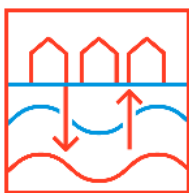
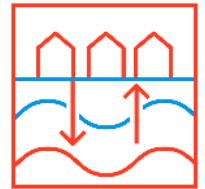


WINDOW *fase 1*



C2

Prestaties en thermische effecten van ondergrondse warmteopslagsystemen

3 december 2020

C2 - Prestaties en thermische effecten van ondergrondse warmteopslagsystemen



Dit rapport is opgesteld door KWR als onderdeel van WINDOW fase 1.

Auteurs

Stijn Beernink
Martin Bloemendal
Niels Hartog

3 december 2020

Kwaliteitsborger(s)

Niels Hartog

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 2020.146

Keywords
Warmteopslag, HT-ATES, WINDOW, verkenningen, opslagcondities

Jaar van publicatie
2020

Meer informatie
Stijn Beernink
T 06 15605329
E stijn.beernink@kwrwater.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.

Samenvatting

Dit rapport is onderdeel van het WINDOW project en richt zich op hoe opslagcondities de prestaties en thermische effecten van ondergrondse warmteopslag (ook wel Hoge Temperatuur Opslag, HTO) beïnvloeden. De numerieke simulaties die zijn uitgevoerd voor de zes verkenningen van het WINDOW project zijn gezamenlijk geanalyseerd in dit rapport. Op basis van deze analyse is de variatie in terugwinefficiëntie van HTO en de temperatuurverspreiding vanuit de hete bron van een HTO systeem inzichtelijk gemaakt voor een variatie aan opslagcondities (opslag volume en opslagtemperatuur, geohydrologie en bronconfiguratie). In totaal zijn de uitkomsten van 26 simulaties met axisymmetrische (2D radiaal-symmetrische) modellen en van 6 simulaties met 3D-modellen geanalyseerd.

De terugwinefficiëntie van het systeem van de onderzochte varianten varieert tussen de 30 en 78% na 10 jaar gebruik van de HTO. De terugwinefficiëntie van het systeem wordt bepaald door met name de terugwinefficiëntie van de hete en warme bron(nen) en daarnaast het ontworpen temperatuurverschil (ΔT_{HTO}) tussen deze twee type bronnen. Met name een verlaging van de opslagtemperatuur in de warme bron(nen) maakt de HTO minder gevoelig voor verliezen uit de bronnen en resulteert dus in een hogere terugwinefficiëntie van het systeem.

De terugwinefficiëntie van de hete bron van het HTO systeem is gesimuleerd met een gedetailleerd axisymmetrisch model. De resultaten van deze simulaties geven aan dat de thermische verliezen bij de meeste varianten voornamelijk worden bepaald door conductie (geleiding) van warmte. Daarnaast kan ook opdriving van warmte en de minimaal bruikbare hete bron temperatuur (afkaptemperatuur) een rol spelen in de hoeveelheid thermische energie die kan worden teruggewonnen. De laagdikte en doorlatendheid bepalen in hoeverre thermische verliezen door opdriving een belangrijke rol kunnen spelen. Dit is slechts voor een aantal van de varianten het geval. Over het algemeen heeft de grootte van het HTO systeem (opslagvolume) een positieve invloed op de terugwinefficiëntie.

Voor de 3D simulaties is gewerkt met een vaste plaatsingsregel van 2 keer de thermische straal van de hete bron, tussen de hete en de warme bron(nen). Het aantal warme bronnen dat rondom de hete bron(nen) is geplaatst is afhankelijk van het benodigde debiet en varieert tussen de 2 en de 8. Uit deze simulaties blijkt dat er weinig tot geen positieve invloed is van de warme bronnen op de terugwinefficiëntie van de hete bron(nen). Echter, de positieve invloed van de hete bron op de warme bronnen is voor sommige varianten waargenomen, doordat de warme bronnen het warmteverlies uit de hete bron(nen) voor een deel kunnen opvangen. Dit resulteert in een hogere terugwinefficiëntie van het systeem doordat er minder energie hoeft worden gebruikt tijdens het laden van het HTO systeem. Het vermogen dat de hete bron kan leveren tijdens ontladen blijft echter hetzelfde (omdat de terugwinefficiëntie van de hete bron niet toeneemt).

De thermische verspreiding vanuit de hete bron onder een range aan locatie-specifieke condities is inzichtelijk gemaakt door de verspreiding van de 25 °C en de 50 °C contour in de verticale richting (opwaarts en neerwaarts vanaf de opslag-aquifer) en in de horizontale richting te volgen in de tijd (50 jaar gesimuleerd met axisymmetrisch model). Het blijkt hieruit dat de horizontale verspreiding in de opslag-aquifer in absolute zin sterker is t.o.v. de verticale verspreiding van warmte. De horizontale verspreiding wordt in grote mate bepaald door de grootte van het systeem en de dikte van de opslag-aquifer, en, de mate van opdriving. De verticale verspreiding van warmte wordt voornamelijk bepaald door de locatie-specifieke laagopbouw boven en onder de opslag-aquifer.

De resultaten van de analyses laten zien dat de locatie-specifieke opslagcondities in grote mate het functioneren van het HTO systeem bepalen. De ondergrond is voor iedere locatie zo goed mogelijk gekarakteriseerd o.b.v. lokale boringen en geohydrologische modellen. Echter, de onzekerheid van de gebruikte geohydrologische parameterwaarden is voor de meeste locaties groot. Dit betekent dat bijv.

de laagdikte en de horizontale en verticale doorlatendheid in werkelijkheid anders is dan verwacht. Dit kan impact hebben op zowel de prestatie en de thermische impact van de HTO.

De analyse in dit rapport geeft aanleiding voor aanvullend onderzoek gericht op het beter in kaart brengen van de (onzekerheden van de) eigenschappen van de ondergrond, de onderlinge afstand tussen de bronnen en het effect dat een brede range aan locatie-specifieke opslagcondities kan hebben op de prestatie en thermische impact van HTO.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
1 Inleiding	6
2 Achtergrond informatie	8
2.1 Warmte verliezen bij ondergrondse warmteopslag	8
2.2 Thermisch beïnvloed gebied door HTO	9
2.3 Thermische eigenschappen ondergrond	10
3 Methodes	12
3.1 Benadering locatie-specifieke ondergrondcondities	12
3.2 Modelbeschrijving SEAWATv4 zoals gebruikt voor verkenningen WINDOW	14
3.3 Bronlocatie t.b.v. 3D simulaties	19
3.4 Beoordelingskader	19
3.5 Gesimuleerde varianten	22
4 Resultaat A: thermische terugwinefficiëntie van HTO	25
4.1 Invloed van locatie-specifieke condities op terugwinefficiëntie hete bron	25
4.2 Bepaling van de terugwinefficiëntie van het systeem	30
4.3 Effect van interactie hete en warme bronnen (3D simulaties)	32
4.4 Discussie	35
5 Resultaat B: temperatuur verandering in de ondergrond door warmteverlies van HTO	38
5.1 Verticale verspreiding warmte in ondergrond	38
5.2 Horizontale verspreiding warmte in opslagpakket	41
5.3 Terugwinefficiëntie vs. thermische impact	43
5.4 Discussie	44
6 Conclusies en aanbevelingen	47
6.1 Prestaties HTO	47
6.2 Thermische effecten	48
Referenties	49
Bijlagen	51
Bijlage 1 Invloed opslagcondities op terugwinefficiëntie hete bron	51
Bijlage 2 Resultaten simulaties verkenningen: thermische verspreiding	52

1 Inleiding

Dit rapport is onderdeel van het WINDOW project en richt zich op hoe opslagcondities (temperatuur, opslagvolumes, geohydrologie en bronlocatie) de prestaties en thermische effecten van ondergrondse warmteopslag (ook wel Hoge Temperatuur Opslag, HTO)¹ beïnvloeden. Het doel van dit onderzoek is om generieke inzichten te verkrijgen uit een representatieve range aan condities ontleend aan numerieke simulaties voor de verkenningen in WINDOW. Het onderzoek in dit werkpakket richt zich op de volgende vragen:

- Hoe is de terugwinefficiëntie van de individuele bronnen en het warmteopslagsysteem als geheel gerelateerd aan de opslagcondities?
- Welke optimalisaties zijn er mogelijk bij het geohydrologisch ontwerp van ondergrondse warmteopslag, gericht op rendementsverbetering, kostenbesparing en risico beperking?
- Hoe verspreidt de warmte die verloren gaat uit een HTO zich in (de omgeving van) het opslagpakket en hoe resulteert dit in een temperatuurverandering van de ondergrond?

De simulaties voor de verschillende verkenningen van WINDOW zijn gedaan met het numerieke grondwatermodel SEAWATv4. Omdat voor iedere verkenning een (ander) aantal varianten zijn bepaald, is er een grote range aan verschillende condities gesimuleerd. Er zijn verkenningen uitgevoerd voor de volgende zes locaties: Heerhugowaard, Sittard/Geleen, Rotterdam, Leeuwarden, Den Haag en Delft². In totaal zijn er 26 varianten doorgerekend met het axisymmetrische model. Voor iedere locatie is er ook één 3D simulatie gedaan.

Werking HTO en verschil met WKO

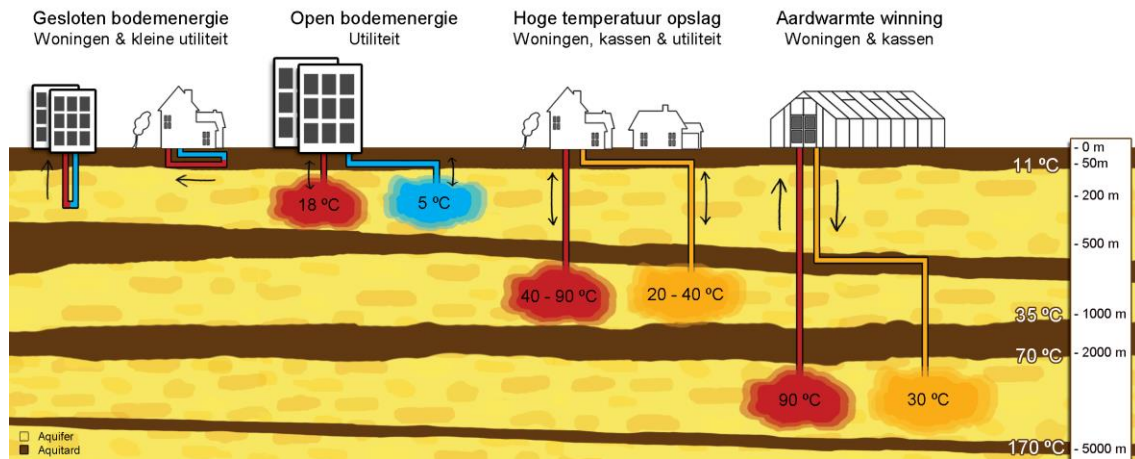
Een HTO lijkt in principe erg veel op een WKO systeem. Het gaat om een open bodemenergiesysteem met twee type bronnen. Tijdens warmtelevering (in de winter) wordt er warm grondwater onttrokken uit de warme bron, deze energie wordt uitgewisseld met de afnemer, en het grondwater wordt vervolgens met een lagere temperatuur opgeslagen in de relatief koude bron. Tijdens het laden van het systeem (in de zomer) wordt er grondwater onttrokken uit de relatief koude bron, opgewarmd, en opgeslagen in de warme bron.

Een groot verschil tussen WKO systemen en HTO systemen is dat WKO systemen thermisch in balans kunnen (moeten) zijn met de ondergrond en daarom netto (jaarrond) geen thermisch effect op de bodem hebben. Zo kunnen er in zowel de warme bron(nen) en de koude bron(nen) verliezen zijn, maar wegen deze netto tegen elkaar op.

