The interpretation of the data and evaluation of the enabling technologies is part of WP3 and are hence not described in this report. The following paragraphs only focus on what needs to be done in Delft.

The goal of enabling technologies is to develop, apply and evaluate technologies required for the successful application of heat storage in geothermal reservoirs. These will be general technology developments required for and directly applied on the Delft. These serve to reduce costs, improve monitoring and control to reduce energy needs, ensure low environmental impact and optimise system performance.

Key technological advances resolving barriers for implementation of heat storage in geothermal reservoirs, including in drilling and completion, environmental impact reduction and water quality control, energy system control and performance optimisation.

### 4.1. Drilling and completion

#### 4.1.1. Vibration free drilling of Temporary Outer Casing

The aim is to select what methods to install temporary outer casings (TOC) (typically to depth of 10 – 30 m BGS) produce the least amount of vibrations and thus risk to nearby buildings when constructing HT-ATES wells in the built environment.

Table 13: activities

Who	What	Where	When
TUD, GBBH	Monitor vibrations in subsurface	DAS cable, 5 m distance from TOC's	Construction (Q3 2024)

#### 4.1.2. Borehole diameter expansion (& 3D geometry monitoring)

The aim is to expand the diameter of the borehole in the target aquifer, preferably using an expandable jet (van der Schans et al 2022). This requires monitoring during the EDGW drilling, but also information beforehand about the formation properties to compute the maximum diameter of a stable borehole. Also, the borehole diameter needs to be monitored during diameter expansion.

Table 14: activities

Who	What	Where	When
TUD	Geological layering (drilling log, EM-log)	Pilot borehole	Pilot borehole (Q3 2023),
TUD	3D-profile of borehole using acoustic signal	EDGW wells	Construction (Q3 2024),
TUD, GBBH	Volume of soil excavated and material brought into borehole	EDGW wells	Construction (Q3 2024),
TUD, GBBH	Drilling parameters such as ROP, fluid loss	EDGW wells	Construction (Q3 2024),

#### 4.1.3. Alternative drilling mud and development methods

The aim is to identify and test drilling muds, that are not used for conventional water wells, and that either enhance well bore stability or cause hydraulic resistance when the drilling mud is not entirely removed during well development. Also, it needs to be ascertained that the drilling mud will not promote the growth of microorganisms that may clog the well.

Table 15: activities

Who	What	Where	When
GBBH	Prepare agreed mud properties and maintain them during drilling	Pilot & production wells	Pilot borehole (Q3 2023) & Construction (Q3 2024),
TUD, GBBH, KWR	Monitor mud properties: density, viscosity, take mud samples	--,,--	Pilot borehole (Q3 2023) & Construction (Q3 2024), daily in overburden, every 1 hour while in target aquifer
--,,--	Monitor mud application: type, weight en mixing method of additives. Also record dumping of mud and removal of solids.	--,,--	--,,-- (every batch)
--,,--	Monitor drilling parameters: ROP	--,,--	--,,-- (every minute)
--,,--	Head in casing/ mud pit	--,,--	--,,-- (every second)
--,,--	Water supply to mud pit (m3)	--,,--	--,,-- (every minute)
--,,--	Flow rate and head in casing and piezometers during pumping test (to determine skin-factor)	--,,--	Pilot borehole (Q3 2023) & Construction (Q3 2024), before, during, after well development
TUD	Dampening of Acoustic signal in formation during development of EDGW, measure with DAS cable	=/- 5 m from EDGW in target formation	Construction (Q3 2024), during acoustic stimulation

#### 4.1.4. ESP suited for frequent switching and flowrate adjustment

The aim is to test ESPs that are suited for high temperatures and that can be adjusted frequently to exactly the desired flow rate.

Table 16: activities

Who	What	Where	When
TUD	Install ESP with Frequency converter (FC)	At least 2 production wells	Construction (Q3 2023)
TUD	Record input signal (FC) and flowrate	At least 2 production wells	Operation (2025-2026)

#### 4.1.5. Well Pump Performance Monitoring

The aim is to test pump performance monitoring using a temperature and piezo-electric sensor (prototype) installed on the ESP.

In addition, other methods to monitor pump performance will be tested such as:

- Electrical Signal Analyses (ESA) based on evaluation of Amperage, Voltage, Frequency and temperature data of the pump over time.
- distributed acoustic sensing (DAS) and/or distributed temperature sensing (DTS) (will be examined in further course of the project)

Table 17: activities

Who	What	Where	When
TUD	Well housing with 240 V connection, space for extra laptop in well housing. Laptop/PC with internet connection, TeamViewer or similar for remote access	1 hot well	Design of well house (Q3 2023)
TUD	Communicate to F-IEG how much space there is for the sensor in the casing (to design the setup) PM: F-IEG will design dimensions so that there will be enough clearance for safe installation and removal.	1 hot well	Design of well house (Q3 2023)
F-IEG,	Decide whether to use 1 or 2 sensor units (in case 1 fails)		Design (Q1 2024)
F-IEG, TUD	Install sensor unit on tubing above pump	1 hot well	Installation of pump (Q3 2024)
F-IEG,	Periodically check data to see if sensor is functioning properly	1 hot well	Operation (2025-2026), every @ weeks
TUD	Retrieve sensor unit from tubing above pump and send it to F-IEG	1 hot well	During maintenance of pump (2026?)
F-IEG, TUD	Decide whether to test other monitoring methods (DAS, DTS, ESA)		Design (Q1 2024)
TUD	DAS, DTS cable on well	1 hot well	Installation of pump (Q3 2024)
TUD	Periodically read DAS, DTS cable on well	1 hot well	Operation (2025-2026), every @ weeks
TUD	Include registration of pump temperature, amperage, frequency, flowrate in SKADA system	1 hot well	Design (Q4 2023)

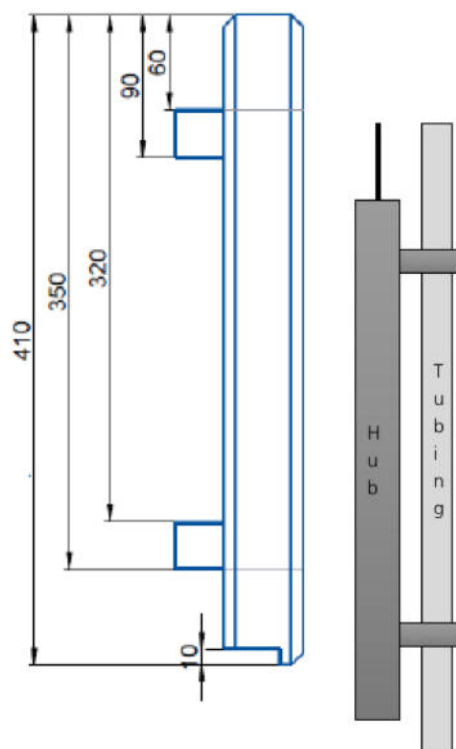


Figure 10. Dimensions of the sensor prototype (left) and its installation on the pump tubing (right). Real dimensions will be designed to fit in particular for the Delft well casing

#### 4.1.6. Isolation of casing (vacuum casing, isolation-grout)

The aim is to identify and test different methods to thermally isolate the well casing. Anticipated methods to be tested include a vacuum casing and thermally isolating grout. The Delft site results will be analysed using numerical analysis.

Table 18: activities

Who	What	Where	When
GBBH	Install vacuum casing	In top 50 m of 1 hot well	Construction (Q3 2024)
GBBH	Apply isolation grout in annulus	In top 50 m of 1-2 hot wells	Construction (Q3 2024)
TUD, GBBH	Install DTS-cable near the well in overburden	1, 5 m distance from hot wells	Construction (Q3 2024)
TUD	Monitor DTS-cables	--"	Operation (2025-2026), monthly

#### 4.1.7. Adjust design flowrate to temperature

The aim is to test whether the design flowrate is low enough to prevent excessive clogging of the well by particle transport from the formation.

The activities (measurements) overlap with the investigation of clogging due to other processes (paragraph 4.3) and performance monitoring (paragraph 4.4).

Table 19: activities

Who	What	Where	When
	Measure flowrate, heads in well, compute specific volume flux >> see paragraph 4.4		
TUD, KWR	Consider particle counting during HPPT >> influence of temperature on particle transport	1 or 2 wells	Construction (Q3 2024)
TUD, KWR	Perform particle counting during operation at various abstraction rates (and temperatures) >> influence of flowrate on particle transport	1 or 2 wells	Operation (2025-2026), for several days during this period

#### 4.1.8. Heat induced production prevention (HIPP)

Due to the low density of hot water in the HT-ATES well casing, the water table in the well can increase above surface level, even if the ambient groundwater was not artesian. This may cause Heat induced production prevention (HIPP). Therefore, the production casing will have a valve and a junction to add a temporary casing on top of the production casing.

The aim is to evaluate if the existing solutions to HIPP function as anticipated.

Table 20: activities

Who	What	Where	When
TUD, GBBH	Include HIPP facility in well head design	1, 5 m distance from hot wells	Design (Q4 2023)
GBBH	Record how long it takes to install/ de-install the HIPP. And record any problems encountered during maintenance	--"	Operation (2025-2026), during maintenance

#### 4.1.9. Tool to design and monitor mud application

There are numerous tools to design and monitor mud pressures during hydrocarbon drilling applications. However, these are not suited for reverse circulation drilling of more shallow groundwater wells.

