

WINDOW *fase 1*



Verkenning HTO

Het Groene Net, Sittard-Geleen

door

Uitvoeringsteam WINDOW (IF Technology, TNO, Deltares, KWR)

21 december 2020

Verkenning HTO Het Groene Net, Sittard-Geleen



provincie limburg



if

TNO

Deltares

KWR

Dit rapport is gezamenlijk opgesteld door het uitvoeringsteam van WINDOW.

	IF Technology	TNO	Deltares	KWR
Bijdragen	Hoofdstuk 1 en 3 - 7 Projectleiding	Hoofdstuk 2 en 5 - 7	Hoofdstuk 3, 4, 6 en 7	Hoofdstuk 1 en 3 - 7 Coördinatie WINDOW
Coördinatie	Rob Kleinlugtenbelt	Frank van Bergen	Ivo Pothof	Marette Zwamborn
Auteurs	Hette de Vlieger Peter Oerlemans	Dorien Dinkelman Willem Jan Zaadnoordijk Mariëlle Koenen	Sofie Kooreman Johan Valstar	Stijn Beernink Gilian Schout
Kwaliteitsborging	Rob Kleinlugtenbelt	Armin Menkovic Frank van Bergen	Ivo Pothof	Martin Bloemendal Niels Hartog

21 december 2020

Dit project is mede gefinancierd door TKI-Energie en TKI-Watertechnologie uit de Toeslag voor TopConsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat. WINDOW is een acroniem voor Warmtevoorziening In Nederland Duurzamer met Ondergrondse Warmteopslag. Doel van het WINDOW-programma is het wegnemen van technische, juridische en bedrijfseconomische belemmeringen en beter inzicht krijgen in de effecten voor het verantwoord toepassen van ondergrondse warmteopslag, zodat ondergrondse warmteopslag na 2025 als bewezen techniek kan worden toegepast en kan bijdragen aan kostenreductie van collectieve warmtesystemen op systeemniveau.

Projectnummer 402656
Rapportnummer KWR 2020.141

Keywords
Ondergrondse warmteopslag, HTO

Jaar van publicatie
2020

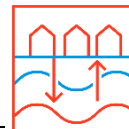
Meer informatie
Marette Zwamborn
E marette.zwamborn@kwrwater.nl

Rob Kleinlugtenbelt
E R.Kleinlugtenbelt@iftechnology.nl

December 2020 ©

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

Management samenvatting



WINDOW fase 1

Verkenning ondergrondse warmteopslag Het Groene Net, Sittard-Geleen

Beoordeling
(zie toelichting)

Over deze verkenning (hoofdstuk 1)

In het onderzoeksprogramma WINDOW zijn op zes locaties verkenningen uitgevoerd naar de haalbaarheid van ondergrondse warmteopslag (Hoge Temperatuur Opslag - HTO). De locatie Het Groene Net is één van de locaties waar een verkenning is uitgevoerd. Met deze verkenning is de potentie van seizoensopslag in het warmtenet van Ennatuurlijk onderzocht. Daarnaast dient deze verkenning ook als vergelijking met de andere verkenningen binnen WINDOW vanuit de gedachte 'learning-by-doing'.

In de verkenningen zijn meerdere systeemconcepten beschouwd. Er is ten minste één systeemconcept per verkenning volledig uitgewerkt, tot en met de businesscase en evaluatie van effecten en risico's. Deze is weergegeven, als mogelijk alternatief hoe HTO op deze locatie kan worden ingepast. We merken daarbij op dat het uitgewerkte systeemconcept een schetsontwerp is: verdere optimalisatie valt buiten de scope van deze verkenningen.

Geohydrologie (hoofdstuk 2)

Meest geschikte bodemlaag: Formatie van Breda z3 of z4,
Geologisch verbreukt gebied, bruinkoollagen

Diepte opslag: 112-145 of 165-215 m-mv

Bodemtemperatuur opslagdiepte: 13,0 of 14,4°C

Proefboring: aangeraden (gemiddelde onzekerheid ondergrond)

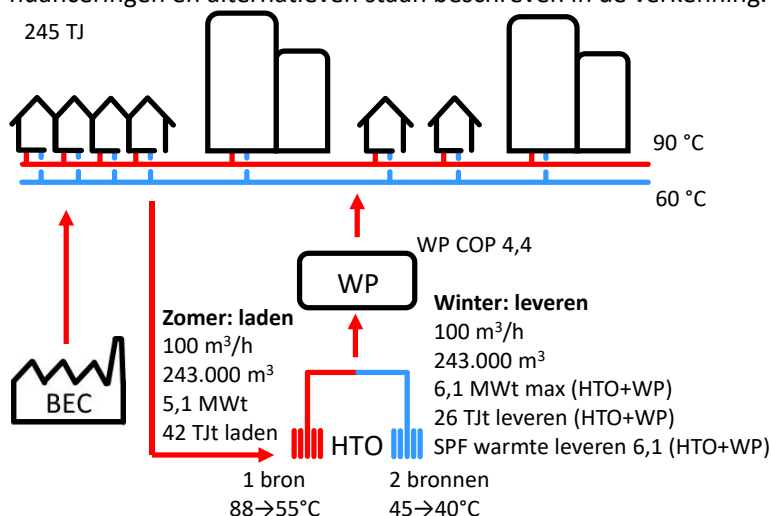
a

Uitgewerkt systeemconcept (hoofdstuk 3)

Het systeemconcept is hier op schematische wijze weergegeven, ten behoeve van overzicht in één oogopslag en voor vergelijking van de verkenningen onderling. De detail opzet, nuancerings en alternatieven staan beschreven in de verkenning.

1

b



Thermisch opslagrendement (hoofdstuk 4)		<i>variant 1</i>	
Systeemefficiëntie in jaar 2	33%	(14 TJ warmte uit HTO)	
Systeemefficiëntie in jaar 10	50%	(21 TJ warmte uit HTO)	
Systeemefficiëntie in jaar 50	60%	(25 TJ warmte uit HTO)	
Business case (hoofdstuk 4)			
Investering	5,6 M€ = 1,18 M€/MWt (bij gemiddeld vermogen 4,8 MWt)		b
Investering bronnen	1,0 M€	18%	
Investering warmtepomp	2,6 M€	46%	
Investering overig	2,0 M€	36%	
Operationele kosten	0,36 M€/jaar		
Kosten opgeslagen warmte	0,00 M€	0%	
Kosten elektriciteit	0,15 M€	43%	
Kosten overig	0,21 M€	57%	
Kostprijs geleverde warmte	29,3	€/GJ	
Kostprijs geladen warmte	0,0 €/GJ		
Referentie: kostprijs warmte gasketel 12 €/GJ			
CO₂ emissie (hoofdstuk 4)			
CO ₂ emissie in periode van 30 jaar	21,4	kg CO ₂ /GJ	
CO ₂ emissie warmte laden	2,9 kg CO ₂ /GJ		
CO ₂ emissie warmte leveren	18,5 kg CO ₂ /GJ		
Referentie: emissie warmtelevering gasketel 62 kg CO ₂ /GJ			
Referentie: in 2030 doelstelling warmtenetten 18,9 kg CO ₂ /GJ			
Opmerking: gerekend met huidig kental voor elektriciteit 0,34 kg CO ₂ /kWh (bron NTA 8800)			
Thermische effecten (hoofdstuk 5)			
Thermische straal warmteopslag:	60 of 48 meter		
Horizontale warmte uitstraling:	na 50 jaar ligt de 25°C contour op circa 170 of 210 meter vanaf de bron (Breda z3 of z4)		
Verticale warmte uitstraling:	na 50 jaar ligt de 25°C contour op circa 125 m-mv (bronnen in Breda z4, nog steeds stijgend) Bij bronnen in Breda z3 bereikt de 25°C contour het maaiveld (niet acceptabel)		
Juridische haalbaarheid (hoofdstuk 5)			
Provinciaal beleid	toepassing HTO niet strijdig met beleid		(2)
Zoet of zout grondwater:	zoet grondwater		
Stakeholders ondergrond:	op de beoogde diepte van de opslag zijn er beperkte aantal belangen in de omgeving		
Inpassing bronnen:	het beoogde gebied heeft een relatief lage stedelijkheid		

Beoordeling: positieve aspecten, nadelen en risico analyse (hoofdstuk 6 en 7)		
Positieve aspecten van deze locatie voor toepassing HTO:		
1	Zowel de bron als een groot deel van de warmtevraag is reeds aanwezig. Aanvullend wordt voor zowel de vraag als de bronnen een groei voorzien in de toekomst.	
(2)	Op de locatie HGN is zoet grondwater in het beoogde opslagpakket aanwezig. Zoet grondwater heeft een hogere waarde in vergelijking met zout grondwater. Het risico ten aanzien van vergunbaarheid wordt bij HGN als een 'gemiddeld' risico gezien.	
Nadelen van deze locatie voor toepassing HTO:		
a	De warmteopslag wordt aangelegd onder bruinkoollagen. Onbekend is welk effect de hogere temperaturen hebben op de bruinkoollagen, meer onderzoek is nodig.	
b	De omvang van het HTO-systeem is relatief klein. Hierdoor liggen de kosten voor warmte vanuit de HTO relatief hoog en is de prijs ook gevoelig voor een schommelingen in omvang.	
Conclusie (hoofdstuk 7) De toepassingsmogelijkheden van HTO op deze locatie kent specifieke beperkingen. De geringe omvang van het systeem resulteert in een hoge warmteprijs. De ligging in een geologisch sterk verbreukt gebied en de aanwezigheid van bruinkoollagen resulteren in hogere risico's. Het WINDOW programma heeft als doel om HTO verder te ontwikkelen tot een bewezen techniek. Op dit moment bestaan er nog (algemene) technische, juridische en financiële onderzoeksvragen voor toepassing van HTO. De specifieke beperkingen op deze locatie zijn wellicht overkomelijk, maar vanwege deze nadelen is deze locatie minder geschikt om binnen het WINDOW programma HTO tot een bewezen techniek te brengen.		

Inhoudsopgave

1	Inleiding	8
1.1	Achtergrond	8
1.2	Doelstelling	9
1.3	Studiegebied	9
2	Geologische haalbaarheid en locatiekeuze	11
2.1	Hydrogeologische situatie	11
3	Technische en economische haalbaarheid	16
3.1	Energetische uitgangspunten warmte aanbod en - vraag	16
3.2	Uitvoering	17
3.3	Basisontwerp van de HTO	20
4	Analyse van uitvoeringsvarianten	22
4.1	Thermische berekeningen	22
4.2	Financiële analyse	25
4.3	CO ₂ -besparing	33
5	Milieu hygiënische en juridische aspecten	35
5.1	Grondmechanica: zetting en opheffing	35
5.2	Thermische effecten	35
5.3	Reflectie op mogelijke thermische effect op de grondwaterkwaliteit op basis van bestaande data	39
5.4	Juridisch raamwerk	45
5.5	Omgevingsscan	46
6	Risico inventarisatie en plan van aanpak vervolgstappen	49
6.1	Introductie	49
6.2	Inschatting relevantie van de projectrisico's	49
6.3	Plan van aanpak vervolg	56
7	Conclusies	58
	Referenties	60

Bijlagen	61
Bijlage I. Ontwerpnorm bronnen	61
Bijlage II. Brontechniek	66
Bijlage III. Beschrijving numerieke model SEAWATv4	69
Bijlage IV. Grond mechanische processen	72
Bijlage V. Generieke risico-inventarisatie voor HTO	75

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Hoge Temperatuur opslag (HTO) kan een belangrijke schakel zijn in de optimale koppeling van warmtevraag enerzijds en duurzame warmte anderzijds, zo ook voor het warmtenet Het Groene Net in Sittard-Geleen. In de toekomst zal het net steeds verder verduurzaamd worden, wat inhoudt dat de inzet van gasketels steeds verder wordt afgebouwd. Door warmte van duurzame bronnen in de zomer op te slaan en deze in de winter weer te gebruiken, kunnen duurzame bronnen het hele jaar door zo optimaal mogelijk worden ingezet en kan in de winter (een deel van) de piekvraag worden ingevuld.

In het programma WINDOW zijn zes verkenningen uitgevoerd naar de haalbaarheid van HTO. De twee meest kansrijke verkenningen worden geselecteerd. In WarmingUP wordt voor de geselecteerde verkenningen een proefboring uitgevoerd en wordt een ontwerp gemaakt van de HTO. Voorzien wordt dat de ontworpen HTO's daarna gerealiseerd worden. Dit vervolg op WarmingUP dient nog nader vorm gegeven te worden.

HTO kan een belangrijke schakel zijn in de optimale koppeling van warmtevraag enerzijds en duurzame warmte anderzijds, zo ook voor Het Groene Net. In de toekomst zal het net in omvang toenemen en is een duurzame warmtelevering van belang. Door warmte van duurzame bronnen in de zomer op te slaan en deze in de winter weer te gebruiken, kunnen duurzame bronnen het hele jaar door zo optimaal mogelijk worden ingezet.

In het programma WINDOW is een zestal verkenningen uitgevoerd naar de haalbaarheid van HTO. De twee meest kansrijke verkenningen worden geselecteerd. In WarmingUP wordt voor de geselecteerde verkenningen een proefboring uitgevoerd en wordt een ontwerp gemaakt van de HTO. Voorzien wordt dat de ontworpen HTO's daarna gerealiseerd worden. Dit vervolg op WarmingUP dient nog nader vorm gegeven te worden.

Wat is HTO?

HTO is het opslaan van hoge temperatuurwarmte in de bodem. Bij een opslagtemperatuur van circa 60 - 90°C wordt gesproken van hoge temperatuur. HTO-systemen bestaan uit één of meerdere doubletten met een hete en een lauwe bron. Daarnaast hebben ze twee operatietypes per jaar. In de zomerperiode is de warmtevraag veelal beperkt of geheel afwezig bij de afnemer. De aanbieder van warmte heeft echter wel warmte beschikbaar. Deze wordt dat tijdelijk opgeslagen in de bodem. Gedurende de winterperiode draait deze operatie om. De aanbieder van warmte en de HTO voeden nu het warmtenet, doordat de vraag naar warmte in de winter relatief hoog is.

De opslag van warmte in de ondergrond gaat gepaard met warmteverliezen naar de omgeving. Om de warmteverliezen te beperken, is het van het belang dat het systeem zoveel mogelijk uren per jaar draait. Hoe groter het opgeslagen volume warm water is, hoe kleiner de relatieve warmteverliezen zijn. Gedurende het terugwinnen van de opgeslagen warmte (leveren/ontladen) zal de temperatuur van het grondwater dat wordt onttrokken uit de hete bron steeds verder afnemen. Om het mogelijk te maken om een constante gewenste temperatuur te leveren aan het warmtenet kan worden overwogen om een warmtepomp te installeren.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van deze verkenning is tweeledig. Ten eerste heeft Ennatuurlijk als doel de inpassing van een HTO in het leveringsgebied rond Sittard. Ten tweede speelt deze verkenning een rol in het WINDOW project.

Het primaire doel van een HTO in het leveringsgebied van Sittard is om de Biomassa Energiecentrale Sittard (BES) op een vaste basislast te kunnen laten draaien. Het zomerse overschot van de BES wordt dan opgeslagen en 's winters terug geleverd aan naburige warmtegebruikers. HTO maakt het mogelijk om bronnen en het netwerk het hele jaar door zo constant en optimaal mogelijk te gebruiken en kan zodoende een belangrijke bijdrage leveren aan de groei en verduurzaming van warmtenetten. Aandachtspunten zijn o.a. de seizoenseffecten van de warmtevraag, capaciteit van het huidige warmtenetwerk en duurzame invulling van de piekvraag. Ennatuurlijk wil met deze studie voornamelijk inzicht krijgen in de technische, juridische en financiële haalbaarheid van HTO in warmtenetten.

Het doel vanuit het WINDOW project is om een reeks verkenningen parallel uit te voeren, en vanuit de gedachte 'learning-by-doing' te leren van de verschillende situaties en de kansrijkheid van HTO op verschillende locaties. De verkenningen worden zo ver uitgewerkt, dat de meest kansrijke HTO-locaties geselecteerd kunnen worden. De geselecteerde HTO-locaties worden verder voorbereid richting uitvoering in het WarmingUP-programma, thema 5. Doel is om te komen tot operationele HTO projecten, die laten zien dat HTO succesvol kan worden toegepast.

1.3 Studieggebied

Het warmtenet van Sittard, genaamd 'Het Groene Net' is globaal weergegeven in Figuur 1-1. De primaire bron voor dit warmtenet is de Biomassa Energiecentrale Sittard (BES) in het noorden van het warmtenet. Aan Het Groene Net is een deel van de bebouwde omgeving van Sittard aangesloten. In overleg met Ennatuurlijk is de voorkeurslocatie van de HTO vastgesteld in het gebied rondom het Fortuna Sittard stadion.



Figuur 1-1: Studieggebied HTO Het Groene Net. De rode lijnen markeren het transportnet, de blauwe lijnen het distributienet

2 Geologische haalbaarheid en locatiekeuze

2.1 Hydrogeologische situatie

Voor de analyse van de geschiktheid van de ondergrond, is gebruikt gemaakt van de openbare modellen en datasets (DGM/REGIS II v2.2, NLOG, DINO, grondwatertools), aangevuld met boorbeschrijvingen van lokale boringen en/of informatie van open bodemenergiesystemen. TNO en IF Technology hebben deze informatie verzameld en geïnterpreteerd.

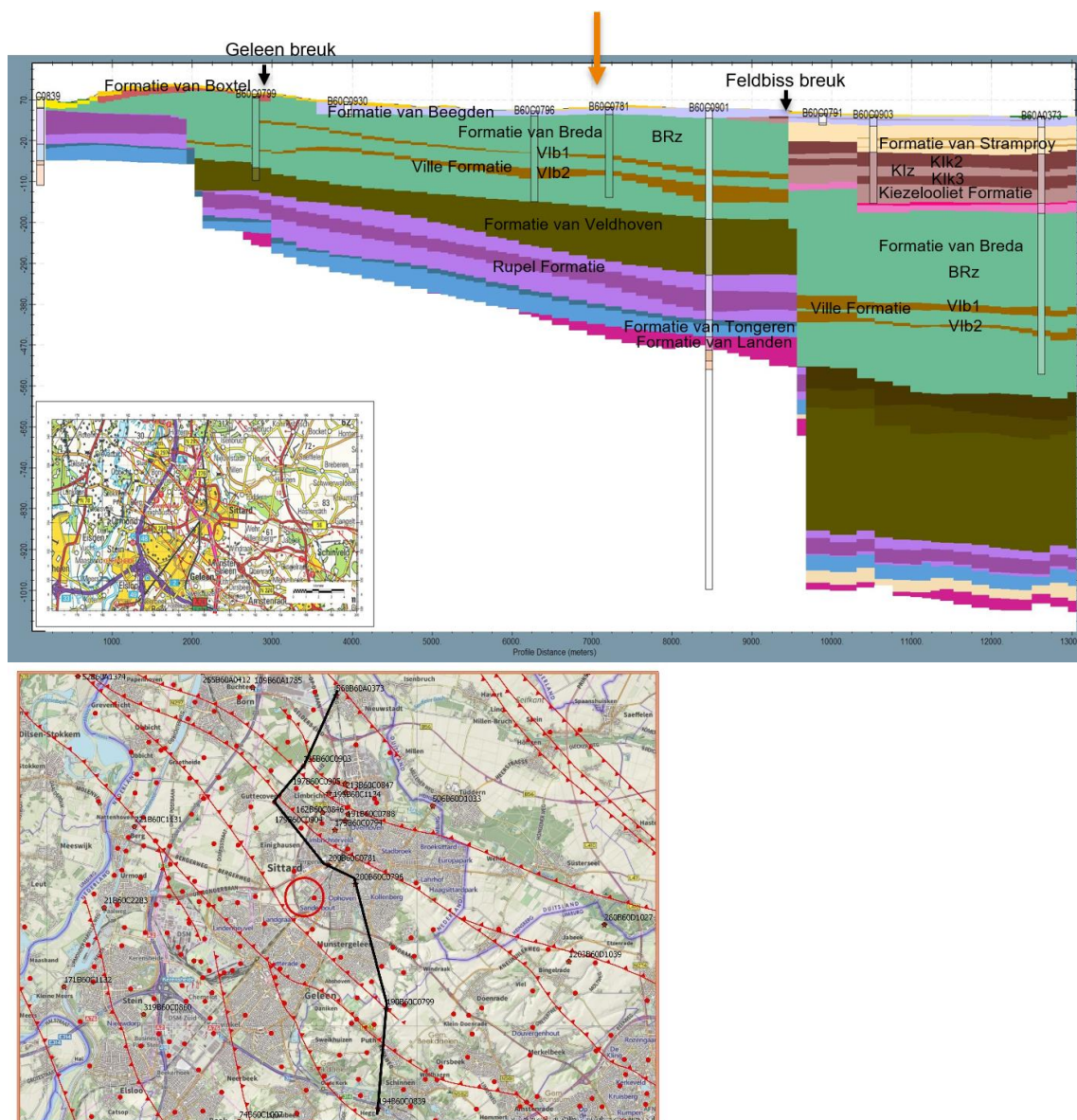
2.1.1 Beschrijving ondergrond

De beoogde HTO locatie van Het Groene Net ligt rondom het Fortuna Sittard stadion. De ondergrond in de omgeving van de beoogde HTO locatie bestaat uit een opeenvolging van verschillende formaties, die weer zijn opgesplitst in verschillende deellagen (hydrogeologische eenheden), zie doorsnede van het onderzoeksgebied in Figuur 2-1. De verwachte geologische eenheden met mogelijk geschikte watervoerende lagen op een diepte tot ~500 m is de Formatie van Breda, afgewisseld met de bruinkoollagen van de Ville Formatie. De Formatie van Peize en Waalre, Maasluis en Oosterhout (in een groot deel van Nederland voorkomende formaties met potentie voor HTO) zijn niet aanwezig in dit gebied, de dieper gelegen Rupel Formatie en Formatie van Tongeren zijn lithologisch gezien minder geschikt voor de toepassing van HTO, ook wordt de doorlatendheden van de zandige laagpakketten in deze formaties laag geschat (<1 m/d, ThermoGIS; <1-4 m/d, REGIS II v2.2). Dit maakt dat de focus van deze analyse ligt op de Formatie van Breda. Tabel 2-1 laat een overzicht van de verwachte hydrogeologische eenheden zien.

Het gebied nabij de beoogde locatie is sterk verbreekt, de HTO locatie ligt op ~800 meter van de Geleen breuk (open breuk) ten zuiden van Sittard, waardoor er kans is op verbinding met bovenliggende watervoerende lagen en het oppervlak. De Feldbiss breuk (open breuk) ten noorden van de beoogde HTO locatie ligt op grotere afstand (>1 km). Door de aanwezigheid van breuken in dit gebied, moet er rekening worden gehouden met seismische activiteit. De kans op geïnduceerde seismische activiteit door HTO wordt klein ingeschat, echter zijn de mogelijke gevolgen voor het project wel groot. Dit moet in eventuele vervolgstappen gekwantificeerd worden. Algemeen advies is om zo ver mogelijk bij de breuken vandaan te blijven, andere beheersmaatregelen worden beschreven in Hoofdstuk 6.

De Formatie van Breda bevat zoet water. De beoogde HTO locatie ligt buiten de grondwaterbeschermingsgebieden (i.e. grondwaterbeschermingsgebied, boringsvrijzone, 100-jaarszone, waterwingebied drinkwater, Natura2000). Ten noorden van de Feldbiss breuk ligt een boringsvrije zone.

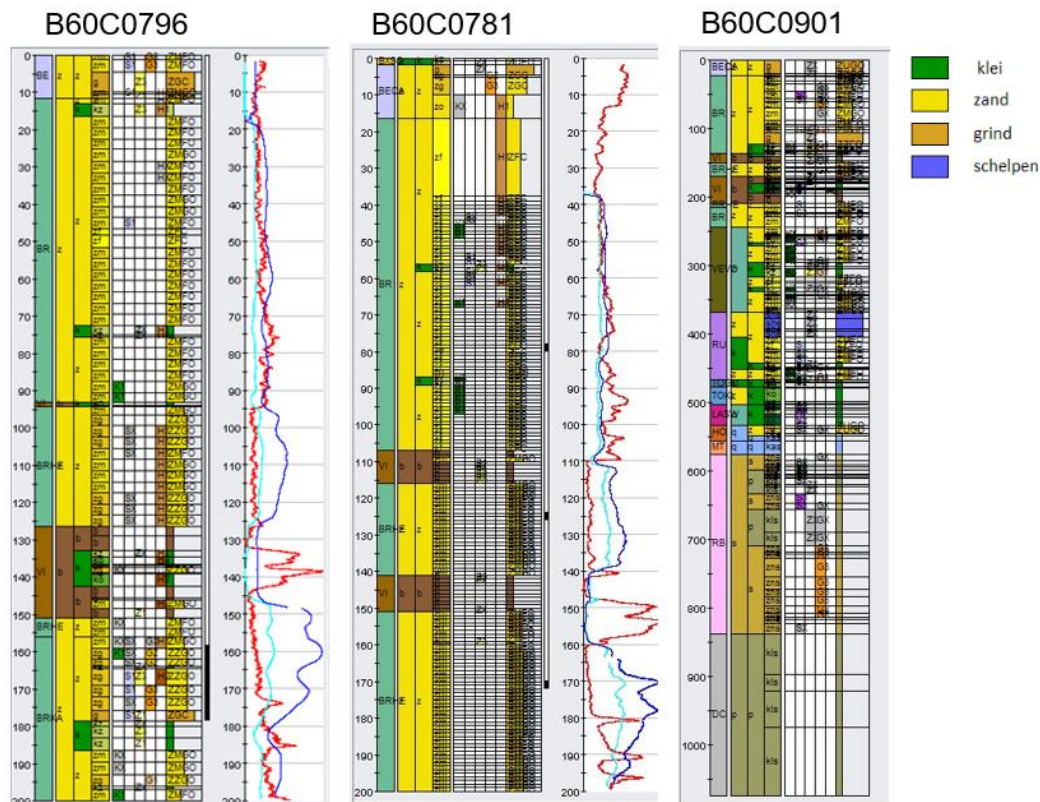
Voor meer gedetailleerde informatie over de ondergrond is gekeken naar boringen in de omgeving, binnen de breuklijnen. De dichtstbijzijnde diepe boringen in de DINO database zijn weergegeven in Figuur 2-2. Daarnaast is gebruik gemaakt van de WKO proefboring en de warme en koude WKO put boringen bij het Zuyderland Ziekenhuis (~800m ten Zuiden van de HTO locatie), hier is de onderste bruinkoollaag in de Formatie van Breda aangeboord. Een warmteopslag systeem voor Het Groene Net in deze bodemlagen moet dus rekening houden met het bestaande systeem van het ziekenhuis.



Figuur 2-1 – Doorsnede (REGIS II v2.2) door het gebied van de beoogde HTO locatie, van west naar oost. De rode cirkel op de plattegrond en de oranje pijl in de doorsnede geven de mogelijke HTO locatie aan. De rode lijnen geven de breuken in het gebied weer.

Tabel 2-1 – Overzicht van de verwachte geologische eenheden voor de beoogde HTO locatie. Op basis van REGIS II v2.2.

Hydrogeologische eenheid	Modeleenheid REGIS II v2.2	Opmerking
Fm. van Breda, 2 ^e zandige eenheid	BRz2	Watervoerende laag
Ville Formatie, bruinkool laag	Vib1	Mogelijk scheidende laag
Fm. van Breda, 3 ^e zandige eenheid	BRz3	Watervoerende laag
Ville Formatie, bruinkool laag	Vib2	Mogelijk scheidende laag
Fm. van Breda, 4 ^e zandige eenheid	BRz4	Watervoerende laag



Figuur 2-2 - Boorgatmetingen en geohydrologische interpretatie van de drie boringen rondom de beoogde HTO locatie nabij Sittard. De rode lijn is de gemeten gamma ray straling, een hoge gamma ray (rechts) duidt vaak op shale/klei of de aanwezigheid van glauconiet, een lagere gamma ray (links) geeft meer zandige sedimenten aan, de bruinkoollagen geven ook een lage gamma ray. Boring B60C0901 heeft geen boorgatmeting, enkel boorbeschrijving.

2.1.2 Beschrijving doelpakketten ondergrond

Formatie van Breda en Ville Formatie

De lithologie van de Formatie van Breda bestaat uit puur kwarts zand met bruinkoollagen (Ville Formatie) en ligt tussen de 10-200 m-mv. Deze bruinkool lagen (Vib1 en Vib2) zouden kunnen dienen als afsluitende laag. Echter is de afsluitende capaciteit en het effect van hoge temperaturen op deze lagen nog onbekend. Op de boorgatmeting geven de bruinkool lagen een heel lage gamma ray (Figuur 2-2).

De WKO proefboring en warme en koude WKO put boringen bij het Zuyderland Ziekenhuis boren de onderste bruinkoollaag (Vib2) aan. Op 115-150 m-mv is het tweede zandpakket van de Fm. van Breda (BRz2) aangetroffen. De bruinkoollaag boven deze zandlaag (Vib1) varieert in dikte van 0.4-2.8 m. Op een diepte van 165 m tot 180 m is tijdens de proefboring een dikke bruinkoollaag met klei aangetroffen, er is niet verder geboord naar het onderliggende zandpakket (BRz4). Echter is dit zandpakket wel aanwezig in andere boringen in de omgeving, en wordt dit ook verwacht in ondergrond van de beoogde HTO locatie.

Op basis van de boorgegevens wordt in de ondergrond van de HTO locatie verwacht dat de tweede zandige eenheid van de Fm. van Breda (BRz2) een ongeveer 90 m dik pakket is met enkele dunne kleilagen, maar waarschijnlijk bevat deze geen afsluitende kleilaag. De derde zandige eenheid van de Fm. van Breda (BRz3), onder de eerste bruinkool laag, is ongeveer 25 m dik en zou mogelijk als opslag pakket kunnen dienen, mits de bruinkoollaag (Vib1) geschikt is als afsluitende laag. Hetzelfde geldt voor de vierde zandige eenheid van de Fm. van Breda (BRz4), hier is in de gamma ray een dik pakket te zien met een bruinkoollaag (Vib2) erboven, als eventuele afsluitende laag (lage gamma ray). Onder deze

bruinkoollaag is een hoge gamma ray straling te zien en onder in het pakket zijn ook een aantal pieken in de gamma ray te zien, dit zijn waarschijnlijk klei inschakelingen. Dit is ook gevonden in de WKO boorstaten.

Uit de meetgegevens van de capaciteitsproeven die zijn uitgevoerd bij het Zuyderland Ziekenhuis volgt dat de bruinkool-laag boven BRz3 (Vlb1) een goede afsluitende werking heeft (hoge weerstand/c-waarde). Ook volgt uit de stijghoogtemetingen in de BRz3 en BRz4 in boring B60C0781 dat de bruinkoollaag Vlb2 ook een hoge weerstandswaarde heeft en dus een goede afsluitende werking.