Voor HTO systemen heeft zowel de hete als de warme bron een temperatuur hoger dan de achtergrondtemperatuur van de ondergrond (Figuur 1-1). Dit betekent dat er altijd een temperatuur effect zal zijn op de omgeving ook al opereert de HTO uiterst efficiënt. Tijdens de opslag van warmte bij hogere temperaturen (e.g. > 50 °C) in de ondergrond kunnen er verliezen optreden door voornamelijk conductie (warmtegeleiding) en convectie (opdrijving) van de opgeslagen warmte. Omdat er nog weinig ervaring is met HTO systemen ontbreekt momenteel het juiste raamwerk dat nodig is om gedegen naar de mogelijke effecten van HTO te kunnen kijken.

¹ Feitelijk gaat het om warmteopslagsystemen met behulp van open bodemenergie. In Nederland algemeen bekend als HTO-systemen.

² Er was ook een 7^{de} Locatie in Tilburg, die viel halverwege het proces. Voor deze locaties zijn geen numerieke simulaties gedaan die zijn meegenomen in de analyse in dit rapport.



Figuur 1-1 Overzicht van typen bodemenergiesystemen met meest voorkomende toepassingsgebieden en natuurlijke en brontemperaturen (Bloemendal, 2018).

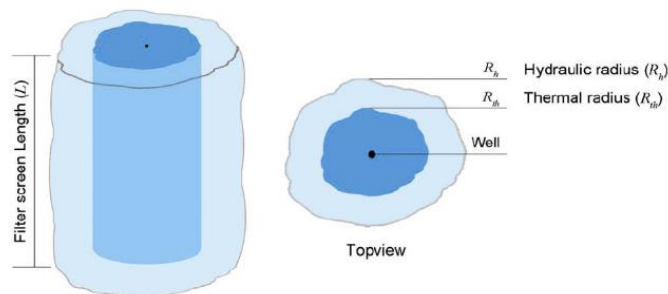
Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is achtergrond informatie gegeven om het vervolg van het rapport in te leiden. In hoofdstuk 3 zijn de methodes en uitgangspunten van de numerieke simulaties van alle verkenningen gedaan, en is beschreven hoe deze resultaten zijn geanalyseerd. De resultaten zijn vervolgens opgeknip in deel A) thermisch terugwinefficiëntie van de HTO in hoofdstuk 4 en deel B) temperatuur verandering in de ondergrond door warmteverlies van HTO in hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 volgen de conclusies en worden aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek.

2 Achtergrond informatie

2.1 Warmte verliezen bij ondergrondse warmteopslag

Meerdere processen spelen een rol in de uitstraling, verplaatsing of verspreiding van de opgeslagen warmte in de ondergrond bij een HTO systeem. Bij iedere fase tijdens het gebruik van de HTO (laden, opslag, ontladen) zijn verschillende processen in meer of mindere mate van toepassing. Allereerst is er het verpompen van het warme water dat voor de ondergrondse verplaatsing van de thermische energie door de ondergrond zorgt, dit wordt advectief transport genoemd. Dit wordt dus veroorzaakt door het injecteren en onttrekken van het grondwater met de put. Doordat het warme water tijdens de beweging door de poriën van de ondergrond warmte af staat aan het sediment loopt het temperatuur-front achter op het geïnjecteerde water-front, dit heet thermische retardatie (Figuur 2-1).



Figuur 2-1 De thermische straal is kleiner dan de straal van het geïnjecteerde water door retardatie (Bloemendal & Hartog, 2018)

Uitgaande van een uniforme verspreiding van water creëert de injectie van water in een bron een cilindervormig volume waarvan de thermische straal dus kleiner is dan de hydraulische straal. De thermische straal wordt berekend als:

$$R_{th} = \sqrt{\frac{c_w V_{opslag}}{c_{aq} \pi L}} \quad (1)$$

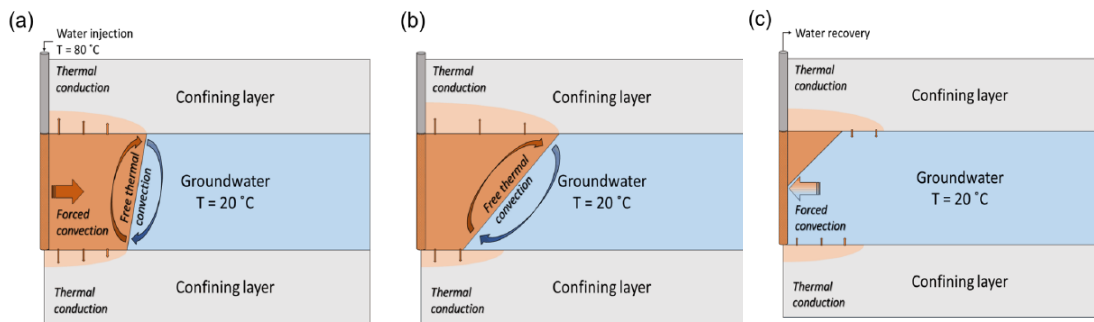
Met c_w en c_{aq} de volumetrische warmte capaciteit van water en het aquifer sediment ($J/m^3/^\circ C$), V_{opslag} het jaarlijkse opslagvolume (m^3) en L de totale dikte van de aquifer (m). Omdat de volumetrische warmtecapaciteit van de aquifer (zand + water in de poriën samen) kleiner is dan de volumetrische warmtecapaciteit van water, is het opgewarmde volume bodem dat ontstaat rondom de bron groter dan het geïnjecteerde watervolume.

Omdat de temperatuur van de bodem met het opgeslagen water hoger is dan van de bodem rondom, zorgt dit voor verspreiding warmte d.m.v. conductie (warmte geleiding). De snelheid van conductie is afhankelijk van de thermische geleidbaarheid van het materiaal waarin het water is opgeslagen. Klei heeft daarbij een betere isolerende werking dan zand omdat de thermische geleidbaarheid van klei kleiner is dan die van zand. De vorm van het thermisch volume kan worden geoptimaliseerd om conductie verliezen te verkleinen door het contact oppervlak van thermische cilinder zo klein mogelijk te houden t.o.v. het totale opgeslagen thermische volume; het oppervlakte van het thermisch volume (A) gedeeld door het thermische volume (V), de A/V ratio (Bloemendal & Hartog, 2018; Doughty et al., 1982).

$$\frac{A}{V} = \frac{2}{L} + \frac{2}{R_{th}} \quad (2)$$

Met L de aquifer dikte (m) en R_{th} de thermische straal (m).

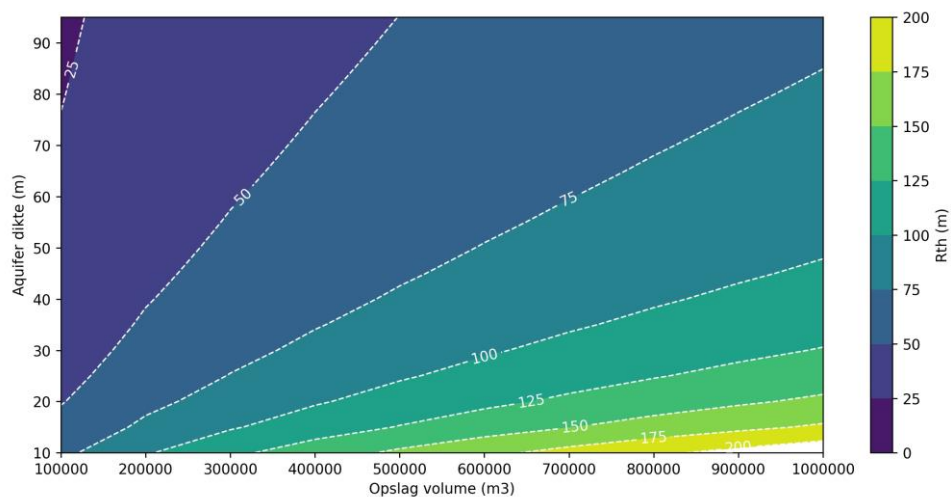
Naast conductie kan, naarmate de opslagtemperatuur hoger wordt, ook de lagere dichtheid van het opgeslagen warme water zorgen voor verspreiding van de opgeslagen warmte (Figuur 2-2). Naarmate deze opdrrijving (convectie) toeneemt, kantelt het temperatuur front, en wordt het opgeslagen thermisch volume minder cilindrisch. Dit zorgt er voor dat er A) warm water achterblijft in het bovenste deel van de opslag-aquifer en B) er koud water wordt aangetrokken in het onderste deel van het bron filter tijdens onttrekking. De mate waarin opdrrijving een rol speelt heeft te maken met het dichtheidsverschil tussen het opgeslagen water en het omringende grondwater (temperatuur en/of concentratie afhankelijk) en de horizontale en verticale doorlatendheid van de aquifer. Het dichtheidsverschil geeft daarbij de potentiële kracht die zorgt voor het opdrijven van het relatief warme water (groter bij groter temperatuur verschil). De doorlatendheid bepaalt daarnaast de snelheid waarmee het water kan gaan opdrijven. Een relatief hoge doorlatendheid zorgt er dus voor dat het warmere grondwater zich relatief makkelijk kan bewegen door de ondergrond. De mate waarin opdrrijving uiteindelijk impact heeft op de totale terugwinefficiëntie heeft ook te maken met de opslagcondities, zoals laagdikte en het opslagvolume (Hellström et al., 1988; Schout et al., 2013)



Figuur 2-2 Opdrrijving (convectie) van het warme water, resulterend in het aantrekken van koud grondwater bij de bron tijdens onttrekking (van Lopik et al., 2016).

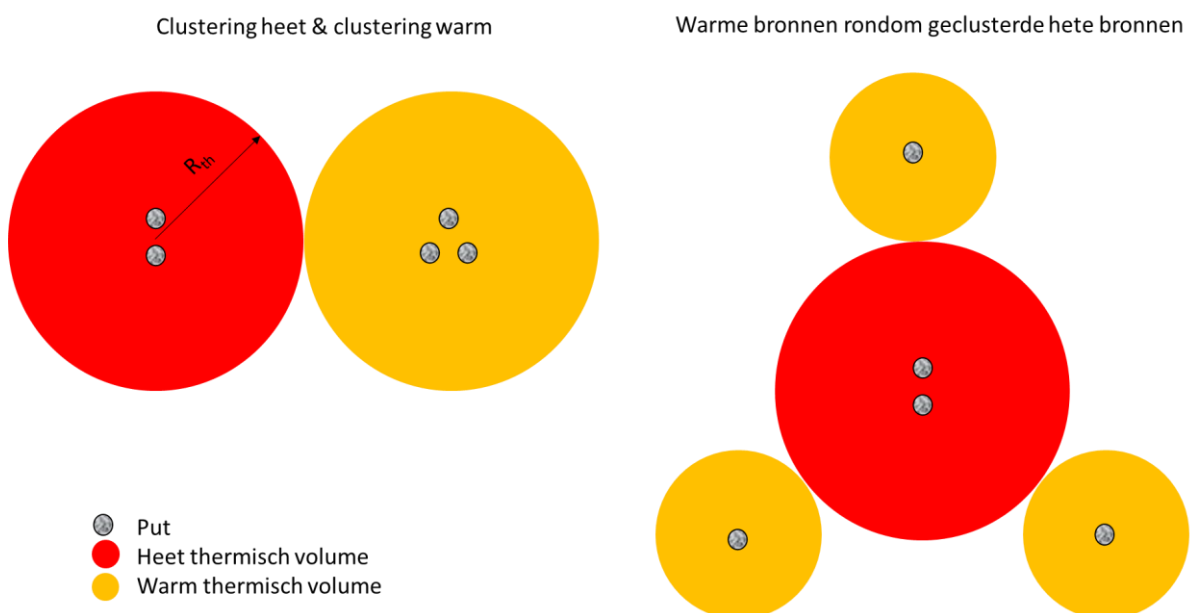
2.2 Thermisch beïnvloed gebied door HTO

De grootte van het vanaf maaiveld bekeken thermisch beïnvloede oppervlakte wordt in de basis bepaald door het jaarlijkse opslagvolume van de HTO en de laagdikte (thermische straal, vergelijking 1.2). Op basis van de thermische straal kunnen we inzichtelijk maken wat de minimale grootte is van het door het HTO systeem thermisch beïnvloede gebied. De thermische straal neemt snel af bij grotere laagdikte en neemt toe bij grotere opslagvolumes (Figuur 2-3).