The aim is to develop an application to design and monitoring mud pressures based on reverse circulation drilling in groundwater wells. Monitoring will include periodic computation of well bore stability based on measurements of mud pit level, mud density and fluid loss.

Table 21: activities

Who	What	Where	When
TUD, GBBH	Use mud-application tool to calculate the minimum required mud density and elevation of mud put	All HT-ATES wells	Construction (Q3 2024)
TUD, GBBH	Apply the tool during construction	At least 1 HT-ATES well	Construction (Q3 2024)

## 4.2. Control & Integration

### 4.2.1. Control

The first step of the development of the controller algorithms, the preparation phase, will be the common definition of the use case. In this step, it will be decided which control objectives are specifically be developed for the TU Delft pilot site, and which sources of flexibility will be utilised by the smart control algorithms. Concretely, the involved project partners (VITO, F-IEG and TUD) will select a few buildings which are then used by the controller, e.g. in a specific network branch, and which storage systems, and heat production equipment will be involved. It is decided what the controller should specifically achieve, e.g. shaving off power consumption peaks, optimize the temperature levels in the selected branch, or optimization of the CHP operation. The selection depends on the specifics of the network, accessibility of buildings and measurement data, location and timing of the HT-ATES system implementation etc.

Once the proof-of-concept case study is defined, VITO and F-IEG will assess if additional sensors and actuators are needed to be able to develop the control algorithms and to run and analyse the test campaign, as well as additional communication equipment. These additional hardware and software components will be installed in the demo site. Meanwhile, a detailed test plan will be discussed in collaboration with TUD.

Once there is enough measurement data available, development of the control algorithms can start. These algorithms will make use of grey and black box models, that describe the behaviour of the network infrastructure involved. VITO will develop the control algorithms for demand response (controlling the buildings and the return temperature), as well as the supply temperature to the selected network branch. F-IEG will develop the control algorithms for the production site, meaning the control of the heat production as well as the control of the supply temperature of the selected network branch.

When the control algorithms are developed, they will be integrated in a cloud-based control system. After this, communication tests will be performed: is the controller receiving the measurement data it needs and is the controller able to send control signals to the demo network? When this all works well, the controller will be tested offline first (without sending control signals to the demo network), after which the first online tests will take place.

In the first winter of the project, measurement data will be collected. In the second winter, the controller functionalities will be gradually tested, analysed and improved. Only in the third winter of the project, we expect to be able to test the full controller functionalities.

The final task is the evaluation of the potential for the large-scale rollout of the controller by means of a co-simulation environment (TDA).

Table 22: activities (PS: details of involvement of CRE need to be resolved)

Who	What	Where	When
VITO, F-IEG, TUD	Use case definition	N/A	Q3, 2023
VITO, F-IEG, TUD	Hardware and software setup and integration	Selected network branch	Q4, 2023
VITO	Data collection for controller development and benchmarking	Selected network branch	Q2, 2024
VITO, F-IEG	Development of first version of control algorithms	N/A	Q3, 2024
VITO, F-IEG, TUD	Testing and first (partial) controller tests	Selected network branch	Q2, 2025

Who	What	Where	When
VITO, F-IEG	Analysis of first controller tests and development of improved control algorithms	N/A	Q3, 2025
VITO, F-IEG, TUD	Testing of fully functional controller tests	Selected network branch	Q2, 2026
VITO, F-IEG	Analysis of the performance of the controller	N/A	Q4, 2026
TDA	Potential evaluation of large-scale roll-out	N/A	Q4, 2026

#### 4.2.2. Surface Facilities and Integration

The surface installations will provide the housing of heat exchangers, filter rooms, pumps and additionally provide room for a possible heat pump. The HT-ATES will be connected through piping with the heat exchangers in the surface facility after construction. Depending on the final design, next to the connection to the HT-ATES, the surface facility will be connected to heat pump plant as well as the CHP on the Delft Campus and the DAPwell.

In order to start construction of the surface facilities permitting will need to be obtained from the municipality. The ease of obtaining the construction permit will largely depend on the final location and surrounding buildings.

After the construction permit is obtained the surface plant and piping will be constructed by Aardyn/Equans in coordination with the TUD-CRE. Coordination with the TUD-CRE is needed as there is a deficit of space both, in the area close to the HT-ATES wells, as well as the availability of subterranean space.

Aardyn will design the surface facilities where needed with the help of third parties like IFT. Aardyn is experienced in the design of surface facilities for geothermal wells, HT-ATES systems are related to geothermal surface facilities however there are differences. Aardyn will optimize the surface design for HT-ATES system to allow for high efficiency of maintenance as well as high durability and safety. This means that most systems will be made redundant, allowing for a few as possible single points of failure.

Additionally, the design will need to allow for integration with other parts of the campus heating system, among others the DAPwell and CHP. Furthermore, the design has to facilitate experiments under the PUSH IT program where necessary.

During operation Aardyn will maintain the surface facilities with both on side personnel as well as external monitoring systems.

Who	What	Where	When
Aardyn, TUD, GBBH, GTD	Connection plan, piping plan	N/A	Design Q1, 2024
Aardyn, TUD	Design of surface facilities	N/A	Design Q2, 2024
Aardyn, TUD	Construction permit	Municipality of Delft	Design Q3, 2024
Aardyn, TUD	Construction of piping	HT-ATES wells area	Construction Q4, 2024
Aardyn, TUD	Construction of surface facilities	t.b.d.	Construction Q1, 2025
Aardyn, TUD, GTD	Integration with other energy systems	N/A	Construction 2025



Who	What	Where	When
Aardyn	Maintenance of surface facilities	t.b.d.	Operation 2025-2026

### 4.3. Water Quality and environmental effects

#### 4.3.1. Main concerns

Injecting water with different temperature into a deep, undisturbed aquifer can result in chemical reactions that are triggered and enhanced by microorganisms. These reactions include corrosion of the casing as well as biogeochemical perturbations in the near-well space causing possibly clogging and loss of injectivity/productivity. It is planned to investigate the use of water treatment in order to avoid detrimental consequences (possible use of CO<sub>2</sub> or of hydrochloric acid).

However, the Waallre aquifers are not drinking water quality aquifers and are already used for ATEs systems. Thus the possible thermal perturbation at the PUSH-IT-ATES location does not represent a public health risk.

#### 4.3.2. Work organization for task 3.3.2 (in reservoir)

#### Geochemistry

When the monitoring well will be drilled and after filter development and clear flushing of the well, a first complete baseline of the chemical components, fluidphysical parameters and microbial community will be obtained. On-site measurements include temperature / pH / Eh (redox potential) / dissolved oxygen / ferrous iron Fe(II), bicarbonate, and sulfide. Gas and liquid samples will be collected. In the water, laboratory analyses on major, minor, and trace elements will be performed (Ca, Mg, Na, K, Cl, SO<sub>4</sub>, Si, Li, F, Br, Mn, Fe-total, Al, TOC (total organic carbon), phosphate PO<sub>4</sub>, nitrate NO<sub>3</sub>). Sampling and monitoring of the parameters will be done by GFZ with their mobile fluid monitoring unit (FluMini).

During all tests the fluid monitoring will be performed, and samples collected. The frequency of sampling depends on the phase of the operation of well testing (higher frequency at the beginning of the test, then reduce the frequency), on the phase of the cycles, and might be different for hot and warm wells.

To be resolved: include measurement of sulfide S(-II), (= request of BRGM)

#### Numerical simulations

Preliminary numerical simulations will be done using chemical compositions of waters from other sites exploiting the same reservoir and already available. This modelling might be useful to anticipate the possible major geochemical changes induced by ATEs. Conservative simulations at equilibrium at different temperatures will give indications to formulate recommendations on efficient frequency (sufficiently frequent to capture the evolution, reasonably spaced in time to limit costs)

BRGM will use available data (section 2.3.6) to perform some preliminary simulations using the code PHREEQC and the thermodynamic database Thermoddem (<https://thermoddem.brgm.fr/>) to propose a monitoring protocol for hot and warm wells. A dedicated meeting will take place in October 2023 (preliminary simulations with approximate data that reflect the current knowledge).

When the test drilling will be done in the autumn 2023, new characterization (fluids and rocks) will be done by TUD. BRGM will then update the geochemical simulations and the monitoring recommendations accordingly. Simulations will be made at equilibrium first, considering different temperatures (in the expected ranges: 75-90°C for the hot well and 50-55°C for the warm well) in

order to mainly estimate the dissolution/precipitation risks in the near-well zone. By considering equilibrium constraints for geochemical reactions, the numerical results correspond to the maximal potential values (maximum geochemical risk). When possible, uncertainties will be characterized and taken into account.

Depending on first results and measurements, new simulations might be refined considering the temperature gradients obtained in TH simulations and considering the kinetic constraints on mineral dissolution/precipitations. This will give further indications concerning the risks of precipitation/dissolution in the near-well. Additional simulations will be performed in order to investigate the benefit provided by different water treatment (CO<sub>2</sub> or hydrochloric acid at different concentrations) to reduce the potential risks of pore clogging. We will reflect on the potential of CO<sub>2</sub> dosing in HT-ATES based on a CO<sub>2</sub> -dosing field test for concentrate injection and PHREEQC modelling and evaluate the relevant differences in applying CO<sub>2</sub> -dosing to HT-ATES and consider the potential of sustainable alternatives using equilibrium analysis. This will be a collaborative work between KWR and GFZ. It will be launched once data will be available (end of 2024, 2025).

Until the end of the project, BRGM will update the geochemical simulations considering the results of water quality measurements and new questions that will arise. The frequency of meetings to share expertise and discuss monitoring/simulations will be adjusted to the needs.