De doorlatendheden van de Formatie van Breda worden in dit gebied voor de BRz3 rond de 7 m/d geschat en voor de BRz4 rond de 5 m/d (REGIS II v2.2). Dit komt goed overeen met de geschatte doorlatendheden uit de capaciteitsproeven van de WKO bij het Zuyderland Ziekenhuis (gemiddeld 5.9 m/d).

2.1.3 Conclusie meest geschikte opslagpakket

Tabel 2-2 geeft een overzicht van de formaties die onderzocht worden voor deze verkenning en de hydrogeologische parameters die gebruikt worden voor de modelsimulaties.

Tabel 2-2 Geohydrologische parameters gebruikt voor de simulaties. Deze informatie is laag specifiek en hier alleen gegeven voor de hydrogeologische eenheden die in aanmerking komen voor gebruik als opslagpakket. Het model gebruikt gedetailleerde informatie die gespecificeerd is voor alle lagen.

Hydrogeologische parameter	Naam	Waarde	Waarde	Eenheid
Opslagpakket	Name_aq	BRz3	BRz4	-
Achtergrond temperatuur	T_amb	13	14.4	°C
Dikte opslagpakket	L_storage	33	50	m
Horizontale permeabiliteit (<i>incl. standaarddeviatie REGIS II v2.2 indien van toepassing</i>)	K_h	7 (3.7)	6 (2.8)	m/d
Verticale permeabiliteit ¹	K_v	3.5	3	m/d

Uit bovenstaande tabel volgt dat het doorlaatvermogen van beide zandige eenheden BRz3 en BRz4 waarschijnlijk goed is (231 m²/d en 300 m²/d, resp.). Echter is de bruinkoollaag boven de BRz3 er dun, wat de BRz4 het meest geschikt opslagpakket voor HTO maakt. Kanttekening bij de BRz4 is dat deze laag niet is aangeboord bij de WKO van het Zuyderland Ziekenhuis, wat de dikte inschatting onzeker maakt.

2.1.4 Onzekerheden ondergrond

Op basis van de beschikbare gegevens is een zo goed mogelijke inschatting van de hydrogeologische ondergrond parameters gemaakt. Echter, zoals in de vorige paragrafen al aangegeven, bestaan er onzekerheden wat betreft de ondergrond. De belangrijkste onzekerheden voor de locatie Het Groene Net (Sittard) worden hieronder beschreven;

- *Dikte van het opslagpakket BRz4*
Op basis van boringen in de verdere omgeving (1.5-5 km) wordt geschat dat de BRz4 wel aanwezig is. Deze zandige eenheid is niet aangeboord in de WKO boringen op ~800 m afstand, waardoor een nauwkeurige inschatting van de dikte lastig is.
- *Effect van hoge temperaturen op bruinkoollagen*

¹ Roelofsen, F., & Goorden, N. (2008). Grondwatereffecten aan de oppervlakte (gebracht): Onderzoek naar effecten van stopzetting grondwateronttrekking DSM Delft-Technisch rapport.
<http://resolver.tudelft.nl/uuid:439d4a1d-74b2-4647-9d7e-65f4f51b88f7>

Het effect van opslag van hoge temperaturen onder deze bruinkoollagen is nog onbekend. Over het algemeen wordt de oxidatie van organische stof (met name veen) boven de grondwaterspiegel wordt gestimuleerd door hogere temperaturen. Om het effect van de hoge temperatuur te kunnen inschatten is meer onderzoek nodig naar deze bruinkoollagen.

- *Breuken*

Het gebied van de beoogde HTO locatie is sterk verbruikt, op ~800 m afstand van de beoogde locatie ligt een open breuk. Hier kan ongewenste lekkage van diepere lagen naar ondiepere lagen en het oppervlak optreden. Ook seismiciteit kan een risico vormen. Algemeen advies is om zo ver mogelijk bij een (open) breuk vandaan te blijven.

3 Technische en economische haalbaarheid

3.1 Energetische uitgangspunten warmte aanbod en - vraag

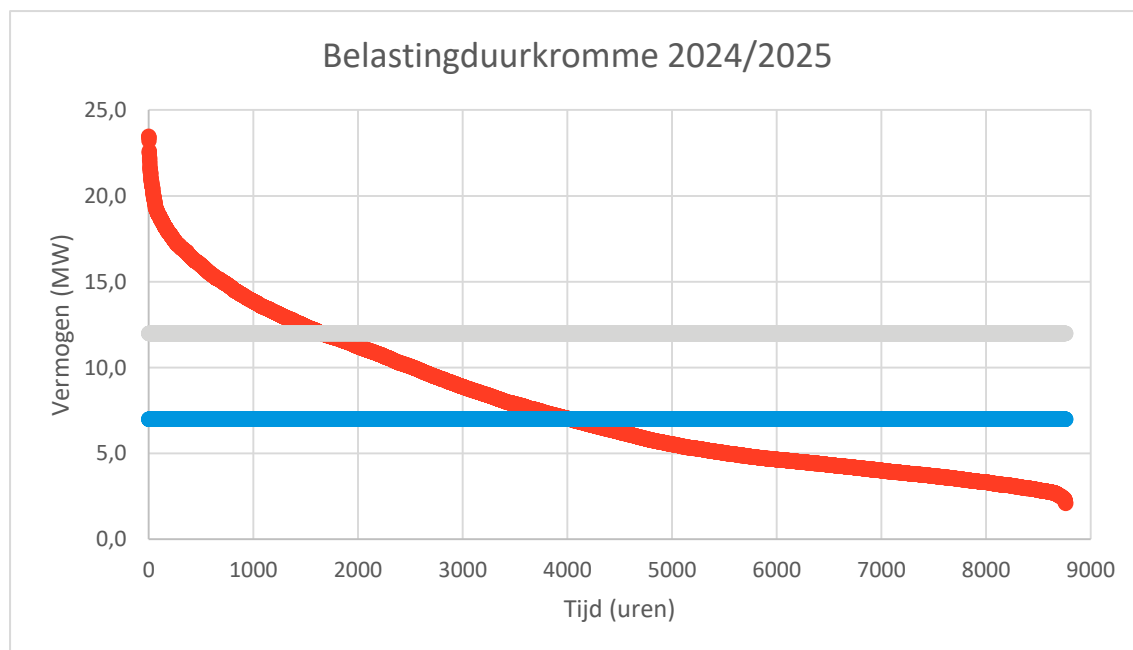
3.1.1 Vraag

In deze studie wordt gekeken naar de huidige warmtevraag van Het Groene Net Noord, wijk Hoogveld, aangevuld met de toekomstige warmtevraag van nieuwbouwwijk de Haese en een deel van de vraag van het Zuyderland ziekenhuis. Deze toevoeging van Haese en het Zuyderland ziekenhuis wordt verwacht plaats te vinden in 2024/2025. Deze verwachte warmtevraag bedraagt circa 246.000 GJ_t, met een piekvermogen rond de 23 MW_t. De bijbehorende belastingduurkromme is te zien in Figuur 4-2.

3.1.2 Aanbod

De biomassa energiecentrale Sittard (BES) levert de basislast van het warmtenet. De biomassa energiecentrale heeft een maximaal vermogen van 7 MW_t (zie ook Figuur 4-2). Het piekvermogen wordt geleverd met een gasketel.

Een eerste inschatting van de inzet van de HTO wordt gemaakt aan de hand van een jaarbelastingduurkromme (zie Figuur 3-1). Ennatuurlijk streeft naar een zo laag mogelijke pieklevering, omdat die op het moment nog niet duurzaam geleverd wordt. Met een HTO kan de BES het hele jaar door worden ingezet (blauwe lijn). In de winter draait de HTO in middenlast (grijze lijn).



Figuur 3-1: Inschatting inzet HTO in het Groene Net aan hand van jaarbelastingduurkromme.

Met de BES kan in de zomer maximaal 42.300 GJ_t (11.750 MWh_t) worden opgeslagen. Hoeveel uiteindelijk opgeslagen kan worden, hangt onder andere af het vermogen van de HTO. Om alle warmte op te kunnen slaan, is een vermogen van circa 5 MW_t nodig, daarom is in deze studie in eerste instantie uitgegaan van een HTO van circa 5 MW_t. Hiermee kan in de zomer 42.300 GJ_t aan warmte worden

opgeslagen. Hoeveel warmte uiteindelijk geleverd wordt aan het warmtenet, hangt af van het systeemconcept (zie paragraaf 3.2) en het systeemrendement (zie paragraaf 4.1)

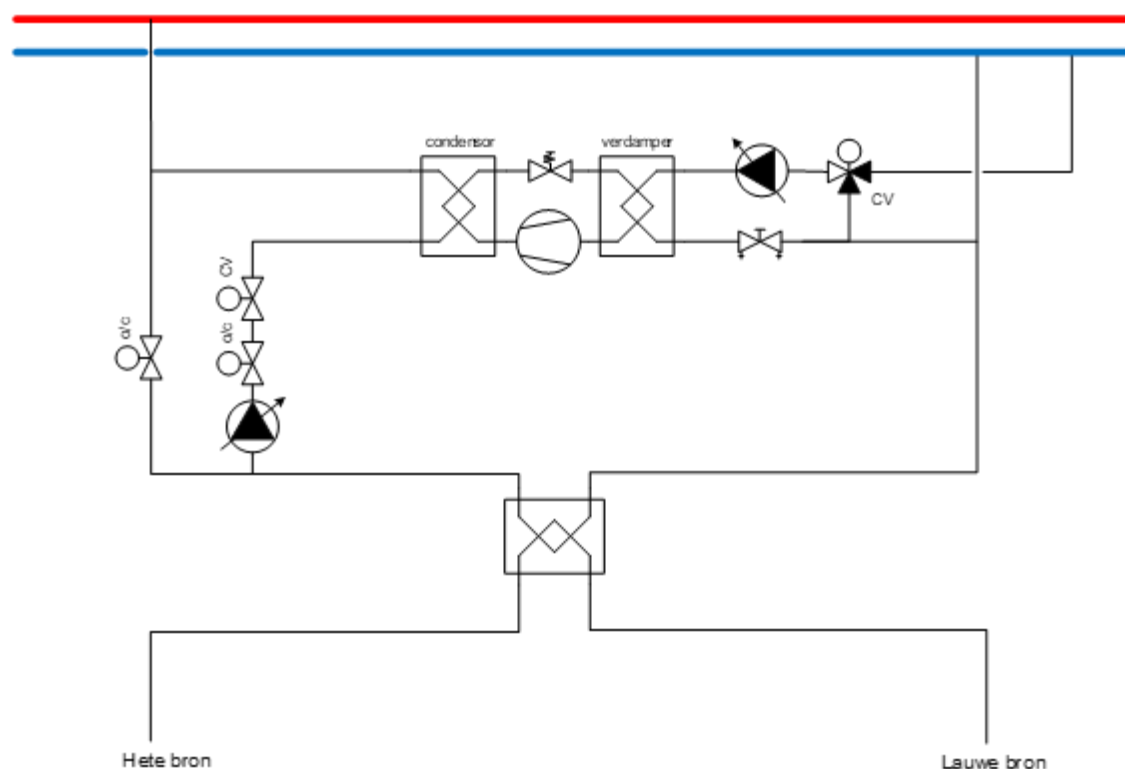
3.1.3 Temperatuurniveaus en debieten

De aanvoertemperatuur fluctueert tussen de 85 °C en 90°C. De retourtemperatuur fluctueert tussen de 50 en 60°C. In overleg met Ennatuurlijk is afgesproken om in deze studie uit te gaan van een constante aanvoertemperatuur van 90°C en een constante retourtemperatuur van 60°C.

Uitgaande van een gemiddelde temperatuurval over de TSA van de HTO van 2°C, betekenen bovenstaande uitgangspunten dat het grondwater opgeslagen wordt bij een temperatuur van 88°C.

3.2 Uitvoering

Ennatuurlijk heeft de voorkeur uitgesproken voor een op zichzelf staand systeem. Daartoe is een warmtepomp nodig om de aanvoertemperatuur hoog genoeg te houden. De inpassing van HTO in het warmtenet is schematisch weergegeven in Figuur 3-2.



Figuur 3-2: Schematische weergave inpassing HTO met warmtepomp in warmtenet

De HTO wordt in de zomer geladen met 90°C warmte afkomstig uit het transportnet. Door een temperatuurverlies in de warmtewisselaar wordt warmte opgeslagen met een temperatuur van 88°C. In de winter levert de HTO in combinatie met de warmtepomp warmte terug aan het transportnet op een temperatuur van 90°C. Hierbij wordt de lauwe bron 'geladen' met 45°C. Deze wijze van inpassing kan in principe overal worden toegepast lang het transportnet, zolang de ondergrond geschikt is en er ruimte is om alles ondergronds en bovengronds in te passen. In de winter levert de combinatie van HTO en de warmtepomp warmte aan het netwerk na het verdeelstation.

COP-warmtepomp

Met een grondwater-injectietemperatuur van 45°C moet het retourwater afgekoeld worden tot 43°C en bedraagt het setpoint in de verdamper 41°C. Het setpoint aan de condensorzijde van de warmtepomp wordt gelijkgesteld aan de leveringstemperatuur (90°C). Uitgaande van 60% rendement (t.o.v. Carnot) verkrijgen we een COP van 4,4.

Bedrijfscondities warmtelevering

Uitgaande van de temperaturen in Tabel 2 en een maximale HTO-injectieflow in de lauwe bron van 48 kg/s (173 m³/uur) en een afkaptemperatuur van 55°C (33°C verlies) worden de volgende bedrijfscondities verkregen gedurende de winterperiode (Tabel 3-1). Bij levering kort na opslag aan het begin van de winter is er nog geen temperatuurverlies in de warme bron en kan de HTO-bron gemiddeld 5,1 MW leveren.

Tabel 3-1: Bedrijfscondities bij warmtelevering

Locatie	T _{in} [°C]	T _{uit} [°C]	Flow [kg/s]	Vermogen [MW]
Aanvang winter				
TSA, HTO-zijde	88	45	28	5,1
TSA, net-zijde	43	68	48	5,1
Verdamper	60	43	48	3,4
Condensor	68	90	48	4,4
Totaal geleverd				6,1
Einde winter				
TSA, HTO-zijde	55	40	28	1,2
TSA, net-zijde	43	53	28	1,2
Verdamper	60	43	47	3,4
Condensor	53	90	28	4,4
Totaal geleverd				3,5

De flow door verdamper en condensor worden zodanig gekozen dat de productietemperatuur wordt gehaald. Dit betekent dat de flow aan de warmtenetzijde van de TSA aan het begin van de winter groter is dan aan de HTO-zijde. Op dit moment kan de HTO met warmtepomp het grootste vermogen leveren: 6,1 MW, waarbij de warmtepomp 3,4 MW onttrekt en 4,4 MW levert. Het thermische ontwerpvermogen van de warmtepomp bedraagt derhalve 4,4 MW. Gedurende de winter daalt de HTO-temperatuur en worden de flows aan beide zijden van de TSA aan elkaar gelijk. Bij een vaste flow in het grondwater wordt op dit moment het minimale warmtepompvermogen bereikt (2,6 MW). Vanaf een bepaalde temperatuurdaling in de HTO-bron moet de flow aan de verdamper-zijde gaan toenemen en wordt een deel van de flow aan verdamperzijde teruggevoerd naar de retourleiding (op 43°C). De retourleiding wordt dus verder uitgekoeld om de gewenste productietemperatuur te kunnen halen aan de condensor-zijde. Hierbij stijgt het warmtepompvermogen weer naar de ontwerpwaarde.

Het kantelpunt voor de bedrijfsvoering is het moment waarop de retourleiding verder uitgekoeld moet worden om de productietemperatuur te kunnen halen. Dit moment treedt pas op bij een HTO-temperatuurdaling van 18°C. De totale warmtelevering is dan gezakt tot 3,5 MW. Bij verdere daling van de HTO-temperatuur wordt dit vermogen gehandhaafd door een combinatie van uitkoeling van de retourleiding en elektrisch vermogen. Bij deze uitgangspunten zou de HTO-bron maximaal 33°C mogen afkoelen voordat de condensor haar maximale vermogen van 4,4 MW levert. De COP van de gehele HTO (gedefinieerd als de totale warmtelevering gedeeld door het elektriciteitsverbruik WP) is gelijk aan 6,1 op het kantelpunt. Met bovenstaande bedrijfscondities (met 28 kg/s grondwaterflow en HTO vermogens tussen 1,2 en 5,1 MW) varieert het benodigde warmtepompvermogen tussen 2,6 en 4,4 MW.

Samenvatting uitgangspunten voor bepaling specificaties van warmtepomp en warmtewisselaars

Tabel 3-2: Specificaties warmtepomp

Condensor setpoint	90 °C	Leveringstemperatuur is ook 90 °C.
Verdamper setpoint	41 °C	Uitgangstemperatuur is 43 °C op de verdamper-uitgang, zodat het grondwater gekoeld kan worden naar 45 °C.
Ontwerpflow	48 kg/s	
Ontwerpvermogen	4,4 MW	

Tabel 3-3: Specificaties TSA HTO

	Warmtenet-zijde	HTO-zijde
Ontwerp-aanvoertemperatuur opslag/laden	90 °C	88 °C
Retourtemperatuur opslag	60 °C	45 °C
Ontwerpflow laden	40 kg/s	27,9 kg/s
Ontwerpvermogen	5 MW	5 MW
LMTD	7	
Ontwerp-aanvoertemperatuur levering / ontladen	53 °C (max 68 °C)	55 °C (max 88 °C)
Ontwerp-injectietemperatuur	43 °C	45 °C
Ontwerpflow ontladen	28 kg/s (max 48 kg/s)	28 kg/s
Ontwerpvermogen	1,2 MW (max 5 MW)	1,2 MW (max 5 MW)
LMTD	2 (max 7 , niet maatgevend)	

De hoge retourtemperatuur in de zomer in het warmtenet is nu bepalend voor de dimensionering van de TSA. Als deze retourtemperatuur verder verlaagd kan worden, kan de TSA kleiner gedimensioneerd worden.

De uitgangspunten voor het geohydrologisch ontwerp staan grotendeels in de TSA Tabel 3-3 hierboven (kolom HTO-zijde). De overige specificaties zijn gebaseerd op de energetische uitgangspunten in sectie 3.1 en staan hieronder samengevat.

Tabel 3-4: Overige specificaties HTO

Parameter	Waarde
Opslagvolume laden	11700 MWh = 42300 GJ
WATERVERPLAATSING	243.000 m3
Aantal uren beschikbaar voor laden	4700 hr
Aantal uren beschikbaar voor ontladen	4100 hr
Afkaptemperatuur	55 °C

Tabel 3-5 Samenvatting van de verschillende varianten die worden doorgerekend (voor 2 opslagformaties)

Variabele	Eenheid	Referentie	Variant 1 (met WP)	Variant 2 (met WP)
Opslag aquifer	-	-	Breda zand 3	Breda zand 4
Opslag temperatuur (hete bron)	°C	-	88	88
Opslag temperatuur (lauwe bron)	°C	-	45	45
Afkapt temperatuur	°C		55	55
Opslag volume HTO	m ³	-	243,000	243,000
Maximaal debiet laden	m ³ /h	-	100	100
Maximaal debiet leveren	m ³ /h	-	100	100

3.3 Basisontwerp van de HTO

3.3.1 Uitgangspunten

Het globaal principe van hoe de HTO wordt ingepast is reeds weergegeven in Figuur 3-2. Het ontwerp betreffen het grondwatersysteem van de ondergrondse opslag, inclusief warmtepomp en koppeling met het transportnet. De HTO wordt gescheiden van het transportnet door middel van een warmtewisselaar. De warmtepomp is warmtenet-zijdig ingepast. Meer informatie omtrent ontwerpkeuzes, zoals bijvoorbeeld materiaalkeuze en waterbehandeling, is te vinden in Bijlage II.

3.3.2 Putontwerp

Uit de ondergrond scan, sectie 2.1.2, blijkt dat er twee watervoerende lagen aanwezig zijn die het meest geschikt lijken voor warmteopslag. Beide lagen hebben andere karakteristieken die dus leiden tot een ander putontwerp.

Het opslag volume is gelijk voor beide varianten, echter, de laagdikte van Breda zand 4 is 18m dikker dan de laagdikte die wordt verwacht voor Breda zand 3 (32 en 50m respectievelijk). Dit zorgt ervoor dat er een grotere thermische straal vormt in het opslagpakket met de kleinste laagdikte (Tabel 3-6).

De dikte van de watervoerende pakketten, de horizontale hydraulische doorlatendheid, het benodigde opslag/onttrekkingsvolume en de verwachte onttrekkingstemperatuur bepalen tezamen hoeveel hete en warme bronnen er nodig zijn (meer info rapportage werkpakket C1 en C2), dit is vervolgens weer bepalend voor het 3D putontwerp. De (conservatieve) NVOE richtlijnen die gemaakt zijn voor WKO systemen worden in dit stadium toegepast (zie Bijlage I). Echter, er zijn aanwijzingen dat ruimere normen mogelijk kunnen zijn voor warmteopslag, de onzekerheid om dit te kunnen toepassen is in dit stadium echter te groot. De wijze waarop de putten worden geboord is beschreven in Bijlage II.

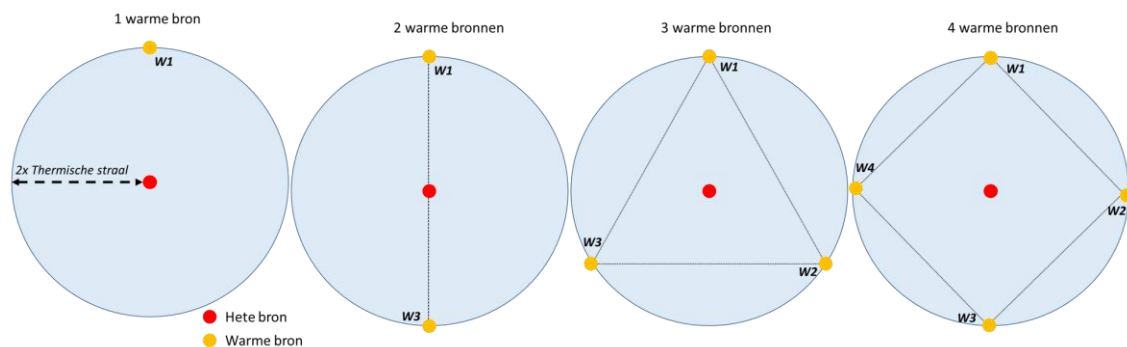
Dit resulteert voor zowel variant 1 en variant 2 in een aantal van 2 warme bronnen rondom de hete bron(nen), Figuur 3-4.

Tabel 3-6 Input voor de simulaties (AXI en 3D)

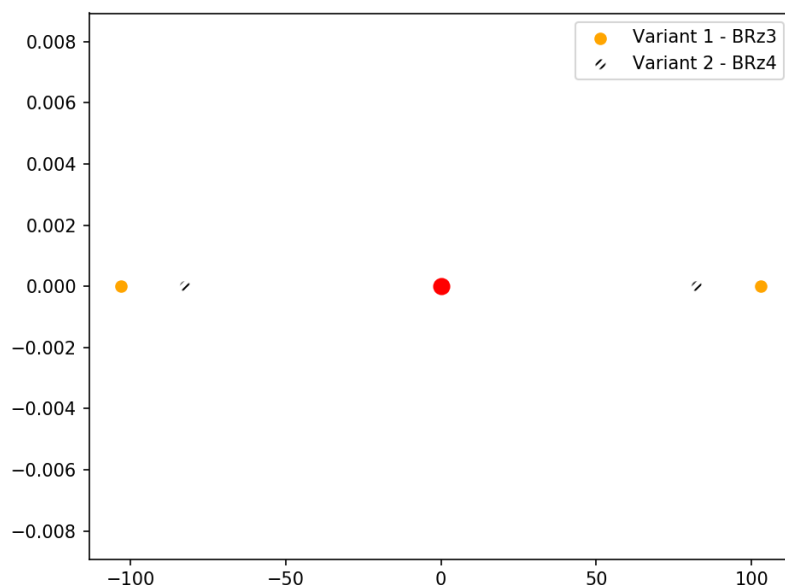
	T _{heet} °C	T _{warm} °C	T _{cut-off} °C	V _{opslag} m ³	Opslagformatie	T _{amb}	L _{aquifer} (m)	Thermische straal (R _{th})	Bronnen _{heet}	Bronnen _{warm}
Variant 1	88	45	55	243,000	Breda zand 3	12.9	32	60	2	2
Variant 2	88	45	55	243,000	Breda zand 4	13.9	50	48	1	2

3D putontwerp

De 3D opstelling van de warme putten rondom de hete bronnen zal in alle gevallen worden gedaan volgens de generieke methode getoond in Figuur 3-3. Eerste onderzoeksresultaten laten zien dat een afstand van $2 \cdot R_{th}$ de meest gunstige afstand is om de efficiëntie van het systeem als geheel te optimaliseren. Deze afstand wordt dus gebruikt om een 3D ontwerp te maken voor de bronnen van het warmteopslag systeem. Indien er andere stakeholders in de buurt van het systeem zitten waar rekening mee gehouden moeten worden of omdat dit ontwerp niet mogelijk is door beperkte bovengrondse inpassing zal het ontwerp in een later stadium (WINDOW fase 2) aangepast worden voor de specifieke case.



Figuur 3-3 Basisontwerp 3D plaatsing bronnen. Afstand Hete bronnen en warme bronnen is $2x$ de thermische straal van de hete bron.



Figuur 3-4 Plaatsing van warme bronnen rondom de hete bron voor variant 1 en variant 2 (kleinere afstand van hete bron).

4 Analyse van uitvoeringsvarianten

4.1 Thermische berekeningen

De afsluitende lagen in de ondergrond van Het Groene Net bestaan voor een groot deel uit bruinkool lagen. Deze lagen hebben een relatief grote warmtecapaciteit en lage warmtegeleiding coëfficiënt. Warmte verspreiding gaat dus relatief langzaam door deze lagen (vergelijkbaar met klei). Echter, het effect van hoge temperaturen op deze lagen is nog vrij onbekend. In dit stadium worden dezelfde thermische eigenschappen als klei aan de bruinkoollaag toegekend omdat deze grotendeels overeenkomen (zie ook rapportage C3a).

4.1.1 Model beschrijving

De numerieke simulaties worden uitgevoerd met het grondwatermodel SEAWATv4 (Langevin (2009)). Dit model is een koppeling tussen het grondwatermodel MODFLOW en het transport model MT3Ds (Harbough et al., 2000; Zheng & Wang, 1999). Een gedetailleerde beschrijving van de model opzet is gegeven in Bijlage III. SEAWATv4 heeft de capaciteit om dichtheidsstroming te simuleren bij verschillende temperaturen. Dit treedt op doordat viscositeit en dichtheid van het grondwater afhankelijk is van temperatuur. Een relatief lage dichtheid van het warme geïnjecteerd water leidt tot een dichtheid verschil met het omringende grondwater, het warmere water heeft dan de neiging op te drijven (van Lopik et al., 2016). De verliezen die hierdoor optreden, plus de verliezen die optreden door andere processen (e.g. conductie, dispersie), kunnen goed worden berekend met dit model.

Axisymmetrisch & 3D model

De simulatie worden gedaan met een axisymmetrisch model en een 3D model (Langevin, 2008). Met het axisymmetrische model wordt alleen de hete bron gesimuleerd, met het 3D model alle putten o.b.v. het putontwerp. Omdat het axisymmetrische model relatief weinig rekencapaciteit vergt, kan hierbij de gehele ondergrondse opbouw worden gemodelleerd (van maaiveld tot bijv. 500m diepte). Echter, de interactie tussen de verschillende bronnen en de ruimtelijke (x,y) invloed van het systeem kan dan niet inzichtelijk worden gemaakt.

Nadat het axisymmetrisch model heeft bepaald welke laag/lagen de meeste potentie hebben, wordt daarom met een 3D model het echte warmteopslag systeem gemodelleerd. Om de rekencapaciteit te verlagen wordt er alleen gekeken naar het opslagpakket en de daar boven en onderliggende laag.

Uitgangspunten model

Voor de modellen wordt een volume balans aangehouden. Dit houdt in dat het geïnjecteerde volume (V_{in}) tijdens laden gelijk is aan het onttrokken volume (V_{uit}) tijdens ontladen. Doordat er in de simulaties rekening wordt gehouden met een afkaptemperatuur kan het voorkomen dat tijdens ontladen de afkaptemperatuur wordt bereikt ($T_{bron} < T_{afkap}$), in dat geval kan $V_{uit} < V_{in}$ zijn. Er blijft dan dus volume achter (en dus energie) in de hete bron(nen).

4.1.2 Methode efficiëntie berekeningen

De efficiëntie kan worden berekend voor een bron en voor het systeem als geheel.

Voor een bron wordt dit berekend als:

$$\eta_{bron} = \frac{V_{uit} \cdot \Delta T_{uit} \cdot c_w \cdot \rho_w}{V_{in} \cdot \Delta T_{in} \cdot c_w \cdot \rho_w}$$

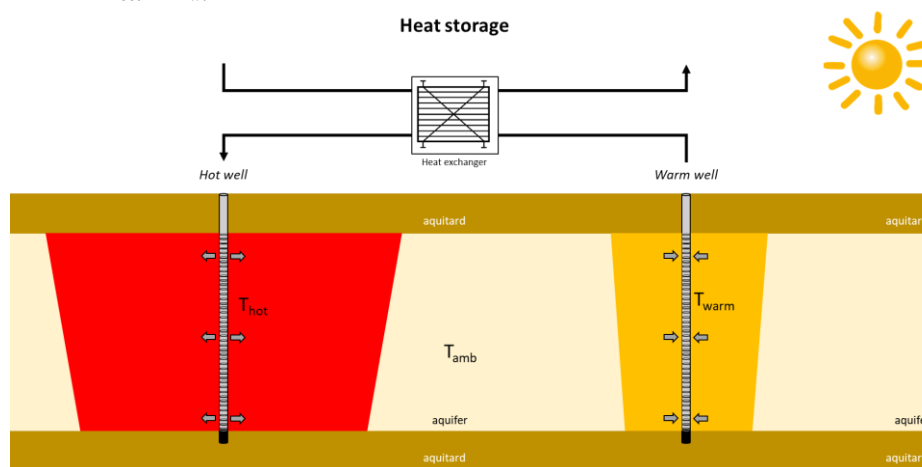
$$\Delta T = \overline{T_{opslag}} - \overline{T_{ambient}}$$

De ΔT is voor een bron berekend als het temperatuur verschil met de achtergrond temperatuur ($T_{ambient}$). Dit kan dus gedaan worden voor zowel de hete en de warme bron (Figuur).