Figuur 2-3 De thermische straal (R_{th}) die ontstaat rondom de bron voor een range aan opslag volume en aquifer dikte.

Echter, een daadwerkelijk HTO systeem bestaat altijd uit een combinatie van hete bronnen en warme bronnen, Figuur 2-4. Dit betekent dat het thermisch beïnvloedde gebied door de HTO niet alleen wordt bepaald door de hete bron(nen) maar ook door de warme bron(nen). De ruimtelijke plaatsing van de hete en warme bronnen speelt dus ook mee in de totale verwachte temperatuurverandering in de ondergrond door HTO. Twee mogelijkheden daarbij zijn om alle hete en warme bronnen te clusteren of om de warme bronnen rondom de hete bronnen te plaatsen.



Figuur 2-4 Voorbeeld van twee mogelijke bron configuraties voor een HTO systeem.

2.3 Thermische eigenschappen ondergrond

De thermische eigenschappen van het materiaal van de verschillende lagen bepalen o.a. hoe groot het thermisch volume in de ondergrond is en hoe snel warmte zich kan verspreiden door middel van warmtegeleiding. Er bestaat hierbij een groot verschil tussen de verschillende sedimenten. Voor dit onderzoek is er gekeken naar de verschillende thermische eigenschappen van zand, klei en bruinkool. Alle specifieke thermische eigenschappen zijn gegeven in Tabel 2-1.

De thermische eigenschappen van de ondergrond als geheel wordt naast eigenschappen van het sediment (bv. zand, klei of bruinkool) ook bepaald door de eigenschappen van het grondwater dat zich in de poriën van het materiaal bevindt. De gemiddelde volumetrische thermische eigenschappen van de watervoerende lagen (aquifers) en afsluitende lagen (aquitards) moet dus worden bepaald o.b.v. een gewogen gemiddelde tussen het sediment en het water en is dus afhankelijk van de porositeit (Φ):

$$X_{aq} = X_{H_2O} \cdot \phi + X_{sediment} \cdot (1 - \phi) \quad (3)$$

Tabel 2-1 Voorbeeld van verschil van thermische eigenschappen tussen zand, klei en veen. Met $C_w=4183$ en $\rho_w=1000$ en $K_{t,w}=0.6$. Gekozen waardes volgens (Bloemendal & Hartog, 2018; Dalla Santa et al., 2020; Kosowska-Golachowska et al., 2014).

		Water	Zand	Klei	Bruinkool
Porositeit (-)	ϕ	-	0.3	0.5	0.2
Warmtegeleidingscoëfficiënt (W/m/°C)	K_t	0.6	2	1.2	0.51
Warmtegeleidingscoëfficiënt ondergrond (W/m/°C) ¹	K_t	-	1.58	0.9	0.528
Dichtheid (kg/m ³)	ρ	1000	2640	2640	1300
Specifieke warmte capaciteit (J/kg/°C)	C_p	4183	710	1400	1350
Volumetrische warmtecapaciteit materiaal (J/m ³ /°C)	C_v	4,183,000	1,874,400	3,696,000	1,755,000
Volumetrische warmtecapaciteit ondergrond (J/m ³ /°C)	C_{aq}	-	2,566,980	3,939,500	2,240,600
Thermische diffusiviteit (m ² /dag)	D_t	0.0123	0.0532	0.0197	0.0204

Tabel 2-1 laat zien dat er een groot verschil kan zijn tussen de thermische eigenschappen van verschillende lagen in de ondergrond. De volumetrische warmtecapaciteit (C_{aq}) bepaalt bijvoorbeeld hoe groot de thermische straal wordt in de ondergrond. De thermische diffusiviteit bepaald de snelheid van warmtegeleiding (m²/dag). De thermische diffusiviteit van zand is in dit geval 2.5x groter dan die van klei en bruinkool. Dit wordt voor klei veroorzaakt door de hogere porositeit, de lagere warmtegeleidingscoëfficiënt en de relatief hoge warmtecapaciteit en voor bruinkool door de zeer lage warmtegeleidingscoëfficiënt en de hogere warmtecapaciteit van het materiaal.

3 Methodes

3.1 Benadering locatie-specifieke ondergrondcondities

Het uitgangspunt voor de simulaties van iedere verkenning was om voor de verschillende locaties zoveel mogelijk de locatie-specifieke condities te benaderen. Vooral nog was er echter voor geen van de locaties gedetailleerde informatie over de ondergrond beschikbaar (bijvoorbeeld uit een proefboring of geofysische meting beschikbaar). Daarom is voor het opstellen van een ondergrondbeschrijving voor iedere locatie zoveel mogelijk gewerkt met de best beschikbare informatie. Soms waren dit slechts regionaal beschikbare inzichten. Waar data voor bepaalde parameters hiervoor ontbrak is gewerkt met bekende relaties met diepte om rekening te houden met de verschillen in diepte op de verschillende locaties. Bij het niet beschikbaar zijn van zulke relaties voor bepaalde parameters zijn er op basis van literatuur of expert kennis realistische waarden aangenomen die op alle locaties zijn toegepast. Dit is in meer detail beschreven in de rapportage van alle verkenningen. De belangrijkste uitgangspunten worden hier beschreven.

Laagopbouw

De locatie-specifieke opbouw van de ondergrond is uitgezocht tot 50 à 100m onder de diepste laag die is onderzocht als opslag-aquifer voor de HTO Tabel 3-1. De opbouw van de verschillende lagen is onderverdeeld vanaf maaiveld in watervoerende (aquifers) en afsluitende lagen (aquitards). Er kunnen meerdere aquifers en aquitards aangesloten zijn, maar wel andere geohydrologische parameters hebben.

Geohydrologische parameters

De horizontale doorlatendheid K_h (m/d) is bepaald per laag. Dit is voornamelijk gebaseerd o.b.v. het regionale Regis II model en indien beschikbaar ook o.b.v. metingen die relatief dicht bij de bronlocatie zijn gedaan (bv. bij een nabijgelegen WKO systeem).

Om de beweging van het grondwater te kunnen modeleren is naast de horizontale doorlatendheid ook de verticale doorlatendheid K_v benodigd. Door de wijze waarop het materiaal is afgezet, is de verticale doorlatendheid in principe altijd kleiner dan de horizontale doorlatendheid. Omdat de waarde van de verticale doorlatendheid niet bekend is, wordt er gewerkt met een anisotropie factor om de verticale doorlatendheid te bepalen o.b.v. de horizontale doorlatendheid. De anisotropie factor (a) is gedefinieerd als:

$$a = \frac{K_h}{K_v} \quad (4)$$

Voor dit onderzoek is er gebruikt gemaakt van: $a=2$ voor zand (aquifers) en $a=3$ voor klei (aquitards), Tabel 3-1. De verticale doorlatendheid is voornamelijk van invloed op de stroming in de aquifers. Voor de aquifers (zand) is er gekozen voor een waarde van 2. Dit is een relatief lage anisotropie, een anisotropie van 5 of 10 is ook gebruikelijk. De verticale doorlatendheid krijgt dus een relatief grote waarde toegewezen.

De porositeit is net zoals de verticale doorlatendheid niet bekend. Over het algemeen neemt de porositeit af met grote diepte door de druktoename bij grotere diepte. Om deze verandering mee te nemen in de ondergrond karakterisatie is er gebruik gemaakt van athy's law (Hantschel & Kauerauf, 2009):

$$\phi_{zand}(z) = \phi_{zand(z=0)} \frac{0.31-z}{1000}, \phi_{klei}(z) = \phi_{klei(z=0)} \frac{0.83-z}{1000} \quad (5)$$

De porositeit ($\Phi_{z=0}$) is over het algemeen groter voor klei dan voor zand. Voor zand is de waarde 0.41 en voor klei de waarde 0.6 aangenomen op basis van Hantschel and Kauerauf (2009). Over een diepte van

400m neemt de porositeit van klei bijna 30% af, terwijl voor zand de porositeit over dit diepte interval slechts af 12% afneemt.

Temperatuur ondergrond

De temperatuur in de ondergrond neemt toe met de diepte o.b.v. de geothermische gradiënt. De geothermische gradiënt in Nederland bedraagt 2 à 3 °C per 100m. Voor dit onderzoek is de volgende relatie gebruikt:

$$T(z) = T_{\text{maaiveld}} + (0.023 * z) \quad (6)$$

Met z de diepte in meters en T_{maaiveld} de gemiddelde temperatuur aan maaiveld, aangenomen als 10 °C. De temperatuur in de ondergrond kan dus >10 °C variëren tussen maaiveld en de diepste lagen die worden beschouwd in de verkenningen (bv. Tabel 3-1).

Tabel 3-1 Voorbeeld van ondergrond opbouw (locatie Heerhugowaard) gebruikt voor de simulaties van de verkenningen (lichte kleur: aquifers, donkere kleur: aquitards)

Laag nummer	Diepte bovenkant	Dikte	Kh	Kv	Natuurlijke grondwater temperatuur	Porositeit	Type	Naam formatie
1	0	20	4.0	1.3	10.2	0.59	aquitard	HLC, BXz4
2	20	13	21.0	10.5	10.6	0.41	aquifer	KRz2,3
3	33	20	14.0	7.0	11.0	0.40	aquifer	Eez1,k2,z2,3
4	53	2	25.0	12.5	11.2	0.40	aquifer	DRz1,2,3
5	55	13	20.0	10.0	11.4	0.40	aquifer	URz2,3,4,5
6	68	7	34.0	17.0	11.6	0.40	aquifer	STz2
7	75	22	29.0	14.5	12.0	0.40	aquifer	APz1
8	97	3	33.0	16.5	12.3	0.40	aquifer	PZWAz2
9	100	115	59.0	29.5	13.6	0.39	aquifer	PZWAz3
10	215	30	7.0	0.0	15.3	0.38	aquifer	PZc
11	245	8	16.0	8.0	15.7	0.38	aquifer	PZWAz4
12	253	2	6.0	3.0	15.8	0.38	aquifer	MSz1
13	255	15	0.0	0.0	16.0	0.48	aquitard	MSk1
14	270	40	4.0	2.0	16.7	0.37	aquifer	MSz2
15	310	50	0.0	0.0	17.7	0.45	aquitard	MSk2
16	360	20	13.0	6.5	18.5	0.37	aquifer	MSz3
17	380	10	0.0	0.0	18.9	0.44	aquitard	MSc klei
18	390	20	7.0	3.5	19.2	0.36	aquifer	MSc zand
19	410	5	0.0	0.0	19.5	0.43	aquitard	MSc klei
20	415	2	4.0	2.0	19.6	0.36	aquifer	MSz4
21	417	3	0.0	0.0	19.6	0.42	aquitard	OOK1
22	420	10	6.0	3.0	19.8	0.36	aquifer	OOz2
23	430	25	1.0	0.0	20.2	0.41	aquitard	OOc

3.2 Modelbeschrijving SEAWATv4 zoals gebruikt voor verkenningen WINDOW

De numerieke simulaties zijn uitgevoerd met het grondwatermodel SEAWATv4 Langevin (2009). Dit model gebruikt is een koppeling tussen het grondwatermodel MODFLOW en het transport model MT3Ds (Harbough et al., 2000; Zheng & Wang, 1999). Het numerieke schema van MODFLOW (finite differences) wordt opgelost met de PCG solver (Hill, 1990). SEAWATv4 wordt bestuurd met behulp van het floy-model, dat gebruik maakt van de python-omgeving (Bakker et al., 2016).