### **Microbiology**

The first step will be a microbiological characterization of the reservoir (baseline) using the pilot borehole. One sample will be collected when there is still drilling mud affection and the two more will be collected after the well is clear from drilling mud as will be monitored by the physico-chemical parameters as measured by FluMIni (GFZ, see geochemical monitoring (after stabilization of the parameters)). The PhD student that will be involved on microbiology (co-supervision BRGM & GFZ) will probably visit the Delft demo site for the sampling (and possibly DNA extraction directly on site). The other possibility is to send a precise protocol and material for microbiological sampling. The organization for the microbiological sampling will be refined with the PhD student, according to the current state of the art. Once the storage will be launched, at least one other sampling campaign will be deployed for hot and warm wells in order to characterize the evolution.

In parallel, the team (PhD student, supervisors, co-advisers) will refine the design of laboratory-scale experiments to anticipate microbiological evolution in an ATES system. The current idea is to use a percolation cell with solid reservoir sample (as undisturbed as possible) and to connect the cell directly on-site during several weeks, with circulation of native water, in order to give time to bacteria to develop in the cell (biofilm formation). Then the cell will be moved to the BRGM's laboratory in order to perform experiments at different temperatures to simulate different underground conditions and characterize the possible microbiological evolutions.

Complementary analyses and experiments might be carried out (e.g. batch experiments) in order to enrich the understanding (focus on specific microbial communities) and to anticipate possible changes (for instance: experiments with CO<sub>2</sub> or hydrochloric acid).

The objective of this task will be to provide some information for the Delft site, but also to develop and consolidate sampling/analyses/experiments protocols for future sites. We will quantify the impact of heat storage on the natural microbial communities and deduce potential effects on the efficiency and viability. The microbial diversity in underground environment has been poorly characterized up to now and the effects of heat storage on these communities cannot be anticipated. Another challenge will be to describe one or several functions of microorganisms. This is the reason why it was decided to work with a PhD student.

#### 4.3.3. Work organization for task 3.3.3 (in wells and facilities)

The wells will be made of composite materials and of stainless steel. It is planned to perform an evaluation of corrosion potential and to provide recommendations to limit the risk of corrosion, considering for instance the role of oxygen or of microbiology. Corrosion can be expected for all materials (specifically carbon steel) in contact with water. High salinity, temperature, certain gases (O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S) and the presence of certain microorganisms enhance this process. As a result, changes in pH, redox, fluid composition and precipitation of corrosion materials (e.g. iron oxides, iron carbonates) can be expected. To evaluate if corrosion takes place and how strong it is, we will analyse and monitor fluid composition and collect solid phases formed in filters or wherever accessible. The evaluation will be performed by GFZ, with inputs of BRGM notably to discuss the possible role of microbiology and of KWR/BRGM to take into account the influence of water treatments.

BRGM will perform specific geochemical calculations with the code PHREEQC and the thermodynamic database Thermoddem (<https://thermoddem.brgm.fr/>) in order to define the nature and the number of deposits (scaling) according to the exploitation scenario. The parameters of simulations will be varied to model different exploitations scenarios (temperature, pressure, duration of cycles) and to test the influence of parameters. These latter simulations will be useful to take into account uncertainties and to go towards recommendations for future sites.

In case of significant scaling deposits, GFZ will characterize scaling by XRF and XRD and we will confront the results with the modelling results obtained by BRGM.

#### 4.3.4. Workplan for water quality issues

Table 23: activities

What	Who	Where	When
Temperature and flowrate measurements in all wells	TUD	All wells	During operation (2025 - 2026) - continuous measurement
Estimate the velocity and residence time of sampled groundwater, based on flowrates.	BRGM	All wells	During operation (2025 - 2026)
Perform preliminary geochemical simulations in order to propose a monitoring protocol (best compromise between cost and precision) for hot and warm wells.	BGRM		Q3 2023
Geochemical water sampling and measurements of ambient groundwater Required: On-site measurements: temperature / pH / Eh (redox potential) / dissolved oxygen / ferrous iron Fe(II) Laboratory analyses on major (Ca, Mg, Na, K, Cl, SO <sub>4</sub> ), minor (Si, Li, F, Br) and trace elements (Mn, Fe <sub>total</sub> , Al, sulfide S(-II), TOC (total organic carbon), phosphate PO <sub>4</sub> , nitrate-NO <sub>3</sub> )	GFZ	Pilot borehole	During construction of pilot borehole (Q4 2023) and after clean pumping (Q1 2024)

What	Who	Where	When
The list of analysed chemical elements will be adjusted during the project according to the results of the baseline and first numerical simulations.			
Decide what chemical elements to analyse, based on the results of the baseline and first numerical simulations.	BRGM, TUD, GFZ		Q2 2024
Decide what location to use for water sampling: Hot Wells (mixture of multiple wells) Hot Wells piezometer Warm Wells (mixture of multiple wells) Warm Wells piezometer Observation Well in heat plume	BRGM, TUD, GFZ		Q2 2024
Geochemical water sampling and measurement of ambient and heated groundwater.	TUD, GFZ	to be discussed	During Construction (Q4 2024) - baseline During operational phase (2025- 2026) - after heating Frequency/ number of measurements: to be discussed.
Microbiological characterization: water sampling for DNA analysis Who does sampling: to be discussed (either a sampling protocol will be sent by BRGM to TUD or the sampling and extraction will be done directly on site).	BRGM or TUD	to be discussed	Baseline: Either during construction of pilot borehole (Q4 2023) or construction of well (Q4 2024) - 1 sample Then: During operation (2025-2026) - multiple sampling times for characterization of the evolution with the same protocol after at least one storage cycle.
Rock characterization: Collect solid samples from the reservoir during drillings and to characterize the mineralogy and chemical composition (e.g. XRD, XRF, ICP).	TUD	Pilot borehole (at selected depths)	During construction of pilot borehole (Q4 2023)
Sediment samples (cuttings): Decide what locations to use for sediment samples: Some samples from a distant well have already been collected and maintained in good conditions. The	BRGM, TUD	Pilot borehole (at selected depths)	During construction of pilot borehole (Q4 2023)

What	Who	Where	When
possibility to collect new samples will be investigated and further discussed.			
Water samples: Collect ~10 liters of undisturbed sample to carry out microbiological laboratory experiments for the Delft demo site.	TUD	Pilot borehole (at selected depths)	During construction of pilot borehole (Q4 2023)
Sediment flushing: The sediment sample needs to be flushed with ambient groundwater to mimic the microbial community. This requires a sampling point and protected space to place the sample.	TUD	Pilot Borehole ??	2024 ? To be discussed with the PhD student and supervisors.

#### 4.3.5. Link with other sites

Matrix organization will be necessary for task 3.3 (sites vs. water issues).

In a first time, before M6, a site by site approach was used to draw a clear picture of each site, with a focus on water quality. The site by site approach will be pursued all along the project, with online meetings organized by BRGM, at frequency that will be adjusted depending on needs.

In parallel, meetings will be organized subtask by subtask, with an overview of activities on the different sites. This transverse approach will be launched in 2024. In these meetings, we will analyse and compare the work and results obtained for the different sites. We will also share more general expertise and state of the art. This will contribute to subtask 3.1 (towards a framework with general recommendations for future sites). In the last 18 months of the project, we will intensify these meetings to elaborate frameworks and decision making supports (e.g. decision trees) for future sites.

## 4.4. Performance assessment and optimisation

### 4.4.1. Hot Push Pull Test (HPPT)

The aims of HPPT in Delft is to:

- estimate thermal behaviour of aquifer -> storage efficiency
- determine of heating on geochemical groundwater quality

The following possible aims of a HPPT are not of primary interest at the Delft site:

- Impact of heating on the microbial community in groundwater (>> this is investigated in a separate work package)
- Distribution of permeability over depth of the filter screen (>> this will be measured using AH-DTS and filter flow sensors)
- Buoyancy effects of heating (i.r.t. anisotropy of aquifer). (>> does not fit within budget/ design of the pilot borehole)

## Planning

The main HPPT will be conducted in one of the hot wells at 90 °C. If it fits in the operation planning, a second HPPT will be conducted in the pilot borehole at 60 °C. The temperature in the pilot borehole is limited due to the use of PVC material.