Omdat er zowel energie verloren gaat tijdens opslag in de hete en de warme bron bepalen de efficiëntie van de hete bron(nen) en de warme bron(nen) samen de efficiëntie van het systeem. De systeem efficiëntie wordt als volgt berekend:

$$\eta_{HTO} = \frac{V_{uit} \cdot \Delta T_{uit} \cdot c_w \cdot \rho_w}{V_{in} \cdot \Delta T_{in} \cdot c_w \cdot \rho_w}$$

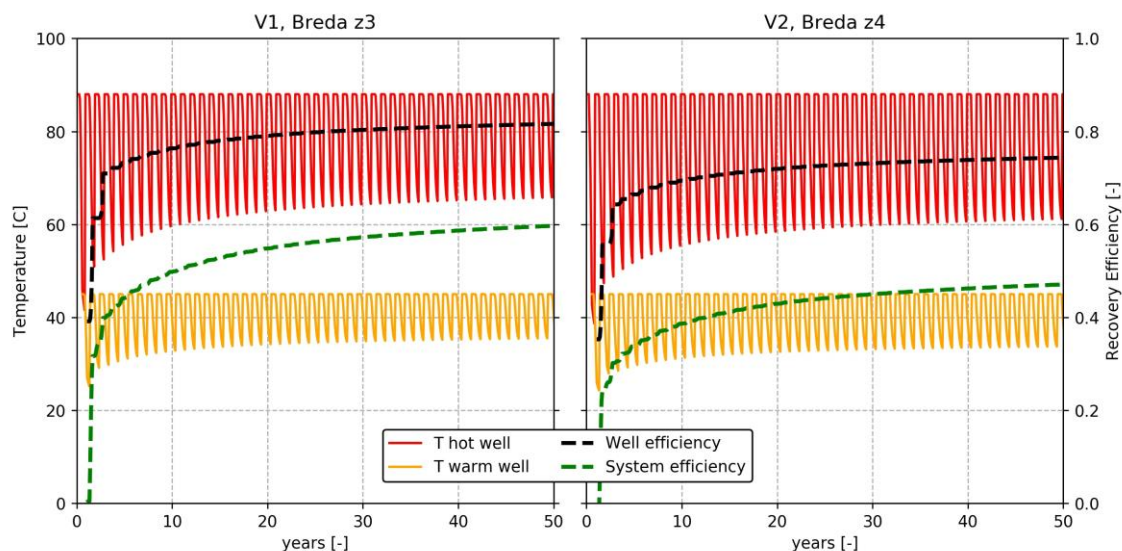
$$\Delta T = \overline{T_{heet}} - \overline{T_{warm}}$$



Figuur 4-1 Schematische weergave van een HTO met de temperatuur van de hete bron (T_{hot}), warme bron (T_{warm}) en de achtergrond temperatuur (T_{amb}).

4.1.3 Resultaten

In Figuur 4-2 zijn de resultaten voor het axisymmetrisch model weergegeven voor beide varianten. In de eerste twee jaar wordt voor de laatste maand van het leverseizoen de cut-off temperatuur (55 °C) gehaald. Dit resulteert in een onttrekkingsstop van 1 maand in deze twee jaren. Echter, nadat de omgeving enigszins is opgewarmd is dit geen probleem meer en wordt hetzelfde volume onttrokken dat wordt geïnjecteerd ($V_{in}=V_{uit}$). De bron en systeem efficiëntie is groter bij opslag in de derde zandige eenheid van de Fm. van Breda (BRz3) t.o.v. vierde zandige eenheid van de Fm. van Breda (BRz4) (Tabel 4-1); dit verschil is waarschijnlijk te wijden aan de grotere laagdikte bij variant 2. Dit in combinatie met de grote verticale permeabiliteit en de hoge temperatuur zorgt er voor dat door opdrijving een groter deel van de opgeslagen energie verloren gaat.



Figuur 4-2 Temperatuur van de hete en warme bron en daaruit volgende bron en systeem efficiëntie voor opslag in Breda zand 3 (links) en Breda zand 4 (rechts).

Tabel 4-1 Resultaten modellering warmteopslag systeem voor opslag in Breda zand 3 of Breda zand 4

Parameter	Variant 1 – BRz3	Variant 2 – BRz4
Hete bron		
Efficiëntie (2 ^e jaar)	0.61	0.56
Efficiëntie (10 jaar)	0.76	0.69
Efficiëntie (50 jaar)	0.82	0.74
Systeem		
Efficiëntie systeem (2 ^e jaar)	0.33	0.25
Efficiëntie systeem (10 jaar)	0.50	0.39
Efficiëntie systeem (50 jaar)	0.60	0.47

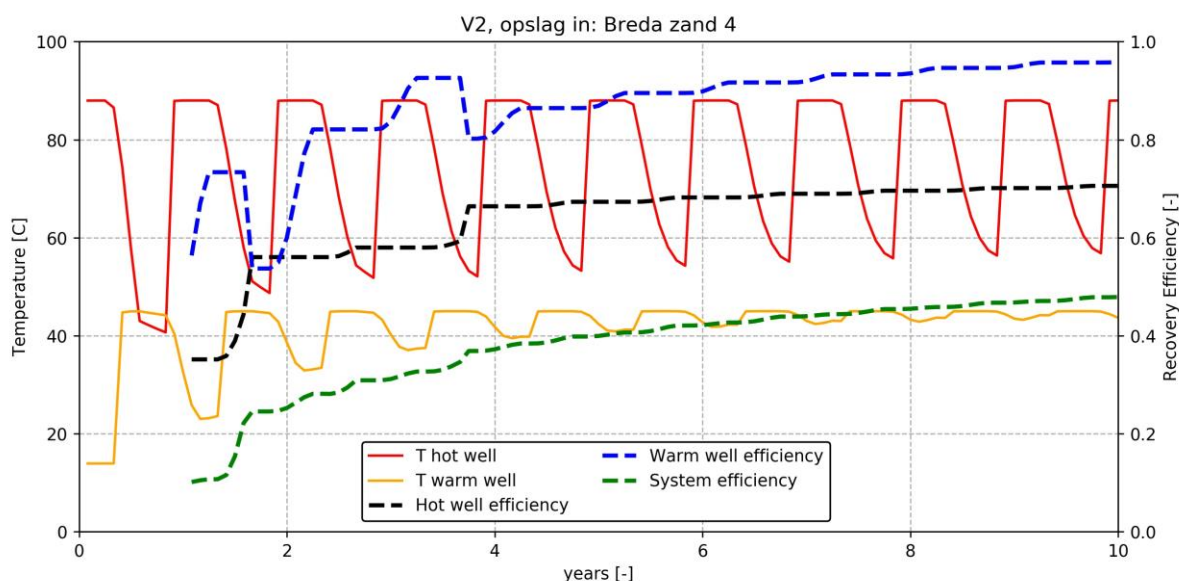
3D model – 10 jaar (V2 – BRz4)

Op basis van de thermische effecten, zie hoofdstuk 5. Is er voor gekozen om Variant 2 door te rekenen met het 3D model. De thermische effecten bij Variant 1 zijn waarschijnlijk te groot (op basis van huidige ondergrond). Ook is het interessant om te bekijken of de interactie tussen de hete en de warme bronnen leidt tot een grote verbetering van het systeemrendement.

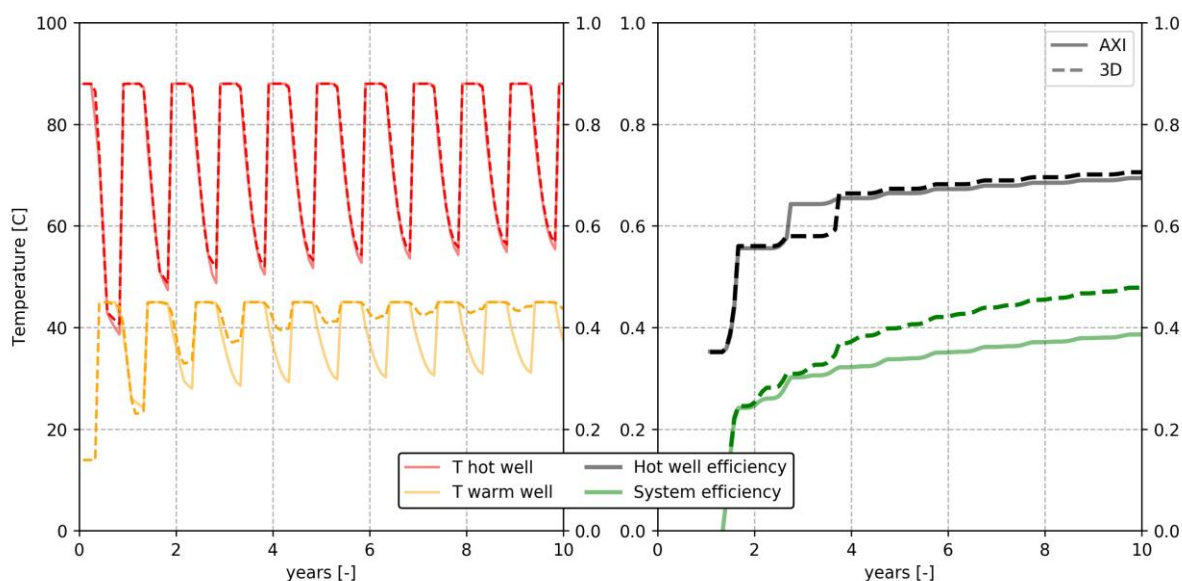
De resultaten van de 3D simulatie zijn gegeven in Figuur 4-3. Het is duidelijk te zien dat het rendement van de warme bron aanzienlijk hoger is dan het rendement van de hete bron, dit komt doordat het een ongelijk volume betreft (cut-off temperatuur). Echter, de warme bron temperatuur ondervindt daarnaast profijt van de verliezen uit de hete bron, wat zorgt er voor een hogere bron temperatuur van de warme bronnen, en, een groter systeemrendement t.o.v. het axisymmetrische model (Figuur 4-4).

Ondanks de verbetering van het systeemrendement met een 3D simulatie, zijn de rendementen van het systeem relatief laag. Dat komt voornamelijk door een combinatie van: relatief klein opslagvolume, grote laagdikte en een grote verticale/horizontale doorlatendheid. Om de efficiëntie van het systeem verder te verhogen kan er worden nagedacht over een aangepast putontwerp (e.g. MPPW) om een beter rendement te bewerkstelligen. Sommige geohydrologische parameters zijn worst-case ingeschat voor deze verkenning, op basis van een proefboring kan worden bepaald in hoeverre de ondergrond meer

optimalere opslag condities behelst. Bij meer kennis over de ondergrond en een optimalisatie van de puttechniek en -configuratie zal, in alle waarschijnlijkheid, het systeemrendement verder toenemen. De hier gepresenteerde resultaten kunnen dus worden beschouwd als 'worst-case'.



Figuur 4-3 resultaten 3D model voor variant 2 – 10 jaar



Figuur 4-4 Vergelijking tussen het axisymmetrische model en het 3D model. Door sterke positieve interactie in het 3D model neemt het systeemrendement sterk toe.

4.2 Financiële analyse

In paragraaf 4.1 zijn berekeningen uitgevoerd voor opslag in de Formatie van Breda z3 en Breda z4, waarbij opslag in Formatie Breda z4 in een lager opslagrendement resulteert. Tevens ligt de Formatie Breda z4 dieper wat zou pleiten voor een opslag in Formatie Breda z3. Maar een voordeel is weer dat een hoger debiet per bron mogelijk is in de formatie van Breda z4, wat resulteert in een lager aantal bronnen.

Omdat beide varianten voordelen bieden en er nog een zekere onzekerheid zit in de exacte eigenschappen van de pakketten worden zowel variant 1 als variant 2 financieel doorerekend.

- Variant 1: om het benodigde debiet te behalen zijn 2 hete en 2 lauwe bronnen nodig, waarbij de onttrekkingsnorm wordt gehandhaafd.
- Variant 2: De doorlatendheid van Formatie Breda z4 is hoger, het benodigde debiet kan gehaald worden met 2 lauwe bronnen en 1 hete bron.

4.2.1 Investeringskosten

De investeringskosten voor de twee varianten zijn op haalbaarheidsniveau geraamd. De geraamde kosten exclusief BTW zijn weergegeven Tabel 4-2. Een korte toelichting op een aantal onderdelen is gegeven na de tabel. Deze waarden zijn gebaseerd op projectervaring met ECW waarbij IF Technology betrokken was.

Tabel 4-2 Geraamde investeringskosten HTO variant

		Variant 1	Variant 2
Proefboring	[€]	140.000	180.000
HTO bronnen	[€]	1.000.000	900.000
Warmtepomp	[€]	2.600.000	2.600.000
WTB/CT/E overig	[€]	750.000	750.000
Onvoorzien (10%)	[€]	450.000	450.000
Ontwerp/advies/vergunningen (15%)	[€]	700.000	700.000
Totaal	[€]	5.640.000	5.580.000

Proefboring

Om een goed ontwerp te kunnen maken van de HTO, wordt geadviseerd om een proefboring uit te voeren. Hiermee wordt de bodemsamenstelling onderzocht en kan door middel van een pompproef de capaciteit worden bepaald. De proefboring kan vervolgens worden afgewerkt als een monitoringsput. In het kader van de vergunning Waterwet zal de Provincie vermoedelijk eisen dat er een monitoringsput moet komen. Hierin worden temperaturen en waterkwaliteit gemeten. Geadviseerd wordt de monitoringsput te gebruiken als testboring en deze aan te leggen voordat er een definitief ontwerp wordt gemaakt. Merk op dat in het onderzoeksvoorstel de kosten voor een proefboring zijn ingeschat op circa € 180.000. In deze verkenning zijn de kosten hiervoor ingeschat op € 140.000. Dit is dus € 40.000,- minder dan voorzien binnen WarmingUp.

HTO bronnen

In de post voor HTO omvat de hete en lauwe bronnen, putbehuizing en bronpompen. Kosten voor het realiseren van de bronnen, zoals o.a. het boren, de stijgbuis, een wikkeldraadfilter en het afwerken zijn hierbij inbegrepen.

Warmtepomp

De investeringskosten voor een hoge temperatuur warmtepomp (geïnstalleerd) zijn ingeschat op 600€/kWt.

WTB/CT/E overig

Deze post omvat de overige componenten, welke grofweg bestaat uit leidingen/kleppen/appendages in de technische ruimte, warmtewisselaars, koppeland leidingwerk met het warmtenet, waterbehandeling, stikstofinstallatie en regeling en elektra.

Onvoorzien

Op de geraamde kosten is een opslag van 10% toegevoegd voor onvoorziene kosten.

Ontwerp/advies/vergunningen

De ontwerp-, advies- en vergunningskosten zijn ingeschat op 15% van de investeringskosten. De vergunningen omvatten de Vergunningen Waterwet (provincie) en vergunningen om te mogen lozen (Waterschap/gemeente) inclusief milieu-effectenrapportages en MER-beoordeling.

4.2.2 Operationele kosten

De operationele kosten voor de twee varianten zijn op haalbaarheidsniveau geraamd. De geraamde kosten exclusief BTW zijn weergegeven Tabel 4-3. Een korte toelichting op een aantal onderdelen is gegeven na de tabel. Er zijn geen operationele kosten voor de opgeslagen warmte meegenomen omdat deze in basis € 0 per GJ zijn.

Tabel 4-3 Geraamde operationele kosten HTO varianten

		Variant 1	Variant 2
Opslag warmte	[€/jaar]	-	-
Elektriciteitsverbruik	[€/jaar]	154.000	154.000
Onderhoud en beheer	[€/jaar]	164.000	152.000
Waterbehandeling	[€/jaar]	12.000	12.000
Monitoring en BRL inspecties	[€/jaar]	30.000	30.000
Totaal	[€/jaar]	360.000	349.000

Opslag warmte

In de zomerperiode is nog veel warmte over vanuit de BEC. De uiteindelijke prijs is een samenspel van de marginale kosten en eventuele ruime in beschikbare SDE+ subsidie. De prijs kan uiteindelijk positief of negatief uitvallen. Als uitgangspunt word een warmteprijs € 0 per GJ aangehouden. In de gevoeligheidsanalyse (zie paragraaf 4.2.4) is ook gekeken naar de situaties waarin de prijs negatief of positief is.

Elektriciteitsverbruik

De warmtepomp, circulatie- en bronpompen verbruiken elektriciteit. Het totale elektriciteitsverbruik is ingeschat op basis van de SPF (Seasonal Performance Factor). De SPF voor het laden wordt ingeschat op 50, wat betekent dat voor elke energie-eenheid warmte (MWh) die wordt opgeslagen en geleverd uit de HTO, 20 kWh aan elektriciteit nodig is. De SPF voor het ontladen ligt door inzet van de warmtepomp lager. De COP van de warmtepomp is ingeschat op 4,4 (zie paragraaf 3.1). Warmtelevering gebeurt deels door op directe wijze en deels via de warmtepomp. De SPF voor warmtelevering als geheel is ingeschat op 6,1. Voor de kosten van elektriciteit is gerekend met een waarde van 75 €/MWh.

Onderhoud en beheer

Er wordt vanuit gegaan dat de bronnen elke vijf jaar worden geregenereerd door ze mechanisch en chemisch te reinigen. De kosten hiervoor liggen op 50 k€ per bron. Dit betekent 10 k€/jaar per bron. Voor onderhoud en beheer wordt er vanuit gegaan dat de pompen (ESP) elke 5 jaar worden vervangen. Voor

de warmtepomp is gerekend met 2% van de investeringskosten. Voor de overige onderdelen is gerekend met 4% van de investeringskosten.

Waterbehandeling

Voor 90°C opslag wordt uitgegaan van waterbehandeling met zoutzuurdosering. Uitgaande van 5 ml/30% per kWh warmte (geologische situatie GeoMEC), is dit 5 l/MWh. Uitgaande van 200 euro/ton geleverd met een vrachtwagen op locatie, liggen de pure zoutzuur kosten op 1 € per opgeslagen MWh.

Monitoring en BRL inspecties

In deze post zijn de kosten opgenomen voor jaarlijkse monitoring, interpretatie en de jaarlijkse BRL check.

4.2.3 Business Case

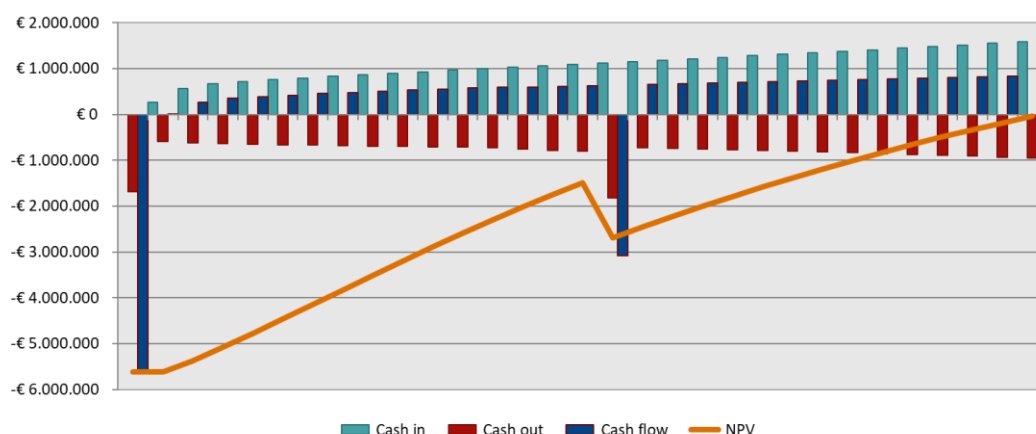
Aannames

Aanvullend op de aannames voor de investeringskosten en operationele kosten zijn voor de business case de volgende aannames/uitgangspunten gehanteerd:

- Herinvesteringen: na 15 jaar is een herinvestering opgenomen voor de warmtepomp, stikstof- en waterbehandelingsinstallatie. Herinvesteringen voor bronpompen en andere onderdelen zijn verdisconteerd in de operationele kosten voor onderhoud en beheer.
- Projectrendement: deze dient 6% zijn over de looptijd. Voor de looptijd is 30 jaar aangehouden. Het benodigde rendement op eigen vermogen is gezet op 15%.
- Indexaties: alle toekomstige energieprijzen zijn geïndexeerd met 2% per jaar.
- Investerings: 30% uit eigen vermogen, 70% vreemd vermogen uit een lening met een looptijd van 15 jaar en een rente van 3%.
- CO₂ besparing wordt gewaardeerd met een waarde van 24€ per ton vermeden CO₂.

Business case variant 1

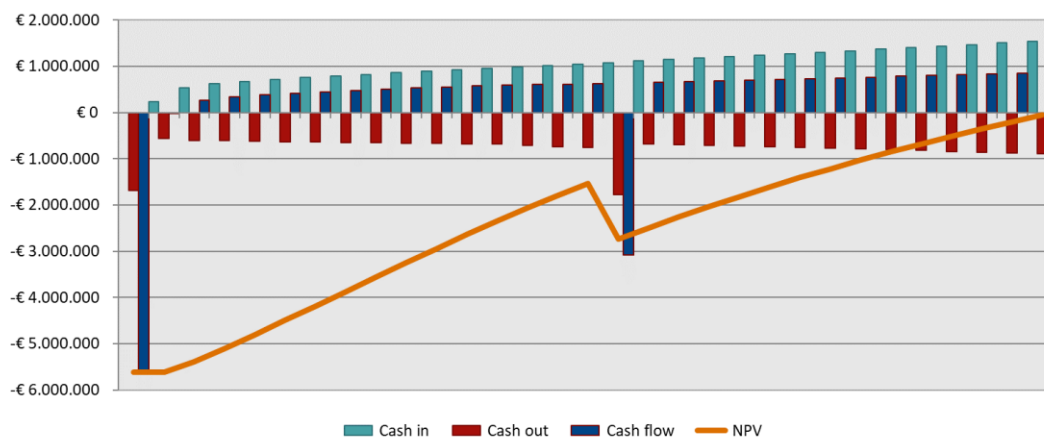
De kasstromen over de projectperiode voor variant 1 zijn weergegeven in Figuur 4-1. In jaar 0 worden alle investeringen gedaan. Na 15 jaar vindt voor een deel van de componenten een herinvestering plaats. De jaarlijkse operationele kosten stijgen jaarlijks als gevolg van de indexatie. De jaarlijkse inkomsten stijgen omdat ten eerste het opslagrendement steeds verder toeneemt. Hierdoor kan elk jaar meer warmte worden geleverd. Ten tweede stijgen de inkomsten doordat ook de prijs voor warmte jaarlijks wordt geïndexeerd. Om een projectrendement van 6% te halen over een looptijd van 30 jaar bedraagt voor variant 1 de prijs voor warmte 29,3 €/GJ.



Figuur 4.1 kasstromen variant 1

Business case variant 2

Voor variant 2 is dezelfde kassastroom geplot als voor variant 1 in onderstaande afbeelding (Figuur 4-2). Hierbij is een warmteprijs van 36,9 €/GJ vereist om een projectrendement van 6% te behalen. De Capex en Opex van beide varianten zijn zeer vergelijkbaar, echter, doordat het systeemrendement van variant 2 een stuk lager is zal er een hogere warmteprijs gevraagd moeten worden om dezelfde omzet te behalen.



Figuur 4.2 kassstromen variant 2

Een van de voordelen van warmte-opslag is dat minder piekvermogen opgesteld hoeft te worden, omdat de HTO een deel van de warmtelevering in de winter voor rekening neemt. De specifieke investeringskosten zijn berekend op basis van het thermisch geleverde vermogen. Omdat het vermogen van de HTO langzaam afneemt, is gerekend met het gemiddelde vermogen. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 4-4.

Tabel 4-4 Berekende specifieke investeringskosten warmte-opslag

		Variant 1
Investeringskosten	[€]	5.640.000
Gemiddeld geleverd vermogen	[MW _t]	4,8
Specifieke investeringskosten	[€/MW _t]	1.175.000

4.2.4 Gevoeligheidsanalyses

Omdat er een zekere onzekerheid zit in de gehanteerde uitgangspunten is er gekeken naar de gevoeligheid van de businesscase op bepaalde uitgangspunten. Deze gevoeligheidsanalyse is enkel uitgevoerd voor variant 1 omdat deze financieel als meest preferabel uit de bovenstaande analyse naar voren kwam.

Investeringssubsidie

Door het innovatieve karakter van de HTO kan er eventueel aanspraak gemaakt worden op de DEI+ subsidie. Het project zou binnen de categorie 'Demonstratieprojecten' vallen, waarbij er investeringssteun wordt verleend aan de exploitant indien er milieuvoordeel met het project wordt behaald. Een HTO kan binnen het thema 'Hernieuwbare Energie' van de DEI+ vallen, met de redenering dat het de exploitatie van een hernieuwbare energie installatie kosten-effectiever maakt. Per project is er een maximale subsidie van €15 miljoen en voor het thema 'Hernieuwbare Energie' geldt een maximaal subsidiepercentage van 45% op de investeringskosten (Tabel 4-5).

Tabel 4-5 Gevoeligheidsanalyse investeringssubsidie

		Variant 1	Investeringsubsidie
Subsidie	[€]	0	2.530.000
Prijs warmte	[€/GJ]	29,3	24,1

De vergelijking van de casus met en zonder investeringssubsidie laat zien dat een voornaam gedeelte van de warmteprijs ook ten grondslag ligt aan de voorheen berekende operationele kosten. Een installatie met lage marginale kosten heeft een sterke relatie tussen de investeringskosten en de warmteprijs.

Projectrendement

Het gewenste projectrendementen wordt door de exploiterende partij bepaald. Verschillende partijen zullen de risico's en baten van een HTO verschillend inschatten, vandaar dat de gevoeligheid van de warmteprijs als functie van het gewenste projectrendement is onderzocht.

Zoals te zien in Tabel 4-6 is de warmteprijs sterk afhankelijk van het gewenste projectrendement. De gevoeligheid op het projectrendement dient als input voor exploiterende partij, maar ook als input ter vergelijking van de verschillende HTO-studies met éénzelfde projectrendement.

Tabel 4-6 Gevoeligheidsanalyse Projectrendement

		Onderwaarde	Variant 1 (basis)	Bovenwaarde
Hete bronnen	[-]	2	2	2
Lauwe bronnen	[-]	2	2	2
Projectrendement	[%]	4%	6%	8%
Prijs opslag warmte	[€/GJ]	0	0	0
Prijs warmte	[€/GJ]	25,6	29,3	33,6

Prijs opgeslagen warmte

Afhankelijk van het aantal vollasturen van de BEC kan er meer dan wel minder aanspraak gemaakt worden op SDE+. Het aantal vollasturen van de BEC is van meerdere factoren afhankelijk waaronder de grote van de vraag, profiel van de vraag en inzet van de HTO.

Binnen de huidige SDE++-systematiek wordt subsidie verstrekt op warmte die door de duurzame bron geleverd wordt. Bij opslag zal een deel van de opgeslagen warmte verloren gaan. Dit is echter ook in de huidige situatie aan de orde, waar een deel van de warmte verloren gaat in het warmtenet. Een discussie omtrent hoe en of de SDE++-systematiek hiermee rekening dient te houden, valt buiten de scope van dit onderzoek. Duurzame energietechnieken hebben echter wel baat bij een haalbare business case zonder subsidie.

De gevoeligheid van de prijs van opgeslagen warmte is onderzocht, door de prijs van warmte te verlagen en te verhogen met 4€/GJ ten opzichte van de basis (0 €/GJ). De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 4-7.

Tabel 4-7 Gevoeligheidsanalyse opslag prijs warmte

		Onderwaarde	Variant 1 (basis)	Bovenwaarde
Hete bronnen	[-]	2	2	2
Lauwe bronnen	[-]	2	2	2
Projectrendement	[%]	6%	6%	6%
Prijs opslag warmte	[€/GJ]	-4	0	4
Prijs warmte	[€/GJ]	22,3	29,3	36,3

Het verschil in GJ prijs is groter dan het verschil in prijs van opgeslagen warmte, doordat een deel van de opgeslagen warmte verloren gaat. Bij de huidige referentie (gasketel) ligt de prijs voor warmte ongeveer rond de 12€/GJ, bovenstaande variaties liggen hier ruim boven.

Hogere onttrekkingsnorm

De NVOE-norm vereist momenteel bij variant 1 twee hete en vier lauwe bronnen. Gezien de relatieve diepe ligging en ervaringen opgedaan binnen Heatstore is de verwachting dat de NVOE-normen opgehoogd zouden kunnen worden, maar onduidelijk is nog hoeveel. Ook is er nog een zekere onzekerheid met betrekking tot de bodem, gunstigere uitgangspunten zouden een hoger debiet binnen de huidige norm kunnen toestaan.

In de gevoeligheidsanalyse is gezocht naar een verhoging van de norm waarmee er een aantrekkelijke warmteprijs gerealiseerd kan worden. Omdat er 2 hete en 2 lauwe bronnen nodig zijn voor de NVOE-norm is er gekeken naar de warmteprijs voor 1 lauwe en 1 hete bron (Tabel 4-8).

Tabel 4-8 Gevoeligheidsanalyse aantal dubletten

		NVOE-norm	Aangepaste norm
Hete bronnen	[-]	2	1
Lauwe bronnen	[-]	2	1
Projectrendement	[%]	6%	6%
Prijs opslag warmte	[€/GJ]	0	0
Prijs warmte	[€/GJ]	29,3	27,0

In bijlage I is meer informatie te vinden over de kansen die er liggen om de bestaande NVOE normen te verhogen. Hier is echter nog geen langdurige ervaring mee en dit brengt risico's met zich mee. In het vervolg van WINDOW binnen WarmingUP zal moeten worden onderzocht in hoeverre verhoogde normen van toepassing kunnen zijn voor een optimaal functionerend warmteopslag systeem.

4.3 CO₂-besparing

De CO₂-besparing wordt berekend door de CO₂ uitstoot van de geleverde warmte te vergelijken met de CO₂ uitstoot van de referentie.

De CO₂-uitstoot wordt bepaald door twee termen: de uitstoot voor productie en transport van de opgeslagen warmte en de hulpenergie voor de levering van de HTO-warmte. De hulpenergie voor levering van de warmte bestaat grotendeels uit elektriciteit voor de warmtepomp. Voor het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp wordt gebruik gemaakt van de resultaten van hoofdstuk 3.

Voor de omzetting van elektriciteit naar CO₂-uitstoot wordt gebruik gemaakt van een vaste uitstoot volgens NTA 8800 (0,34 kg/kWh).

Van de warmteopslag daalt de temperatuur bij warmtelevering gedurende het jaar en tevens neemt per jaar het opslagrendement van de opslag toe. Hierdoor zullen elk jaar zowel de absolute CO₂-uitstoot als ook de relatieve CO₂ uitstoot per geleverde GJ warmte verschillen. In Tabel 4-9 is de afleiding geven van de CO₂-uitstoot. Dit is gedaan voor zowel jaar 30, als over de totale looptijd van 30 jaar.