SEAWATv4 heeft de capaciteit om dichtheidsstroming te simuleren bij verschillende temperatuur en saliniteit van het grondwater. Bij deze simulaties wordt er vanuit gegaan dat er geen water wordt gemengd van verschillende saliniteiten (bv. uit verschillende grondwaterpakketten). Daardoor is alleen een verschil in temperatuur van invloed op de berekende dichtheid en viscositeit. De viscositeit en dichtheid zijn niet-lineair afhankelijk van de temperatuur, Figuur 3-1 (van Lopik et al., 2016). Dit wordt in SEAWATv4 berekend d.m.v. de volgende vergelijkingen.

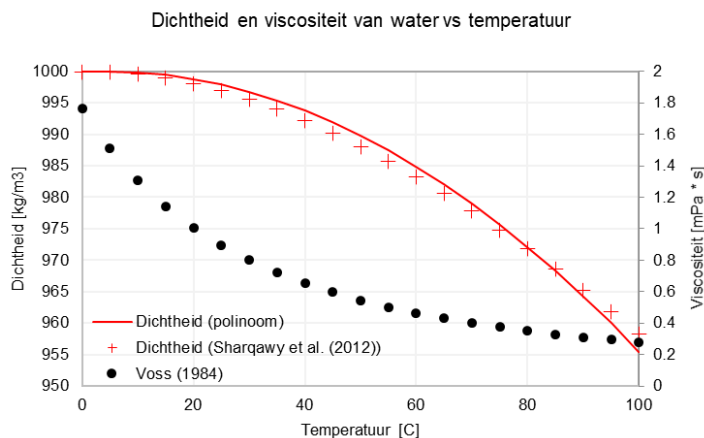
Viscositeit is berekend volgens Voss (1984):

$$\mu(T) = 2.494 \cdot 10^{-5} \cdot \left(10^{\frac{248.37}{T+133.15}}\right) \quad (7)$$

Standaard rekt SEAWAT met een lineaire relatie tussen de species (temperatuur) en de dichtheid (Langevin, 2009). In werkelijkheid is de relatie tussen dichtheid en temperatuur niet-lineair, maar neemt deze met hogere temperatuur steeds sterker af. (Figuur 3-1). Voor de simulaties in deze studie is het standaard SEAWATv4 model daarom aangepast zodat een niet-lineaire relatie kan worden toegepast, aangezien dat een sterke verbetering van simulatieresultaten geeft bij grote temperatuurverschillen (van Lopik et al., 2016). De dichtheid is dus berekend als:

$$\rho(T) = \rho_f - \frac{(T-4)^2}{207} \quad (8)$$

Deze vergelijking is een benadering van de vergelijking opgesteld door Sharqawy et al. (2012), Figuur 3-1.

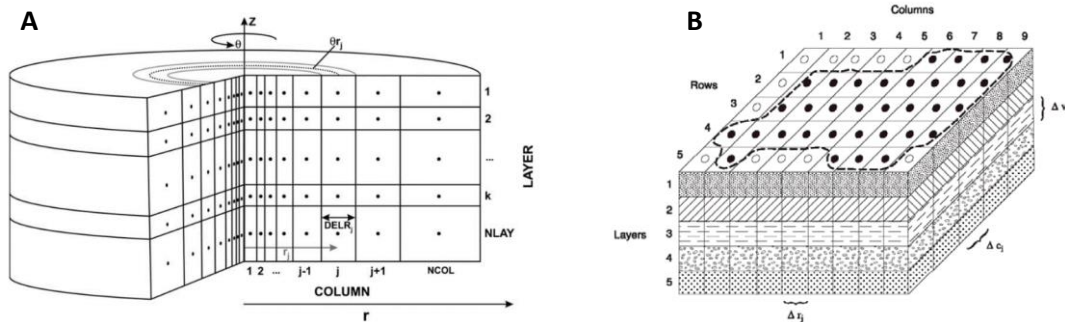


Figuur 3-1 Afhankelijkheid van viscositeit en dichtheid van water bij oplopende temperatuur.

3.2.1 Grid en discretisatie

De simulaties zijn op twee manieren uitgevoerd, met een axisymmetrisch model en met een 3D model. Axisymmetrische simulaties hebben als voordeel dat rekentijden klein zijn t.o.v. 3D simulaties omdat het aantal benodigde rastercellen wordt geminimaliseerd (Langevin, 2008). Met axisymmetrische

simulaties is het dus mogelijk om een hoge verticale en horizontale resolutie te gebruiken met relatief kortere rekentijden. Echter, bij axisymmetrische simulaties wordt er slechts 1 bron gesimuleerd, uitgaande van radiale symmetrie t.o.v. die bron (Figuur 3-2A). Het is dus niet mogelijk om laterale verschillen en interactie te beschrijven zoals natuurlijke grondwaterstroming, horizontale heterogeniteit en het effect van meerdere bronnen. Het axisymmetrische model is dus alleen bruikbaar voor het simuleren van één bron. Het is voor de verkenningen gebruikt om de hete bron van iedere variant in hoog detail door te rekenen. Het 3D model dat is gemaakt voor de verschillende verkenningen is gebruikt om het gehele HTO systeem te modelleren met zowel hete en warme bronnen (Figuur 3-2B).



Figuur 3-2 A) Schematische weergave van een axisymmetrisch grid. De gemodelleerde bron bevindt zich in het midden. De cellen in de radiale richting (r) worden groter naar buiten toe (Langevin, 2008). B) Voorbeeld van een 3D model grid met verschillende lagen (Harbaugh et al., 2000).

Discretisatie en randvoorwaarden

De ruimtelijke discretisatie (grootte modelcellen) is verschillend voor het axisymmetrische model en het 3D model.

Het axisymmetrische model heeft voor de verticale cellen in het model een 0.5m grootte. De horizontale discretisatie start met een grootte van 1m dicht bij de bron en verder van de bron af (na 150m) worden de cellen logaritmisches groter richting de buitenrand van het model. Deze bevindt zich op voldoende (minimaal 1250m) afstand van de bron. Op basis van voorafgaande tests werd namelijk geen verschil gedetecteerd wanneer de rand van het model verder weg werd geplaatst. Voor het 3D model is een grovere discretisatie gebruikt. De verticale grootte van de cellen is 1m en in het midden van het model (waar de bronnen zijn) is de horizontale celgrootte 5m. Naar buiten toe neemt die toe naar maximaal 50m celgrootte. De rand van het model bevindt zich op minimaal 1000m vanaf de rand van de bronnen. Wanneer een kleinere horizontale celgrootte werd gebruikt werden vergelijkbare resultaten gevonden. De discretisatie van de modelcellen wordt dus als toereikend geacht.

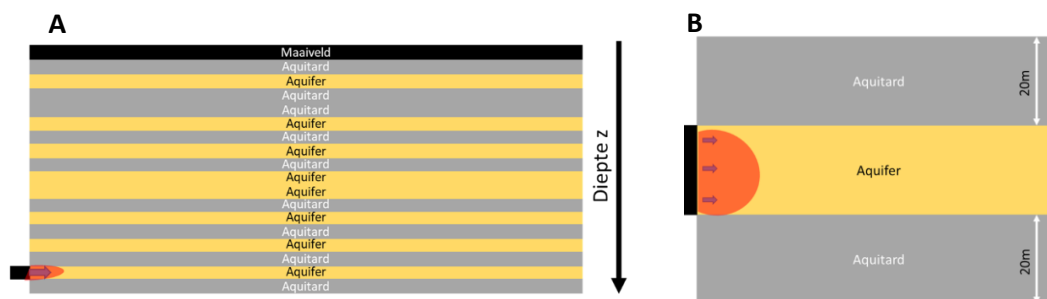
De temporele discretisatie waarmee het model wordt aangestuurd en geüpdatet is per maand. Dit wil zeggen dat het onttrokken/opgeslagen volume wordt gevarieerd per maand. Het gebruik van kleinere tijdstappen (1 week) laat vergelijkbare resultaten zien.

Tabel 3-2 Discretisatie van het SEAWATv4 model voor de axisymmetrisch en 3D simulaties

	Axisymmetrisch	3D
Verticale grote cellen (m)	0.5	1
Horizontale grote cellen	1 - 25	5 - 50
Minimale afstand bron tot rand (m)	1250	1000
Totaal aantal cellen (-)	~75,000 – 85,000	~350,000 – 450,000
Tijdstap (dagen)	30	30
Totale simulatieperiode (dagen)	18,000 (50 jaar)	3,000 (10 jaar)

Laagopbouw

Voor iedere locatie is de ondergrond gekarakteriseerd van maaiveld tot onder het diepste opslagpakket dat wordt beschouwd. Een voorbeeld hiervan is gegeven in Tabel 3-1. Met het axisymmetrische model is de gehele geohydrologische opbouw gebruikt voor de modelsimulaties (Figuur 3-3A). Omdat het 3D model meer reken capaciteit vergt is er bij de 3D simulaties een versimpelde opbouw gebruikt die focust op de opslag-aquifer (Figuur 3-3B). De laagdikte en geohydrologische eigenschappen van het opslagpakket en de afsluitende kleilagen zijn hierbij overgenomen van het axisymmetrische model. Door deze versimpeling was het mogelijk om de reketijden acceptabel te houden (<1 week) en toch de interactie tussen de verschillende bronnen in het 3D model in hoog detail te kunnen simuleren.



Figuur 3-3 A: voorbeeld van gedetailleerde geohydrologische opbouw gebruikt voor de axisymmetrische simulaties. B: versimpelde geohydrologische opbouw, gebruikt voor het 3D model.

3.2.2 Uitgangspunten en aannames

Thermische model parameters

De thermische eigenschappen van de aquifers en de aquitards in de ondergrond zijn berekend gebaseerd op het materiaal en de porositeit van de specifieke laag, Tabel 2-1. De lagen die zijn bestempeld als aquifer worden beschouwd als zandlagen, de lagen die zijn bestempeld als aquitard worden beschouwd als klei lagen. De volgende aannames zijn gedaan:

- Homogene aquifers en aquitards
- Constante thermische conductiviteit (niet beïnvloed door druk of temperatuur)
- Thermische eigenschappen alleen beïnvloed door porositeit

Één waarde voor de thermische geleidbaarheid, dichtheid en de warmtecapaciteit van zand en klei wordt gebruikt voor alle simulaties omdat er niet genoeg informatie beschikbaar is om hier verschillen in te bepalen. De totale thermische geleidbaarheid, dichtheid en warmte capaciteit (bulk) van de laag wordt vervolgens bepaald d.m.v. een gewogen gemiddelde tussen het vaste materiaal (zand of klei) en de hoeveelheid water tussen het vaste materiaal. Dit wordt dus bepaald door de porositeit (die varieert per laag en gemiddeld genomen kleiner wordt bij grotere diepte). Hier wordt als voorbeeld de bulk geleidbaarheid berekend:

$$\lambda_{bulk} = \lambda_{zand/klei} \cdot (1 - \phi) + \lambda_{H_2O} \cdot \phi \quad (9)$$

Andere belangrijke waardes die zijn gebruikt voor SEAWATv4 zijn gegeven in Tabel 3-3.