Table 24: Amount of tracer to be added (extrapolation of amounts during Berlin Experiment; for permitting purpose at Delft site)

Substance	Concentration (mg/L)	Volume Water (m <sup>3</sup> )	Mass (gram)
Fluorocine, Uranium, Eosin	100µg/L (max 290)	min.100	At least 10 - 29
Rhodamine	100µg/L (max 1000)	min. 100	At least 10 – 100
Hot Water (90 Celsius, no tracer)		400	

Table 25: Tracer analysis during HPPT (To be determined)

Parameter	Number of samples
Fluorocine, Uranium, Eosin	To be determined
Rhodamine	To be determined

Table 26: activities

Who	What	Where	When
TUD, GFZ	Define main research focus of HPPT for Delft ATES site		Q3 2023
TUD, IFT	Check temperature limit of PVC tubing	pilot borehole	Q3 2023
TUD	Leave Pilot borehole open for HPPT, but close the casing between aquifers with a packer to prevent short-circuit flow between aquifers	Pilot Borehole	Construction of pilot borehole (Q4 2023)
TUD, IFT	Permission for HPPT including tracer and administrative coordination		2023/2024
TUD, GFZ	Prepare HPPT schedule / detailed plan of action		Q3 2024
GFZ, TUD **	Well - near wellbore model for supporting the test planning and test data analysis		2024
TUD	Install DTS cable incl. reader in wells to be tested	Pilot borehole & H1 well	construction of pilot borehole (Q4 2023) & construction of well (Q4 2024)
TUD/G FZ	downhole pressure and temperature sensor in wells to be tested (suited for 90 Celsius; 60 Celsius in pilot borehole if PVC is capable of that temperature)	Pilot borehole & H1 well	--,,--
TUD, GBBH, GFZ	Well head preparation for test piping connection	Pilot borehole & H1 well	Test preparation (Q1 2025)

Who	What	Where	When
TUD, GBBH,	Well pump / production tubing / injection tubing	Pilot borehole & H1 well	--,,--
GFZ	Prepare HPPT test and monitoring unit (fluid conditioning with tracer/temperature and surface monitoring equipment)	Test site	Q1 2025
GBBH	Piping / large storage tanks / injection pump	Test site	--,,--
GBBH	Heating unit / provision of heating water (depends on site availability)	Test site	--,,--
GBBH	Staff container, equipment container / tent	Test site	--,,--
TUD, GFZ, GBBH	Schedule Technical/scientific staff for test operation	Test site	- Q1 2025
TUD, GFZ, GBBH	Executing the HPPT	Test site	During test (Q1 2025)
TUD, GFZ, BRGM	Fluid sampling and analysis	Test site and lab	During test (Q1 2025); lab analysis until Q2

(\*\*) not clear if this falls in the budget

#### 4.4.2. Co-simulation

A co-simulation model includes different components: A model for the district heating network, a model for the subsurface, a control algorithm, and an interface to link between the district heating network and sub-surface models. The aim is the better understand and allow optimization of the HT-ATES system and district heating system.

For developing controller algorithm, a district heating network model will be developed by VITO and F-IEG. TDA will take this model as the input for the Co-Simulation. If the model is complicated, it will be simplified. The model is developed with Modelica based software (SimulationX/Dymola).

To setup the sub-surface model, TDU will provide input parameters such as the geological model, hydro and petrophysical parameters. A sub-surface model will be setup with FEFLOW. Because the geological condition of Delft site is not complicated, a 3D model with different layers is planned.

Table 27: activities

Who	What	When
TDA, TUD	Collect geological input parameters	Q3, 2023
TDA, VITO, TUD	Define scenarios	Q4, 2023
TDA	Development of sub surface models	Q1, 2024
TDA, F-IEG, VITO	Development of heating network models	Q2, 2024
TDA, F-IEG, VITO	Development of Co-Simulation with control algorithms	Q2, 2025
TDA	Analyse results and report	Q4, 2025

## 5. Plan of action

Plan of action for PUSH-IT and any other activities outside of PUSH-IT but relevant for PUSH-IT.

### 5.1. Organisation

The HT-ATES at the Delft Site will be constructed and operated by GTD. GTD has its own governing structure that includes a strong role for TUD-CRE (campus real estate).

The PUSH-IT research activities at the Delft Site will be coordinated by scientists from the TUD-CEG faculty. These scientists will also act as a liaison with the GTD organization through regular meetings and review of workplans for the construction and operation.

Table 28: Roles and contact persons (July 2023)

Delft Activity	Organisation	Contact person
TUD-HTO project		
GTD	CRE	
	SGT	
	EBN	
Design and consultancy	IFT	
Contractor/ drilling company	GBBH	
Integration with District Heat network / Heat pump	AARD	
Coordinate PUSH-IT activities in Delft Liaise with GTD-project		
coordinate Delft activities to support PUSH-IT WP2 and WP3	TUD	
	TUD	
	KWR	
WP2.1		
Social Engagement	UXT	
	UXT	
	ARU	
	TUD	
WP 2.2		
Regulation and governance	BGS	
	BGS	
	TUD	
WP 2.3		
Finances	UU	
	TUD	
WP 3.1	TUD	
Vibration Free Drilling	TUD	
	GBBH	



Delft Activity	Organisation	Contact person
Borehole Diameter Expansion	TUD	
	GBBH	
Alternative Drilling mud	KWR	
<i>(also need to involve IFT, EBN, SGT)</i>	TUD	
ESP Suited for frequent switching	GBBH	
Well Pump Performance Monitoring	F-IEG	
	KWR	
	TUD	
Isolation of Casing	GFZ	
	TUD	
	KWR	
	KWR	
Adjust design flowrate to temperature	KWR	
<i>(also need to involve IFT)</i>	TUD	
	GBBH	
Heat induced Production Prevention	GBBH	
Tool to design and monitor mud application	TUD	
<i>(also need to involve EBN, SGT)</i>	GBBH	
WP 3.2	VITO	
Quality control/ integration	VITO	
	VITO	
	TUD	
	TUD	
	CRE	
	AARD	
WP 3.3	BRGM	
	BRGM	
	TUD	
	KWR	
WP 3.4	GFZ	
HPPT	GFZ	
	GFZ	
	TUD	
co-simulation	TDA	
	GFZ	
	GFZ	
	TUD	

## 5.2. Planning

In broad terms the site planning is as follows:

When	What	Who
2023 Q1- Q3	Prepare drilling of observation wells	IFT
2023 Q4	Drill observation well to collect additional detailed subsurface information	GBBH
2024 Q1	Final design, locations, physical connections to the system	IFT
2024 Q1 - Q2	Apply for permit	IFT
2024 Q2	Make final design for wells	IFT
2024 Q3 - Q4	Drilling of wells	GBBH
2024 Q3 - Q4	Drilling Additional DTS observation wells	subcontract
2024 Q4	Final concept for ATES integration and ATES operation	IFT
2025 Q1 - Q2	Commission wells and connections to heat	GTD
2025 Q3	Start charging hot wells in summer	GTD
2026 Q1 - Q2	Deliver heat in winter	GTD
2026 Q2 - Q3	Analyse operation and first cycle.	TUD

The planning of PUSH-IT studies is outlined in chapter 3 and 4 and may be adjusted as the site planning changes.

## 5.3. Milestones/deliverables

The milestones and deliverables directly linked to the Delft site are listed in Table 29. Within current planning, M2 and D1.6 will be unlikely to meet. When approaching the deadline this will be checked and updated accordingly with the EC-PO.

*Table 29. Milestones and deliverables for the Delft site*

no	name	Type	Due
D1.1	Workplan for Delft ATES activities: Drilling, monitoring, service plant, integration/ control, community engagement plan, permits		Aug-2023
D1.6	Commissioning report of installations ATES-Delft: report of works, functioning of system, learnings from drilling, integration, HPPT.	R	Feb-2025
M 2	Installations Delft completed (TUD, TDA, F-IEG)	R	Feb-2025
D1.7	Performance evaluation of ATES-Delft demonstrate HT-ATES TRL 7/8	R	Oct-2026

## 6. Risks and mitigation

### Project risks

The potential risks and their mitigation measures are listed in Table 30.

Table 30. Project risks for HT-ATES in Delft

Risk	Description level of (i) likelihood, and (ii) severity	Mitigation
	Site and drillings not ready for TES tests and implementation (i: low / ii: high)	Use of follower sites already within project for demonstration or implement at alternative sites within project network. Each example technology has a follower site, which can be upgraded to an implemented demo site.
	Permissions not obtained for drilling, testing, and/or operation. (i: low / ii: high)	Sites have been selected due to their relative maturity and existing work on integrating with legal authorities. All sites have received initial positive reaction to the demonstration activities. If permits are unsuccessful mitigation is execution at follower sites.
	Financial: associated projects for demonstration and follower sites are postponed or not realised. (i: medium / ii: medium)	Associate projects are not necessary to demonstrate heat storage, but for some demo/follower sites are necessary to store renewable heat, thus main objectives are not at risk (Delft, Litoměřice). For the sites with associated projects project funding is already in place. Mitigation is via the use of demonstration and follower sites, such that activities can be moved from one site to another within the project to still achieve the aims.
	Administrative/financial: tendering procedure failure (i: medium / ii: medium)	Detailed planning in collaboration with an experience international expert team prior to the tender execution allowing optional well design reflecting ground water flow rates, careful risk assessment, consultations with drilling companies, quotations providing real costs and delivery times
	Local communities uninterested in engagement activities about the demonstrator site. (i: low / ii: medium)	Engagement plans will follow co-creation design principles to establish needs and wants of local communities. Due to existing plans for the pilots, social stakeholders are already aware and partners have access to them. Preparatory work, while developing this proposal by leaders of WP2, resulted in an initial engagement with stakeholders. Mitigation via identification of groups who have already engaged in energy system development at each demonstration.
	Limited material / equipment availability due to strained international market situation	Time buffer considered in project time planning, timely ordering of equipment.