Tabel 4-9 Afleiding CO₂-uitstoot warmteopslag

		Variant 1
Jaar 30		
Opgeslagen warmte	[GJ _t]	42.000
Elektriciteitsverbruik warmteopslag ¹	[MWh _e]	230
Geleverde warmte	[GJ _t]	28.800
Elektriciteitsverbruik warmtelevering ²	[MWh _e]	1.300
CO ₂ -uitstoot opgeslagen warmte ³	[ton CO ₂]	70
CO ₂ -uitstoot elektriciteit ⁴	[ton CO ₂]	520
CO ₂ -uitstoot totaal	[ton CO ₂]	600
Specifieke CO ₂ -uitstoot	[kg CO ₂ /GJ _t]	20,8
Periode van 30 jaar		
Opgeslagen warmte	[GJ _t]	1.300.000
Elektriciteitsverbruik warmteopslag	[MWh _e]	7.000
Geleverde warmte	[GJ _t]	760.000
Elektriciteitsverbruik warmtelevering	[MWh _e]	35.000
CO ₂ -uitstoot opgeslagen warmte	[ton CO ₂]	2.200
CO ₂ -uitstoot elektriciteit	[ton CO ₂]	14.000
CO ₂ -uitstoot totaal	[ton CO ₂]	16.000
Specifieke CO ₂ -uitstoot	[kg CO ₂ /GJ _t]	21,4

1) Aangenomen COP van 50 voor de HTO

2) Gemiddelde COP systeem (HTO, WP, pompen) ingeschat op 6,1

3) CO₂-uitstoot warmte in de zomerperiode 1,7 kg/GJ_t (op basis van COP van 55 voor het warmtenet)

4) 0,34 kg/kWh, bron NTA 8800

De CO₂-uitstoot van de HTO met warmtepomp wordt vergeleken met de CO₂-uitstoot van een gasketel. Warmte geleverd met een gasketel heeft een CO₂-uitstoot van 62 kg/GJ_t (bij een rendement van de gasketel van 90% op de bovenwaarde). Dit betekent dat met de HTO (i.c.m. een warmtepomp) een CO₂-reductie van circa 65% kan worden gerealiseerd gedurende de looptijd van 30 jaar.

De uitstoot van 21,4 kg/GJ wordt sterk gedomineerd door de uitstoot t.g.v. het elektriciteitsverbruik voor de warmtepomp (15,5 kg/GJ). Deze uitstoot is gebaseerd op de huidige energiemix en zal de komende decennia nog aanzienlijk dalen. De werkelijke uitstoot zal dus lager uitvallen dan deze 21,4 kg/GJ, afhankelijk van de toekomstige elektriciteitsmix.

5 Milieu hygiënische en juridische aspecten

5.1 Grondmechanica: zetting en opheffing

5.1.1 Algemeen

De grondmechanische risico's van een HTO-systeem zijn vergelijkbaar met die van de gangbare open bodemenergiesystemen (waarbij ook geen netto wateronttrekking plaatsvindt en de putten een seizoencyclus van injectie en onttrekking hebben. Eventuele verschillen worden veroorzaakt door de van effecten de hogere temperatuur.

In vergelijking met (drinkwater)onttrekkingen zijn de effecten kleiner doordat de onttrekking per put een beperkte duur heeft en wordt afgewisseld met injectie.

De grondmechanica wordt beïnvloedt door stijghoogteveranderingen en temperatuurveranderingen. In bijlage 4 is de invloed van deze veranderingen op de grond mechanische processen verder beschreven. Daarbij is een algemene beschrijving gegeven van grond mechanische processen bij HTO systemen. Een specifieke beschouwing per locatie is in deze verkenningen niet gemaakt.

5.1.2 Samenvatting grond mechanische risico's

Voor onttrekkingen is veel kennis beschikbaar over voorspellingen van zettingen en over daadwerkelijk opgetreden zettingen. Voor WKO's zijn er ook richtlijnen voor de geotechnische risico's. Dit kan ook gebruikt worden voor HTO. De risico's zullen minder zijn naar gelang de HTO dieper aangelegd. De consequenties van de hogere temperatuur zijn naar verwachting beperkt, maar hier is weinig informatie over beschikbaar zodat het is aan te bevelen om gerichte monitoring uit te voeren.

5.1.3 Aanbeveling

Op basis van deze kwalitatieve beschouwing kan geen belangrijk onderscheid gemaakt worden tussen de geselecteerde locaties wat betreft grondmechanische risico's. Na selectie van locaties voor verdere evaluatie dienen locatie specifieke berekeningen een inschatting geven van de verwachte effecten aan het maaiveld. Daarna kan in combinatie met een omgevingsscan het effect worden ingeschat waarbij mogelijk een ondiepere laag afvalt als optie voor HTO. Hiertoe dienen de mogelijke effecten van hogere temperaturen beter in beeld te worden gebracht, eventueel ondersteunt door experimentele observaties en gecombineerde modellen die grondmechanische, hydraulische, thermische en geochemische processen simuleren.

5.2 Thermische effecten

De grootste thermische effecten vinden plaats in de opslag-aquifer en de daaromheen liggende lagen. Daarnaast is er warmte-uitstraling vanuit de put naar de ondergrond rondom. De mate waarin thermische effecten door dit warmte verlies optreden, hangt voornamelijk af van de isolerende werking van de putconstructie. Op basis van eerder onderzoek kan worden ingeschat dat deze thermische verliezen relatief klein zijn t.o.v. de thermische verliezen vanuit de opslag. Nader onderzoek moet bepalen wat de exacte effecten zijn. Dat is in dit stadium nog niet bepaald.

In het vervolg van dit hoofdstuk worden alleen de thermische effecten beschouwd die optreden door de opslag van de thermische energie in de aquifer. In deze verkenningen is nog geen rekening gehouden met de natuurlijke grondwaterstroming.

Vergelijking tussen variant 1 (BRz3) en variant 2 (BRz4)

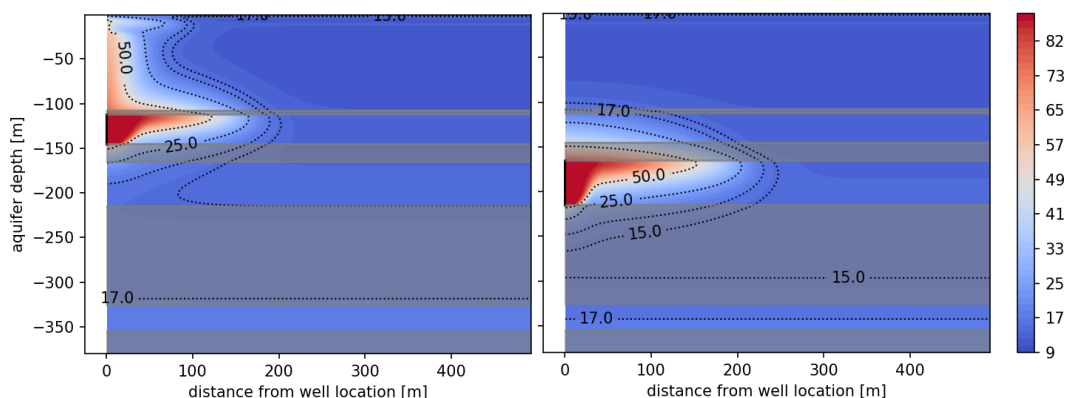
De thermische effecten zijn 50 jaar doorgerekend voor de hete bron voor variant 1 (opslag in de derde zandige eenheid van de Fm. van Breda (BRz3)) en variant 2 (opslag in de vierde zandige eenheid van de Fm. van Breda (BRz4)), Figuur 5-1.

De afsluitende laag (bruinkool) boven BRz3 (variant 1) is relatief dun (~5m). Hierdoor verspreidt de warmte zich al na een aantal jaar vrij snel door de bovenliggende aquifer (BRz2), Figuur 5-2. Dit bovenliggende pakket heeft een hoge horizontale/verticale doorlatendheid wat leidt tot oprijving naar de bovenkant van het pakket en de thermische geleidbaarheid van dit zandige pakket is ook relatief groot. Echter, er wordt verwacht dat er in deze laag verschillende dunne kleilagen aanwezig zullen zijn. Dit zal er toe leiden dat de verspreiding die nu gemodelleerd is in werkelijkheid minder groot zal zijn. Momenteel hebben we echter nog niet voldoende gedetailleerde informatie over deze laag om dit exact in te schatten.

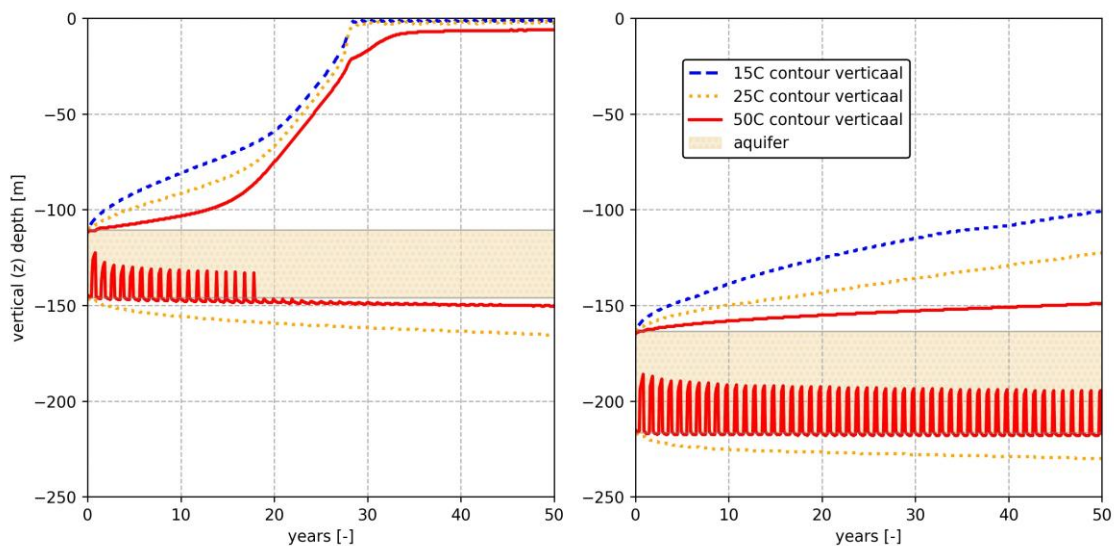
Voor opslag in de BRz4 (variant 2) is de verticale verspreiding veel geringer. Dit komt doordat het pakket wordt afgesloten door een vrij dikke bruinkoollaag >20m dik. De verspreiding van warmte gebeurt voornamelijk naar de bovenliggende laag BRz3, waar de temperatuur na 50 jaar ~25 °C kan zijn. Echter, dit gaat alleen om de locatie recht boven de put (Figuur 5-2). Het geschetste beeld kan worden beschouwd als worst-case.

Indien er significante grondwaterstroming in een van de pakketten is zal de uitgestraalde warmte worden verspreid en zal de absolute opwarming van de bovenliggende lagen sterk verminderen. Echter, dit zal wel leiden tot een groter gebied dat in kleine mate wordt opgewarmd. Dit kan in een later stadium verder worden uitgezocht.

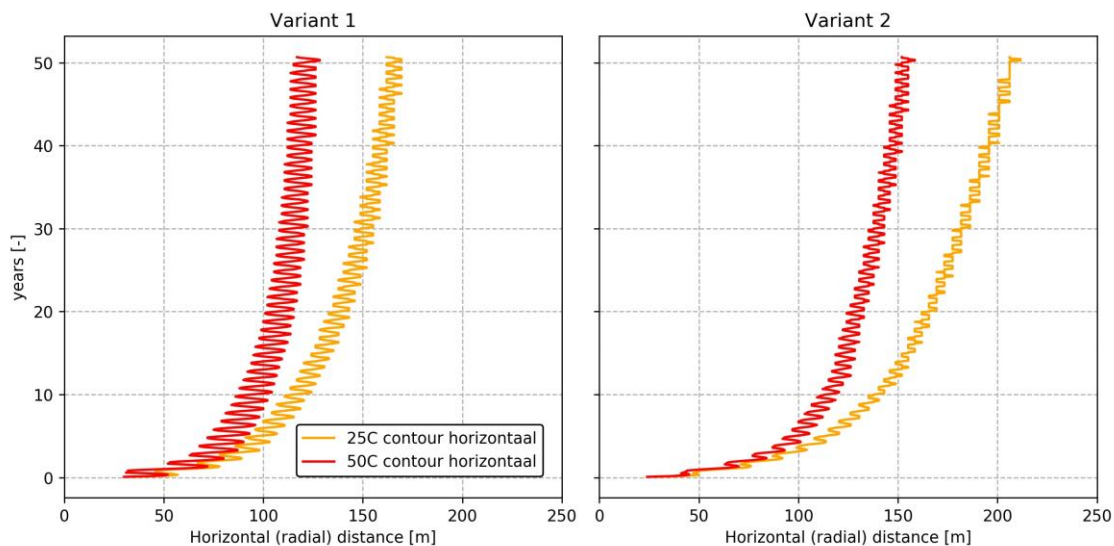
De horizontale verspreiding is groter voor opslag in BRz4, Figuur 5-3. Dit kan worden verklaard door de grotere oprijving, die leidt tot een relatief grote horizontale verspreiding van de warmte in het bovenste gedeelte van de aquifer.



Figuur 5-1 Thermische verspreiding van de warmteopslag na 50 jaar voor opslag in BRz3 (links) en BRz4 (rechts). De knik bovenin het linker figuur wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van een complexe laag kort onder maaiveld.



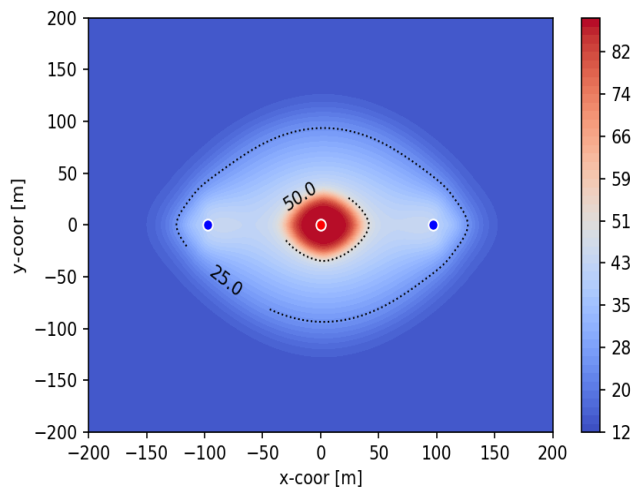
Figuur 5-2 Verticale verspreiding (recht boven de put) vanuit de opslag aquifer naar boven en onder voor opslag in BRz3 (links) en BRz4 (rechts). De knik bovenin het linker figuur wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van een complexe laag kort onder maaiveld.



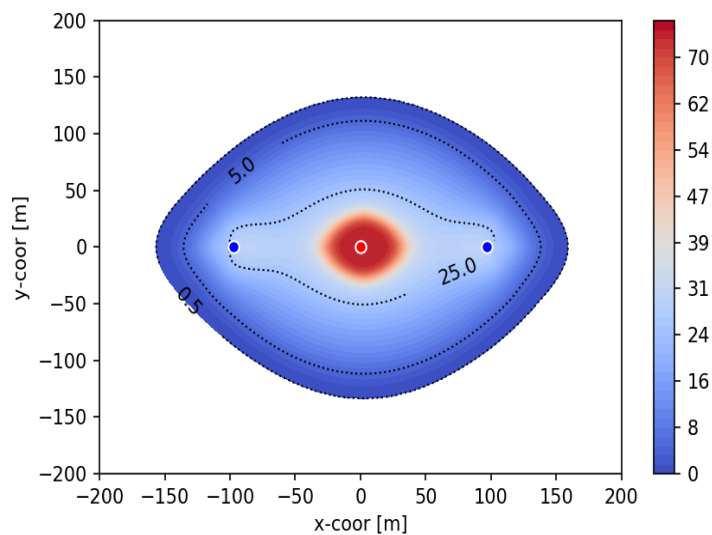
Figuur 5-3 horizontale verspreiding in de opslag aquifer t.o.v. de hete put voor opslag in BRz3 (links) en BRz4 (rechts).

3D simulatie

Variant 2 is doorgerekend met het 3D model (Figuur 5-4). De temperatuur in de ondergrond neemt naar buiten toe sterk af. De grootste temperatuur impact is op de lijn van de hete en de warme bronnen. Een vergelijkbaar figuur is weergegeven in Figuur 5-5, waar de absolute temperatuur stijging van de ondergrond is weergegeven. Het is hier goed te zien dat er ongeveer een oppervlak van 300m bij 200m $>0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ is opgewarmd na 10 jaar.

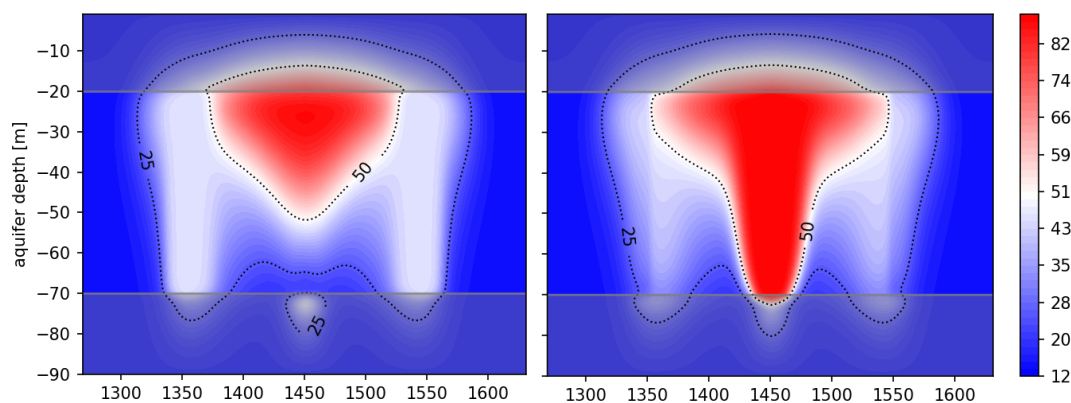


Figuur 5-4 Temperatuur van de opslag aquifer na 10 jaar gebruik van de warmteopslag voor variant 2. 50 en 25 °C contour zijn gegeven.



Figuur 5-5 Absolute temperatuur stijging van de ondergrond in de opslag aquifer door de warmteopslag na 10 jaar voor variant 2.

Het effect van opdrijving, en de interactie tussen de hete en warme bronnen is zichtbaar in de doorsnede van het 3D model (Figuur 5-6). Tijdens het ontladen van de warmteopslag wordt er onderaan het filter koud water onttrokken (links, Figuur 5-6). Echter, de warmte die bovenin afdrijft kan bovenin het filter van de warme bronnen worden opgevangen en hergebruikt.



Figuur 5-6 Doorsnede van de ondergrond in de winter (links, warmteopslag raakt leeg) en zomer (rechts, warmteopslag raakt vol). De 2 warme bronnen rondom de hete bron zijn herkenbaar als de blanke vorm ($T=45\text{ }^{\circ}\text{C}$) in de ondergrond. Opdrijving is goed zichtbaar in dit figuur, dit leidt er toe dat onderaan het filter koud water wordt onttrokken (linker figuur).

5.3 Reflectie op mogelijke thermische effect op de grondwaterkwaliteit op basis van bestaande data

Op basis van de beschikbare data in Dinoloket over de samenstelling van grondwater nabij de verkenninglocaties is een eerste algemene interpretatie gemaakt van de geohydrochemie in de voor opslag beschouwde lagen ter plekke van de 5 verkenninglocaties. Hiervoor is alle beschikbare grondwaterkwaliteitsdata binnen een radius van 5 kilometer van deze locaties geanalyseerd. Omdat grondwaterkwaliteit alleen slechts een indicatie kan geven van mogelijk relevante effecten tijdens HTO, is er naast deze algemene beschouwing specifiek gekeken naar een aantal aspecten waarvoor uit de literatuur is gebleken dat ze bij HTO mogelijk een waterkwaliteitsrisico vormen. Voor zover de databeschikbaarheid het toeliet is dit gedaan vanuit zowel operationeel als grondwaterbeschermingsperspectief.

Een belangrijke eerste conclusie van deze voorverkenning is dat de huidig beschikbare data voor de verkenninglocaties niet toereikend is voor een uitgebreide analyse van mogelijke effecten op grondwaterkwaliteit. Dit omdat de hoeveelheid van geanalyseerde parameters zeer beperkt is, of analyses zelfs geheel afwezig voor de formaties waarin de lagen zich bevinden die worden verkend voor HTO (Tabel 5-1). Voor de Oosterhout bij Heerhugowaard, de Maassluis bij Leeuwarden, en de Oosterhout bij Rotterdam is bijvoorbeeld geen data. Daarnaast is de data bij Rotterdam voor de Maassluis wel uit de zelfde formatie, maar zo'n 100 m minder diep gelegen dan de laag die verkend wordt voor HTO.

Tabel 5-1. Gemiddelde concentraties van belangrijke waterkwaliteitsparameters bij iedere verkenninglocatie in de formaties waarin de voor HTO verkende lagen zich bevinden. *Monsters wel uit Formatie van Maassluis maar ruim 100 m ondieper dan de voor HTO verkende laag.

Locatie	Formatie	Aantal monsters	As (ug/l)	Ca (mg/l)	Cl- (mg/l)	Fe (mg/l)	HCO3 (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Mn (mg/l)	NH4 (mg/l)	NO3 (mg/l)	Na (mg/l)	SO4 (mg/l)	SiO2 (mg/l)	T-PO4 (mg/l)	pH (-)
Heerhugowaard	Maassluis	3		340	10018	5.4	353	116	642	0.8	43	0	5521	496	17	0.1	7.8
Heerhugowaard	Oosterhout	0															
Leeuwarden	Maassluis	0															
Sittard	Breda	6	0.8	59	11	0.6	206	9	9	0.2	1	22	15	26	14	0.6	7.2
Den Haag	Maassluis	1			2930		281										
Den Haag	Oosterhout	2		601	13444	1.5	168	118	337		46	0	7327	24	32	0.0	
Rotterdam	Maassluis*	2		521	2707	8.3	575		134	0.1	6	0	1106	0	48		
Rotterdam	Oosterhout	0															

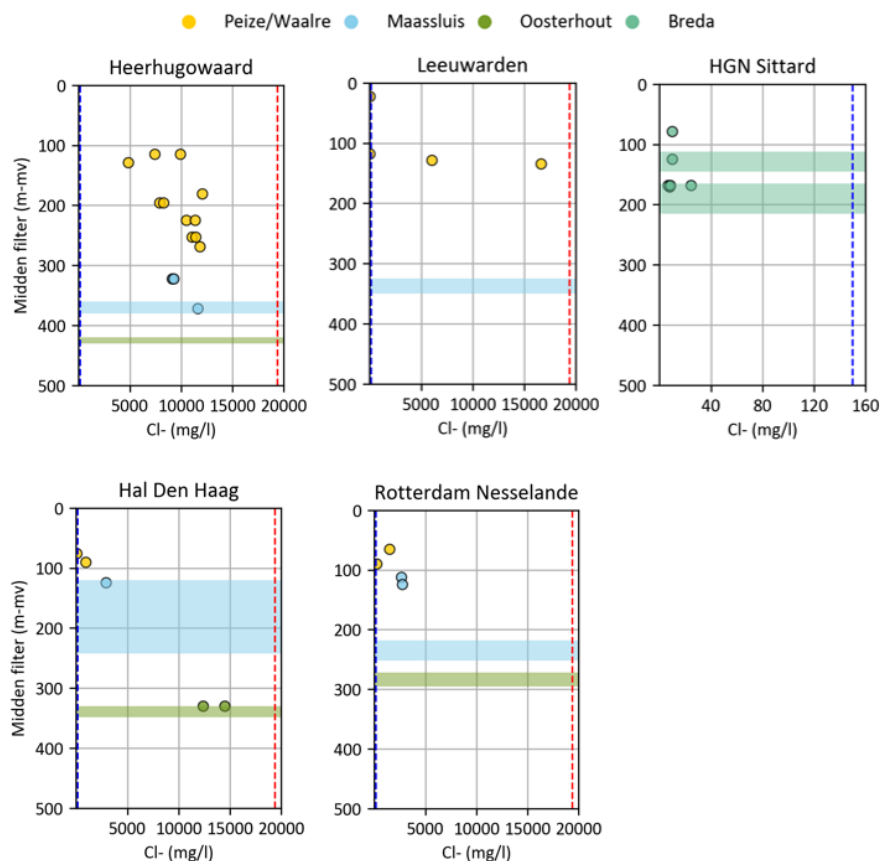
Naast deze ruimtelijke beperking is er ook een beperking in termen van de waterkwaliteitsparameters die zijn geanalyseerd in de monsters. Zo is er helaas slechts 1 monster waarvan sporenelementen

geanalyseerd zijn zoals bijvoorbeeld arseen, en is geen microbiologische data voorhanden. Uit de literatuur volgt dat de mobilisatie van arseen één van de belangrijkste processen is die kan optreden bij toepassing van HTO. De waterkwaliteitsaspecten waartoe we ons op basis van de data op hebben gericht zijn het risico op menging van zoet en zout grondwater met verschillende kwaliteit door het rondpompen, de impact op de kalkchemie en mogelijke carbonaatneerslag, en de redoxchemie.

5.3.1 Algemene interpretatie en risico op vermenging van watertypen

Een van de grondwaterkwaliteitsaspecten waarop de toepassing van HTO in een bepaalde laag beschouwd kan worden is het zoutgehalte van het grondwater, omdat dat mede de geschiktheid bepaald voor waterproductie. Alleen voor de locatie in Sittard bevindt zich zoet water in de voor HTO verkend lagen, met een gemiddeld chloride gehalte van slechts 11 mg/l. Op deze locatie wordt de samenstelling van de in het grondwater opgeloste ionen dus grotendeels bepaald door de concentratie calcium en bicarbonaat (HCO_3). Op de andere locaties is het grondwater zout, met chloride gehalten die variëren van zoon 3.000 tot 13.500 mg/l (Tabel 5-1). Hier wordt de samenstelling van het grondwater dus bepaald door met name de chloride en natrium concentraties.

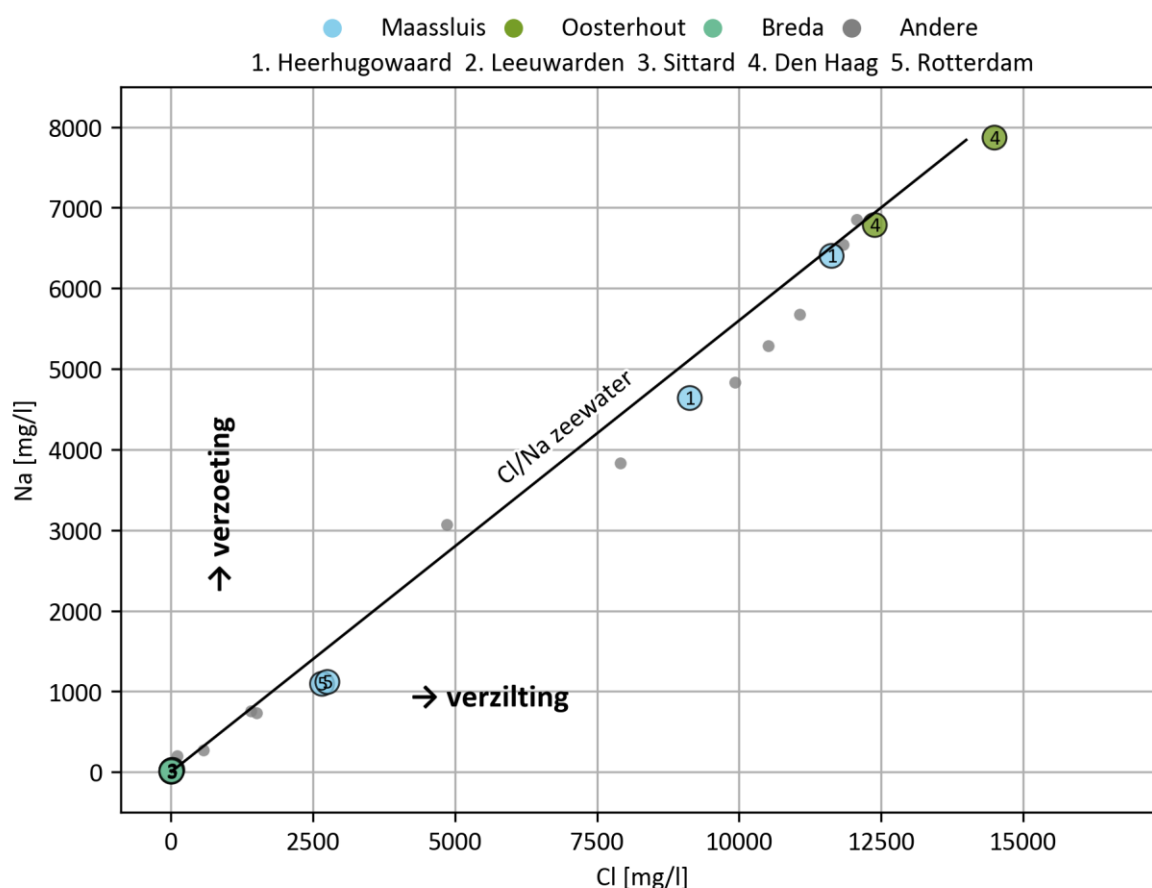
Voor zowel Leeuwarden en Rotterdam, waar geen data voor de beschouwde lagen beschikbaar is, is in Figuur 5-7 Figuur 5-7. Diepteprofiel van chlorideconcentraties op basis van alle beschikbare waterkwaliteitsdata (DINOLOKET) in nabijheid van de 5 pilot locaties. Doorzichtig ingekleurde zones geven de diepte en het deel van de betreffende formatie weer welke voor iedere locatie verkend worden. De verticale gestreepte lijnen geven de grens tussen zoet en brakwater weer (150 mg/l Cl) en brak en zoutwater (19.400 mg/l) te zien dat de chloride gehalten in de monsters uit de meest diep gelegen filters hierboven wel 10 tot 100 keer hoger zijn dan zoet grondwater. In Leeuwarden nadert de waarneming van ~16.600 mg/l zelfs dat van zeewater (~19.400 mg/l). Het feit dat er zich ver boven de beschouwde lagen nog zout grondwater bevindt geeft aan dat het risico op verzilting van bovenliggend zoet grondwater veroorzaakt door een mogelijk HTO systeem gering is.



Figuur 5-7. Diepteprofiel van chlorideconcentraties op basis van alle beschikbare waterkwaliteitsdata (DINOLOKET) in nabijheid van de 5 pilot locaties. Doorzichtig ingekleurde zones geven de diepte en het deel van de betreffende formatie weer welke voor iedere locatie verkend worden. De verticale gestreepte lijnen geven de grens tussen zoet en brakwater weer (150 mg/l Cl) en brak en zoutwater (19.400 mg/l)

In Figuur 5-8 zijn de chloride en natrium gehalte in de watermonsters tegen elkaar uit gezet. Voor alle monsters geldt dat de Na/Cl verhouding rond die van zeewater ligt. Dit toont aan dat de grondwaters zoals verwacht uit verschillende verhoudingen tussen zeewater en zoet grondwater bestaan, maar bovenal geeft het enige mate van vertrouwen in de kwaliteit van de data, ondanks dat deze in sommige gevallen al bijna 100 jaar oud is (oudste monster is uit 1925, zie Tabel 5-2).