Tabel 3-3 Geohydrologische en thermische modelparameters gebruikt voor SEAWATv4 (MODFLOW/MT3Ds)

Parameter	symbol	Value	Bron
Laterale dispersie	-	0.5 m	Bloemendal & Hartog (2018)
Transversale dispersie	-	0.05 m	Bloemendal & Hartog (2018)
Dichtheid water (4°C)	ρ_{H2O}	1000 kg/m ³	Bloemendal & Hartog (2018)
Dichtheid vast materiaal	ρ_{solids}	2640 kg/m ³	Bloemendal & Hartog (2018)
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)
Porositeit zand (z=0) *	ϕ_{zand}	0.41	Hantschel & Kauerauf (2009)
Porositeit klei (z=0) *	ϕ_{klei}	0.6	Hantschel & Kauerauf (2009)
Thermische diffusiviteit aquifer**	D_{m_temp}	~0.1 m ² /d	-
Thermische distributie factor	K_{dist}	0.00017 m ³ /kg	-
Horizontale hydraulische conductiviteit ***	K_h	x m/d	Variabel per laag
Verticale hydraulische conductiviteit ***	K_v	x m/d	Variabel per laag

*Varieert met diepte, **varieert met porositeit ***
Dit is specifiek voor iedere laag in het model

Implementatie energetische condities

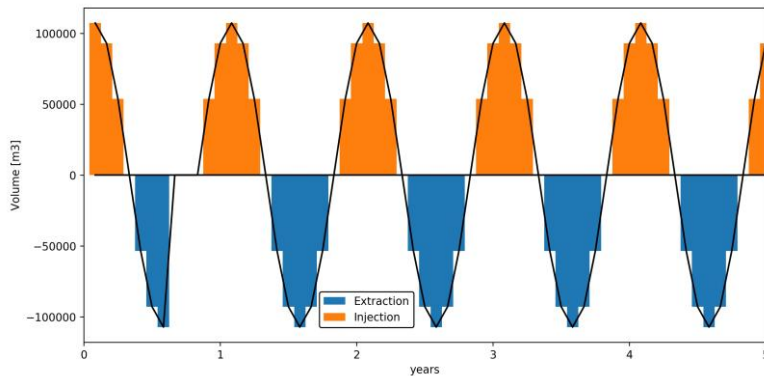
De energetische condities variëren per variant per verkenning. De totale hoeveelheid energie die kan worden opgeslagen in de hete bron bepaalt het jaarlijkse opslagvolume. De afkaptemperatuur bepaalt tot welk temperatuurniveau de energie die wordt onttrokken uit de hete bron nog nuttig kan worden gebruikt.

Opslagtemperatuur en afkaptemperatuur

De afkaptemperatuur is de temperatuur waarbij de energie uit de warmteopslag niet meer nuttig/efficiënt kan worden gebruikt. De temperatuur in de warmteopslag, die bij het begin van de warmtelevering nog de opslagtemperatuur is, daalt na verloop van tijd. De warmteopslag stopt op het moment dat de brontemperatuur lager is dan de afkaptemperatuur. Dit zorgt er dus voor dat het jaarlijks onttrokken volume kleiner kan zijn dan het opgeslagen volume in de hete bron. Het effect van de afkaptemperatuur op het onttrokken volume is zichtbaar in Figuur 3-4. Indien er geen afkaptemperatuur is gespecificeerd in het ontwerp van de locatie(/variant) is de afkaptemperatuur van de hete bron gelijk gezet aan de injectie temperatuur van de warme bron.

Opslagvolume

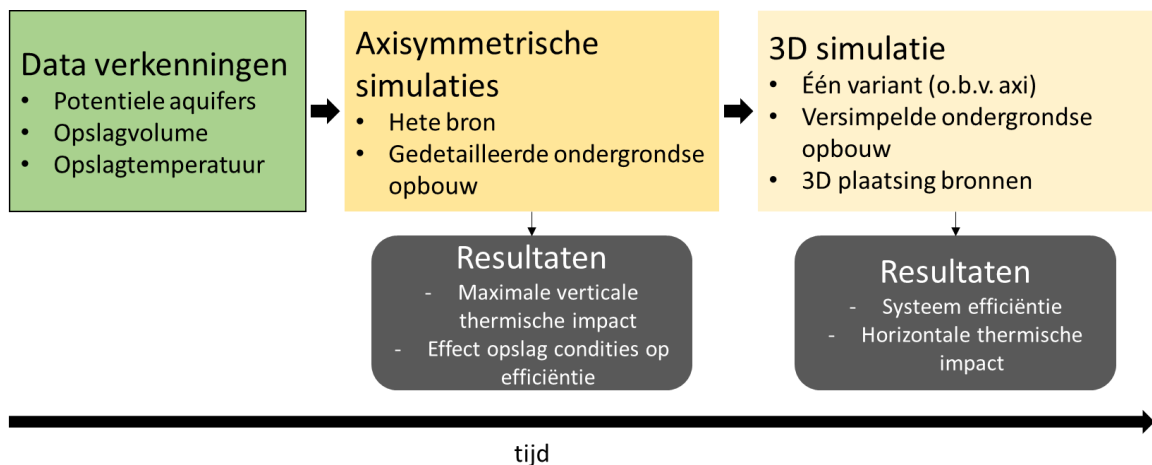
Het opslag volume wordt evenredig verdeelt over het jaar. De tijdstap is per maand. Het jaar is dus onderverdeeld in vier fases: laden (5 maanden), opslag (1 maand), ontladen (5 maanden), rust (1 maand). De laadpiek is over het algemeen in het midden van de zomer, de ontladpiek in het midden van de winter. De volumeverdeling kan dus goed worden gerepresenteerd door een sinus (Figuur 3-4). Het totale opslagvolume wordt dus in 5 stappen geïnjecteerd en na 1 maand rust weer in 5 stappen onttrokken.



Figuur 3-4 Opslagvolume en onttrokken volume tijdens de eerste 5 jaar. De tijdstap is per maand. In jaar 1 zien we dat de afkaptemperatuur er voor zorgt dat de onttrekking wordt afgekapt na 3 maanden.

3.2.3 Workflow modelsimulaties

Om de simulaties voor de verschillende verkenningen zo vergelijkbaar mogelijk te laten verlopen is een vaste workflow gebruikt (Figuur 3-5). Voor iedere verkenning zijn tenminste 2 simulaties gedaan, een axisymmetrische simulatie van alleen de hete bron en een 3D simulatie met alle bronnen. Op basis van de data van iedere verkenning zijn axisymmetrische simulaties gedaan van de hete bron(nen) van het systeem voor 50 jaar. Het aantal varianten dat is doorgerekend per locatie varieerde afhankelijk van de locatie condities. Een variant kan bijvoorbeeld variëren in energetische uitgangspunten (opslagvolume, temperatuur) of de gekozen opslag-aquifer. Dit resulteert er in dat er in totaal 25 axisymmetrische modellen zijn gesimuleerd. Op basis van de axisymmetrische resultaten is per locatie de variant met de gunstigste prestaties gekozen om te gebruiken voor de 3D simulatie. De 3D modellen zijn voor 10 jaar doorgerekend, omdat deze modellen relatief meer reken capaciteit vergen. Er is voor alle zes de locaties één 3D model gesimuleerd.



Figuur 3-5 Workflow van de simulaties van de verkenningen

3.3 Bronlocatie t.b.v. 3D simulaties

Aantal hete en warme bronnen

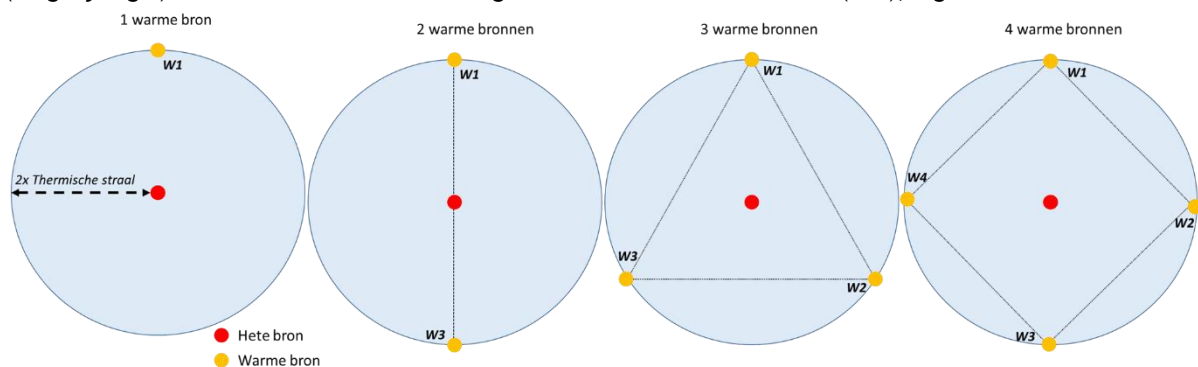
Het aantal hete en warme bronnen dat benodigd is voor het warmteopslag systeem wordt bepaald door het minimale benodigde vermogen dat de bron moet kunnen leveren of moet op kunnen slaan. Vanuit de ervaring die zijn opgedaan met WKO en andere soort bronnen (e.g. drinkwater) zijn een aantal basis regels opgesteld. Bij hogere temperatuur is de dichtheid en viscositeit van water lager, wat er toe leidt dat er een hoger debiet kan worden gehaald bij een hogere temperatuur. Dit zorgt er dus voor dat er voor dat er een ander aantal hete en warme bronnen nodig kan zijn. Het bronontwerp is ontworpen op basis van de regels die staan vastgelegd in de NVOE norm, dit wordt in meer detail besproken in de literatuurstudie brontechniek van WINDOW fase 1 (Bloemendal et al., 2020).

Plaatsing bronnen

Op basis van het axisymmetrische model is een 3D model gemaakt dat het aantal daadwerkelijke bronnen simuleert en de interactie tussen deze bronnen. Bij de 3D simulatie zijn de hete bronnen omringt door de warme bronnen, in de verwachting dat dit de terugwinefficiëntie van het HTO systeem als geheel zou kunnen verbeteren. Recent onderzoek heeft laten zien dat de afstand tussen de hete bron en de warme bron(nen) ongeveer optimaal is bij een afstand van 2 keer de thermische straal (Duijff, 2019). Dit is als uitgangspunt gebruikt bij de 3D simulaties voor de verkenningen.

De hete bronnen in het midden staan zo dicht mogelijk bij elkaar, en functioneren daardoor als één thermisch volume. Dit zorgt er voor dat conductie verliezen naar buiten toe geminimaliseerd worden. De hete bronnen worden in deze 3D simulaties daarom gerepresenteerd als 1 bron terwijl dit in de praktijk een cluster van meerdere bronnen kan zijn.

De plaatsing van de omliggende warme bronnen is altijd op een afstand van 2 keer de thermische straal (vergelijking 1) van de hete bron en evenredig verdeeld rondom de hete bron(nen), Figuur 3-6.



Figuur 3-6 plaatsing van 3D bronnen volgens evenredige verdeling rondom de hete put. De warme bronnen zijn met de klok mee genummerd.

3.4 Beoordelingskader

De HTO simulaties zijn op twee aspecten beoordeeld, de prestaties (terugwinefficiëntie, hoofdstuk 4) en de verspreiding van de warmte naar de ondergrond door de verliezen uit de HTO (temperatuur effecten, hoofdstuk 5).