Risk	Description level of (i) likelihood, and (ii) severity	Mitigation
	(i: medium / ii: medium)	
	Price increases make budget unrealistic at time of implementation, e.g. for manufacturing full novel well casings or other equipment. (i: medium / ii: medium)	Go / no-go moment for novel (more expensive) components, so that budget can be transferred to standard (cheaper) components and overall objectives and results can be achieved.
	Feasibility of novel aspects, including casing-while-drilling, is seen to be not technically or financially feasible. (i: low / ii: medium)	Experience of project partners has been used to develop work plan and budget. Where the feasibility is not clear at the current time, a task is defined to carry out a detailed study in advance of designing and carrying out activities. Mitigation is that budget for those on-site activities is transferred to other project sub-goal, and these do not damage the overall project goals.
	Co-simulation computational time too long (i: low / ii: medium)	Simplify the subsurface model to enhance integration in the DHN.
	DH network controller testing: unwillingness of building owners to participate (i: medium / ii: low)	Since we aim for a proof-of-concept test only, only a limited number of buildings is needed to test the controller. As the demonstration sites are universities with the buildings on campus there are a limited number of stakeholders who are already engaged in the project.
	DH network controller testing: technical issues with respect to measurement data acquisition or control of the heat demand of the building (i: medium / ii: medium)	This can be overcome by installing additional hardware in the buildings. Enough budget is foreseen for the installation if this is the case. The project partners involved are experienced in solving these issues.
	ATES reservoir property uncertainties (i: medium / ii: high)	ATES hydraulic conductivity is critical for project success. Mitigation has been carried out via a pilot borehole in the demo site in same formation carried out in 2022.
	Drilling / workover failures (i: medium / ii: low)	All sites have multiple boreholes/wells. If proposed activities fail, remedial or alternative methods can be used. Drillers have required certifications as a precaution for failures
	Undetected heat losses occur (i: medium / ii: medium)	All sites have extensive monitoring and simulation activities. In the event of poor recovery efficiency due to heat losses that are not detected additional analysis and simulations will be carried out to identify the source of these losses.
	Aquifer contamination / Aquifer temperature threshold (i: low / ii: medium)	Prediction of flow/temperature before full implementation, through injection/ production tests, to calibrate proper flow and temperature levels.

Risk	Description level of (i) likelihood, and (ii) severity	Mitigation
	No permit for use of tracer during HPPT (i: medium / ii: medium)	Start permitting >1 year before start experiments, so that there is enough time to develop an alternative plan

### Health, Safety and environment

Next to the project risks regarding the deliverables and planning, also specific HSE risks are listed in the risks table. All PUSH-IT sites deal with EU and local HSE regulations. Hence, it is not required to list and mitigate all HSE risks here, as those are covered by site leads and local contractors to comply to local regulations. Only apparent HSE risks that are specific for a site or technology are listed in the risks and mitigation table.

## References

- Bloemendal, M. (2018). The hidden side of cities. PhD, Delft University of Technology.
- Bloemendal, M. and N. Hartog (2018). "Analysis of the impact of storage conditions on the thermal recovery efficiency of low-temperature ATES systems." *Geothermics* 17(C): 306-319.
- Bloemendal, M., P. J. Vardon, A. Medema, A. Snelleman, K. Marif, S. T. W. Beernink, F. v. Veldhuizen, M. Pijnenborg, G. Sudintas and T. v. Oort (2020). HT-ATES at the TU Delft campus. Delft, TU Delft / ENGIE.
- Bloemendal, M., P. Oerlemans, G. Schout (2021). Voorlopig afwegingskader voor vergunningverlening HTO Juridisch afwegingskader ondergrondse warmteopslag.
- Boudet, H.S. (2019). Public perceptions of and responses to new energy technologies. *Nat Energy* 4, 446–455. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0399-x>
- Drijver, B., G. Bakema and P. Oerlemans (2019). State of the art of HT-ATES in The Netherlands. . European Geothermal Congress 2019, Den Haag, Netherlands.
- Gooding, L. P. Devine-Wright, M. Rohse, R. Ford, C. Walker, I. Soutar, H. Devine-Wright (2023). The best-laid plans: Tracing public engagement change in emergent Smart Local Energy Systems. In *Energy Research & Social Science*, volume 101. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103125>.
- Kallesøe, A. J. and T. Vangkilde-Pedersen (2019). Underground Thermal Energy Storage (UTES) – state-of-the-art, example cases and lessons learned., GEOTHERMICA – ERA NET Cofund Geothermal.
- Kingsnorth, J. (2022). Optimal screening depths for the HT-ATES system in the Maassluis formation at TU Delft. BSc, Delft University of Technology.
- Peterson, T.R., Stephens, J.C. & Wilson, E.J. (2015). Public perception of and engagement with emerging low-carbon energy technologies: A literature review. *MRS Energy & Sustainability* 2, 11. <https://doi.org/10.1557/mre.2015.12>
- Ryder, S., Walker, C., Batel, S. et al. (2023). Do the ends justify the means? Problematizing social acceptance and instrumentally-driven community engagement in proposed energy projects. *Socio Ecol Pract Res* 5, 189–204 . <https://doi.org/10.1007/s42532-023-00148-8>
- Shaw K, Hill SD, Boyd AD, Monk L, Reid J, Einsiedel EF (2015). Conflicted or constructive? Exploring community responses to new energy developments in Canada. *Energy Res Soc Sci* 8:41–51
- SIKB (2015). Besluitvormings Uitvoerings Methode Open bodemenergiesystemen. Gouda, SIKB. BUM BE deel 1.
- Techniplan (2020). Analyse testresultaten leidingnet 5 juni 2020 Noordtak 1 & 2, Zuidtak 1 & 2 – Maximale debieten. Rotterdam, Techniplan Adviseurs.
- TNO (2017). REGIS II. Utrecht.
- Westlake, S., John, C.H.D. & Cox, E. (2023). Perception spillover from fracking onto public perceptions of novel energy technologies. *Nat Energy* 8, 149–158. <https://doi.org/10.1038/s41560-022-01178-4>
- Wiebes, E. (2020). Mijnbouwwet. M. o. E. a. a. climate. Den Haag.

## Annex I Export of microbial water quality samples

The legislation for the implementation of the Nagoya Protocol does not regulate access to Dutch genetic resources in the framework of the Nagoya Protocol, as the Dutch government considers it unnecessary to exercise its sovereignty regarding access to Dutch genetic resources in national legislation (section 6.2.1 of the Explanatory Memorandum of the Nagoya Protocol (Implementation) Act of the Netherlands).

This means that you do not need Prior Informed Consent (PIC) to access and use Dutch genetic resources. On the ABS Clearing House website, this information can be found on <https://absch.cbd.int/database/record/ABSCH-MSR-NL-208036>.

Of course, the above only applies if the genetic resources are really Dutch genetic resources, i.e., they are not genetic resources obtained from another country and transferred to the Netherlands. In case the genetic resources are obtained from another country, access regulation of that country may apply. As the samples are collected in Delft, they can be considered Dutch genetic resources.

While there are no access requirements in the Netherlands related to the Nagoya Protocol, access may be restricted by means of legislation and regulatory requirements with respect to species protection, territorial protection, and animal and plant diseases. Environmental impact rules may also apply.

If you have further questions regarding Access and Benefit-sharing and the Nagoya Protocol, feel free to contact us.

The afore mentioned information has been obtained from the ABS Focal Point on Access and Benefit-Sharing, Centre for Genetic Resources, the Netherlands (CGN), Wageningen University & Research on 20 June 2023 per email by Martin van der Schans (KWR)

## Bijlage 2

### BEREKENING VAN DE SPF

De berekening van de SPF is schematisch weergegeven in de figuren op de volgende pagina's. In het eerste schema is de SPF berekend voor de startsituatie, waarin nog geen gebruik wordt gemaakt van een warmtepomp. Mogelijk dat in de toekomst het systeem wordt uitgebreid met een warmtepomp. In dat geval verandert de SPF berekening. Deze is schematisch weergegeven in het tweede schema. Naast de SPF zijn ook de energiebesparing en emissiereducties berekend voor CO<sub>2</sub> en stikstof.

Een korte toelichting op een aantal aspecten van de schema's is hieronder gegeven.

#### Bron

Geothermische warmte wordt opgeslagen in de HTO. Hiervoor moet de geothermie in de zomerperiode extra draaien, waardoor de bronpompen van het geothermiesysteem extra elektriciteit verbruiken. Aardyn heeft de volgende SPF waarden gegeven voor het geothermiesysteem:

- Minimaal: 18,6
- Verwacht: 25,4
- Maximaal: 33,5

Voor het berekenen van de SPF voor de HTO is gerekend met de minimale waarde.