Te zien is verder dat de monsters in de Maasluis en Oosterhout Formatie enigszins afwijken van de op basis van menging met zeewater te verwachte lijn, met lagere Na/Cl ratio's. Dit is een indicator voor het optreden van verzilting van het grondwater: bij verdringing van zoet grondwater met zout water wisselt het in het zoute zeewater dominante kation natrium namelijk uit met het aan het sediment geadsorbeerde calcium. Voor de monsters waarvoor naast natrium concentraties ook magnesium en kalium data beschikbaar was is ook de Base Exchange Index (BEX) berekend (volgens Stuyfzand, 1993, zie Tabel 5-2). Een negatieve BEX is een duidelijk bewijs voor verzilting. Behalve voor de locatie Sittard was de BEX dan ook inderdaad negatief, wat aangeeft dat er sprake is van verzilting. In Sittard zijn de BEX waarden licht positief, wat mogelijk juist nog een spoor van verzoeting aangeeft.



Figuur 5-8. Chloride versus natrium concentraties. Grijze punten zijn monsters uit de verzamelde putten maar uit bovenliggende formaties. Doorgetrokken streep geeft de chloride/natrium verhouding weer in zeewater.

De aanwezigheid van een redox gradiënt binnen de opslagformatie kan een operationeel risico zijn, als bijvoorbeeld door de HTO nitraatrijk en ijzerhoudend grondwater wordt samengebracht. Neerslag van

ijzeroxiden kan dan tot putverstopping leiden. Gezien de grote diepte van de verkende lagen mag echter worden aangenomen dat het grondwater volledig anoxisch is. In 1 van de 2 putten in de Formatie van Breda bij Sittard lijkt echter wel nitraat aanwezig te zijn in 2 monsters uit het jaar 2000, en is het grondwater dus mogelijk niet volledig anoxisch. In een eerder monster uit dezelfde put uit 1975 zat geen nitraat. Dit betekent dat er ofwel sprake is van diep doorgedrongen antropogene verontreiniging, of er is mogelijk sprake van fouten bij monsternamen. Een wat afwijkende ionenbalansen in deze monsters zijn een indicatie voor het laatste.

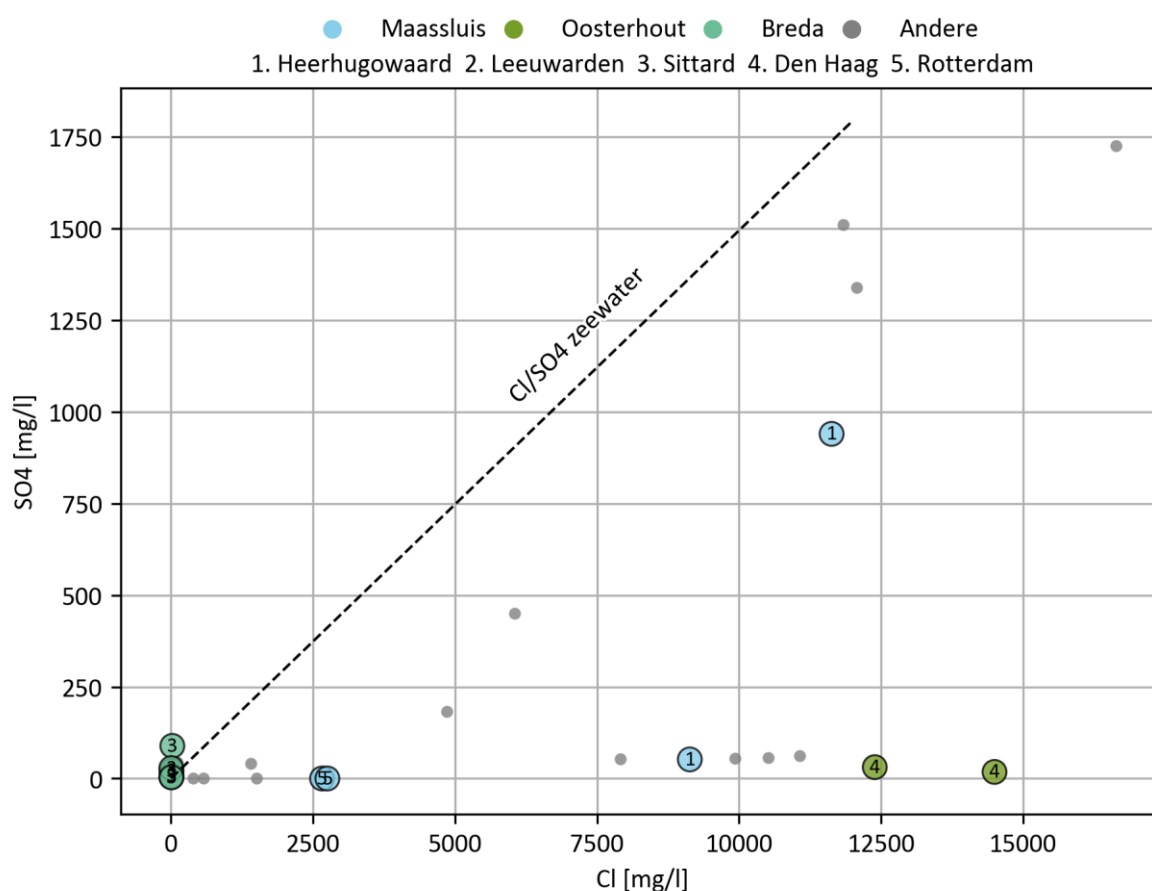
5.3.2 Verwachte invloed temperatuur op redox chemie en microbiologie

De verhoging van de temperatuur bij HTO kan ook leiden tot mineralisatie en mobilisatie van sedimentair organisch materiaal (SOM), en verandering van de redoxstaat en de daaraan samenhangende biochemie van het grondwater (Bonte et al., 2013; Brons et al., 1991). Mobilisatie van SOM kan leiden tot oplossing van organisch materiaal (DOC) dat bovendien als substraat kan dienen voor biologische reacties. In de data is echter slechts voor 1 beschouwde laag data beschikbaar over de hoeveelheid aanwezig organisch materiaal (de Formatie van Maassluis bij Heerhugowaard). De concentraties van 12-13 (mg/l) zijn niet ongebruikelijk, maar een verhoging valt bij hogere temperaturen te verwachten.

Tabel 5-2. Volledige waterkwaliteitsdataset gebruikt voor de voorverkenning

Loc Nr	Formatie	Target	NITG nr	Mid filter (m-mv)	Analyse datum	pH (-)	Ca (mg/l)	Cl- (mg/l)	Fe (mg/l)	HCO3 (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Mn (mg/l)	NH4 (mg/l)	NO3 (mg/l)	Na (mg/l)	SO4 (mg/l)	T-PO4 (mg/l)	TOC (mg/l)	BEX
1		Nee	B14D0062	16.5	1978	8.4		59												
1		Nee	B14D0062	16.5	1979	7.5	103	61	2.4	557	20	33	1	3.46	0	59	4	0.951	9.8	3.9
1		Nee	B14D0062	37.5	1978	7.3		60												
1		Nee	B14D0062	37.5	1979	7.7	71	87	4	601	24	42	1.26	7.17	0	117	8	0.276	10.4	6.5
1		Nee	B14D0062	81	1978	7.8		1566												
1		Nee	B14D0062	81	1979	7.6	166	1410	14.4	821	42	122	3.73	8.256	0	754	41	0.061	12.5	1.3
1	Peize/Waalre	Nee	B14D0062	115	1979	7.3	476	9932	12.2	863	176	731	3.32	25.28	0	4834	55	0	12	-25.3
1	Peize/Waalre	Nee	B14D0062	115	1978	7.7		7439												
1	Peize/Waalre	Nee	B14D0062	196	1979	7.4	438	7910	1.5	622	134	550	0.4	11.09	0	3831	53	0.061	13.5	-23.7
1	Peize/Waalre	Nee	B14D0062	196	1978	7.9		8293												
1	Peize/Waalre	Nee	B14D0062	225	1979	7.5	297	10517	1.8	819	191	752	0.59	25.8	0	5289	56	0.46	13.2	-21.0
1	Peize/Waalre	Nee	B14D0062	225	1978	7.9		11372												
1	Peize/Waalre	Nee	B14D0062	253	1979	7.5	310	11067	1.9	819	216	777	0.34	22.06	0	5674	62	0	10	-18.2
1	Peize/Waalre	Nee	B14D0062	253	1978	7.9		11425												
1	Maassluis	Ja	B14D0062	322.5	1979	7.6	372	9134	2.1	341	93	601	0.8	22.83	0	4639	52	0	13	-22.4
1	Maassluis	Ja	B14D0062	322.5	1978	7.9		9290												
1		Nee	B19E0101	46	1979	7.4	102	62	3.1	755	23.7	57.6	1.41	6.8		111	17	0.55	14	8.3
1		Nee	B19E0101	67	1979	7.5	66	114	0.6	683	22.7	41.4	0.76	7.2		201	44.5	0.68	19	9.3
1	Peize/Waalre	Nee	B19E0101	129	1979	7.7	201	4860	3.8	1575	78.9	294	1.26	20		3070	182	2.18	25	12.9
1	Peize/Waalre	Nee	B19E0101	181	1979	7.6	371	12070	2.7	808	210	1009	1.42	16.4		6850	1340	0.3	18	21.6
1	Peize/Waalre	Nee	B19E0101	269	1979	7.7	351	11840	1.3	362	199	800.3	3.09	13.1		6540	1510	0.03	10	-2.4
1	Maassluis	Ja	B19E0101	372	1979	7.9	307	11630	8.7	365	138	682	0.78	63		6402	940	0.24	12	-13.4
2		Nee	B11B0023	57.81	1980	6.75	103.2	31	15.2	388	2.4	11.9	1.3	0.84	0	19.2	0	1	6.19	0.9
2		Nee	B11B0023	74.03	1980	6.9	116.4	33	11	427	2.2	10.1	1.1	0.7	0	21	0	0.98	6.7	0.8
2	Peize/Waalre	Nee	B11B0023	117.99	1980	6.8	119.2	25	13.1	453	2.2	12.8	0.93	1.12	0	17.5	0	1.14	7.06	1.1
2	Peize/Waalre	Nee	B11B0023	22.78	1980	6.6	53.2	35	29.8	293	3.1	29.5	1.8	2.8	0	20.4	0	1.12	5.15	2.3
2	Peize/Waalre	Nee	B05H0004	134.6	1952	7.5	454	16637	5.2	936	241	1073		50		9050	1726	6.5		-14.7
2	Peize/Waalre	Nee	B10F0041	128.645	1969		610.5	6050	9.6	566.7		359.7		10			450.8			
3	Breda	Ja	B60C0781	78.8	1970	7.6	63	10	1.7	262		12	0	0.22	0	19	20.8	0.06		1.5
3	Breda	Ja	B60C0781	124.8	1970	7.58	29.5	10	0.42	159		7.8	0.08	0.23	0	20	8.4	0.58		1.2
3	Breda	Ja	B60C0781	170.8	1970	6.92	26.5	8	0.82	122		6.3	0	0.48	0	10	4.3	0.62		0.7
3	Breda	Ja	B60C0796	168.3	2000	7.02	140.69	24.6	0	377	10.43	19.58	0.7	0.37	27.8	27.14	89			2.3
3	Breda	Ja	B60C0796	168.3	2000	6.59	54.41	6.81	0	185.44	7.13	6.78		6.45	103.8	3.49	28.34	1.38		0.7
3	Breda	Ja	B60C0796	168.3	1975	7.2	37.5	8.5	0.88	130		3.07	0.01	0.13	0.5	12.19	3	0.39		0.5
4		Nee	B30G0500	19				190		204										
4		Nee	B30G0500	44				193		207										
4	Peize/Waalre	Nee	B30G0500	76				78		436										
4	Peize/Waalre	Nee	B30G0500	90.5				955		476										
4	Maassluis	Ja	B30G0500	124.5				2930		281										
4	Oosterhout	Ja	B30D0064	330	1938		611	14498	0.1	159	123	399		49.9	0	7869	17.9	0		-59.9
4	Oosterhout	Ja	B30D0064	330	1938		591	12390	2.8	177.56	112	274		41.5	0	6785	30.9	0		-53.9
5	Peize/Waalre	Nee	B37H0129	90.14	1939		248.5	0.7	441.17				0							
5		Nee	B37F0104	19.75	1925		162.6	388	29.4			59.9	0.78	25	0		0			
5		Nee	B37F0104	28.5	1935		228	576	25.6	873.19		59.9	1.01	25	0	273.8	0			-0.3
5		Nee	B37F0104	40	1925			812												
5	Peize/Waalre	Nee	B37F0104	65.5	1925		357.1	1505	5.84	835.97		73	0.37	6.24	0	730.1	0			-6.9
5	Maassluis	Ja	B37F0104	112.37	1925		539.6	2660	8.1	602.26		118.7	0.14	5.4	0	1095	0			-21.6
5	Maassluis	Ja	B37F0104	124.5	1925		502.5	2754	8.4	547.34		150	0.14	5.8	0	1118	0			-20.8

In experimentele studies is verder aangetoond dat bij een verhoging van de temperatuur een verschuiving in redox condities te verwachten valt: van initieel oxidisch of ijzerreducerend grondwater naar methanogeen bij zo'n 25°C en naar sulfaatreducerend bij nog hogere temperaturen (Bonte et al., 2013; Jesuřek et al., 2013). De data van de locaties laat zien dat er weinig of geen sulfaat in het grondwater aanwezig is in de voor HTO beschouwde lagen, met SO_4/Cl verhoudingen ver onder dat van zeewater (Figuur 5-9). Dit toont aan dat het natuurlijke milieu dus waarschijnlijk al sulfaat reducerend is, of dat het aanwezige sulfaat reeds is weg gereduceerd. Bij toepassing van HTO mag dus worden verwacht het nog aanwezige sulfaat relatief snel weg reduceert. Bij sulfaat reductie komt H_2S vrij, wat niet wenselijk is vanwege corrosieve en verstoppingsreacties, bijvoorbeeld door neerslag met ijzer en het vormen van pyriet. Tegelijk kunnen bij deze neerslag sporenelementen als arseen worden opgenomen, waardoor eventuele mobilisatie hiervan beperkt kan blijven (Van Breukelen & Bonte, 2016).



Figuur 5-9. Chloride versus sulfaat concentraties. Grijze punten zijn monsters uit de verzamelde putten maar uit bovenliggende formaties. Gestreepte lijn geeft de chloride/sulfaat verhouding in zeewater weer.

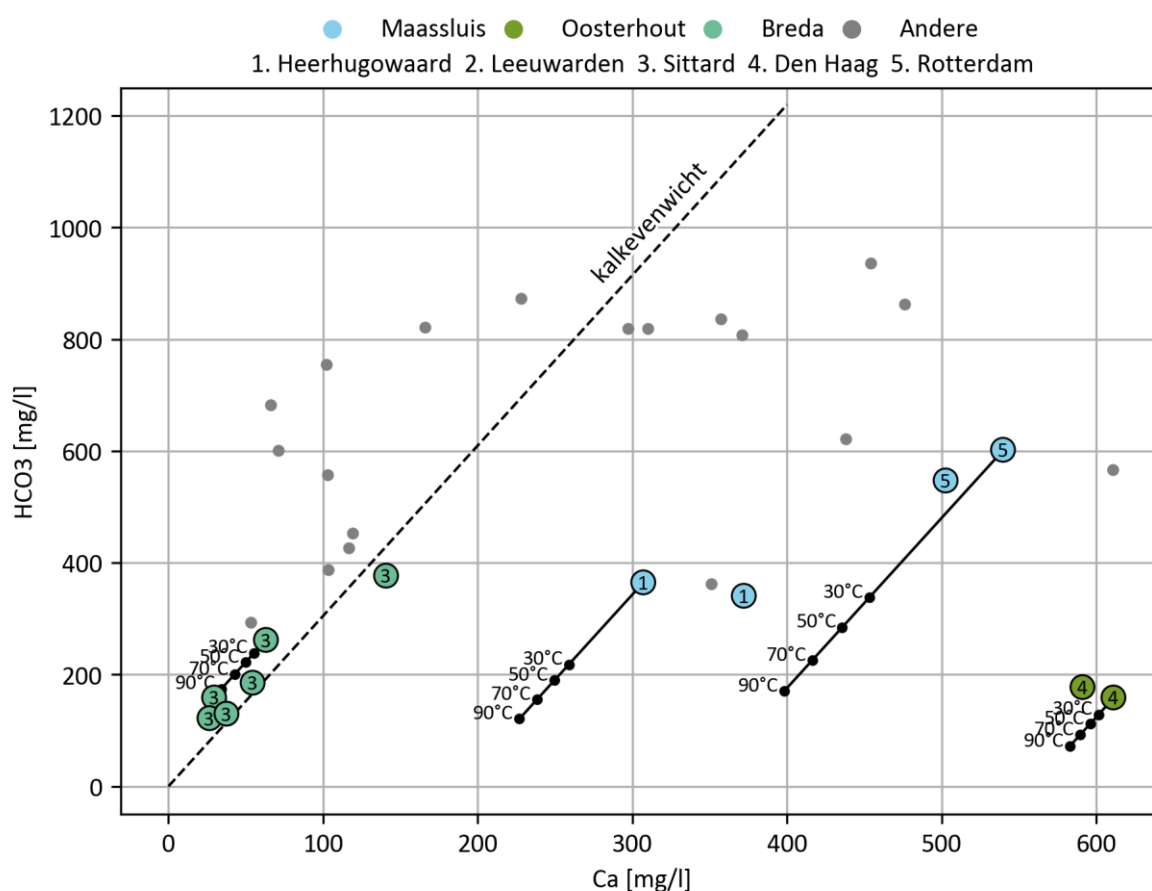
5.3.3 Verwachte invloed op kalkchemie en carbonaatneerslag

In Figuur 5-10 zijn de concentraties aan calcium en bicarbonaat (HCO_3) weergegeven. Voor de Formatie van Breda in Sittard is te zien dat de verhouding tussen deze twee goed te verklaren valt door kalkevenwicht puur op basis van de CO_2 spanning. Voor de andere locaties geldt dat de calcium concentraties verhoogd zijn – wat goed te verklaren valt door de waargenomen verzilting, waarbij Ca vrijkomt en de Ca/HCO_3 verhouding verschuift.

Een belangrijk risico bij HTO is dat de temperatuurverhoging neerslag van kalk veroorzaakt, met putverstopping tot gevolg. Om het risico hierop ondanks de beperkte databeschikbaarheid enigszins in te schatten is met behulp van het geochemisch modelleer programma PHREEQC voor de combinatie pH, Ca en HCO_3 van vier representatieve grondwatermonsters berekend wat het effect zou zijn een verhoging

van temperatuur van 15 graden naar achtereenvolgens 30, 50, 70 en 90 graden (Figuur 5-10). De berekeningen laten best grote verschillen in potentiële neerslag zien, zoals geïllustreerd wordt door de mate waarin Ca en HCO_3 concentraties afnemen. Vooral voor de omstandigheden in de Formatie van Maassluis bij zowel Heerhugowaard als in Rotterdam is een aanzienlijke verlaging ten gevolge van kalkneerslag te zien.

Hierbij moet worden aangetekend dat het verstoppingsrisico niet alleen afhangt van de potentie om kalk neer te slaan maar zeker ook van de snelheid waarmee dat gebeurt. Die snelheid is mede-afhankelijk van verhouding Ca/ HCO_3 . De berekende CO_2 druk als gevolg van de verschuiving (bij 90°C) varieerden van 0.1 tot 0.5 atm, en de resulterende pH's daalde als gevolg hiervan tot 5.9 – 6.8. Naast de temperatuur verhoging kan ook CO_2 ontgassing veroorzaakt door de drukverlaging bij onttrekking kalkverstopping veroorzaken (Hartog, 2015).



Figuur 5-10. Calcium en bicarbonaat concentraties in grondwatermonsters. Gestreepte zwarte lijn geeft de theoretische Ca/ HCO_3 verhouding weer bij kalkevenwicht, puur als functie van CO_2 spanning. De vier doorgetrokken zwarte lijnen geven de met PHREEQC berekende verschuiving weer in de concentraties als gevolg van een temperatuurstijging in 4 stappen naar 90 °C, berekend voor de pH, Ca, en HCO_3 van één grondwatermonster uit elk van de 4 'clusters' aan datapunten in de figuur. Zie de Appendix bij dit hoofdstuk voor de exacte chemische samenstelling van deze monsters.

5.3.4 Conclusies

De belangrijkste conclusie is dat de data beschikbaarheid beperkt is. Hierdoor kon er slechts in beperkte mate op verschillende aspecten van mogelijke grondwaterkwaliteitsveranderingen gereflecteerd worden. Naast aanvullende monsternamen en uitgebreidere analyses in de lagen die verkend worden voor HTO, is voor een gedegen analyse van de waarschijnlijke effecten op grondwater ook niet alleen meer grondwaterdata nodig, maar, zeker voor de inschatting van de te verwachten temperatuur effecten ook (experimentele) karakterisatie van het sediment uit die lagen nodig.

Wel lijkt dat het risico op verzilting door vermenging over een chloride gradiënt verwaarloosbaar is, omdat de beoogde formaties zich in een dieptetraject vinden waar het grondwater ofwel volledig zout is of volledig zoet. Voor de locatie in Sittard is er een indicatie dat vermenging over een redox gradiënt een mogelijk risico op verstopping zou kunnen zijn, al is niet zeker of de aanwezigheid van nitraat hier berust op een meetfout of dat het echt zo is. Evenwel is het gebrek van data voor andere locaties natuurlijk geen indicatie dat daar geen redoxvermenging op kan treden.

Middels PHREEQC berekeningen is inzicht verkregen in de potentie tot carbonaatneerslag door verschuiving van het kalkevenwicht. De neerslagpotentie lijkt op basis van de beschikbare data het hoogst in de Formatie van Maassluis bij Rotterdam en Heerhugowaard. Bij een verdere beschouwing van verstoppingsrisico's zal dit risico verder geadresseerd moeten worden, samen met de noodzaak voor mitigerende maatregelen, zoals zoutzuur of CO₂ dosering.

5.4 Juridisch raamwerk

Wettelijk kader

Het wettelijke kader voor HTO tot 500 m-mv is vastgelegd in de Waterwet en het Wijzigingsbesluit Bodemenergie (AMvB Bodemenergie uit 2013). Vanaf 500 m-mv is de Mijnbouwwet van toepassing. In principe beperkt deze verkenning zich tot een diepte van 500 m-mv en daarom is hier de wet- en regelgeving in relatie tot de Waterwet weergegeven.

Waterwet en bevoegd gezag

WKO en HTO vallen onder de term 'open bodemenergiesystemen': systemen waarbij koude of warmte aan de bodem wordt onttrokken en waarbij grondwater wordt verplaatst. Het onttrekken en infiltreren van grondwater ten behoeve van een bodemenergiesysteem is vergunningplichtig in het kader van de Waterwet. Gedeputeerde staten van de provincie zijn hiervoor bevoegd gezag (artikel 6.4 van de Waterwet).

Wijzigingsbesluit Bodemenergie

Het Wijzigingsbesluit Bodemenergiesystemen (AMvB Bodemenergie) is sinds 1 juli 2013 van kracht. In artikel 6.11 van dit besluit wordt geregeld dat de infiltratietemperatuur bij open systemen maximaal 25 °C mag zijn en dat er geen lange termijn warmteoverschot mag zijn. Voor beide voorwaarden zijn uitzonderingen mogelijk indien het belang van de bescherming van de bodem zich daartegen niet verzet. Op basis daarvan kan HTO onder voorwaarden worden toegestaan. Hoe die afweging gemaakt moet worden is verder in de AMvB niet beschreven en zal door het bevoegd gezag gedaan moeten worden (maatwerk).

Richtlijnen voor vergunningverlening: de BUM

Om de provincies te helpen bij de vergunningverlening rond open bodemsystemen is een zogenaamde BUM (Besluitvorming Uitvoerings Methode) ontwikkeld (SIKB, 2015). Hierin zijn standaardvoorschriften opgesteld voor open bodemenergiesystemen met een infiltratietemperatuur tot 25 °C en een energiebalans in de ondergrond ('gangbare' WKO-systemen). Daarmee heeft de BUM de uniformiteit van beoordeling en vergunningverlening van vergunningaanvragen voor open bodemenergiesystemen door provincies bevordert. HTO voldoet niet aan deze standaardvoorschriften die zijn opgesteld in de BUM, vanwege de infiltratietemperatuur (>25°C) en het warmteoverschot in de bodem. De BUM geeft als richtlijn dat af kan worden geweken van de standaardvoorschriften mits het gaat om onderzoeksprojecten, en vermeldt expliciet dat HTO hier voorlopig ook onder valt. Bij het aanhouden van

de BUM als richtlijn voor vergunningverlening wordt HTO dus vergund mits het een onderzoeksproject betreft en er geen andere belangen worden geschaad.

Vergunningsprocedure voor HTO in Limburg - de Waterwet

Voor een HTO bij Het Groene Net (HGN) dient een vergunning Waterwet aangevraagd te worden. Hiervoor dienen de effecten van het bodemenergiesysteem in een effectenstudie te worden gekwantificeerd. Het bevoegd gezag voor deze vergunning is de provincie Limburg. De proceduredtijd voor het aanvragen van de vergunning Waterwet bedraagt circa 8 weken. In het geval van complexe omgevingsbelangen kan de provincie hiervan afwijken en de uitgebreide procedure (6 maanden) van toepassing verklaren.

In de praktijk is het wenselijk om de vergunningsprocedure met het bevoegd gezag af te stemmen voordat de officiële juridische procedure voor het verkrijgen van de vergunning Waterwet wordt opgestart.

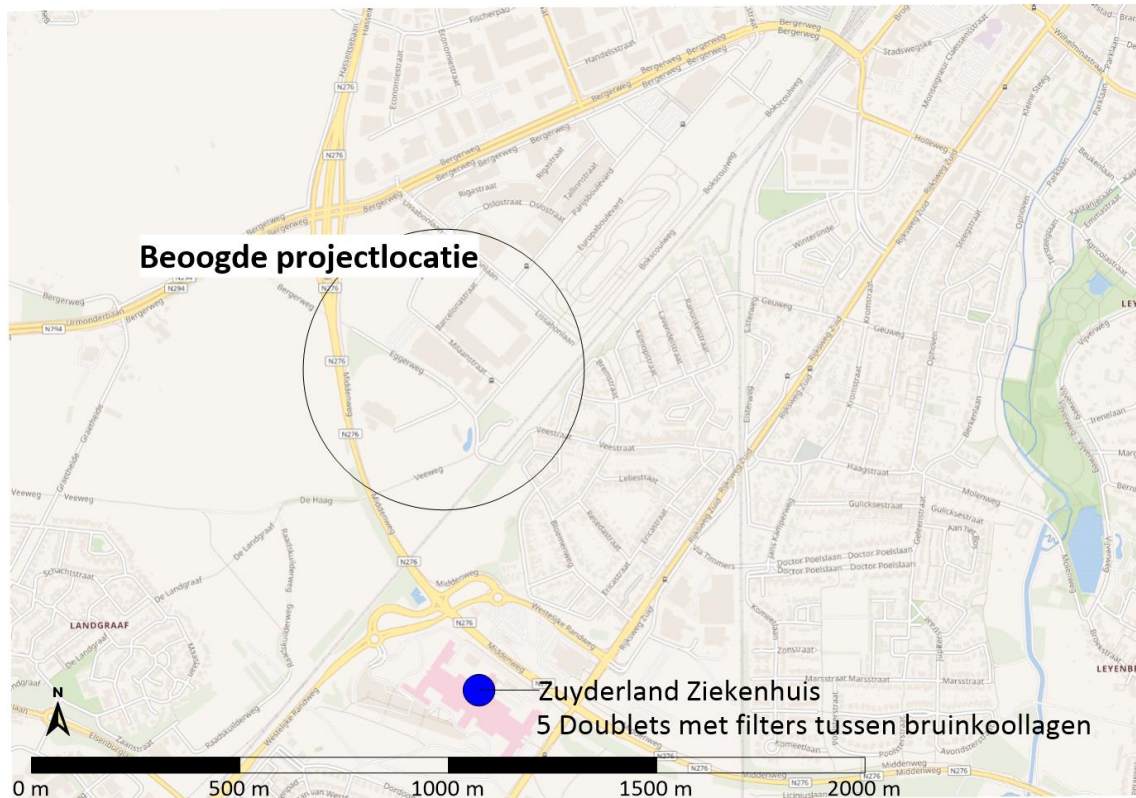
Het toepassen van bodemenergie op de projectlocatie is niet tegenstrijdig met het huidige beleid, dus de verwachting is dat er geen specifieke goedkeuring (en bijbehorende proces) van de Gedeputeerde Staten nodig is.

5.5 Omgevingsscan

Stakeholderanalyse ondergrond

In de vergunningsprocedure zal het bevoegd gezag de noodzaak van HTO afwegen tegen de optredende effecten op de omgeving, en de impact daarvan op de omgevingsbelangen. Daarom is het belangrijk om een beeld te hebben van de stakeholders in de ondergrond nabij de projectlocatie. Er is daartoe een stakeholderanalyse uitgevoerd om te zien welke belangen er zich in de ondergrond bevinden.

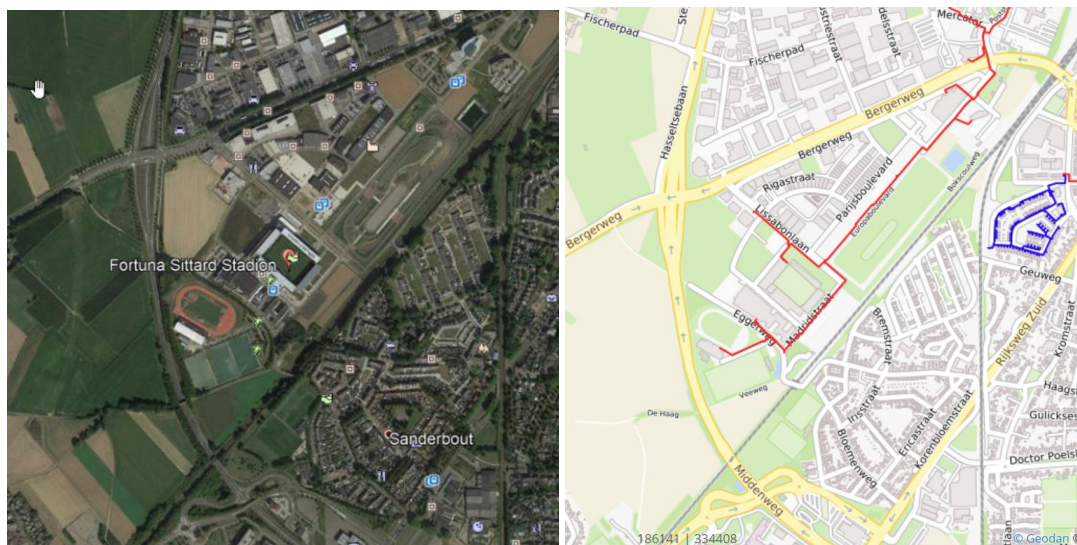
De aanwezige belangen nabij de potentiële projectlocatie rondom het stadion zijn weergegeven in onderstaande Figuur 5-11. Voor dit project ligt de precieze bronlocatie nog niet vast, maar vermoedelijk worden de HTO-bronnen in het omcirkelde gebied geplaatst. Uit contact met het bevoegd gezag voor open en gesloten bodemenergiesystemen, en grondwateronttrekkingen op de projectlocatie, is gebleken dat er zich slechts één andere stakeholder in de ondergrond bevindt: het Zuyderland Ziekenhuis. Het WKO-systeem van het ziekenhuis bestaat uit 5 doubletten met filters tussen de bruinkoollagen (BRz3). Wanneer warmteopslag in dezelfde laag wordt voorzien, worden vooralsnog geen significante thermische effecten op het Zuyderland ziekenhuis verwacht (zie simulaties). Eventueel kan ervoor worden gekozen om meer afstand tussen de twee systemen aan te houden, door de HTO aan de noordkant van het zoekgebied (de cirkel) te plaatsen. Meer gedetailleerde simulaties, waarbij ook grondwaterstroming wordt meegenomen, worden uitgevoerd binnen de effectrapportage, wanneer een vergunning voor dit systeem wordt aangevraagd.