3.4.1 Terugwinefficiëntie berekeningen

De prestatie van de HTO wordt beoordeeld met de terugwinefficiëntie. De terugwinefficiëntie is de hoeveelheid energie die kan worden teruggewonnen van de totale hoeveelheid energie die is opgeslagen (per jaar):

$$\eta = \frac{E_{uit}}{E_{in}} \quad (10)$$

De terugwinefficiëntie kan worden berekend voor een bron (bv. hete of warme bron) en voor het systeem als geheel. Voor een bron wordt dit berekend o.b.v. het temperatuurverschil tussen het opgeslagen water en de natuurlijke grondwater temperatuur (Figuur 3-7):

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

$$\Delta T_{bron_{in}} = T_{bron_{in}} - T_{natuurlijk} \quad (11)$$

$$\Delta T_{bron_{uit}} = T_{bron_{uit}} - T_{natuurlijk}$$

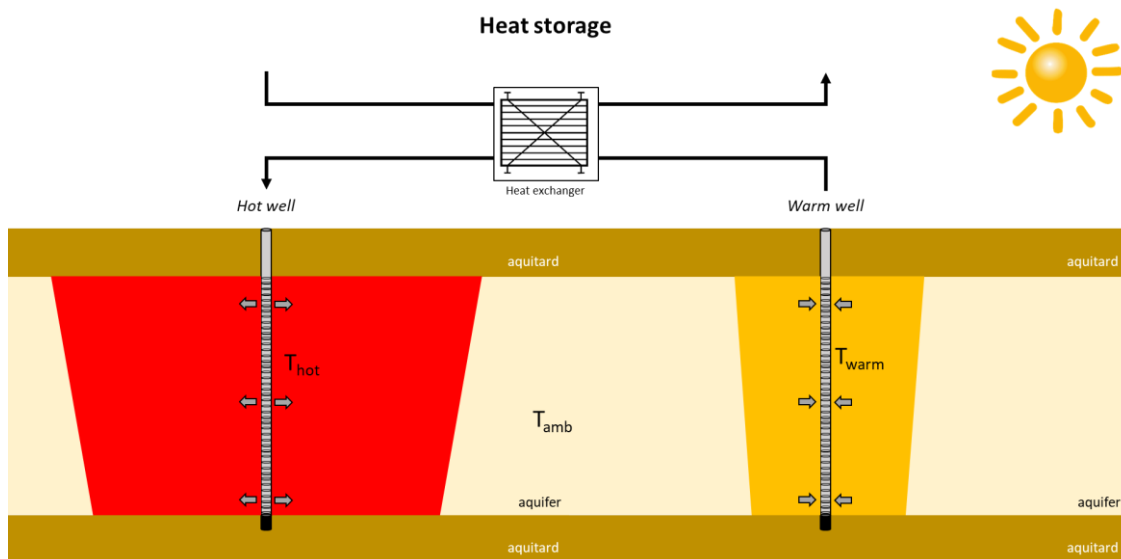
met c_w volumetrische warmtecapaciteit water ($4.2 \text{ MJ/m}^3 / ^\circ\text{K}$). De ΔT_{bron} is voor een bron berekend als het temperatuur verschil met de achtergrond temperatuur ($T_{natuurlijk}$). Dit kan dus gedaan worden voor zowel de hete en de warme bron (Figuur 3-7). De temperatuur van de hete bron(nen) en de warme bron(nen) bepalen samen de terugwinefficiëntie van het systeem.

De terugwinefficiëntie van het systeem wordt dus bepaald o.b.v. het temperatuur verschil tussen de hete en de warme bron:

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

$$\Delta T_{HTO_{uit}} = T_{heet_{in}} - T_{warm_{uit}} \quad (12)$$

$$\Delta T_{HTO_{in}} = T_{heet_{uit}} - T_{warm_{in}}$$



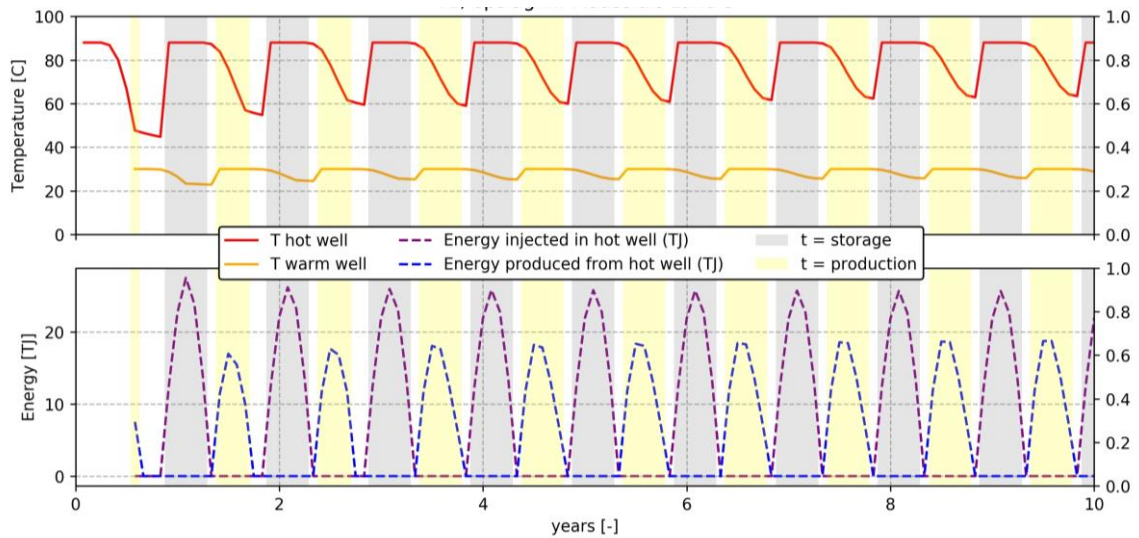
Figuur 3-7 Schematische weergave van een HTO tijdens het laden van het systeem (zomer), met de temperatuur van de hete bron (T_{hot}), warme bron (T_{warm}) en de achtergrond temperatuur (T_{amb}).

Voorbeeld: bepalen terugwinefficiëntie bron en systeem o.b.v. simulaties

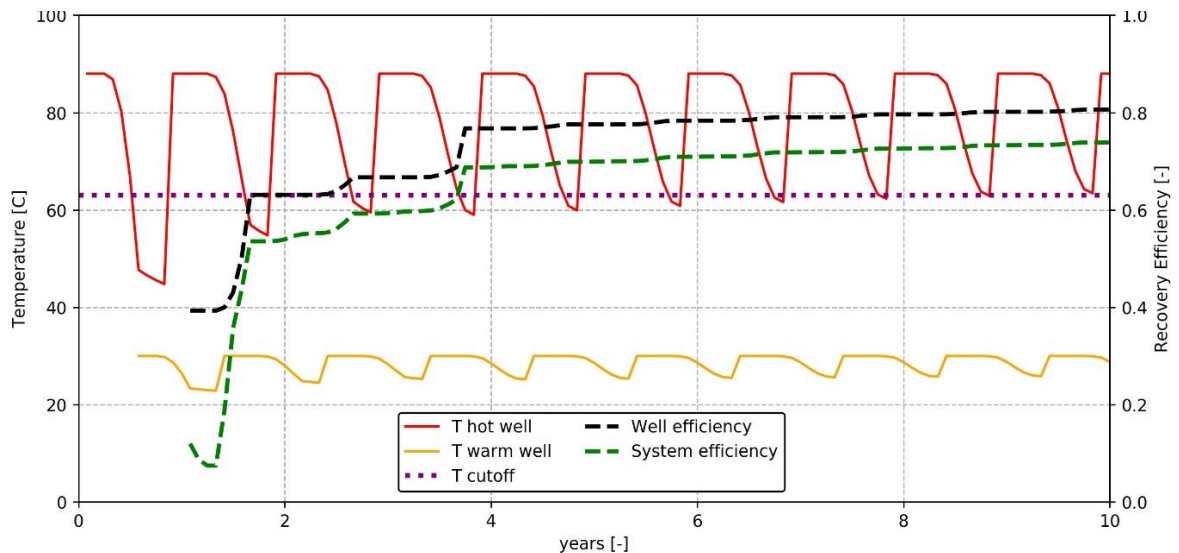
Voor iedere tijdstap wordt met het numerieke model berekend wat de brontemperatuur is. Op basis van de temperatuur van de hete bron, de warme bron en het volume dat wordt verpompt kan worden berekend hoeveel energie er wordt opgeslagen of geproduceerd (Figuur 3-8). Tijdens het laden van de warmteopslag is de hete brontemperatuur gelijk aan de injectie temperatuur, tijdens warmte levering raakt de warmteopslag leeg en daalt de temperatuur van de hete bron (Figuur 3-9). Omdat het systeem ieder jaar meer opwarmt en daardoor beter gaat functioneren, neem de temperatuur van de hete bron steeds meer toe. Dit resulteert er in dat de cutoff temperatuur die is ingesteld (in het voorbeeld $63 \text{ }^\circ\text{C}$)

steeds later in het onttrekking seizoen wordt behaald, en uiteindelijk niet meer wordt gehaald. Dit zorgt voor de snelle steile toename in de terugwinefficiëntie in de eerste jaren in Figuur 3-9.

Zowel de temperatuur van de hete en de warme bron zijn belangrijk in het bepalen van de terugwinefficiëntie van het systeem. De temperatuur van de warme bron (tijdens laden van warmteopslag) bepaalt hoeveel warmte er ieder jaar nodig is om de warmteopslag te vullen (paarse lijn in Figuur 3-8). De hete bron temperatuur bepaalt vervolgens hoeveel energie er kan worden teruggewonnen tijdens warmtelevering (blauwe lijn in Figuur 3-8). Als het systeem als geheel opwarmt daalt de benodigde energie voor opslag, en, neemt de teruggewonnen energie uit de opslag toe. Dit resulteert samen in het verbeteren van de terugwinefficiëntie van het systeem.



Figuur 3-8 Voorbeeld van resulterende energie die opgeslagen en geproduceerd kan worden a.d.h.v. de temperatuur van de hete en warme bron. Grijs = laden van de HTO, geel = ontladen (levering), wit= opslag.

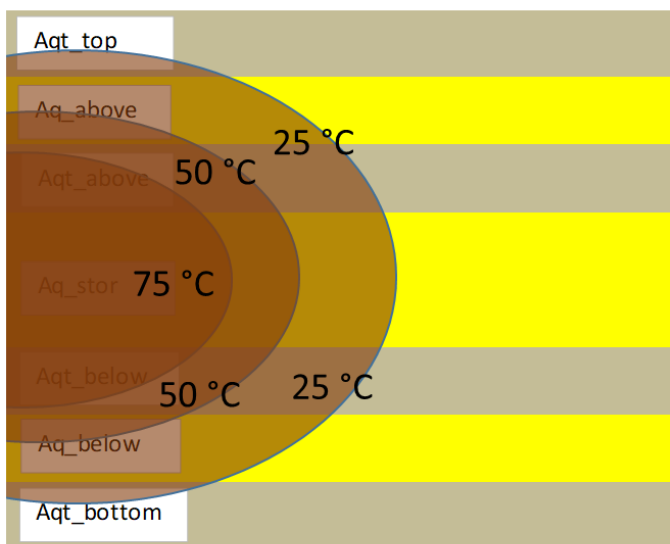


Figuur 3-9 Voorbeeld van een resultaat van het jaarlijkse systeem en de terugwinefficiëntie van de hete bron van een simulatie voor de verkenningen.

3.4.2 Temperatureffecten van de HTO in de ondergrond

De effecten van een HTO op de ondergrond kunnen worden beschreven door te kijken naar de temperatuurverandering in de ondergrond met verloop van tijd. Dit kan goed inzichtelijk worden gemaakt o.b.v. de modellen die zijn gemaakt voor het WINDOW project. Met de axisymmetrische modellen kan in groot detail de verticale en horizontale verspreiding vanuit de hete bron worden weergegeven. Deze axisymmetrische modellen worden dus gebruikt om de verspreiding van de temperatuurcontouren in de tijd te volgen in de verticaal (boven en onder de opslag-aquifer) en in de horizontaal (verspreiding in de opslag-aquifer). De maximale verspreiding van warmte wordt gemonitord. Oftewel, de verspreiding van warmte recht boven en onder de hete bron, en, de verspreiding boven in de opslag-aquifer (Figuur 3-10).

De warmteverspreiding ontstaat door het temperatuurverschil tussen de natuurlijke temperatuur van het grondwater en de opslagtemperatuur in de HTO. Dit betekent dat alleen contouren kunnen worden gevolgd die tussen de opslagtemperatuur en de natuurlijke grondwatertemperatuur in liggen. De 25 en de 50 °C contour zijn dus in veel gevallen een logische keuze. Op een diepte tot 500m is de natuurlijke grondwatertemperatuur in Nederland lager dan 25 °C, hierdoor kan de 25 °C dus voor alle simulaties gevolgd worden. De 50 °C contour is daarnaast een contour die voor alle varianten lager is dan de injectietemperatuur en is dus ook beschikbaar voor alle varianten.