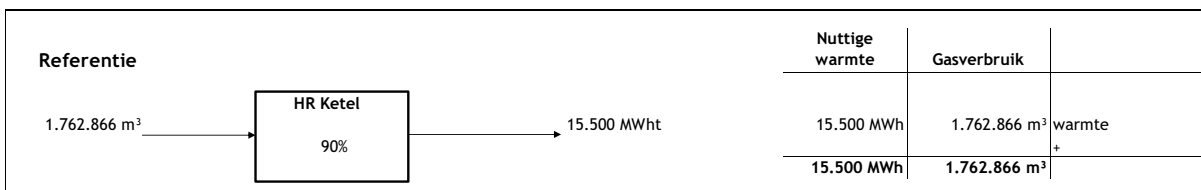
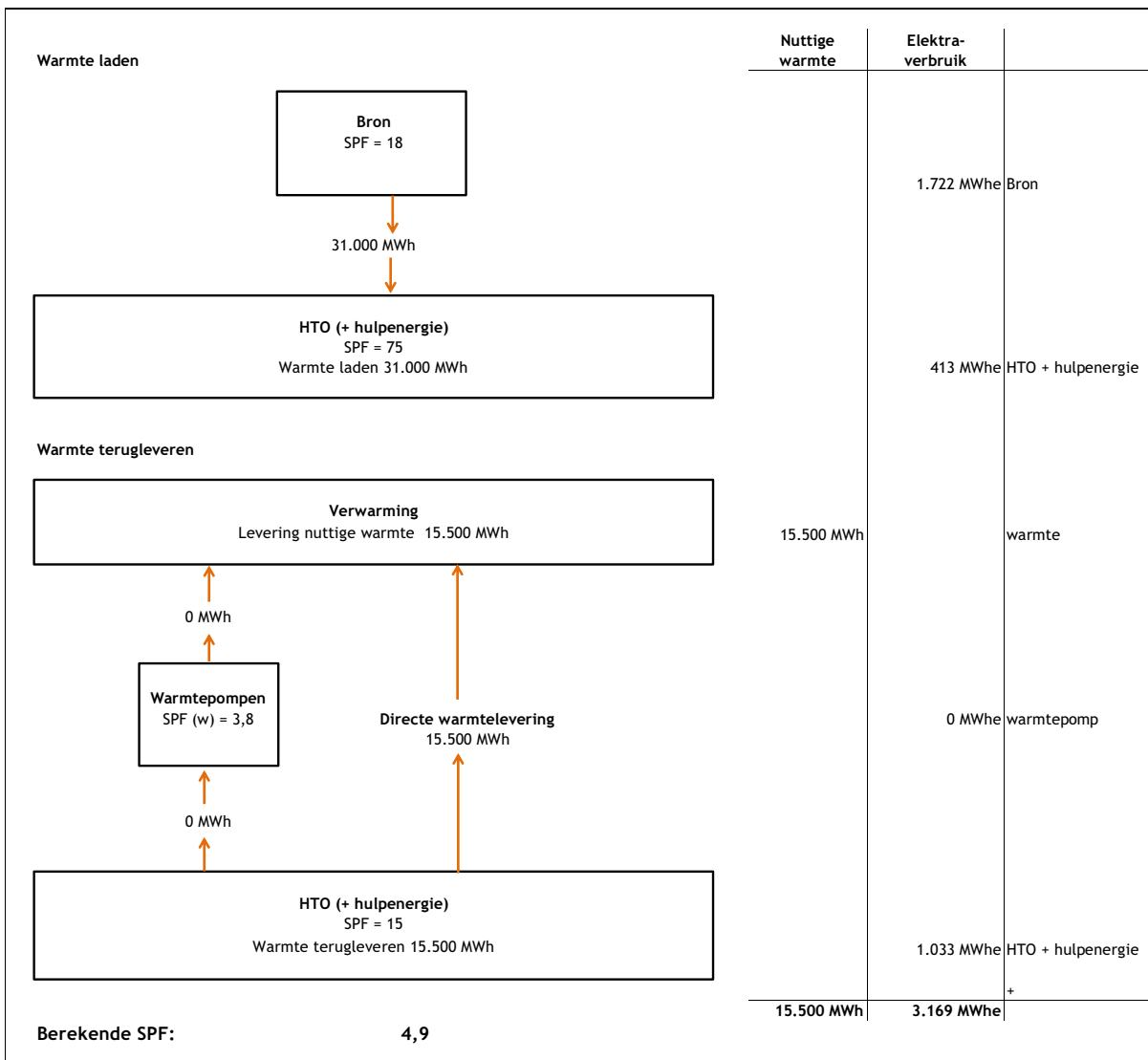
Naast elektriciteitsverbruik kan geothermische warmte ook een CO<sub>2</sub>-uitstoot hebben als gevolg van formatiegas dat vrijkomt. In dit project zal vrijkomend formatiegas worden opgewaardeerd en worden ingevoerd op het gasnet. Hierdoor is er geen aanvullende CO<sub>2</sub>-uitstoot voor de geleverde geothermische warmte.

#### HTO + hulpenergie

Onder deze post valt al het elektraverbruik van componenten die nodig zijn voor een HTO-systeem. Deze omvatten (o.a.) de bronpompen, circulatiepompen, regeling, waterbehandeling en stikstofdosering. De SPF is sterk afhankelijk van het temperatuurverschil van de bronnen. Bij WKO is het temperatuurverschil klein en redelijk constant. Bij HTO is het temperatuurverschil groot, maar ook sterk veranderlijk. Aan de hand van het HTO systeem in Middenmeer is een correlatie afgeleid tussen de SPF van het HTO systeem met hulpenergie en het temperatuurverschil tussen de bronnen. Op basis hiervan is een SPF berekend voor het HTO systeem in Delft. Te zien is dat de SPF bij laden hoger ligt dan bij terugleveren. Dit komt doordat het temperatuurverschil tussen de bronnen bij laden hoger ligt dan bij terugleveren.



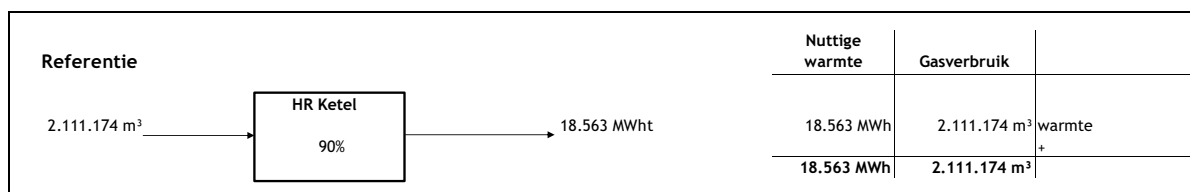
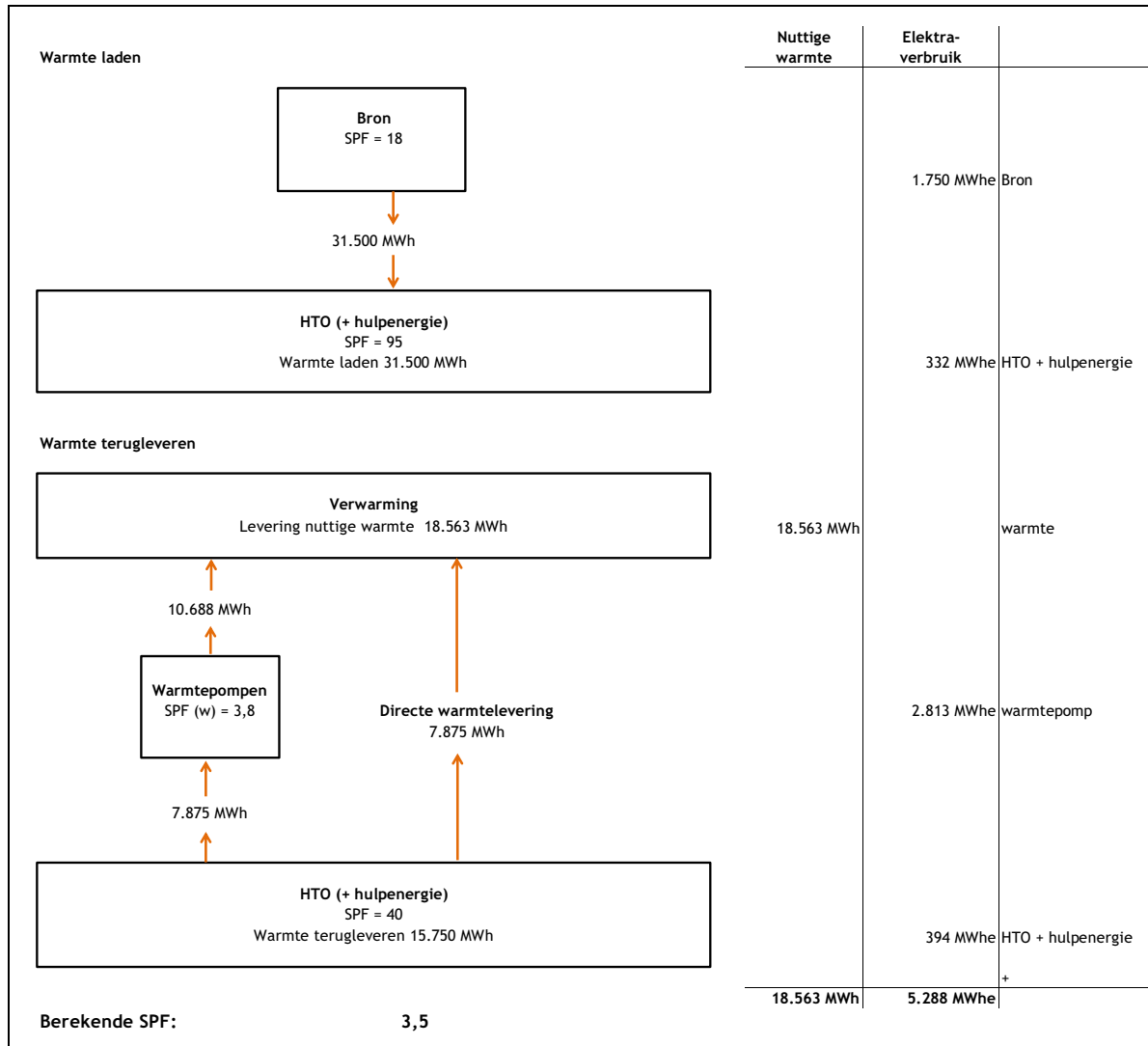
Project HTO Delft  
 Onderwerp SPF berekening ten behoeve van aanvraag Vergunning Waterwet voor HTO zonder warmtepomp  
 Referentie PR09968  
 Datum 3 november 2023  
 Auteur Rob Kleinlugtenbelt  
 Gecontroleerd Nico Franco Pinto



<b>Besparing HTO t.o.v. referentie</b>		
primair energieverbruik	45.458 GJ	73%
CO2	2.074 ton	66%
NOx	3.050 kg	87%

Hierbij verklaart ondergetekende dat de Seasonal Performance Factor voor het HTO-systeem berekend is op een vergelijkbare wijze als voor een bodemenergiesysteem zoals beschreven in Artikel 6,29 lid 2 Waterregeling, van de te realiseren installatie en dat deze (in theorie) zal voldoen aan de genoemde waarde, dit bij het voorziene gebruik van het bouwwerk overeenkomstig de bestemming waarvoor het systeem ontworpen zal worden.