Figuur 5-11: overzichtskartaal met daarin het zoekgebied voor de HTO (cirkel). Het Zuyderland ziekenhuis is een WKO-systeem op enige afstand van het zoekgebied.

Scan bovengrond

Er liggen plannen voor uitbreiding en koppeling naar Geleen. Met een beoogde locatie van de HTO in de omgeving van het Fortuna Sittard Stadion ligt in dat geval de HTO centraal in het warmtenet (Figuur 5-12). Rondom het stadion is nog relatief veel open ruimte, wat voordelig is voor het inpassen van de HTO-bronnen en leidingwerk. Wanneer bij het ontwerp uitgegaan wordt van de NVOE ontwerpnormen, dient rekening gehouden te worden met 2 hete bronnen en 2 lauwe bronnen. Idealiter liggen de hete bronnen dicht bij elkaar en ligt aan elke zijde van de hete bronnen een lauwe bron op circa 100 meter afstand (zie paragraaf 3.3.2). Dit betekent dat er 3 boorlocaties gezocht moeten worden. Een eerste inschatting is dat er voldoende ruimte beschikbaar is hiervoor. Mocht het lastig zijn om drie boorlocaties te vinden, dan kunnen de lauwe bronnen ook bij elkaar geplaatst worden, waardoor er nog maar twee boorlocaties nodig zijn. Dit zal wel een wat lager systeemrendement geven.



Figuur 5-12: Mogelijke locatie HTO rondom het Fortuna Stadion. Links satellietbeelden en rechts het huidige warmtenetwerk.

6 Risico inventarisatie en plan van aanpak vervolgstappen

6.1 Introductie

De belangrijkste risico's gerelateerd aan HTO projecten zijn geïnventariseerd op basis van projecten in het verleden (bijv. TNO, 2016; TNO & IF Technology, 2016, 2019) en op basis van studies zoals het WINDOW project. De indeling en beschrijving van de risico's zijn grotendeels gebaseerd op TNO & IF Technology (2019). In het algemeen zijn de geïdentificeerde risico's generiek voor elk HTO project, maar de specifieke risico's kunnen wel meer of minder relevant zijn voor de individuele projecten. Er is daarom gekozen voor een algemeen overzicht van de geïdentificeerde risico's, dat gelijk is in alle verkenningen, gevolgd door een locatie-specifiek overzicht waarin voor elk van de individuele verkenningen de relevantie is aangegeven. Voor die risico's die relevant worden geacht wordt per locatie een toelichting gegeven.

Risico's zijn onder te verdelen in:

- Risico's voor de business case (commercieel/economisch)
- Juridische haalbaarheid en draagvlak
- Technische en geohydrologische risico's
- Milieu- en veiligheidsrisico's
- Organisatorische risico's (inclusief commitment stakeholder)

Deze worden per categorie verder toegelicht in bijlage 5.

6.2 Inschatting relevantie van de projectrisico's

Een inschatting van de belangrijkste projectrisico's is weergegeven in Tabel 6-1. Hieruit komt naar voren welke risico's als belangrijkste projectrisico's worden gezien. De kans en het gevolg van projectspecifieke risico's zijn relatief ten opzichte van de andere uitgevoerde verkenningen bepaald. Voor de projectrisico's kunnen één of meer beheersmaatregelen worden vastgesteld en zijn daardoor lager ingeschaald. Het reduceren van projectrisico's zal het meest effectief zijn door een dialoog op te zetten met bevoegd gezag en belanghebbenden om het vergunning traject succesvol te laten verlopen, het laten uitvoeren van een proefboring en het opstellen van een robuuste strategie voor de operationele inpassing van de HTO. Naast het betrekken van het bevoegd gezag (de Provincie) kan het van belang zijn om ook andere belanghebbende partijen (zoals bijv. waterbedrijven) in het vervolgtraject te betrekken.

Tabel 6-1: Overzicht projectrisico's (kans en gevolg relatief ingeschat t.o.v. andere verkenningen)

	Algemene risico omschrijving			Locatie specifieke beoordeling (relatief t.o.v. andere verkenningen)		
Nr.	Risico	Gevolg	Beheersmaatregel	Kans	Gevolg	Opmerkingen
	Business case (commercieel/economisch)					
	Hogere investeringskosten door marktdruk boorbedrijven	Overschrijding CAPEX	Aanbesteding tijdens crisis Voldoende ruimte inbouwen in planning om te kunnen boren op gunstig moment.	klein	Klein	Kans hang af van de diepte van de bronnen. Hoe dieper de bronnen, hoe minder partijen in de markt in staat zijn dit technisch te boren. Gevolg op CAPEX van de bronnen.
	Hogere investeringskosten of operationele kosten vanwege onvoldoende bewezen techniek	Hogere CAPEX/OPEX	Zoveel mogelijk aanhaken bij onderzoeksprojecten waarbij subsidie/leergeld beschikbaar is.	Groot	Groot	Met name risico hoger uitvallen opex door beperkte ervaring HTO. Door project Wieringermeer capex al beter inzichtelijk. Hoe hoger de opslagtemperatuur, hoe hoger de kans is ingeschat.
	Aanbodzijde duurzame energie blijft achter op verwachting of wordt niet gerealiseerd.	In toekomst onvoldoende duurzame warmte beschikbaar om te laden.	Tijdig inzetten op verschillende duurzame bronnen in aanbodportfolio	Klein	Groot	Kans bepaald op basis van huidige aanbod en gewenste aanbod in eindsituatie. Gevolg afhankelijk van opslagvolume Kleiner opslagvolumes reageren gevoeliger dan grotere opslagvolumes.
	Warmteafzet/ontwikkeling warmtenet blijft achter/ zachte winters	Lagere opbrengsten dan verwacht.	Robuuste operationele strategie voor verschillende stookseizoenen opstellen. Gefaseerd aanleggen bronnen Monitoren performance HTO	Klein	Groot	Kans bepaald op basis van huidige vraag en gewenste vraag in eindsituatie. Gevolg afhankelijk van opslagvolume Kleiner opslagvolumes reageren gevoeliger dan grotere opslagvolumes.
	Warmteverlies in de ondergrond groter dan verwacht, opslagrendement lager dan verwacht.	Lager vermogen en temperatuurniveau aan het einde van het stookseizoen Lagere inkomsten en/of hogere operationele kosten	Proefboring om met grotere zekerheid de opbouw en eigenschappen van de ondergrond te bepalen Optimalisatie van het ontwerp om het opslagrendement te maximaliseren (b.v.	Gemiddeld	Gemiddeld	De gegeven rendementen zijn al relatief laag. De meeste onzekerheden (laagdikte, doorlatendheid) zullen waarschijnlijk gunstig uitvallen. Ook kan er d.m.v. slimme/geoptimaliseerd

		Grotere thermische effecten (en daaraan gekoppelde effecten op de grondwaterkwaliteit)	verlagen afkaptemperatuur of aanpassen putconfiguratie) Putafwerking met isolerend materiaal en/of dikkere omstorting			putgebruik een hoger rendement worden gehaald.
	Te hoge retourtemperatuur	Bijdrage directe warmtelevering kleiner, lagere inkomsten	Afnemers stimuleren tot lagere retourtemperaturen Voldoende aandacht bij ontwerp/uitrol warmtenet Duurdere warmtepomp installeren. Hogere temperatuur lauwe bron toelaten	Nihil	Groot	Retourtemperatuur van warmtenet is heel conservatief op 60 °C ingeschat; actuele waarde is 50 – 60 °C.
	Bij toepassing warmtepomp: Aanvoertemperatuur hoger dan beoogd	Slechtere COP warmtepomp of naverwarming noodzakelijk. Hogere operationele kosten.	Voldoende aandacht bij ontwerp/uitrol warmtenet	Klein	Groot	Aanvoertemperatuur is ook op een conservatieve bovenwaarde (90 °C) gesteld in deze verkenning.
Juridische haalbaarheid en draagvlak						
	HTO niet vergunbaar (in het kader van de Waterwet)	Vergunning wordt niet verleend.	Vroegtijdig betrekken en informeren van het bevoegd gezag	Gemiddeld	Generiek groot	Kans is gemiddeld: beperkte impact op omgevingsbelangen, HTO in zoet grondwater. Rekening houden met nabijgelegen WKO-systeem, bijvoorbeeld bij keuze bronpositionering, maar thermische invloed lijkt niet aan de orde. Wanneer vergunning niet verleend is heeft dat grote gevolgen, want zonder vergunning geen warmteopslag.
	Maatschappelijk draagvlak ontbreekt	Vergunning wordt niet (tijdig) verleend	Voldoende tijdige communicatie richting stakeholders	Gemiddeld	Gemiddeld - groot	Kans ingeschat n.a.v. gevoerde gesprekken consortiumleden en op basis van stedelijkheid omgeving. Wanneer bronnen nabij een breuk worden gerealiseerd is toelichting over risico's hiervan mogelijk gewenst.

						Gevolg voor alle verkenningen gelijk aan algemeen gevolg.
	Technisch en geohydrologisch					
	Onzekere ondergrond (<i>risico dat de ondergrond dusdanig afwijkt van de verwachting, zodat dit negatief uitpakt voor de businesscase</i>)	Debiet per bron lager, lagere opbrengst met negatief effect op businesscase. Overschrijding CAPEX en OPEX	Proefboring Aanpassen ontwerp: Aantal bronnen vergroten om vermogen te verhogen (grote invloed op investeringen) Bij geringe dikte opslagpakket, opslag in meerdere lagen, indien mogelijk (voorbeeld concept ECW)	Gemiddeld	Gemiddeld	Over de eigenschappen van het onderste opslagpakket in de Fm. van Breda (BRz4) is relatief weinig bekend, wel is op basis van boringen in de omgeving een goede inschatting gemaakt. Onzekerheden met name over de bruinkoollagen (zie risico's hieronder).
	Afsluitende eigenschappen bruinkoollagen nemen af door invloed van temperatuur	Lekkage naar bovenliggende lagen Zettingseffecten Beïnvloeding grondwaterkwaliteit	Experimenteel (veld)onderzoek	Klein-gemiddeld	Gemiddeld-groot	Onzekerheid m.b.t. effect van hoge temperatuur op de bruinkoollagen. De kans dat afsluitende eigenschappen afnemen wordt klein/gemiddeld geschat, echter zullen de gevolgen voor de haalbaarheid project wel gemiddeld-groot zijn.
	Vrijkomen van gas door invloed van temperatuur	Beïnvloeding grondwaterkwaliteit	Experimenteel (veld)onderzoek	Klein-gemiddeld	Gemiddeld-groot	Onzekerheid m.b.t. effect van hoge temperatuur op de bruinkoollagen. De kans dat er gas vrijkomt door hogere temperatuur wordt klein/gemiddeld geschat, echter zullen de gevolgen voor de haalbaarheid project wel gemiddeld-groot zijn.
	Lekkage door breuken (<i>risico op aanwezigheid breuk die vooraf niet geïdentificeerd is</i>)	Lekkage van diep grondwater naar ondiepere aquifers of oppervlak (crossflow).	Goede lokale karakterisatie van het breuksysteem (locatie en doorlaatbaarheid van de breuken) Voldoende afstand houden tot breuken; de invloedssfeer van de warmtebel moet buiten de breukzone blijven.	Gemiddeld	Gemiddeld	Er ligt een open breuk op ~800m afstand van de HTO locatie. Goede lokale karakterisatie van het breuksysteem (zodat het risico op andere niet-geïdentificeerde breuken

						klein is), en voldoende afstand houden zijn mitigerende beheersmaatregelen. Kleinere breuken zijn mogelijk niet identificeerbaar maar wel aanwezig, omdat er sprake is van een breuk systeem.
	Seismische risico's (<i>risico geïnduceerde seismiciteit door toepassing HTO</i>)	Draagvlak kwijt Volledige stillegging operaties	Goede lokale karakterisatie van het breuksysteem (locatie en doorlaatbaarheid van de breuken) Veel afstand houden tot de breuken Goede seismische risicoanalyse laten uitvoeren	Klein	Groot	Ook natuurlijke seismische activiteit kan gerelateerd worden aan de operaties, omdat het soms lastig is om geïnduceerde en natuurlijke seismische activiteit van elkaar te onderscheiden. Kleinere breuken zijn mogelijk niet identificeerbaar maar wel aanwezig, omdat er sprake is van een breuk systeem.
	Verstopping van warmtewisselaar en bronnen door scaling	Daling vermogen door lager debiet en slechtere warmteoverdracht. Hogere operationele kosten	Proefboring om geo-chemische eigenschappen van grondwater en doelpakket te analyseren en ontwerp daarop afstemmen (materialen en waterbehandeling) Gebruik waterbehandeling aanpassen Systeem reinigen gedurende operatie	Gemiddeld	Gemiddeld	De locatie-specifieke geochemische eigenschappen zijn nog niet beschouwd/bekend in deze fase van de studie. De proefboring biedt de mogelijkheid voor evaluatie van dit risico.
	Bij toepassing warmtepomp: Storing(en) hoge temperatuur warmtepomp	Hoger stroomverbruik Hogere kosten onderhoud Gewenste temperatuur wordt niet gehaald	Ontwerpen op zo laag mogelijke temperatuur -	Gemiddeld	Gemiddeld	Kans bepaald op basis van condensortemperatuur warmtepomp. Gevolg ingeschat op basis van omvang warmtepomp.
	Milieu en veiligheid					
	Onvoorziene impact op andere belangen	Vergunning wordt ingetrokken tijdens looptijd	Zorgvuldige effectbeoordeling in ontwerpfase Proefboring voor zekerheid bodemopbouw	Klein	Groot	Mogelijke effecten op WKO-bronnen van Zuyderland Ziekenhuis vragen aandacht, maar van thermische beïnvloeding is vermoedelijk geen

						sprake. De opwarming van bruinkoollagen en effecten daarvan op (grondwaterkwaliteit in) ondiepere lagen vragen specifiek aandacht.
	Verstoring bodemmilieu en integriteit in opslagpakket	Productie, mobilisatie en verspreiding verontreinigingen	Monitoringsprogramma	Gemiddeld	Gemiddeld - Groot	In opslagpakket zal microbiologie en chemie aanzienlijk beïnvloed worden door HTO, maar effect zal vooral optreden in de bel van het geïnjecteerde water. Grondwater dat uit deze bel “ontsnapt” door natuurlijke stroming zal weer meer op de natuurlijke situatie lijken door redoxprocessen, neerslag van sulfide. Uitzondering is het effect van de dosering van HCl, wat zal leiden tot een hogere chlorideconcentratie en een lagere pH. Verhoging van de chlorideconcentratie is hier niet klein ten opzichte van de natuurlijke chlorideconcentratie. Eventueel toevoegen van CO2 ipv HCL is een mogelijke oplossing, maar dit dient verder gekwantificeerd te worden in fase 2.
	Verstoring bodemmilieu en integriteit in bovenliggende pakketten	Mogelijke operationele consequenties: verlagen debiet, verlagen temperatuur	Risicomanagement Systeem Monitoringsprogramma BRL gecertificeerde partijen	klein	Gemiddeld - groot	Kans ingeschat op basis van diepte boringen en aantal putten. Een gedegen en robuust ontwerp put en monitoringsstrategie zodat de kans op lekkage klein is en snel wordt gedetecteerd tijdens of voor optreden verkleint de kans.

						Gevolg is groot ingeschat door operationele consequenties; maar is kleiner bij systemen met meer hete putten.
	Organisatorisch / commitment stakeholder					
	Onvoldoende vertrouwen en/of commitment	Stop zetten project	Regelmatig BuCa updaten en bespreken Voldoende aandacht voor zo optimaal mogelijke inpassing Duidelijke afspraken maken (zwart op wit) met betrokken partijen	Gemiddeld	Groot	Betrokken stakeholders in basis positief over HTO. Risico's bruinkoollagen en betere toepasbaarheid bij grotere schaalomvang geeft nog wel enige bedenkingen.
	Inpassing ruimtebeslag lastig door grote aantal bronnen	Vertraging bij vindengeschikte bronlocaties, mogelijk verder weg. Tijdvertraging en kostenverhogend. Geen geschikte locatie kunnen vinden. Stop zetten project.	Aantal bronnen minimaliseren door goed ruimte verhogen NVOE-normen te onderzoeken. Tijdig grondpositie nemen of in overleg gaan met grondeigenaren/gemeente	Gemiddeld	Groot	Ingeschat op basis van benodigd aantal bronnen in relatie tot stedelijkheid.

6.3 Plan van aanpak vervolg

Wanneer deze verkenning vergeleken wordt met de andere uitgevoerde verkenningen, is deze verkenning niet de meest voor de hand liggende verkenning om uit te werken in WarmingUP (WINDOW fase 2). Een belangrijk risico dat hier speelt is de aanwezigheid van bruinkoollagen. Momenteel is onbekend hoe deze lagen reageren op opwarming. Geadviseerd wordt om hier eerst meer onderzoek naar te doen, alvorens over te gaan tot de realisatie van een HTO systeem.

Daarnaast ligt het opslagrendement ten opzichte van andere verkenningen relatief laag, waardoor ook de prijs van warmte relatief hoog ligt. Het HTO-systeem zou gebaat zijn bij een grotere omvang. Hierdoor zal het opslagrendement toenemen en de relatieve investering dalen door 'economy of scale'. Dit zal leiden tot lagere tarieven voor warmte. Wanneer eerst meer onderzoek wordt gedaan naar de effecten op de aanwezige bruinkoollagen, geeft dit Ennatuurlijk de tijd om het bestaande warmtenet verder uit te breiden. Daarna kan een besluit worden genomen over het vervolg van een HTO-systeem.

Wanneer er een positief besluit ligt, zijn de onderstaande generieke, vervolgstappen mogelijk.

- Opstellen plan van aanpak: in overleg met de stakeholders van de locatie wordt een plan van aanpak opgesteld, waarin in ieder geval de volgende onderdelen aan bod komen:
 - Bespreken rolverdeling en verantwoordelijkheden
 - Bepalen operationele volgorde effectenstudie, proefboring en ontwerp
 - Planning
 - Kosten- en risicoverdeling
- Omgevingsplannen: Voor de aanleg van een HTO systeem zijn verschillende vergunningen nodig, zoals een vergunning in het kader van de Waterwet, lozingsvergunning, WABO en omgevingsvergunning. Binnen WarmingUP worden voorbereidende studies uitgevoerd, met name gericht op de vergunning Waterwet: een effectenstudie en een mer-beoordelingsnotitie worden opgesteld en afgestemd met het bevoegd gezag. De operator/opdrachtgever dient zelf de vergunning aan te vragen. Om de totale doorlooptijd zo kort mogelijk te houden, kan deze stap parallel worden uitgevoerd met de proefboring en het voorontwerp. In dat geval worden de voorbereidende studies gebaseerd op een zo goed mogelijke inschatting van de omvang van het beoogde HTO-systeem. Mogelijk moet na het definitief ontwerp een wijziging worden ingediend.
- Proefboring
Een proefboring geeft wezenlijk inzicht in de lokale bodemopbouw en haalbare debiet. De proefboring zal na afloop worden omgebouwd tot monitoringsput. De volgende stappen worden uitgevoerd:
 - Locatie bepaling
 - Ontwerp en aanbesteding proefboring
 - Realisatie proefboring
 - Uitvoeren van boorgatmetingen, grondmechanische testen en grondwater-, gas en bodemanalyse.
 - Uitvoeren van onttrekkingstesten en bepalen van het doorlaatvermogen.
Aangeraden wordt om ook onttrekkingstesten uit te voeren die de huidige NVOE-norm overschrijden om zodoende te bepalen of en op welk moment zandlevering optreedt.

- **Go/No Go:** Het uitvoerende team maakt op basis van de proefboring een inschatting van het maximaal haalbare debiet. Op basis van de resultaten van de proefboring en het maximaal haalbare debiet nemen de stakeholders van de locatie een besluit om al dan niet verder te gaan met het ontwerp.
- **Ontwerp**
Op basis van de inzichten verkregen uit de proefboring zal een ontwerp gemaakt worden van het HTO-systeem. Een aantal onderdelen die daarbij naar voren komen zijn:
 - Voorontwerp en definitief ontwerp, waarin o.a. gekeken wordt naar:
 - Keuze formatie voor opslag (indien relevant)
 - Keuze te hanteren onttrekkingsnormen
 - Putontwerp (configuratie), bronontwerp en materiaalkeuze
 - Bepalen benodigde waterbehandeling
 - Optimale systeemintegratie
 - Opstellen monitoringsplan
 - Update risico-analyse
 - Update Business case
 - Opstellen aanbestedingsdocument
- **Go/No Go:** Op basis van de resultaten uit de ontwerpfase nemen de stakeholders van de locatie een besluit om al dan niet verder te gaan naar de realisatiefase.
- **Realisatie**
Nadat de vergunning is verleend, kan verder worden gegaan met de realisatie van het HTO-systeem. Grofweg worden hierin de volgende stappen uitgevoerd:
 - Aanbesteding
 - Realisatie
 - Commissioning
 - Exploitatie
 - Periodieke evaluatie

7 Conclusies

De toepassingsmogelijkheden van HTO op deze locatie kent specifieke beperkingen. De geringe omvang van het systeem resulteert in een hoge warmteprijs. De ligging in een geologisch sterk verbroekt gebied en de aanwezigheid van bruinkoollagen resulteren in hogere risico's.

Het WINDOW programma heeft als doel om HTO verder te ontwikkelen tot een bewezen techniek. Op dit moment bestaan er nog (algemene) technische, juridische en financiële onderzoeksvragen voor toepassing van HTO. De specifieke beperkingen op deze locatie zijn wellicht overkomelijk, maar vanwege deze nadelen is deze locatie minder geschikt om binnen het WINDOW programma HTO tot een bewezen techniek te brengen.

- De formatie van Breda lijkt het meest geschikte opslagpakket. Dikte, diepte en doorlatendheid van beide watervoerende lagen waarin opslag plaats kan vinden (BRz3 en BRz4) zijn redelijk goed ingeschat op basis van lokale boordata. De bruinkoollagen lijken hydraulisch gezien goed scheidende lagen (hoge hydraulische weerstand), maar de grootste onzekerheid zit in het effect van hoge temperaturen op deze scheidende bruinkoollagen. Hierover is weinig bekend, maar experimenteel onderzoek kan hier mogelijk antwoorden geven.
- Alhoewel de Fm. van Breda zand 3 een hoger rendement geeft voor HTO zijn de verwachte thermische effecten (richting maaiveld) waarschijnlijk te groot. Fm. van Breda zand 4 is dus mogelijk de beste laag voor HTO, echter, de rendementen in deze aquifer zijn relatief laag. Het risico dat rendementen voor deze laag nog lager uitvallen dan nu is ingeschat wordt klein geacht, op basis van een proefboring kan hier meer inzicht in worden verkregen. De kans is groot dat een optimalisatie van het putontwerp kan zorgen voor een verhoging van het rendement van de HTO.
- De wijze van inpassing van de HTO die wordt voorzien is een koppeling aan het transportnet, gescheiden door een warmtewisselaar. HTO wordt in de zomer geladen via het transportnet op een temperatuur van 88°C met warmte uit de biomassacentrale. Hierdoor kan de biomassacentrale ook in de zomer maximaal draaien.
- Om warmte in de winter te leveren aan het transportnet is een hoge temperatuur warmtepomp nodig om de warmte uit de HTO op te waarden naar de gewenste temperatuur (90°C).
- Inpassing in Breda zand 3 geeft naar verwachting een betere business case (variant 1) dan inpassing in Breda zand 4 (variant 2). De kostprijs van geleverde warmte uit de HTO is ingeschat op 24,7€/GJ. Dit is hoger dan wanneer dezelfde warmte met een gasketel zou worden geleverd (10 – 12 €/GJ).
- Het systeemrendement van de HTO na 10 jaar is ingeschat op 43% en na 50 jaar op 52%.
- Warmte geleverd door de HTO i.c.m. een warmtepomp reduceert de CO₂ uitstoot met circa 65% ten opzichte van warmte geleverd door een gasketel.
- Geadviseerd wordt om een proefboring uit te voeren. De kosten hiervoor zijn ingeschat op € 140.000,-. Dit is € 40.000,- minder dan voorzien is in het onderzoeksplan van WarmingUP.
- Risico's zijn relatief ten opzichte van andere verkenningen ingeschat. De volgende punten hebben een lager risicoprofiel dan gemiddeld:

- Zowel de bron als een groot deel van de warmtevraag is reeds aanwezig. Hierdoor is de realisatie niet afhankelijk van de ontwikkeling van het warmtenet. Hierdoor is ook een goed beeld van de temperaturen in het warmtenet. Aanvullend wordt voor zowel de vraag als het aanbod een groei voorzien in de toekomst.
- De diepte van een eventueel HTO systeem ligt (t.o.v. andere verkenningen ondiep). Hierdoor vallen de boorkosten en risico's op overschrijding hiervan laag. Ook is er meer zekerheid over de opbouw en eigenschappen van de ondergrond.

De volgende punten hebben een hoger risicoprofiel dan gemiddeld:

- Onbekend is welk effect de hogere temperaturen hebben op de bruinkoollagen. Meer onderzoek is nodig om hier een beeld van te vormen.
- De locatie van de beoogde HTO bevindt zich in een sterk verbruikt gebied, waardoor rekening moet worden gehouden met de risico's van lekkage naar bovenliggende lagen/het oppervlak en geïnduceerde seismiteit. Beheersmaatregelen zijn; een uitgebreide lokale karakterisatie van het breuksysteem, een seismische risicoanalyse laten uitvoeren en afstand houden tot de aanwezig breuken zijn.
- Het risico op scaling (verstopping van de bronnen en/of de warmtewisselaar door anorganische neerslag) is afhankelijk van de locatie-specifieke geochemische condities.
- De geochemische gegevens van de beoogde aquifer(s) zijn echter nog niet beschouwd/bekend in deze fase van de verkenning/ontwikkeling van de HTO. Het risico op scaling kan daardoor nog niet nader worden beschouwd.
- In algemene zin is het belangrijk om rekening te houden met kalkneerslag aan de warme kant van het HTO systeem en eventuele neerslag van andere anorganische componenten.
- De proefboring biedt de mogelijkheid om de condities in de aquifer te analyseren, het risico op verstopping te evalueren en het design van het HTO op af te stemmen (bijvoorbeeld door waterbehandeling toe te passen om kalkneerslag te beperken/voorkomen en een monitoringsysteem te ontwerpen).
- De volgende analyses dienen te worden uitgevoerd: water compositie, gas compositie en partiele drukken en eventueel de mineralogische samenstelling van de aquifer.
- De verstoring van het bodemmilieu en integriteit in opslagpakket door eventuele toediening van HCl heeft relatief groot effect door het lage chloridegehalte in het opslagpakket.
- De diepte van en het aantal bronnen geven een relatief kleiner risico op verstoring van het bodemmilieu in de bovenliggende pakketten door zowel uitstraling van warmte vanuit de putten als door de kans op lekkage.

Referenties

Brons, H. J., Griffioen, J., Appelo, C. A. J., & Zehnder, A. J. B. (1991). (Bio) geochemical reactions in aquifer material from a thermal energy storage site. *Water research*, 25(6), 729-736.

Ghabezloo S., Sulem J. (2010) Temperature induced pore fluid pressurization in geomaterials, Italian Geotechnical Journal, 1/2010, 29-43.

Roelofsen, F., & Goorden, N. (2008). Grondwatereffecten aan de oppervlakte (gebracht): Onderzoek naar effecten van stopzetting grondwaterontrekking DSM Delft-Technisch rapport.
<http://resolver.tudelft.nl/uuid:439d4a1d-74b2-4647-9d7e-65f4f51b88f7>

Van Dalen, W. (1984). Tijdelijke warmte-opslag in ondergrondse watervoerende lagen. Een beschrijving van de fysische principes. Rijks Geologische Dienst, OS 84-21.

Fleuchaus, P., Schüppler, S., Bloemendal, M., Guglielmetti, L., Opel, O., & Blum, P. (2020). Risk analysis of High-Temperature Aquifer Thermal Energy Storage (HT-ATES). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 110153.

TNO, IF Technology, 2019. Haalbaarheidsstudie ondergrondse hoge temperatuur opslag (HTO) voor tuinbouwgebied NEXTgarden

TNO, 2016. Feasibility study of a High Temperature Aquifer Thermal Energy Storage at AVR Duiven. Utrecht.

TNO, IF Technology, 2016. Analyse effecten van Hoge Temperatuur Opslag op voorraad zoet grondwater. Utrecht

Harbough, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C., & McDonald, M. G. (2000). Modflow-2000, the U.S. Geological Survey modular groundwater model - User guide to modularization concepts and the Groundwater Flow Process. (Open-File Report 00-92).

Langevin, C. (2009). SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Variable-Density Groundwater Flow and Multi-Species Solute and Heat Transport (2009-3047).

Langevin, C. D. (2008). Modeling Axisymmetric Flow and Transport. *Ground water*, 46(4), 579-590. doi:10.1111/j.1745-6584.2008.00445.x

Sharqawy, M. H., Lienhard, J. H., & Zubair, S. M. (2012). Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. *Desalination and Water Treatment*, 16(1-3), 354-380. doi:10.5004/dwt.2010.1079

van Lopik, J. H., Hartog, N., & Zaadnoordijk, W. J. (2016). The use of salinity contrast for density difference compensation to improve the thermal recovery efficiency in high-temperature aquifer thermal energy storage systems. *Hydrogeology Journal*, 24(5), 1255-1271. doi:10.1007/s10040-016-1366-2

Zheng, C., & Wang, P. (1999). MT3DMS v5.3. A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems. Documentation and User's Guide.