Figuur 3-10 Conceptueel overzicht van de temperatuur contouren die worden gevolgd tijdens de thermische effect berekeningen

3.5 Gesimuleerde varianten

De zes verkenningen die zijn gemodelleerd voor het WINDOW project zijn samengevat in Tabel 3-4. Voor de meeste verkenningen zijn meerdere varianten doorgerekend. De variatie aan thermische uitgangspunten en opslagcondities is aanzienlijk. Dit resulteert in een grote variatie aan terugwinefficiënties van de hete bron en het systeem. Varianten 1,2 en 3 voor casus Den Haag zijn bijzonder t.o.v. de andere varianten omdat hier 3 losse zandlagen in de formatie van Maassluis (MSz2, MSz3 en MSz4) zijn gebruikt. De totale laagdikte is dus relatief groot, terwijl de 3 lagen zelf (allen ongeveer -18m) relatief dun zijn. Deze 3 lagen bevinden zich tussen een diepte van (-120 tot -250m).

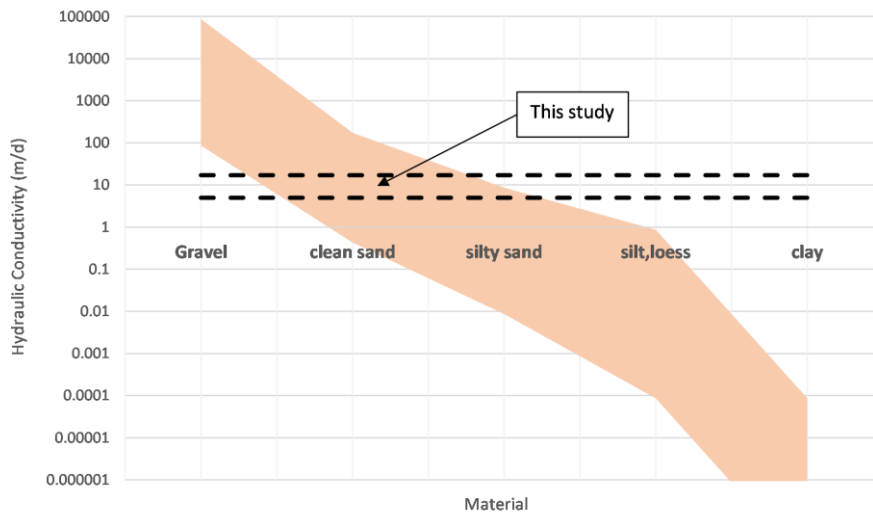
Tabel 3-4 overzicht van alle locaties en daarbij horende varianten die zijn doorgerekend. Terugwinefficiëntie is weergegeven na 10 jaar gebruik HTO.

Locatie	Formatie	Variant	T	T	T	Totale dikte aquifer (m)	Opslag- volume (x1000 m3)	Horizontale doorlatendheid aquifer (m/d)	Systeem	Hete bron	Thermische	Afkap-
			heet (C)	afka p (C)	afkap [C]				terugwin- efficiëntie (-)	terugwin- efficiëntie (-)	straal Rth (m)	temperatuur bereik in 10 ^e jaar? (welke maand?)
Heerhugowaard	MSz3	1	88	30	63	20	380	13	0.74	0.81	97.1	-
Sittard	Brz3	1	88	45	55	32	243	7	0.49	0.76	60	-
Sittard	Brz4	2	88	45	55	50	243	6	0.39	0.69	48	-
Leeuwarden	MSz4	1	88	52	53	25	400	5	0.60	0.84	89.1	-
Leeuwarden	MSz4	2	88	30	30	25	400	5	0.78	0.84	89.1	-
Leeuwarden	MSz4	3	88	40	40	25	400	5	0.72	0.84	89.1	-
Den Haag	MSz2,3,4	1	76	30	32	54	162	17	0.49	0.66	38.6	-
Den Haag	MSz2,3,4	2	74	30	34	54	151	17	0.48	0.67	37.3	-
Den Haag	MSz2,3,4	3	76	40	42	54	181	17	0.36	0.68	40.8	-
Den Haag	OOz2	4	76	30	32	18	165	6	0.74	0.82	67.5	-
Den Haag	OOz2	5	74	30	34	18	154	6	0.72	0.81	65.2	-
Den Haag	OOz2	6	76	40	42	18	200	6	0.64	0.82	74.3	-
Rotterdam	MSz3	1	86	60	64	22	473	10	0.42	0.83	103.3	-
Rotterdam	MSz3	2	86	54	58	22	432	10	0.50	0.82	98.7	-
Rotterdam	MSz3	3	88	40	42	22	369	10	0.64	0.81	91.2	-
Rotterdam	MSz3	4	86	40	44	22	369	10	0.64	0.81	91.2	-
Rotterdam	OOz2	5	86	60	64	25	549	6	0.47	0.85	104.4	-
Rotterdam	OOz2	6	86	54	58	25	504	6	0.57	0.85	100	-
Rotterdam	OOz2	7	88	40	42	25	441	6	0.70	0.84	93.6	-
Rotterdam	OOz2	8	86	40	44	25	441	6	0.70	0.84	93.6	-
Delft	MSz1	1	73	53	63	50	935	10	0.46	0.77	100	Maand 5
Delft	Omme	2	73	53	63	50	935	15	0.41	0.74	100	Maand 5
Delft	MSz1	3	73	33	35	50	935	10	0.75	0.87	100	-
Delft	Omme	4	73	33	35	50	935	15	0.73	0.83	100	-

3.5.1 Range aan opslagcondities

Doorlatendheid en opslagtemperatuur

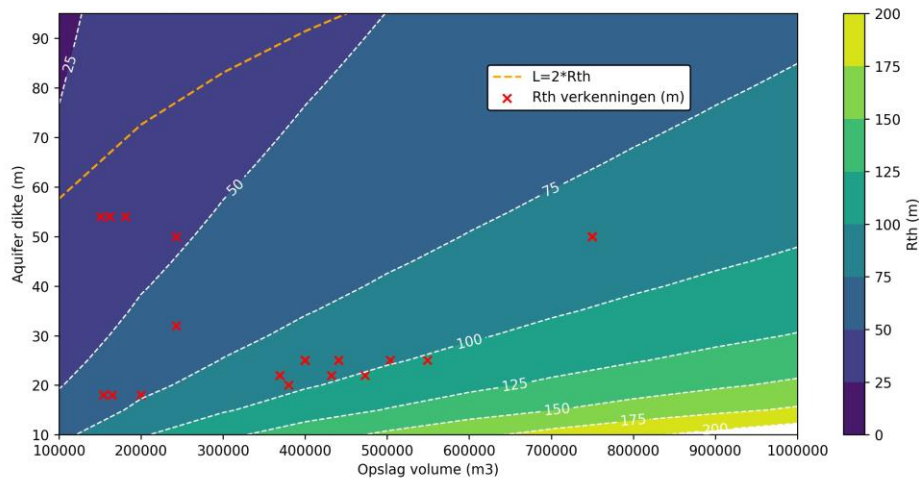
De opslagtemperatuur in de hete bron(nen) verschilt relatief weinig tussen de verschillende varianten (74-88 °C). Echter, de temperatuur van de warme bron(nen) varieert in grotere mate (tussen de 30-60 °C), dit komt bijvoorbeeld door een andere energetische inpassing in het warmtenet of het gebruik van een warmtepomp. De doorlatendheid van de verschillend opslag-aquifers is bepaald o.b.v. de ondergrondse scan. De doorlatendheden voor de verschillende locaties is gegeven in Tabel 3-4. De doorlatendheden (5-17 m/d) variëren relatief weinig tussen de verkenningen. Ter vergelijking, voor zandige type aquifers (eventueel gemengd met silt) kan de doorlatendheid variëren van 100 tot 0.01 m/d (Figuur 3-11). Voor alle locaties zijn dus zeer goed (horizontaal/verticaal) doorlaatbare aquifers gemodelleerd.



Figuur 3-11 Range aan doorlatendheden (logaritmische schaal y-as) voor verschillende materialen (x-as) (Freeze et al., 1979). De range aan doorlatendheden voor deze studie is weergegeven met de zwarte stippellijnen.

Opslagvolume en laagdikte

De opslagcondities, met name de aquifer dikte (18-54m) en het opslagvolume (154,000 - 549,000 m³) variëren aanzienlijk tussen de verschillende locaties. Dit resulteert in een grote range aan thermische straal tussen de verschillende varianten (37.3 - 104.4m), Figuur 3-12. De verhouding tussen de thermische straal en de laagdikte laten zien wat de vorm is van het thermisch volume tijdens opslag (Bij $L=2 \cdot R_{th}$ is de thermische diameter gelijk aan de hoogte van het thermisch volume). Voor bijna alle systemen is de thermische straal een aantal orders groter dan de laagdikte, we spreken dus van relatief platte thermische volumes (bijv. pannenkoekvorm).



Figuur 3-12 Thermische straal bij verschillende opslagvolumes (x) en aquifer diktes (y). Thermische eigenschappen: $c_w=4.2 \times 10^6$ en $c_{aq}= 2.8 \times 10^6$ (Bloemendal & Hartog, 2018). De verschillende varianten voor de verkenningen zijn weergegeven als een rood kruis.

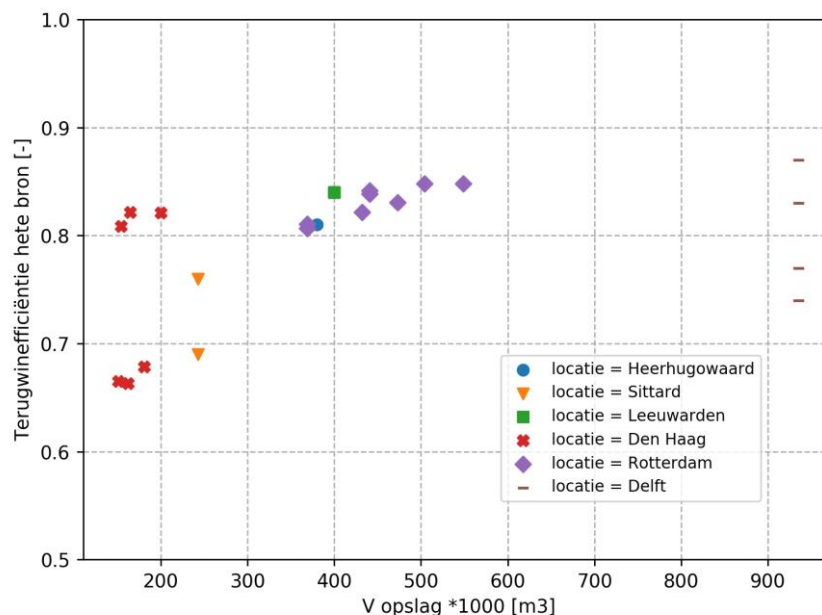
4 Resultaat A: thermische terugwinefficiëntie van HTO

In dit hoofdstuk zijn alle terugwinefficiënties van de numerieke simulaties voor alle verkenningen vergeleken om inzicht te krijgen in welke verschillende locatie-specifieke ondergrondse opslagcondities en energetische uitgangspunten met name de terugwinefficiëntie van de hete bron(nen), warme bron(nen) en het systeem als geheel beïnvloeden. De vergeleken terugwinefficiënties zijn na 10 jaar gebruik van de warmteopslag. In hoofdstuk 4.1 en hoofdstuk 4.2 zijn de resultaten op basis van de axisymmetrische simulaties gepresenteerd. Hier wordt alleen de hete bron gesimuleerd en aangenomen dat de terugwinefficiëntie van de hete en de warme bron gelijk is. In hoofdstuk 4.3 worden de resultaten van de 3D modellen vergeleken. Bij deze resultaten zijn de terugwinefficiënties van alle hete en warme bron(nen) dus bepaald in een simulatie. Het effect van de interactie tussen de bronnen is hier dus van invloed.