Project HTO Delft  
 Onderwerp SPF berekening ten behoeve van aanvraag Vergunning Waterwet voor HTO met warmtepomp  
 Referentie PR09968  
 Datum 3 november 2023  
 Auteur Rob Kleinlugtenbelt  
 Gecontroleerd Nico Franco Pinto




Besparing HTO t.o.v. referentie		
primair energieverbruik	46.648 GJ	63%
CO2	1.977 ton	52%
NOx	3.429 kg	81%

Hierbij verklaart ondergetekende dat de Seasonal Performance Factor voor het HTO-systeem berekend is op een vergelijkbare wijze als voor een bodemenergiesysteem zoals beschreven in Artikel 6,29 lid 2 Waterregeling, van de te realiseren installatie en dat deze (in theorie) zal voldoen aan de genoemde waarde, dit bij het voorziene gebruik van het bouwwerk overeenkomstig de bestemming waarvoor het systeem ontworpen zal worden.

# Bijlage 3

## BEREKENING VAN DE EINDZETTING

## Berekening van eindzetting volgens de methode van Koppejan (combinatie van Terzaghi en Keverling Buisman)

	<b>Projectnaam:</b>	Hoge Temperatuuropslag TU Delft
	<b>Projectnummer:</b>	PR09968
	<b>Datum berekening:</b>	21-12-2023
	<b>Bijlage</b>	3
	<b>Rapport:</b>	Effectenstudie
	<b>Specialist:</b>	SW
	<b>Opmerking(en):</b>	Voor de tweede scheidende laag (groen) is een tijdsafhankelijke zettingsberekening uitgevoerd

## Gebruikte formule van Terzaghi:

$$z = \frac{D}{C} \ln \frac{\sigma_k + \Delta\sigma_k}{\sigma_k}$$

GLG: 1 m-mv

Materiaal	[m-mv] diepte	[m] Dikte	$\Delta H$	$C_p$	$C_s$	$C_{onein}$	[kg/m <sup>3</sup> ] $\rho$	[N/m <sup>2</sup> ] $\sigma_k$	[N/m <sup>2</sup> ] $\Delta\sigma_k$	[mm] Z
	0									
Onverz. zone		1	0,01	-	-	-	1800	-		0
	1									
Zand		6	0,01	200	1,00E+99	200	1900	44145	98,1	0
	7									
Klei		12		15	160	10,909	1900	123606	147,15	1
	19									
Zand		21	0,02	1000	1,00E+99	1000	2000	279585	196,2	0
	40									
Klei		10		25	320	19,048	1900	426735	588,6	1
	50									
Zand		25	0,1	1000	1,00E+99	1000	2000	593505	981	0
	75									
Klei		20		50	600	37,5	1900	804420	56211	23
	95									
Zand		2	11,36	1000	1,00E+99	1000	2100	903501	111442	0
	97									
Zand		20	13,66	1000	1,00E+99	1000	2100	1022202	134005	2
	117									
Zand		1	12,34	1000	1,00E+99	1000	2100	1135507,5	121055	0
	118									
Klei		2		50	600	37,5	1900	1149732	63814	3
	120									
Zand		65	0,67	1000	1,00E+99	1000	2100	1509268,5	6572,7	0
	185									

## Verklaring van de parameters:

symbolen	verklaring	eenheid
D	= Dikte	[m]
$\Delta H$	= Stijghoogteverandering	[m]
$C_p$	= Primaire zettingsconstante	[-]
$C_s$	= Seculaire zettingsconstante	[-]
$C_{onein}$	= Totale zettingsconstante	[-]
$\rho$	= Bulkdichtheid	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_k$	= Korrelspanning	[N/m <sup>2</sup> ]
$\Delta\sigma_k$	= Verandering korrelspanning	[N/m <sup>2</sup> ]
Z	= Zetting	[mm]
GLG	= Gemiddelde laagste grondwaterstand	[m-mv]

Totale zetting [mm] 31

# Bijlage 4

BEREKENING VAN DE TIJDSAFHANKELIJKE ZETTING

## Zettingsberekening

Tijdsafhankelijke berekening van de maximale zetting; versie datum: 29 september 2004

	Projectnaam:	Hoge Temperatuuropslag TU Delft
	Projectnummer:	PR09968
	Datum:	2-11-2023
	Bijlage:	4
	Rapport:	Effectenstudie
Specialist:	SW	
Opmerking(en):		

### Parameters

bovenzijde scheidende laag		75 m-mv	
onderzijde scheidende laag		95 m-mv	
GLG		1 m-mv	
verlaging aan bovenzijde		0,1 mwk	
verlaging aan onderzijde		11,36 mwk	
primaire zettingsconstante	Cp	50	
seculaire zettingsconstante	Cs	600	
samendrukkingsconst.	C_oneindig	37,50	
doorlatendheid (vert.)	kv	1,00E-09 m/s	= 0,0000864 m/d
volumegewicht van water	$\gamma_w$	1000 kg/m <sup>3</sup>	
verzadigd volumegewicht bovenliggende lagen	$\gamma_\tau$	1960 kg/m <sup>3</sup>	
tijdstip	ti	109 d	= 0,30 j

### Enkelzijdig gedeelte

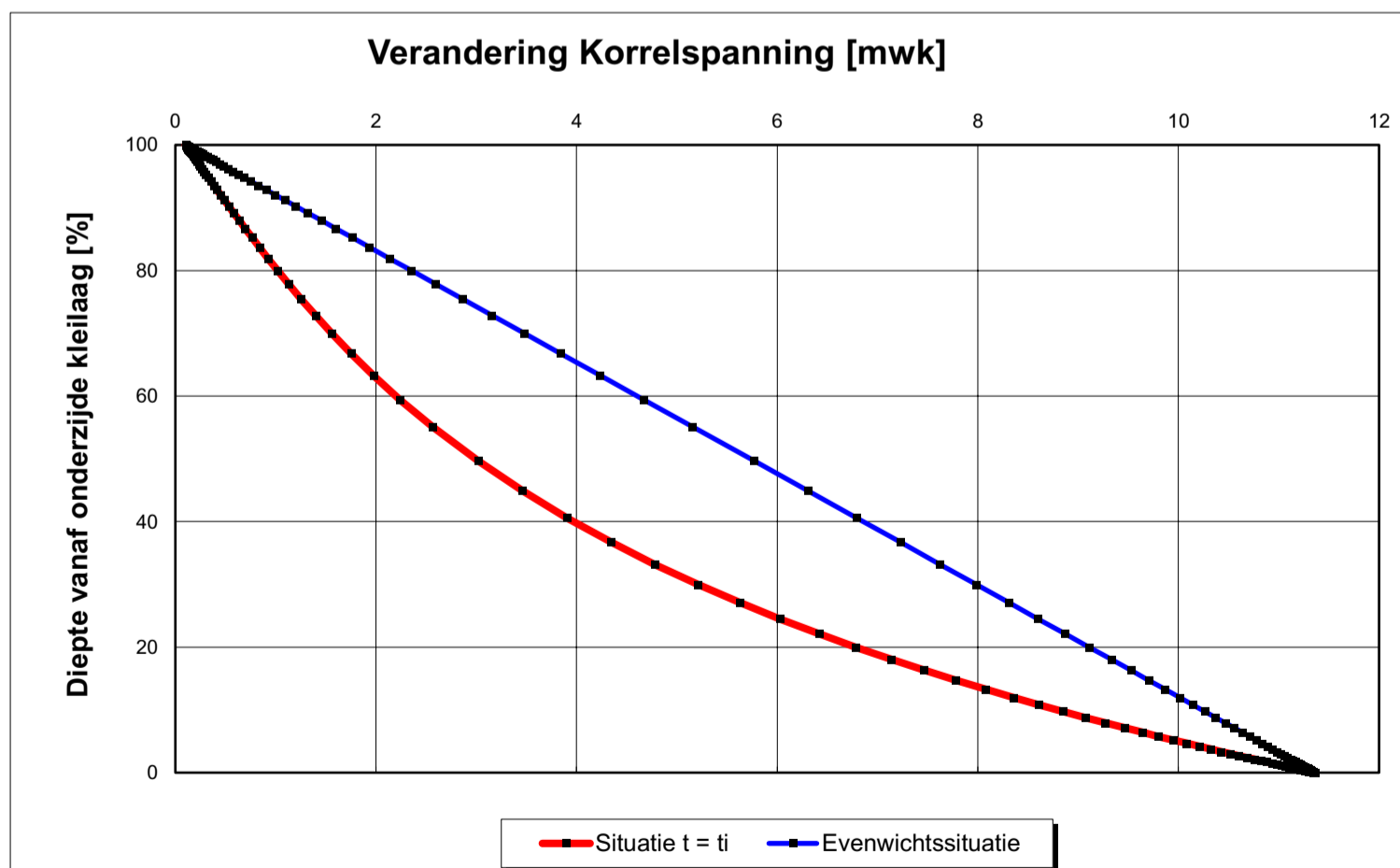
eindzetting		33,83 mm	
hydrodynamische periode		1,39E+03 d	= 3,81 j
zetting op t=ti		67 % van eindzetting	
zetting op t=ti		22,70 mm	