Bijlagen

Bijlage I. Ontwerpnorm bronnen

NVOE norm WKO

De bronnen voor het warmteopslag systeem worden ontworpen aan de hand van de geldende NVOE normen, ontworpen voor WKO systemen. De onttrekkingsnorm of de infiltratienorm zijn, afhankelijk van de geldende situatie, de limiterende factor voor het debiet dat kan worden gehaald.

Onttrekkingsnorm

De onttrekkingsnorm is bedoeld om zandlevering te voorkomen. Hieruit volgt een maximale Darcy snelheid in de aquifer. Voor WKO-bronnen wordt een minder conservatieve onttrekkingsnorm gehanteerd dan voor winputten ten behoeve van drinkwater. Bij de NVOE-onttrekkingsnorm (2006) hangt de maximale Darcy snelheid in de formatie af van de doorlatendheid:

$$v_b = \frac{K}{12} \quad (I.1)$$

Waarin v_b de ontwerpsnelheid op de boorgatwand is (in m/uur) en K de gemiddelde doorlatendheid in m/d. Deze formule laat een veel hogere snelheid op de boorgatwand toe dan de conservatieve formule van Huisman die wordt gebruikt voor conventionele winputten ten behoeve van grondwateronttrekking. Met name in grovere zandpakketten met een doorlatendheid K van meer dan 40 m/d kan er significant meer onttrokken worden met deze infiltratienorm.

infiltratienorm

De infiltratienorm is bedoeld om de verstopping van de infiltratieput te beperken. Hieruit volgt de maximaal toelaatbare Darcy snelheid op de boorgatwand en daarmee ook het maximale debiet bij infiltratie. De maximaal toelaatbare Darcy snelheid op de boorgatwand bij infiltratie (NVOE, 2006) is niet alleen afhankelijk van de doorlatendheid (k-waarde), maar ook van de mate waarin het infiltratiewater een verstoppende werking heeft (uitgedrukt in de MFI-waarde), de hoeveelheid grondwater die geïnfiltreerd wordt (uitgedrukt in het aantal equivalente vollasturen) en hoe snel de bron mag verstoppert (uitgedrukt in de specifieke verstoppingssnelheid).

$$v_{max} = 1000 \left(\frac{k}{150} \right)^{0,6} \cdot \sqrt{\frac{v_v}{2 \cdot MFI \cdot U_{eq}}} \quad (I.2)$$

v_{max}	=	ontwerpsnelheid op de boorgatwand bij infiltratie [m/uur]
k	=	doorlatendheid van het watervoerende pakket [m/d]
v_v	=	specifieke verstoppingssnelheid [m/jaar]
MFI	=	MFI [s/l ²]
U_{eq}	=	aantal equivalente vollasturen per jaar [uur]

De afleiding van deze ontwerpnorm is beschreven in IF Technology (2001). Als geen MFI bekend is kan voor energieopslag (waarbij grondwater wordt geïnfiltreerd, en geen oppervlaktewater) uitgegaan worden van een MFI van 2. In de meeste gevallen is de MFI van grondwater dat onttrokken wordt aan goed schoon gepompte bronnen lager dan 2. Incidenteel worden hogere MFI-waarden gemeten (3 tot 4). In dat geval zou iets vaker onderhoud plaats moeten vinden.

Voorgesteld wordt om als standaard toegelaten verstoppingssnelheid een waarde van 0,1 m/jaar aan te nemen. Indien gewenst kunnen hogere of lagere verstoppingssnelheden worden aangehouden, dit vertaalt zich dan in een infiltratiebron met een kleinere respectievelijk grotere diameter (als wordt uitgegaan van hetzelfde debiet en dezelfde filterlengte).

De NVOE normen kunnen worden beschouwd als een conservatieve manier om het debiet per meter filterlengte uit te rekenen. In eerste instantie worden deze normen gehanteerd om het aantal bronnen te bepalen. Deze conservatieve methode resulteert voor een warmteopslag vaak tot een groot aantal bronnen, wat leidt tot hoge investeringskosten. Echter, er zijn verschillende aanwijzingen die erop duiden dat deze normen bij opslag met hogere temperaturen verhoogd kunnen worden.

Kans voor ruimere normen

1. Hogere hydrologische conductiviteit

Voor hoge temperatuuropslag is het van belang, dat de doorlatendheid van de aquifer geen constante waarde heeft, maar afhankelijk is van de temperatuur. Dat komt doordat de doorlatendheid niet allen wordt bepaald door de eigenschappen van het poreuze medium (de intrinsieke permeabiliteit), maar ook door de eigenschappen van de vloeistof. De eigenschappen van de vloeistof (dichtheid en viscositeit) zijn afhankelijk van de temperatuur (en in geringe mate ook van het zoutgehalte en de druk).

$$k = \frac{\rho_f \cdot g}{\mu} \cdot K_i \quad (1.3)$$

k = doorlatendheid [m/s]
 ρ_f = dichtheid van de vloeistof [kg/m³]
 g = de valversnelling [9,8 m/s²]
 μ = dynamische viscositeit van de vloeistof [Pa*s]
 K_i = de intrinsieke permeabiliteit [m²]

Bij hoge temperatuuropslagssystemen hebben het zoutgehalte en de druk geen grote invloed op de viscositeit en dichtheid. De viscositeit van water neemt echter sterk af bij hogere temperaturen. Bij het dimensioneren van bronnen voor hoge temperatuur opslag is het dus noodzakelijk om rekening te houden met de invloed van de temperatuur op de doorlatendheid. De doorlatendheid in de reeds bestaande normen dient hiertoe vervangen te worden door de intrinsieke permeabiliteit. Verder dient de dichtheid en de viscositeit van het water bij de temperatuur van het onttrokken en geïnfiltreerde te worden meegenomen. Zowel voor de onttrekkingsnorm als de infiltratienorm zal de ontwerpssnelheid bij een hogere temperatuur hoger zijn.

Als de invloed van de temperatuur op de doorlatendheid meegenomen wordt, ziet de onttrekkingsnorm er als volgt uit (IF Technology, 2012):

$$v_b = 7200 * \frac{\rho_f \cdot g}{\mu} \cdot K_i \quad (1.4)$$

v_b = ontwerpssnelheid op de boorgatwand bij onttrekking [m/uur]

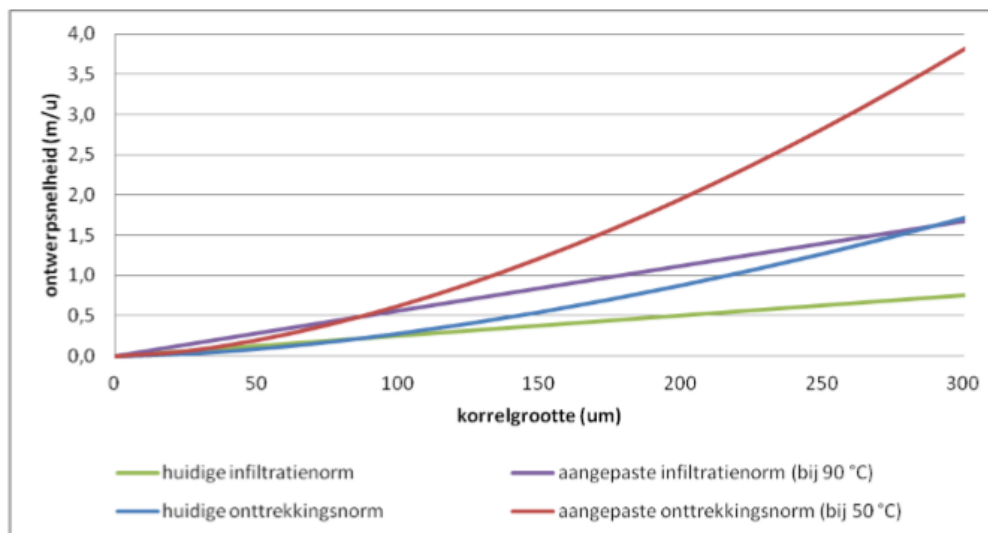
Als de invloed van de temperatuur op de doorlatendheid meegenomen wordt, ziet de infiltratienorm er als volgt uit (IF Technology, 2012):

$$v_{max} = 1000 \left(576 * \frac{\rho_f \cdot g}{\mu} \cdot K_i \right)^{0,6} \cdot \sqrt{\frac{v_v}{2 \cdot MFI \cdot U_{eq}}} \quad (1.5)$$

v_{max}	=	ontwerpsnelheid op de boorgatwand bij infiltratie [m/uur]
ρ_f	=	dichtheid van de vloeistof [kg/m ³]
g	=	de valversnelling [9,8 m/s ²]
μ	=	dynamische viscositeit van de vloeistof [Pa*s]
K_i	=	de intrinsieke permeabiliteit [m ²]
v_v	=	specifieke verstoppingssnelheid [m/jaar]
MFI	=	MFI [s/l ²]
U_{eq}	=	aantal equivalente vollasturen per jaar [uur]

In fijnzandige aquifers is de norm voor infiltratie minder kritisch dan de norm voor onttrekking. Verder kan de infiltratienorm positief worden beïnvloed door het te infiltreren water bovengronds te filteren voorafgaande aan de infiltratie (verlagen van de MFI waarde).

In Figuur I-1 is de huidige onttrekkings- en infiltratienorm vergeleken met de aangepaste normen. De weergegeven norm is gebaseerd op de warme bron van de case in Gorinchem. Hierin bedraagt de onttrekkingstemperatuur uit de warme bron 50°C en de infiltratietemperatuur 90°C. Uit de vergelijking blijkt dat door het integreren van de temperatuur in de ontwerpnormen in deze case de ontwerpsnelheid ruim twee keer zo groot mag zijn in vergelijking met de huidige ontwerpnormen.



Figuur I-1: Vergelijking tussen de ontwerpnormen voor WKO-systemen, en de ontwerpnormen voor HTO-systemen (met afhankelijkheid van viscositeit) (IF Technology, 2012)

2. Praktijkervaringen met betrekking tot de onttrekkings- en infiltratie norm

Van enkele bronnen is bekend dat er zandlevering optreedt. De oorzaak van deze zandlevering hoeft niet direct te liggen bij het overschrijden van de ontwerpnormen. Mogelijke oorzaken kunnen ook zijn een verkeerde keuze van filtergrind en -spleten, grote variatie in korrelgrootte, filters in kalksteen en scheve debietverdeling over het filtertraject of een combinatie van deze oorzaken. Een directe relatie tussen het overschrijden van de norm en zandlevering is (nog) niet gevonden (IF Technology en Universiteit Utrecht, 2012).

Volgens onderzoek naar de ontwerpnormen voor putten bij ondiepe geothermie projecten (IF Technology, 2019), mede gebaseerd op ervaringen in de olie- en gasindustrie, kunnen op grotere dieptes hogere snelheden worden toegepast zonder dat daarbij (onacceptabele) zandlevering optreedt. De spanningen in de ongeconsolideerde lagen in de ondiepe ondergrond worden hoofdzakelijk bepaald door het gewicht van de bovenliggende lagen en de zwaartekracht. Daardoor nemen de spanningen in de ondergrond steeds verder toe met toenemende diepte. Hoe groter de krachten op de korrels, hoe moeilijker de korrels te mobiliseren zijn. Hieruit volgt dat op grotere dieptes hogere debieten mogelijk zijn dan in ondiepere aquifers (als wordt aangenomen dat de eigenschappen van de gebruikte bodemlaag gelijk blijven).

Met dit aspect wordt in de bestaande onttrekkingsnorm voor open bodemenergiesystemen geen rekening gehouden. De onttrekkingsnorm voor open bodemenergiesystemen is op grote schaal toegepast voor het ontwerp van deze systemen (>> 1.000 systemen) en het aantal projecten met zandlevering is zeer gering. De bronsystemen voor open bodemenergiesystemen staan bekend als robuust en onderhoudsarm. Dit geeft enerzijds aan dat de ontwerpnormen veilig zijn en anderzijds dat er wellicht ruimte is om hogere snelheden toe te staan.

Praktijktesten ECW (Wieringermeer)

Het overgrote deel van de open bodemenergiesystemen maakt gebruik van zandlagen in het dieptebereik van 20 tot 250 meter. Bij ECW in de Wieringermeer polder is een hoge temperatuur opslag project beoogd in een watervoerende zandlaag tussen 360 en 383 m diepte. Aangezien bij ECW gebruik wordt gemaakt van een aquifer op aanzienlijk grotere diepte dan gebruikelijk, is de verwachting dat aanmerkelijk hogere debieten mogelijk zijn. Om dit nader te onderzoeken zijn testen uitgevoerd in het bronfilter van de proefboring die ten behoeve van het project is gerealiseerd. Bij deze testen is het onttrekkingsdebiet in een aantal stappen verhoogd tot ruim boven de huidige onttrekkingsnorm. Uit de praktijktesten blijkt, dat de zandlevering minimaal is bij snelheden op de boorgatwand tot 2,44 maal de huidige onttrekkingsnorm. Hogere snelheden konden vanwege praktische beperkingen niet worden getest (IF Technology, 2020). Deze ervaringen suggereren dat er, met name op grotere dieptes, hogere debieten kunnen worden gerealiseerd dan wat de huidige ontwerpnormen aangeven. Het is echter nog te vroeg om bij andere projecten op grotere dieptes “zomaar” hogere snelheden toe te passen. Bij het HTO project van ECW is de keuze voor een hoger debiet gebaseerd op een combinatie tussen theorie en (kortdurende) praktijktesten. Die resultaten zijn positief, maar geven nog geen zekerheid. Een punt van aandacht is bijvoorbeeld nog het functioneren van de putten op de lange termijn.

Bij eventuele andere projecten op grotere dieptes wordt aanbevolen om vergelijkbare testen uit te voeren om de haalbaarheid van sterk verhoogde debieten voor de betreffende formatie op die locatie te onderzoeken. Als de haalbaarheid van verhoogde debieten op meerdere locaties middels praktijktesten is aangetoond en de praktijkervaring met de betreffende putten tijdens bedrijfsvoering op de langere termijn ook positief is, dan kan dit aanleiding zijn voor een aanpassing van de ontwerpnormen. Mogelijk ontstaat daarmee dan ook ruimte om in ondiepere aquifers hogere debieten toe te staan.

Door de relatief hoge stroomsnelheden in de directe omgeving van de onttrekkingsput worden deeltjes in de aquifer gemobiliseerd en meegevoerd met het grondwater dat in de richting van de put stroomt. Bij hoge stroomsnelheden (hoger dan waar tot op heden ervaring mee is bij open bodemenergiesystemen), ontstaan hogere sleepkrachten en is de verwachting dat er meer deeltjes gemobiliseerd gaan worden. Bovendien wordt het gebied waarbinnen een bepaalde stroomsnelheid optreedt groter. Dit leidt naar verwachting ook tot een toename van de concentratie aan deeltjes in het toestromende water. Bij hogere concentraties aan deeltjes en hogere stroomsnelheden neemt de kans op de brugvorming toe (deeltjes lopen vast als ze tegelijkertijd door dezelfde poriehal willen: de deeltjes vormen bruggetjes die een verstoppend effecten hebben). Dit fenomeen is bekend uit onderzoek dat is uitgevoerd in de drinkwatersector (zie b.v. Timmer et al., 2000 en 2003; De Zwart, 2007 en Van Beek et al., 2009).

In de metingen van de tot nu toe uitgevoerde putproeven zijn geen aanwijzingen gevonden voor het optreden van putverstopping: de verlaging in de proefboring neemt niet of nauwelijks toe ten opzichte van de verlaging die wordt berekend aan de hand van de eigenschappen van het watervoerende pakket die zijn afgeleid uit stopproeven. De testen waren echter van relatief korte duur (6 uur). Hiermee is dus nog niet duidelijk in hoeverre er op de langere termijn wellicht toch merkbare effecten van putverstopping door brugvorming verwacht mogen worden.

In het vervolg van WINDOW binnen WarmingUP zal moeten worden onderzocht in hoeverre verhoogde normen van toepassing kunnen zijn voor een optimaal functionerend warmteopslag systeem.

Bijlage II. Brontechniek

De bronnen worden gemaakt met de zogenaamde zuigboortechniek. Dit type boring is op duizenden plaatsen de afgelopen twintig jaar uitgevoerd; van zeer drukke binnensteden, natuurgebieden tot bedrijventerreinen. Geluidsoverlast is beperkt zodat in de directe omgeving van eventuele bebouwing kan worden geboord (mogelijk alleen overdag boren).

De benodigde ruimte voor het boren bedraagt 300 tot 400 m² (zie Figuur II-1 voor opstellingsruimte). Het gehele boorproces inclusief het schoonmaken van de bron kost circa 1 maand.



Figuur II-1: Boorstelling zuigboren

De bronnen worden geboord met een diameter van 800 mm. De warme bronnen krijgen een GVK stijgbuis en RVS wikkeldraad filter; de temperatuur in de lauwe bronnen blijft onder de 60 °C vandaar dat stijgbuis en filter in PVC kunnen worden uitgevoerd. Hierbij moeten er beveiligingen worden ingebouwd om te voorkomen dat er ooit water van meer dan 60°C in de koude bronnen komt. De lauwe bronnen worden aan maaiveld afgewerkt met een half bovengrondse putbehuizing (2x2 m, zie Figuur II-2). De warme bronnen dienen volledig bovengronds te worden afgewerkt. Dit is een kleine constructie die past binnen een ruimte van 2x1,5x1,5 m. Deze bovengrondse afwerking is nodig omdat al het leidingwerk heet is en de ruimte in een half bovengrondse put te klein is om er veilig te kunnen werken. Daarnaast dient er naast de bovengrondse put voldoende ruimte beschikbaar te zijn voor vrachtwagens en hijskranen. Positionering naast een parkeerplaats o.i.d. heeft dan ook de voorkeur.



Figuur II-2 Afwerking bron met half-bovengrondse putbehuizing

Waterbehandeling

Specifiek voor hoge temperatuur is de neerslag van carbonaten. Dit effect is bekend vanuit de dagelijkse praktijk: ketelsteen in de fluitketel en kalkaanslag bij het verwarmingselement van de wasmachine. Het risico op carbonaatneerslag 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. Aangezien de aanwezigheid van kalkverzadigd grondwater in de te gebruiken bodemlaag aannemelijk is en sprake is van opslag met 90 °C, is carbonaatneerslag waarschijnlijk als geen tegenmaatregelen worden genomen. Om carbonaatneerslag te voorkomen kan waterbehandeling worden toegepast.

De sterke en zwakke punten en de kansen en bedreigingen van de verschillende technieken zijn opgesomd in Tabel II-0-1.

Tabel II-0-1 Afweging waterbehandelingstechnieken

	ionenwisseling	(zout)zuurdosering	inhibitors
sterke punten	invloed op de grondwaterkwaliteit relatief klein	werkt goed goed beheersbaar invloed op de grondwaterkwaliteit relatief klein	relatief goedkope oplossing
zwakke punten	waterbehandeling vergt veel aandacht aanvoer veel zout nodig in de praktijk putverstopping opgetreden relatief hoge kosten	veiligheidsmaatregelen i.v.m. zuur zoutzuur nodig, veel transport bewegingen.	nog geen praktijkervaring
alternatief		CO ₂ -dosering	
bedreigingen	risico op kleizwelling bij overbehandeling niet verkrijgen toestemming zoutlozing	kwetsbare sturing/beveiliging Publieke opinie	risico neerslag na adsorptie aan de bodem effect grondwaterkwaliteit onduidelijk Publieke opinie

Omdat ionenwisseling te duur is en de toepassing van inhibitoren onzeker is door gebrek aan praktijk ervaring, is zuurdosering de beste optie voor de waterbehandeling van de HTO van Heerhugowaard.

Er zijn verschillende opties voor het type zuur dat kan worden gebruikt. Vooralsnog wordt gekozen voor de toepassing van zoutzuurdosering, met name omdat deze techniek zich in de praktijk heeft bewezen (HTO Zwammerdam) en de grondwaterkwaliteitseffecten relatief klein zijn. Deze waterbehandelingstechniek is beproefd en goed beheersbaar. Nadeel zijn de grote hoeveelheden zoutzuur die nodig zijn en de extra zorg voor opslag en gebruik. Op basis van de HTO Zwammerdam en het ontwerp van de HTO bij GEOMEDEV (Brielle) wordt verwacht dat een zoutzuurdosering van 0,3 l/m³ (30 % HCl) nodig is (exacte dosering wordt bepaald aan de hand van de grondwaterkwaliteit gemeten tijdens de proefboring). Zoutzuurdosering hoeft alleen plaats te vinden tijdens het laden van de ondergrondse opslag. Naast zoutzuur kan er ook worden gekozen voor 99,9% pure CO₂, dit wordt toegepast op de HTO te Middenmeer. Tests moeten uitwijzen of deze vorm van dosering zoutzuur kan vervangen.

Transportleiding en technische ruimte

De bronnen worden via ondergrondse transportleidingen (min 0,6 m-mv) met de warmtewisselaar in de technische ruimte verbonden. De transportleiding is van geïsoleerd glasvezel versterkt kunststof (GVK). In de technische ruimte staan de warmtewisselaars, regelkasten, filterinstallatie en waterbehandeling van het grondwatersysteem. De leidingen zijn van GVK. Dit neemt meer inbouwruimte in beslag dan RVS leidingen. De warmtewisselaars zijn van titanium. Hiermee wordt voorkomen dat de warmtewisselaars binnen korte tijd door corrosie defect raken.

De technische ruimte wordt opgenomen in een warmte-overdrachtsstation (WOS). Vanwege het gebruik van chemicaliën bij de waterbehandeling en de hoge temperaturen, zal de technische ruimte aan strikte veiligheidseisen moeten voldoen.

Bijlage III. Beschrijving numerieke model SEAWATv4

De numerieke simulaties worden uitgevoerd met het grondwatermodel SEAWATv4 Langevin (2009). Dit model is een koppeling tussen het grondwatermodel MODFLOW en het transport model MT3Ds (Harbough et al., 2000; Zheng & Wang, 1999). Een nog gedetailleerde beschrijving van de model opzet is beschreven in de rapportage van werkpakket C2- geohydrologisch ontwerp. SEAWATv4 heeft de capaciteit om dichtheidsstroming te simuleren bij verschillende temperaturen. Dit treedt op doordat viscositeit en dichtheid afhankelijk zijn van temperatuur, Figuur III-1. Een relatief lage dichtheid van het warme geïnjecteerd water leidt tot een dichtheid verschil met het omringende grondwater, het warmere water heeft dus de neiging op te drijven (van Lopik et al., 2016). Doordat de viscositeit ook sterk afneemt met hogere temperatuur kan water makkelijker door de ondergrond stromen waardoor het opdrijf effect versterkt wordt. Dit wordt in SEAWATv4 berekend d.m.v. de volgende vergelijkingen.

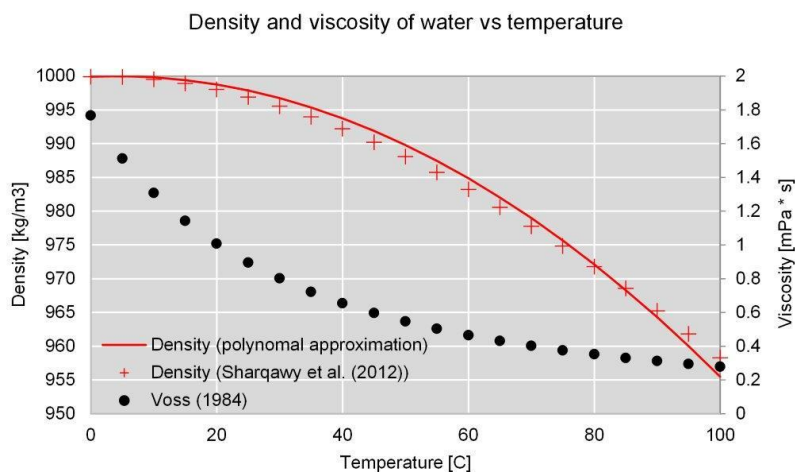
Viscositeit is berekend volgens is (Langevin, 2009):

$$\mu(C,T) = 2.494 \cdot 10^{-5} \cdot (10^{\frac{248.37}{T+133.15}}) + 1.92 \cdot 10^{-6} (C - C_0)$$

De dichtheidsverandering van water bij oplopende temperaturen is berekend volgens:

$$\rho(T) = \rho_f - \frac{(T - 4)^2}{207}$$

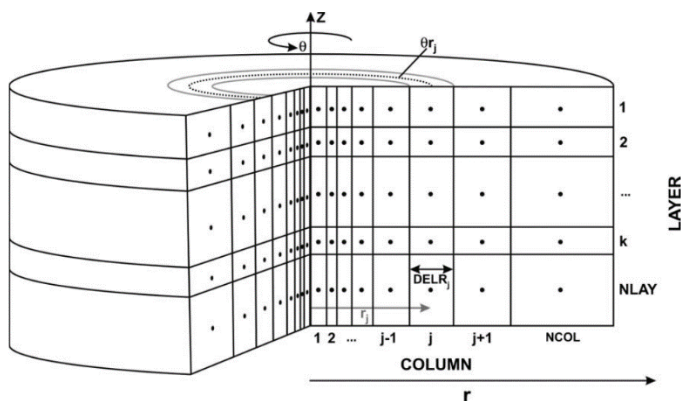
Dit is een benadering van de vergelijking opgesteld door Sharqawy et al. (2012) waarbij ook verschil in zoutconcentratie wordt meegenomen. Bij deze simulaties wordt er vanuit gegaan dat er geen water wordt gemengd van verschillende kwaliteiten (e.g. uit verschillende grondwaterpakketten). Daardoor is alleen een verschil in temperatuur van invloed op de berekende dichtheid.



Figuur III-1 Afhankelijkheid van viscositeit en dichtheid van water bij oplopende temperatuur.

Axisymmetrisch model

De simulaties worden op twee manieren uitgevoerd, axisymmetrisch en in 3D. Axisymmetrische simulaties hebben als voordeel dat rekentijden relatief klein zijn vergeleken met een simulatie in 3D. Met axisymmetrische simulaties is het dus mogelijk om een hoge verticale resolutie te gebruiken zonder dat de rekentijden te omvangrijk worden. Echter, een nadeel bij axisymmetrische simulaties is dat slechts 1 put gesimuleerd kan worden en het niet mogelijk is om ruimtelijke verschillen te implementeren zoals grondwaterstroming en horizontale heterogeniteit.



Figuur III-2 Schematische weergave van een axisymmetrisch grid. De gemodelleerde put bevindt zich in het midden. De cellen in de radiale richting (r) worden groter naar buiten toe. Van (Langevin, 2008)

Discretisatie en randvoorwaarden

Voor zowel het axisymmetrisch model als het 3D model is een vaste discretisatie gebruikt voor de simulaties, Tabel III-1. Het grid bestaat rondom de putten uit cellen met dezelfde grootte (Min horizontaal), vanaf een bepaalde afstand (min afstand linear) vanaf de putten worden de cellen logaritmisches groter tot de grootste celgrootte (max horizontaal) is bereikt. Het totale grid moet een minimaal afstand van 1000m vanaf de dichtstbijzijnde put hebben. Dit resulteert in een gemiddelde model grootte van 2,5x2,5 km.

Tabel III-1 Discretisatie Axisymmetrische- en 3D-modellen

	Axisymmetrisch	3D
Min horizontaal	1 m (r)	2.5 m (x,y)
Max horizontaal	25 m (r)	25 m (x,y)
Min afstand linear	150 m (r)	150 m (x,y)
Verticaal	0.5 m (z)	0.5 m (z)
Buitenste rand	1000 m (r)	1000 m (x,y)
Minimaal aantal cellen (linear -> logaritmisches)	50	50

Geohydrologische & thermische model parameters

De thermische eigenschappen van de aquifers en de aquitards in de ondergrond zullen gekozen en berekend worden gebaseerd op het materiaal en de porositeit van de specifieke laag, tabel III-2.

We variëren hier alleen tussen zandig (aquifer) en kleig materiaal (aquitard). De volgende aannames worden gedaan:

- Homogene aquifers en aquitards
- Constante thermische conductiviteit (niet beïnvloed door druk of temperatuur)
- Anisotropie tussen horizontale en verticale conductiviteit is constant (zand=2, klei=3)

Tabel III-2: geohydrologische parameters SEAWATv4 model

Parameter	symbol	Value	Bron
Laterale dispersie	-	0.5 m	Bloemendal & Hartog (2018)
Transversale dispersie	-	0.05 m	Bloemendal & Hartog (2018)
Dichtheid water (0°C)	ρ_{H2O}	1000 kg/m ³	
Dichtheid vast materiaal	ρ_{solids}	2640 kg/m ³	
Specifieke warmte capaciteit zand	C_{zand}	710 J/kg °C	www.engineeringtoolbox.com
Specifieke warmte capaciteit klei	C_{klei}	1381 J/kg °C	www.engineeringtoolbox.com
Specifieke warmte capaciteit water	C_{H2O}	4183 J/kg °C	www.engineeringtoolbox.com
Thermische geleidbaarheid zand	λ_{zand}	1.9 W/m °C	Dalla Santa et al. (2020)
Thermische geleidbaarheid klei	λ_{klei}	1.1 W/m °C	Dalla Santa et al. (2020)
Thermische geleidbaarheid water	λ_{H2O}	0.58 W/m °C	Dalla Santa et al. (2020)
Bulk thermal diffusivity*	D_{m_temp}	0.05 – 0.08 m ² /d	# relatief lage waarde
Porositeit zand (-z=0)	ϕ_{zand}	0.41	Hantschel & Kauerauf (2009)
Porositeit klei (-z=0)	ϕ_{klei}	0.6	Hantschel & Kauerauf (2009) &
Horizontale hydraulische conductiviteit*	K_h	. m/d	
Verticale hydraulische conductiviteit*	K_v	. m/d	

* Dit is specifiek voor iedere laag in het model

Bijlage IV. Grond mechanische processen

Algemeen

De grondmechanische risico's van een HTO-systeem zijn vergelijkbaar met die van de gangbare open bodemenergiesystemen (waarbij ook geen netto wateronttrekking plaatsvindt en de putten een seizoencyclus van injectie en onttrekking hebben. Eventuele verschillen worden veroorzaakt door de effecten van de hogere temperatuur.

In vergelijking met (drinkwater)onttrekkingen zijn de effecten kleiner doordat de onttrekking per put een beperkte duur heeft en wordt afgewisseld met injectie.

Grond mechanische processen: invloed grondwaterstijg hoogteverandering

De verlaging van de grondwaterstijg hoogte bij onttrekking zorgt voor verlaging van de waterdruk en toename van de korrelspanning, waardoor de korrels dichter naar elkaar toegedrukt worden en water uitgedreven wordt wat gepaard gaat met zetting. Deze zetting is grotendeels permanent. Dat betekent dat de opheffing veel kleiner is dan de zetting als vervolgens de stijg hoogte toeneemt door stoppen van de onttrekking en ook als deze vervolgens groter wordt dan de oorspronkelijke waarde door injectie.

In zandlagen treedt weinig relatief zetting op in vergelijking met kleilagen.

In ondiepe veenlagen kan nog meer zetting optreden, maar speelt ook een tweede proces waardoor de bodem daalt, namelijk de afbraak van veen. Dat laatste zorgt bij veen aan het oppervlak vaak voor meer bodemdaling dan de zetting. Basisveen en in sterkere mate bruinkoollagen zijn minder zettingsgevoelig door stijg hoogteverlaging omdat deze lagen al sterk gecompacteerd zijn. Verhoging van de stijg hoogte leidt tot een uitzetting die veel kleiner is dan de zetting bij verlaging en die bovendien reversibel is.

De duur van de stijg hoogteverlaging speelt ook een rol. Het water kan slechts langzaam uit dikke kleilagen geperst worden, waardoor het zettingsproces geremd wordt. Dit wordt vaak uitgedrukt in de hydrodynamische periode: de tijd die het duurt voordat een evenwichtssituatie bereikt is waarbij praktisch alle potentiële zetting bij de gegeven stijg hoogteverlaging opgetreden is. Voor een kleilaag van bijvoorbeeld 10 meter dikte kan de hydrodynamische periode in de orde van jaren liggen, wat veel langer is dan het seizoen van een HTO en daardoor de zetting veel kleiner is dan de potentiële zetting bij de optredende verlaging in het watervoerend pakket waaruit de HTO onttrekt.

HTO-systemen combineren onttrekking en injectie waardoor er netto geen water onttrokken wordt aan de ondergrond. Hierdoor treden stijg hoogteverlagingen op in een beperkt deel van de ondergrond (zowel lateraal als verticaal). Bij de volumes die genoemd worden en onttrekking onder een kleilaag met grote weerstand zijn de verlagingen rond een put die onttrekt wel groot in de gepompte laag (meer dan 10 meter), maar deze nemen snel af naar buiten en in verticale richting (maximaal in de orde van decimeters in de boven- en onderliggende watervoerende pakketten).

De kleilaag direct boven het gepompte pakket zal daarbij de meeste zetting opleveren. In ondiepere lagen is de verlaging veel minder en diepere lagen hebben meer bovenbelasting waardoor de stijg hoogtedaling minder relatieve korrelspanningstoename oplevert. Bovendien neemt de stijfheid van kleilagen in het algemeen toe met de diepte door geologische bovenbelasting en opgetreden lagere stijg hoogten. Naast de duur van de onttrekkingsfase, wordt de zetting beperkt door de driedimensionale samenhang in de bodem. De zettingen vlakbij de put

bij deze diepere kleilaag werken naar boven toe door over een groter gebied (waarbij de verticale verplaatsing minder wordt).

In generieke zin kan gesteld worden dat zettingen kleiner worden in de diepte. Enerzijds door de grotere bovenbelasting (waardoor de relatieve toename van de korrelspanning kleiner is) en anderzijds doordat de lagen stijver zijn doordat er meer compactie heeft plaatsgevonden. De zetting in een kleilaag op 200 m diepte is in het algemeen dus minder dan eenzelfde soort laag op 20m diepte. De eigenschappen zullen ook verschillen per soort klei, maar hier is geen systematische informatie beschikbaar over en er kan geen verschil aangegeven worden tussen kleien per formatie.

Grond mechanische processen: invloed temperatuur

Over de invloed van injectie en productie van hoge temperatuur water ($> 25^{\circ}\text{C}$) op de grondmechanica in ongeconsolideerd materiaal is relatief weinig bekend. De directe invloed van de temperatuur op de grondmechanica is naar verwachting beperkt. Het belangrijkste effect is dat door de lagere viscositeit van water, zettingen sneller optreden en een grotere fractie van de potentiële eindzetting bereikt wordt in een onttrekkingsseizoen. Dit zal vooral plaatsvinden in het eerste onttrekkingsseizoen omdat de zetting grotendeels irreversibel is. Ook de opheffing in het injectieseizoen kan sneller optreden, deze is naar verwachting ongeveer even groot als het reversibele deel van de zetting. De potentiële eindzetting zelf hangt niet direct van de temperatuur af.

Een verhoging van de temperatuur veroorzaakt ook thermische uitzetting van het ondergrondmateriaal en het water. De hier aan gerelateerde bodembeweging van een ondergrond die wordt opgewarmd en afgekoeld, bestaat uit twee componenten (van Dalfsen, 1984):

1. Een gedurige bodembeweging, door toenemende opwarming van het sediment/gesteente.
2. Een op en neer gaande bodembeweging, als gevolg van de opslag en winning van warmte.

De thermische uitzetting treedt op in de opslagaquifer voor HTO, en de aangrenzende lagen die opwarmen op door geleiding. Vooral voor klei zijn de thermische uitzettingscoëfficiënten afhankelijk van de samenstelling (soort klei en hoeveelheid bijmenging van bijvoorbeeld silt of zand).

De volumetrische uitzettingscoëfficiënt van kleimineralen heeft een ordegrootte van $0.0034 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (Ghabezloo, 2010). De volumetrische uitzettingscoëfficiënt van kwarts (hoofdbestandsdeel van zand) kan variëren van ongeveer 0.0024 tot $0.0033 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (Ghabezloo, 2010).

Indirecte effecten van de temperatuur kunnen zijn extra afbraak van ondiep veen en verandering van mechanische eigenschappen door geochemische veranderingen. Oxidatie van organische stof (met name veen) boven de grondwaterspiegel en microbiologische afbraak er onder worden gestimuleerd door hogere temperaturen (Brons e.a., 1991). Vanaf een graad of zestig wordt de microbiologische afbraak echter weer geremd zodat dit vooral in de perifere zone van de warmteopslag zal spelen. Geochemische veranderingen kunnen de structuur van klei veranderen wat de grondmechanische eigenschappen beïnvloedt. Ook kunnen hoge temperaturen een effect hebben op glauconiet (korrelige kleimineralen ontstaan in een ondiep marien afzettingssmilieu), waar echter nog weinig over bekend is. In de Formatie van Oosterhout en de Formatie van Breda komt vaak glauconiet voor. Deze glauconiethoudende zanden bevatten 10-40% glauconiet. In ondiepe lagen is glauconiet vaak instabiel en heeft het een hoge verbrijzelbaarheid, wat kan zorgen

voor zetting in een pakket. Meer onderzoek is nodig naar de effecten van hoge temperaturen op glauconiet.

Bij hogere temperatuur verlaagt de oplosbaarheid van gassen. Ontstaan van gasbelletjes beïnvloedt de doorlatendheid en ontgassing van CO₂ leidt tot kalkneerslag dat bovendien tot putverstopping kan leiden.

Monitoring van vervorming van de put kan hierbij misschien meer inzicht verschaffen, bijvoorbeeld met rekstrookjes op de buis. Daarnaast kunnen grondwaterstijghoogten gemeten worden met automatische drukopnemers; voor kleilagen zonder peilbuis, maar direct in de klei geplaatst. Misschien dat het meten van geochemische parameters via minifilters in de omstorting extra informatie kan verschaffen naast analyseren van de chemische verandering in het onttrokken en geïnjecteerde water. Het is goed ook de maaiveldhoogte regelmatig te meten om de totale bodembeweging te kunnen bepalen.

Samenvatting

Voor onttrekkingen is veel kennis beschikbaar over voorspellingen van zettingen en over daadwerkelijk opgetreden zettingen. Voor WKO's zijn er ook richtlijnen voor de geotechnische risico's. Dit kan ook gebruikt worden voor HTO. De risico's zullen minder zijn naar gelang de HTO dieper aangelegd. De consequenties van de hogere temperatuur zijn naar verwachting beperkt, maar hier is weinig informatie over beschikbaar zodat het is aan te bevelen om gerichte monitoring uit te voeren.

Aanbeveling

Op basis van deze kwalitatieve beschouwing kan geen belangrijk onderscheid gemaakt worden tussen de geselecteerde locaties wat betreft grondmechanische risico's. Na selectie van locaties voor verdere evaluatie dienen locatie specifieke berekeningen een inschatting geven van de verwachte effecten aan het maaiveld. Daarna kan in combinatie met een omgevingsscan het effect worden ingeschat waarbij mogelijk een ondiepere laag afvalt als optie voor HTO. Hiertoe dienen de mogelijke effecten van hogere temperaturen beter in beeld te worden gebracht, eventueel ondersteunt door experimentele observaties en gecombineerde modellen die grondmechanische, hydraulische, thermische en geochemische processen simuleren.

Bijlage V. Generieke risico-inventarisatie voor HTO

Introductie

De belangrijkste risico's gerelateerd aan HTO projecten zijn geïnventariseerd op basis van projecten in het verleden (bijv. TNO, 2016; TNO & IF Technology, 2016, 2019) en op basis van studies zoals het WINDOW project. De indeling en beschrijving van de risico's zijn grotendeels gebaseerd op TNO & IF Technology (2019). In het algemeen zijn de geïdentificeerde risico's generiek voor elk HTO project, maar de specifieke risico's kunnen wel meer of minder relevant zijn voor de individuele projecten. Er is daarom gekozen voor een algemeen overzicht van de geïdentificeerde risico's, dat gelijk is in alle verkenningen, gevolgd door een locatie-specifiek overzicht waarin voor elk van de individuele verkenningen de relevantie is aangegeven. Voor die risico's die relevant worden geacht wordt per locatie een toelichting gegeven.

Risico's zijn onder te verdelen in:

- Risico's voor de business case (commercieel/economisch)
- Juridische haalbaarheid en draagvlak
- Technische en geohydrologische risico's
- Milieu- en veiligheidsrisico's
- Organisatorische risico's (inclusief commitment stakeholder)

Deze worden per categorie hieronder toegelicht.

Commerciële en economische risico's

De belangrijkste commerciële en economische projectrisico's zijn:

- A) Volume en prijsrisico's
- B) Hoge onvoorziene kosten
- C) Rendement en kwaliteit van de geproduceerde warmte
- D) Inpassing in het warmtenet

Ad A) Een van de belangrijkste risico zijn volume- en prijsrisico's van de warmtelevering. In de praktijk is het lastig om bij nieuwbouw en geplande ontwikkelingen de warmtevraag nauwkeurig in te schatten. De vraag is sterk afhankelijk van gedrag en projecten kunnen om allerlei renden vertraging oplopen. Bij bestaande warmtenetten bestaat het risico dat een deel van de warmtevraag wegvalt, bijvoorbeeld door faillissement van zakelijke gebruikers die op het warmtenet zijn aangesloten. Daarnaast zal ook de klimaatverandering een impact hebben op de toekomstige warmtevraag.

Kosten voor exploitatie kunnen in de toekomst sterk fluctueren door allerlei invloeden. Wanneer de kosten voor elektriciteit toenemen, heeft dit een direct gevolg op het financiële resultaat, omdat dit een belangrijke kostenpost is. Ook kan veranderende regelgeving en subsidie-beleid van invloed zijn op de kosten en baten. Dit kan zowel effect hebben op de eigen kosten en baten, als ook op concurrerende energiebronnen.

Volume en prijsrisico's dienen zoveel mogelijk afgedekt te worden, bijvoorbeeld door regelmatig en voldoende aandacht te hebben voor een optimaal en robuust ontwerp op basis van de ingeschatte warmtevraag en aanbod. Prijsrisico's kunnen worden afgedekt door warmte-afnameovereenkomsten.

Ad B) De techniek HTO staat sinds de jaren 80 van de vorige eeuw in de belangstelling. Tot op heden zijn slechts een paar HTO-systemen gerealiseerd in Nederland. De kostenschattingen in het

WINDOW project zijn gemaakt op basis van kennis uit gerealiseerde projecten en recent uitgevoerde ontwerpen. Echter, de kostenschatting voor de investeringen en exploitatie kunnen in realiteit afwijken (zeker +/- 25%). Na het doen van de proefboring en de terrein-inventarisatie kunnen de investeringskosten veel nauwkeuriger (+/- 10 %) worden ingeschat. Het risico is dat de kosten te hoog uitvallen waardoor deze niet volgens verwachting kunnen worden terugverdiend.

Ad C) De marginale kosten van de HTO wordt voor een groot deel bepaald door het rendement van HTO-systeem en de inpasbaarheid in het warmtenet (risicogroep D). Het risico is dat het rendement van het HTO-systeem lager is (dus het warmteverlies groter) dan verwacht. Het opslagrendement is de verhouding tussen de opgeslagen warmte en de nuttig geleverde warmte. Warm water heeft een lagere dichtheid dan koud water. Hierdoor ontstaan dichtheidsstromingen, waarbij warm water naar boven stroomt en koud water in het onderste deel van het opslagpakket wordt aangetrokken. Een deel van de opgeslagen warmte gaat verloren. Dit uit zich als niet teruggewonnen warmte en temperatuurdaling van teruggewonnen warmte. Het rendement van de HTO kan tegenvallen door tegenvallers in de ondergrond, door een hogere retourtemperatuur in het warmtenet, door een hogere benodigde aanvoertemperatuur, door suboptimale inzet of extreme seizoensvariëaties tussen verschillende jaren. De verhouding tussen geïnjecteerde warmte en teruggewonnen warmte moet goed worden afgestemd (geen jaarlijkse over-injectie of onderproductie van warmte). De afkaptemperatuur dient ook zo laag mogelijk te zijn, zodat ook productie van lagere kwaliteit warmte aan het einde van het stookseizoen nog nuttig kan worden ingezet. Dit kan door het combineren van de HTO met een (industriële) warmtepomp of (hulp)warmtebron.

Ad D) De retourtemperatuur en benodigde productietemperatuur ter plaatse van de HTO zijn mede bepalend voor de investeringen in de warmtepomp, als deze in het systeemconcept zit. In het voorontwerp kunnen deze conservatief ingeschat worden; d.w.z. hoge retour- en productietemperatuur. Dan zijn de gevolgen bij optreden van dit risico beperkt. Als de retourtemperatuur en productietemperatuur optimistisch ingeschat worden, dan zijn de gevolgen van het optreden van hogere retour- en productietemperaturen groot. Een hogere productietemperatuur kan met een piekvoorziening opgevangen worden of door het bijmengen met heet water uit het warmtenet. Een hogere retourtemperatuur kan in het detail-ontwerp gemitigeerd worden door een duurdere warmtepomp of door een hogere temperatuur in de lauwe bron toe te laten met meer verliezen in de ondergrond tot gevolg.

Juridische haalbaarheid en draagvlak

Voor HTO-systemen tot een diepte van 500 m beneden maaiveld is een vergunning Waterwet nodig. De gedeputeerde staten van de Provincie is het bevoegd gezag en daarmee de vergunningsverstrekker (zie artikel 6.4 Waterwet). Volgens de Wet wijzigingsbesluit Bodemenergiesystemen (Schultz-van Hagen, 2013) is de infiltratie van water boven de 25 °C toegestaan, onder de voorwaarde dat het belang van de bescherming van de bodem zich daartegen niet verzet. In de vergunningprocedure kan het bevoegd gebruik maken van standaardvoorschriften uit de Besluitvorming Uitvoeringsmethode (BUM). Echter, HTO kan niet voldoen aan twee van deze standaardvoorschriften. Afwijken van de standaardvoorschriften is toegestaan in het kader van een onderzoeksproject, en in de BUM is opgenomen dat HTO daar voorlopig ook onder valt. Het bevoegd gezag kan eisen aan onderzoek en monitoring stellen om mogelijk nadelige effecten van hogere injectietemperatuur en het warmteoverschot beter in kaart te brengen en, indien noodzakelijk, te mitigeren.

De aandachtspunten vanuit vergunningverlening voor HTO-systemen tot 500 m diepte zijn:

- A) De aanwezigheid van omgevingsbelangen in de ondergrond nabij de HTO.
- B) De (onzekerheid over) effecten die optreden in de ondergrond door toepassing van HTO.
- C) Er kunnen strenge voorschriften in de vergunning worden opgenomen, die onzekerheid en/of hoge (monitorings)kosten kunnen meebrengen voor de gebruiker van het systeem.
- D) Het verwachte en gerealiseerde energierendement;
- E) Draagvlak onder omgeving/gebruikers

Ad A) De effecten die de HTO heeft op de ondergrond, en de mogelijke gevolgen die dit heeft voor omgevingsbelangen dienen door het bevoegd gezag te worden afgewogen. Daarbij is de bescherming van drinkwaterproductiesystemen het hoogste belang.

Ad B) De hogere infiltratietemperatuur, het warmteoverschot in de ondergrond en de effecten die dit meebrengt voor de grondwaterkwaliteit zijn belangrijke risico's die de provincie beoordeeld wil zien, voor een vergunning Waterwet verleend kan worden. Echter, sommige effecten, zoals de geo-chemische effecten op het grondwater, zijn locatie-afhankelijk en niet altijd op voorhand in te schatten wanneer er weinig bodeminformatie beschikbaar is. Net als bij alle open bodemenergiesystemen is het van belang dat er geen/beperkte nadelige gevolgen optreden voor andere belangen en/of voor de intrinsieke waarde van de ondergrond door toepassing van HTO.

Ad C) Wanneer het bevoegd gezag strenge voorschriften opneemt voor de monitoring van het systeem, brengt dat hoge kosten met zich mee voor de gebruiker. Het is wenselijk om duidelijke monitoringsdoelen te stellen en te bespreken op welke manier hier redelijkerwijs aan kan worden voldaan. Wanneer vergunningen voor bepaalde tijd worden verleend, of wanneer er in de vergunning wordt opgenomen dat het bevoegd gezag het systeem te allen tijde kan beëindigen, kan dit leiden tot financiële risico's die voor een initiatiefnemer onacceptabel zijn. Tijdens het vooroverleg kan besproken worden onder welke voorwaarden tegelijkertijd aan de wensen van vergunningverlener en -aanvrager kan worden voldaan.

Ad D) De regels stellen dat er doelmatig gebruik wordt gemaakt van de ondergrond. Gerelateerd daaraan kan een eis worden gesteld m.b.t. het warmteoverschot in de ondergrond, dat direct afhangt van het terugwinrendement van het systeem ('system efficiency' in Hoofdstuk 4). Als een warmteopslag een te laag terugwinrendement heeft, kan het bevoegd gezag oordelen dat er geen doelmatig gebruik wordt gemaakt van de ondergrond.

Ad E) Het maatschappelijk draagvlak bij omwonenden en andere belanghebbenden kan zowel een kans als risico betekenen voor het project. Het is van belang om in een vroeg stadium een volledige stakeholderanalyse uit te voeren, zodat duidelijk is welke partijen belanghebbende kunnen zijn tijdens het realiseren, vergunnen en exploiteren van een HTO-project. Wanneer de verwachte effecten daar reden toe geven, kan er een communicatie- en participatieplan worden opgesteld, zodat in een vroeg stadium mogelijke bezwaren kunnen worden weggenomen. Dit kan de benodigde basis bieden aan het bevoegd gezag om de vergunning (al dan niet) te verlenen, omdat zij de toepassing van warmteopslag (en de bijkomende effecten daarvan) af moet wegen tegen de aanwezige belangen.

Technische en geohydrologische risico's

De belangrijkste risico's van technische aard zijn:

- A) Onzekerheid eigenschappen doelpakket en bovenliggende lagen
- B) Operationele prestaties en integriteit van componenten, met name bronmaterialen en pompen
- C) Integriteit van bronnen

Ad A) Een onzekere factor is de doorlaatbaarheid van het beoogde opslagpakket, leidend tot het risico dat deze te laag is. De doorlatendheid is zeer belangrijk voor de prestatie van het HTO project. Een lage verticale en horizontale doorlatendheid is gunstig voor het thermische rendement (dichtheidsstroming wordt sterk geremd). Een lage doorlatendheid kan er echter ook toe leiden dat het meer kracht kost om het grondwater te onttrekken en te infiltreren. Als de injectiedruk (kracht) te groot wordt kan dit leiden tot onacceptabele gronddrukken. Verder kan een te grote benodigde kracht om te onttrekken leiden tot het extra produceren van zanddeeltjes waardoor het systeem sneller slijt en de injectiebron verstopt. De ontwerpnormen voor WKO-systemen zijn bedoeld om deze nadelige effecten te voorkomen, maar hebben tot gevolg dat bij een lage doorlatendheid het debiet dat kan worden behaald per put ook lager is. Vanwege economische redenen mag de doorlatendheid daarom ook weer niet te laag zijn.

Om de bovengenoemde onzekerheden te ondervangen zijn de volgende oplossingen mogelijk:

- Het aanpassen van de bronconfiguratie- Het dicht bij elkaar plaatsen van de warme en koude bron. Hierdoor worden de drukken verder uitgevlakt. Te dicht bij elkaar plaatsen kan echter leiden tot thermische kortsluiting en verlaging van rendement.
- Het verlagen van het maximale debiet.

De doorlaatbaarheid is afgeleid van informatie van nabijgelegen putten of van regionale informatie. Gezien de natuurlijke variatie blijft er daarom sprake van onzekerheid in de inschatting van deze essentiële informatie.

Datzelfde geldt voor de inschatting van de dikte van de bovenliggende kleilagen wat ook van groot belang is voor elke beoogde locatie. Deze kleilagen hebben namelijk sterk invloed op de verwachte temperatuurstijging in bovenliggende lagen. Het risico hier is dat de kleilagen te dun zijn waardoor er a) meer warmteverlies is, dus een lager rendement wordt gehaald, en b) hogere temperaturen worden bereikt in de overliggende pakketten.

De belangrijkste mitigatiemaatregel is het uitvoeren van een proefboring en capaciteitstest. Hiermee kunnen de eigenschappen van het doelpakket en die van bovenliggende lagen beter worden gekarakteriseerd, zodat de performance van de HTO en de mogelijke effecten op bovenliggende lagen in meer detail kunnen worden berekend.

Ad B en C) Een proces dat de operationele prestaties van de HTO kan beïnvloeden is scaling (met name carbonaatneerslag) en/of kleizwelling leidend tot de verstopping van de bron. Het risico is dat hierdoor de productie/injectie van water lager is dan verwacht. De geochemie van het doelpakket en de temperaturen in de operationele fase van de HTO zijn belangrijke parameters die de scaling en verstopping kunnen voorspellen. Afhankelijk van de gekozen opslagtemperatuur en de watersamenstelling in het gebruikte watervoerende pakket kan waterbehandeling nodig zijn, in combinatie met een goed monitoringssysteem. Materiaalkeuze is hier ook een belangrijke mitigatiemaatregel om problemen met scaling en kleizwelling te voorkomen.

Een algemeen risico is dat een verkeerde materiaalkeuze leidt tot een suboptimale operatie van de HTO. Hier zal dan ook uitgebreid aandacht aan moeten worden besteed in de ontwerpfase. Ook

hier is het temperatuurniveau van de opgeslagen een belangrijke randvoorwaarde. Bij lage opslagtemperaturen (45 °C) kan nog gewerkt worden met standaard materialen die gebruikelijk zijn bij “lage temperatuur WKO-systemen”. Als de opslagtemperaturen verder oplopen, moet worden overgeschakeld op andere materialen, die bestand zijn tegen de hogere temperaturen. Belangrijke componenten in het ontwerp van de HTO zijn de pompen. Ook voor de keuze van de pompen geldt dat een verkeerde keuze kan leiden tot een suboptimale operatie. De meest waarschijnlijke keuze voor een pompsysteem is een submersible pump (ESP). Het ontwerp en configuratie voor de pompinstallatie is van groot belang voor de continuïteit van de operatie van de HTO en verdient dus extra aandacht in de ontwerpfase. Het vervangen van een pomp tijdens operationele fase is een kostbare en tijdrovende situatie. Redundantie in het ontwerp (bijvoorbeeld door capaciteit middels meerdere injectie en productiebronnen), O&M planning en monitoring van de pompen tijdens operationele fase zijn belangrijke mitigatiemaatregelen.

Het optreden van erosie en corrosie zijn belangrijke faalfactoren voor geothermische systemen, zo mogelijk ook voor HTO. Het risico is dat deze processen leiden tot beschadigde of falende apparatuur in het totale systeem waardoor de productie/injectie stil komt te liggen of de gezondheid, veiligheid, of milieu in gevaar brengt. In de geothermie zijn er verhoogde corrosierisico's door de combinatie van het gebruik van koolstofstalen casings met zout water. Bij de HTO projecten uit het verleden is voor de casings gebruik gemaakt van Glasvezelversterkt Kunststof en is daardoor geen sprake van een risico op corrosie van de casings. Wel is er in het ontwerp aandacht nodig voor corrosierisico's voor andere componenten in het systeem. De hoge temperaturen en het toevoegen van zuur ten behoeve van de waterbehandeling zijn hierbij risico verhogende factoren.

Een kwalitatieve analyse van de mogelijke risico's van bronfalen (verlies bronintegriteit) is reeds onderzocht in eerdere haalbaarheidsstudies (TNO, 2016) en omvat de belangrijkste faalscenario's voor de bronnen in de HTO: interne en externe corrosie; materiaalstress; en productiefouten van de bron(materialen). Deze scenario's kunnen in theorie lekkage van formatiewater uit de reservoirs in bovenliggende watervoerende pakketten als gevolg hebben. Dit kan vervolgens thermische, chemische en microbiologische effecten hebben. Er zijn beproefde methoden beschikbaar om bovenstaande faalscenario's en hun mogelijke effecten nauwkeurig te identificeren en monitoren. Tenslotte zijn de effecten te corrigeren doormiddel van technische en operationele maatregelen. Tijdens detail engineering van een HTO-project zullen de risico's in meer detail worden uitgewerkt in een HAZID/HAZOP proces (TNO, IF Technology, 2016). Ervaringen en “Lessons Learned” uit de WKO, geothermie en olie en gassector zullen worden toegepast in dit proces.

Samenvattend, de belangrijkste mitigatiemaatregelen voor de genoemde technische risico's zullen zijn:

- Proefboring om in detail eigenschappen van de ondergrond in kaart te brengen
- Toepassing laatste inzichten omtrent materialen, ontwerp en componentenkeuze opgedaan in onderzoeksprogramma's voor (hoge temperatuur) geothermie projecten en olie- en gasprojecten.
- Een HAZID/HAZOP proces is integraal onderdeel van het project om samen met stakeholders de belangrijkste risico's voor milieu, techniek en mensen te identificeren, karakteriseren en mitigeren.
- Specifiek monitoringprogramma

Milieu- en veiligheidsrisico's

HTO-systemen kunnen effecten hebben op de milieuhygiënische toestand van de ondergrondse omgeving waarbinnen ze geïmplementeerd zijn. De hoge temperaturen van een HTO systeem

kunnen tot gevolg hebben dat de effecten op de chemie en de microbiologie van het grondwater duidelijk groter zijn dan bij "lage temperatuur" WKO.

De belangrijkste aandachtspunten in de vergunningverlening zijn:

- A) Fysische/chemische eigenschappen van het grondwater
- B) Microbiologie
- C) Grond mechanische effecten
- D) Effecten waterbehandeling op waterkwaliteit
- E) Warmteverlies van de put naar ondiepe lagen
- F) Lekkage van boorvloeistoffen of radioactieve vloeistoffen voor loggingsdoeleinden
- G) Lekkage van reservoir water naar ondiepe lagen

Ad A) De toename in temperatuur van de ondergrond, die komt kijken bij opslag van warmte in de ondergrond op hoge temperatuur, kan tot verandering in de samenstelling van het grondwater leiden. Wanneer er andere grondwatergebruikers binnen het invloedsgebied van de warmteopslag gelegen zijn, kunnen deze nadelig beïnvloed worden. Op basis van mogelijke nadelige beïnvloeding van andere grondwatersystemen kan het bevoegd gezag weigeren om een vergunning Waterwet af te geven voor het warmteopslagsysteem.

Ad B) Ook de samenstelling van de microbiologische populatie in de ondergrond is temperatuurgevoelig. Vanuit milieutechnische hoek is het van belang om het grondwater, dat van nature anaeroob (zuurstofloos) is, ook anaeroob te houden, zodat pathogene microben geen kans krijgen. Een technisch risico m.b.t. microbiologie is de kans op productie van waterstofsulfidegas, dat door sulfaatreducerende bacteriën kan worden geproduceerd wanneer er voldoende voedingsstoffen en sulfaat aanwezig zijn in het grondwater.

Ad C) Grondmechanische effecten treden op door de stijghoogteveranderingen van een open bodemenergiesysteem. Bij een warmteopslag komt daar een aanvullend effect van de opwarming van de ondergrond bij.

Ad D) Voor opslag van warmte met een temperatuur hoger dan 45 °C is vermoedelijk zuurdosering nodig om verstopping van de putten door kalkneerslag te voorkomen. Wanneer waterstofchloride (HCl) wordt gedoseerd, kan lokaal de chlorideconcentratie toenemen.

Ad E) De stijgbuis van de warmteopslag warmt op wanneer er warm water doorheen stroomt. Naar verwachting treedt er enige opwarming van de directe omgeving van de stijgbuis op.

Ad F), G) Een eerder uitgevoerde haalbaarheidsstudie voor een HTO-project liet een kwalitatieve analyse van de mogelijke risico's van putfalen zien. Deze omvatte de belangrijkste faalscenario's voor de bronnen in de HTO: Interne en externe corrosie; materiaalstress; en productiefouten. Deze scenario's kunnen lekkage van formatiewater in bovenliggende watervoerende pakketten als gevolg hebben. Dit kan vervolgens thermische, chemische en microbiologische effecten hebben. Er zijn beproefde methoden beschikbaar om bovenstaande faalscenario's en hun mogelijke effecten te monitoren. Tenslotte zijn de effecten te corrigeren doormiddel van technische en operationele maatregelen. Mochten er milieueffecten optreden dan lijken deze niet onomkeerbaar.

Organisatorische risico's

A. Ontbreken of onvoldoende commitment stakeholders

B. Inpassing systeem lastig of niet mogelijk

Ad A) HTO is een techniek die nog in een ontwikkelfase zit. Dit zorgt voor onzekerheid over hoe het systeem in de praktijk gaat functioneren, terwijl er wel een forse investering gedaan moet worden om het systeem te realiseren. Wanneer stakeholders onvoldoende vertrouwen hebben in een succesvol project, bestaat het risico dat het project voortijdig wordt stop gezet. Het is van belang om regelmatig een update uit te voeren van zowel de business case als risico-analyse, zodat in een zo vroeg mogelijk stadium bijgestuurd kan worden op een positief resultaat.

Ad B) In veel gevallen zullen bronnen en leidingwerk niet op het eigen terrein geplaatst kunnen worden. In dat geval moet gekeken worden of bronnen op grond van derden gerealiseerd kan worden, of dat grond aangekocht kan worden. Vanuit de WKO-markt is de ervaring dat dit in veel gevallen wel mogelijk is, maar dat dit het project welk kan vertragen. HTO systemen hebben een grotere omvang nodig dan een gemiddeld WKO-systeem, en hebben daardoor vaak meer bronnen, waardoor de complexiteit van het vinden van geschikte boorlocaties verder toeneemt. Reeds in een vroeg stadium van het onderzoek dient gezocht te worden naar de meest optimale locatie voor de HTO. Dit is een samenspel van bestaande infrastructuur, ligging van bronnen en bovengrondse situatie.

**Eindredactie van dit
deelrapport door KWR**

Adres
Groningenhaven 7

Postadres
Postbus 1072
3430 BB Nieuwegein