### Dubbelzijdig gedeelte

eindzetting		0,65 mm	
hydrodynamische Periode	Th	7,53E+02 d	= 2,06 j
zetting op t=ti		60 % van eindzetting	
zetting op t=ti	zt =	0,39 mm	

### Berekening

zetting na oneindig lange belasting	34,49 mm
zetting op t = ti	23,09 mm




# Bijlage 5

BEREKENING VAN DE EINDZETTING ALS GEVOLG VAN BESTAANDE OPEN ODEMENERGIESYSTEMEN

# Zettingsberekening

Versie 29 september 2004

## Berekening van eindzetting volgens de methode van Koppejan (combinatie van Terzaghi en Keverling Buisman)

	<b>Projectnaam:</b>	Hoge Temperatuuropslag TU Delft
	<b>Projectnummer:</b>	PR09968
	<b>Datum berekening:</b>	29-4-2024
	<b>Bijlage</b>	5
	<b>Rapport:</b>	Effectenstudie
	<b>Specialist:</b>	SW
	<b>Opmerking(en):</b>	Voor de deklaag is een tijdsafhankelijke zettingsberekening uitgevoerd

### Gebruikte formule van Terzaghi:

$$z = \frac{D}{C} \ln \frac{\sigma_k + \Delta\sigma_k}{\sigma_k}$$

GLG: 1 m-mv

Materiaal	[m-mv] diepte	[m] Dikte	$\Delta H$	[-] $C_p$	[-] $C_s$	[-] $C_{onein}$	[kg/m <sup>3</sup> ] $\rho$	[N/m <sup>2</sup> ] $\sigma_k$	[N/m <sup>2</sup> ] $\Delta\sigma_k$	[mm] Z
	0									
Onverz. zone		1	0,04	-	-	-	1800	-		0
	1									
Zand		6	0,04	200	1,00E+99	200	1900	44145	392,4	0
	7									
Klei		12		15	160	10,909	1900	123606	588,6	1
	19									
Zand		21	0,08	1000	1,00E+99	1000	2000	279585	784,8	0
	40									
Klei		10		25	320	19,048	1900	426735	1569,6	2
	50									
Zand		15	0,24	1000	1,00E+99	1000	2000	544455	2354,4	0
	65									
Klei		30		50	600	37,5	1900	750465	1324,4	1
	95									
Zand		2	0,03	1000	1,00E+99	1000	2100	893691	294,3	0
	97									
Zand		20	0,03	1000	1,00E+99	1000	2100	1012392	294,3	0
	117									
Zand		1	0,03	1000	1,00E+99	1000	2100	1125697,5	294,3	0
	118									
Klei		2		50	600	37,5	1900	1139922	245,25	0
	120									
Zand		65	0,02	1000	1,00E+99	1000	2100	1499458,5	196,2	0
	185									

### Verklaring van de parameters:

symbolen	verklaring	eenheid
D	= Dikte	[m]
$\Delta H$	= Stijghoogteverandering	[m]
$C_p$	= Primaire zettingsconstante	[-]
$C_s$	= Seculaire zettingsconstante	[-]
$C_{onein}$	= Totale zettingsconstante	[-]
$\rho$	= Bulkdichtheid	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_k$	= Korrelspanning	[N/m <sup>2</sup> ]
$\Delta\sigma_k$	= Verandering korrelspanning	[N/m <sup>2</sup> ]
Z	= Zetting	[mm]
GLG	= Gemiddelde laagste grondwaterstand	[m-mv]

Totale zetting [mm] 5



# Bijlage 6

BEREKENING TIJDSAFHANKELIJKE ZETTING DEKLAAG ALS GEVOLG VAN BESTAANDE OPEN BOD-  
DEMENERGIESYSTEMEN

## Zettingsberekening

Tijdsafhankelijke berekening van de maximale zetting; versie datum: 29 september 2004

	Projectnaam:	Hoge Temperatuuropslag TU Delft
	Projectnummer:	PR09968
	Datum:	29-4-2024
	Bijlage:	6
	Rapport:	Effectenstudie
Specialist:	SW	
Opmerking(en):		

### Parameters

bovenzijde scheidende laag		7 m-mv	
onderzijde scheidende laag		19 m-mv	
GLG		1 m-mv	
verlaging aan bovenzijde		0,04 mwk	
verlaging aan onderzijde		0,08 mwk	
primaire zettingsconstante	Cp	15	
seculaire zettingsconstante	Cs	160	
samendrukkingsconst.	C_oneindig	10,91	
doorlatendheid (vert.)	kv	1,00E-09 m/s	= 0,0000864 m/d
volumegewicht van water	$\gamma_w$	1000 kg/m <sup>3</sup>	
verzadigd volumegewicht bovenliggende lagen	$\gamma_\tau$	1885 kg/m <sup>3</sup>	
tijdstip	ti	109 d	= 0,30 j

### Enkelzijdig gedeelte

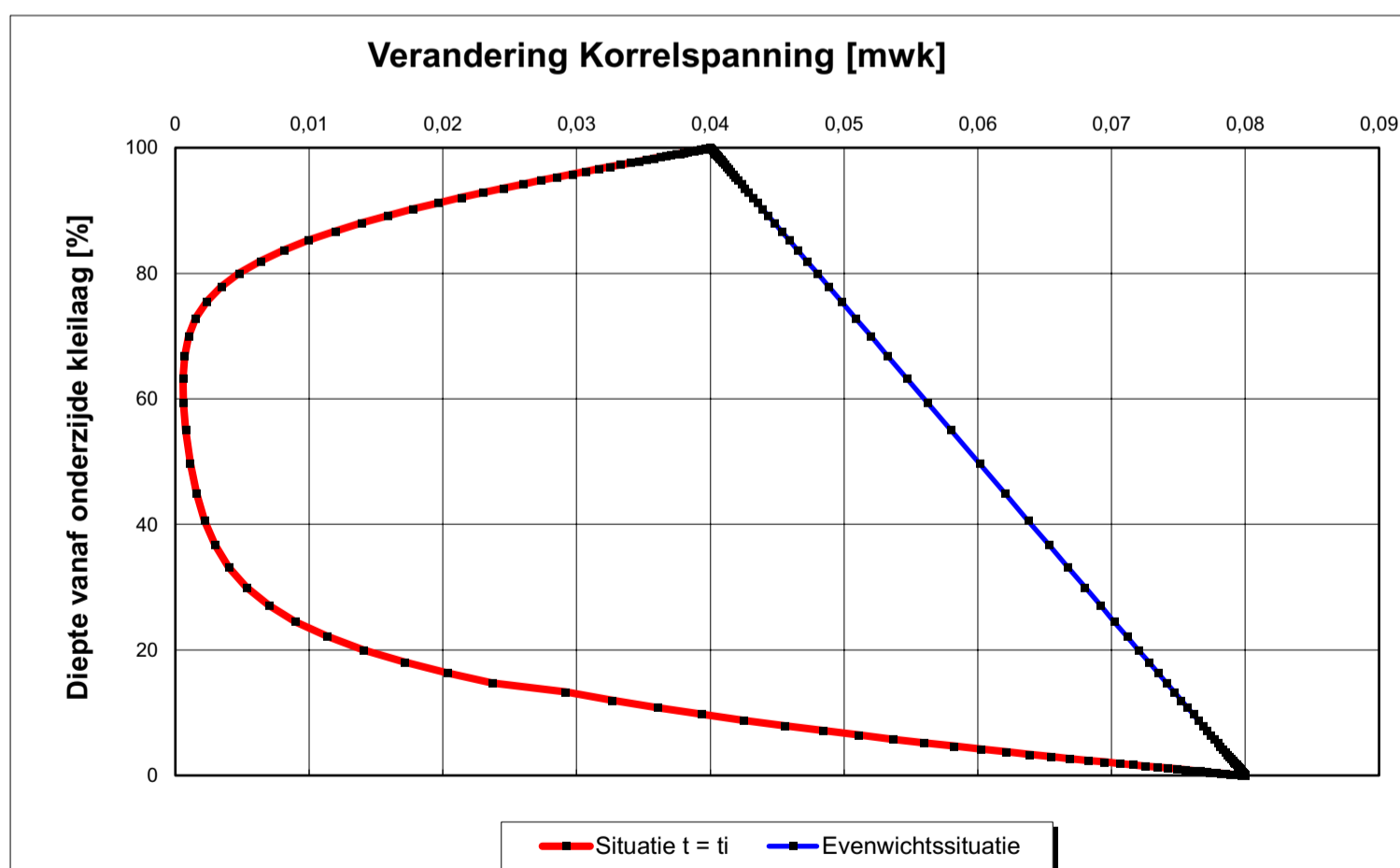
eindzetting		1,64 mm	
hydrodynamische periode		1,14E+04 d	= 31,21 j
zetting op t=ti		23 % van eindzetting	
zetting op t=ti		0,38 mm	

### Dubbelzijdig gedeelte

eindzetting		3,87 mm	
hydrodynamische Periode	Th	6,72E+03 d	= 18,42 j
zetting op t=ti		22 % van eindzetting	
zetting op t=ti	zt =	0,85 mm	

### Berekening

zetting na oneindig lange belasting	5,51 mm
zetting op t = ti	1,24 mm



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**