4.1 Invloed van locatie-specifieke condities op terugwinefficiëntie hete bron

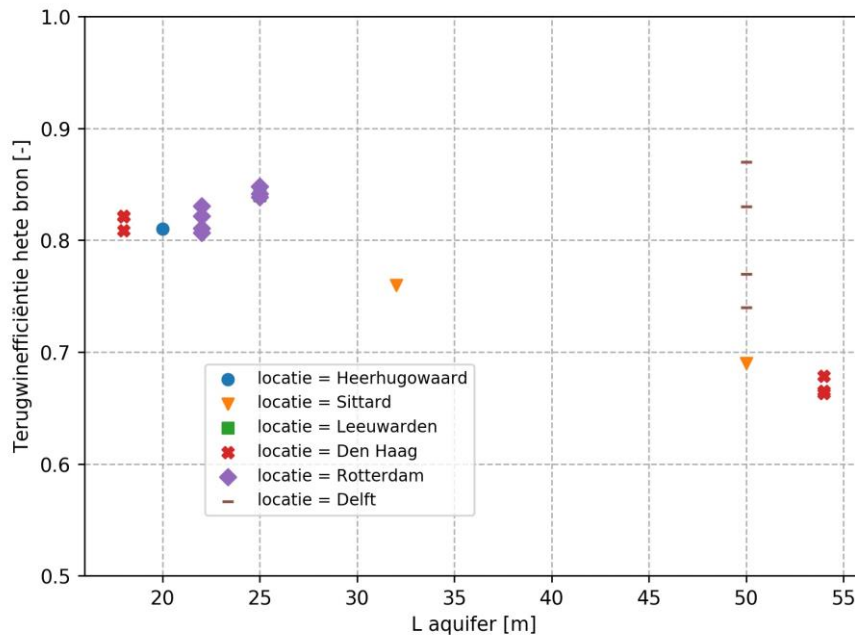
De locatie-specifieke condities die een effect kunnen hebben op de terugwinefficiëntie zijn de locatie-specifieke opslagcondities (volume, laagdikte, geohydrologische kenmerken van de opslag-aquifer) en de locatie-specifieke energetische uitgangspunten (opslag temperatuur, afkaptemperatuur) voor iedere locatie. De range aan condities is weergegeven in Tabel 3-4. Het effect van de grote variatie aan verschillende condities op de terugwinefficiëntie van de hete bron wordt hier onderzocht.

Het opslagvolume varieert aanzienlijk tussen de verschillende varianten (160,000 - 935,000 m³), Figuur 4-1. De laagste terugwinefficiëntie (0.66) is voor een Den Haag variant met een relatief klein opslagvolume. Echter, de variatie voor de systemen van Den Haag (ongeveer zelfde opslagvolume) is groot (0.66 - 0.83). Over het algemeen lijkt de terugwinefficiëntie groter te worden bij groter volume voor de meeste varianten, maar ook voor grote opslagvolumes kunnen relatief lage terugwinefficiënties van de hete optreden (Delft varianten).



Figuur 4-1 Terugwinefficiëntie van de hete bron bij verschillende opslagvolumes na 10 jaar gebruik van de HTO.

Ook de laagdikte varieert aanzienlijk tussen de verschillende varianten (18 -54 m), Figuur 4-2. Het gaat hier bij alle locaties om 1 opslag-aquifer, behalve voor variant 1,2 en 3 van locatie Den Haag (de lage terugwinefficiënties in Figuur 4-1 en Figuur 4-2) waar het opslagvolume wordt verdeeld over 3 zandlagen in de formatie van Maassluis. De terugwinefficiëntie is het laagst bij de varianten met een grote laagdikte. Echter, ook locaties met een grote laagdikte kunnen een relatief hoge terugwinefficiëntie van de hete bron hebben, zie Delft in Figuur 4-2.



Figuur 4-2 Terugwinefficiëntie van de hete bron bij verschillende laagdiktes

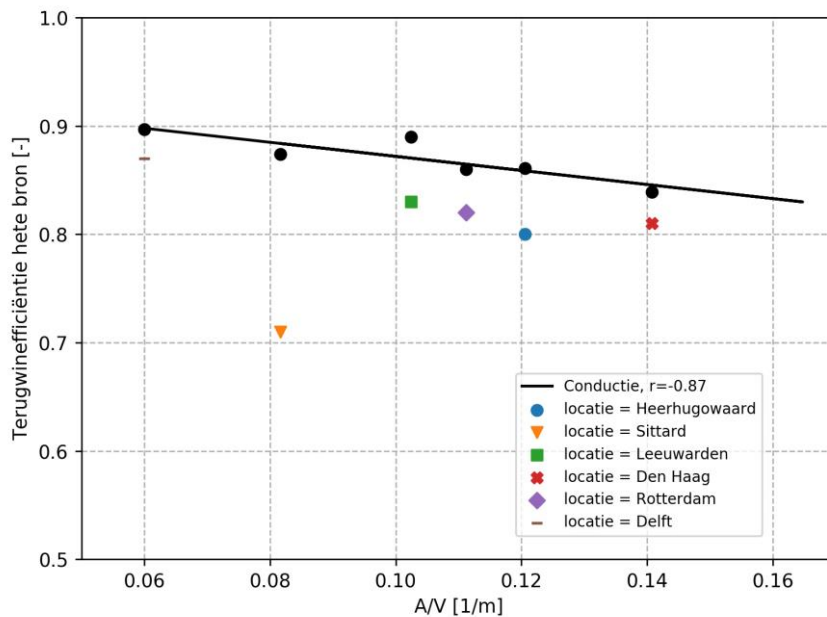
Ook de doorlatendheden, opslagtemperatuur en afkaptemperatuur kunnen mogelijk een effect hebben op de terugwinefficiëntie van de hete bron. Echter, binnen de range aan waardes die gebruikt zijn voor deze parameters voor de beschouwde locaties is de relatie met de terugwinefficiëntie van de hete bron nog minder duidelijk dan bij het opslagvolume en laagdikte (zie Bijlage 1). Het blijkt lastig te zijn om op basis van één van deze vier verschillende parameters een duidelijke relatie met de terugwinefficiëntie te vinden.

4.1.1 Verklaring voor de variatie aan thermische verliezen

Het opslagvolume en laagdikte bepalen samen de geometrie van het ondergrondse opslagvolume, en die bepaalt weer de thermische verliezen door conductie (Bloemendal & Hartog, 2018; Doughty et al., 1982). Daarom zijn er voor de vergelijking tussen de locaties aanvullende simulaties gedaan zonder dichtheidsstroming (voor iedere locatie 1 variant). Bij deze simulaties is met opzet het eventuele effect van dichtheidsstroming op de terugwinefficiëntie niet meegenomen zodat het effect van alleen conductieverliezen op de terugwinefficiëntie inzichtelijk kan worden gemaakt. De conductieverliezen treden op over het oppervlak (A) van een thermisch volume (V), zie ook §2.1. De resultaten zijn gepresenteerd in Figuur 4-3 en vergeleken met dezelfde varianten met dichtheidsstroming. Geen van de simulatieresultaten in Figuur 4-3 ondervindt een effect van de afkaptemperatuur op de terugwinefficiëntie.

Ondanks de sterk variabele locatie-specifieke condities waarmee de simulaties zijn uitgevoerd, in tegenstelling tot de meer conceptuele studie door Bloemendal and Hartog (2018), laten de resultaten op vergelijkbare wijze zien dat de verliezen door conductie toenemen met grotere A/V ratio. De terugwinefficiëntie neemt dus af met grotere A/V ratio (Figuur 4-3). De aanvullende simulatie laten hogere terugwinefficiënties zien t.o.v. de oorspronkelijke simulaties voor de verschillende locaties. Dit laat zien dat dichtheidsstroming zorgt voor extra verliezen en dus een effect heeft op de

terugwinefficiëntie voor alle locaties. Echter, voor de meeste locaties zorgt dichtheidsstroming voor slechts een relatief klein extra verlies t.o.v. de verliezen door conductie (2 tot 5 % extra verlies). Alleen voor locatie Sittard is opdrijving een grote verliespost (>15% extra verlies door dichtheidsstroming).



Figuur 4-3 Terugwinefficiëntie voor simulaties van de hete bron waar geen dichtheidsstroming wordt beschouwd (dus voornamelijk conductie, zwarte bolletjes) en de terugwinefficiënties van de simulaties voor de WINDOW verkenningen waar dichtheidsstroming wel is mee-gesimuleerd (gekleurde symbolen). Er is geen effect van de afkaptemperatuur op de terugwinefficiëntie voor deze locaties. R waarde (Pearson) is -0.87 voor de lineaire regressielijn (zwarte lijn).

Een vergelijking van de afname van de terugwinefficiënties door conductie bij toenemende A/V ratio (zwarte lijn, Figuur 4-4) met alle gesimuleerde locatievarianten laten zien dat voor de locaties Rotterdam, Heerhugowaard, Leeuwarden en een deel van varianten van Delft en Den Haag de verliezen door conductie dominant zijn. Echter, voor 3 locaties zijn er grote verschillen qua terugwinefficiëntie tussen de varianten voor de specifieke locatie. De locatie specifieke condities die deze verschillen mogelijk kunnen verklaren worden hieronder voor de 3 locaties los besproken.

1. Variatie locatie Delft

De resultaten van de simulaties van de vier varianten voor de locatie Delft gaven uiteenlopende terugwinefficiënties (0.74 - 0.87) bij identieke A/V ratio's en dus verwachte conductieverliezen (Figuur 4-4). De variatie tussen deze vier varianten bestaat aan de ene kant uit de beschouwing van 2 verschillende opslag-aquifers van gelijke dikte (Maassluis of Ommelanden) en aan de andere kant 2 verschillende afkaptemperatuurtemperaturen (33 en 63 °C), Tabel 4-1. De hoogste terugwinefficiëntie (0.87) wordt behaald bij variant 3 (opslag in Maassluis, lage afkaptemperatuur) en de laagste terugwinefficiëntie (0.74) voor variant 2 (opslag in Ommelanden en relatief hoge afkaptemperatuur). Bij gelijke afkaptemperatuur laat opslag in de formatie van Maassluis een hogere terugwinefficiëntie (3-4%) zien dan bij opslag in de Ommelanden formatie (Tabel 3-4). Mogelijk komt dit doordat de doorlatendheid lager is voor de Maassluis formatie (10 t.o.v. 15 m/d) waardoor er minder verliezen door opdrijving plaatsvinden. Het lijkt op basis van deze resultaten dus de moeite waard om te verkennen of maar een deel van de aquifer kan worden gebruikt. Het meest bepalend voor de range in terugwinefficiënties van de Delft varianten is echter het verschil in gehanteerde afkaptemperaturen. De twee varianten waar een afkaptemperatuur van 63 °C is gehanteerd bereiken de afkaptemperatuur na 4 maanden onttrekken, wat er in resulteert dat de laatste maand niet wordt benut (13% van volume blijft achter in aquifer). Dit resulteert in een daling van de terugwinefficiëntie van ongeveer 10%.

Tabel 4-1 Variant-specifieke condities locatie Delft

Variant (gesorteerd op terugwin-efficiëntie)	Terugwin-efficiëntie (-)	T _{afkap} (°C)	Laagdikte (m)	Opslagvolume m ³ (per laag)	K _h (m/d)
Variant 3	0.87	33	50	935,000	10
Variant 4	0.83	33	50	935,000	15
Variant 1	0.77	63	50	935,000	10
Variant 2	0.74	63	50	935,000	15

2. Variatie locatie Sittard

Bij de varianten voor locatie Sittard is er een verschil van 15% tussen de terugwinefficiëntie voor variant 1 (terugwinefficiëntie: 0.76, opslag in BRz3) en variant 2 (terugwinefficiëntie: 0.69, opslag in BRz4), Figuur 4-4. Het grootste verschil tussen Brussels zand 3 en 4 is de laagdikte (32 t.o.v. 50m), de doorlatendheid is nagenoeg gelijk (Tabel 4-2). Volgens de A/V relatie resulteert de dikkere laag tot minder conductieverliezen, echter, de terugwinefficiëntie is voor deze variant lager. De relatief grote laagdikte zorgt er dus mogelijk voor dat opdrijving onder deze omstandigheden een groter effect kan hebben.

Tabel 4-2 Variant-specifieke condities Sittard

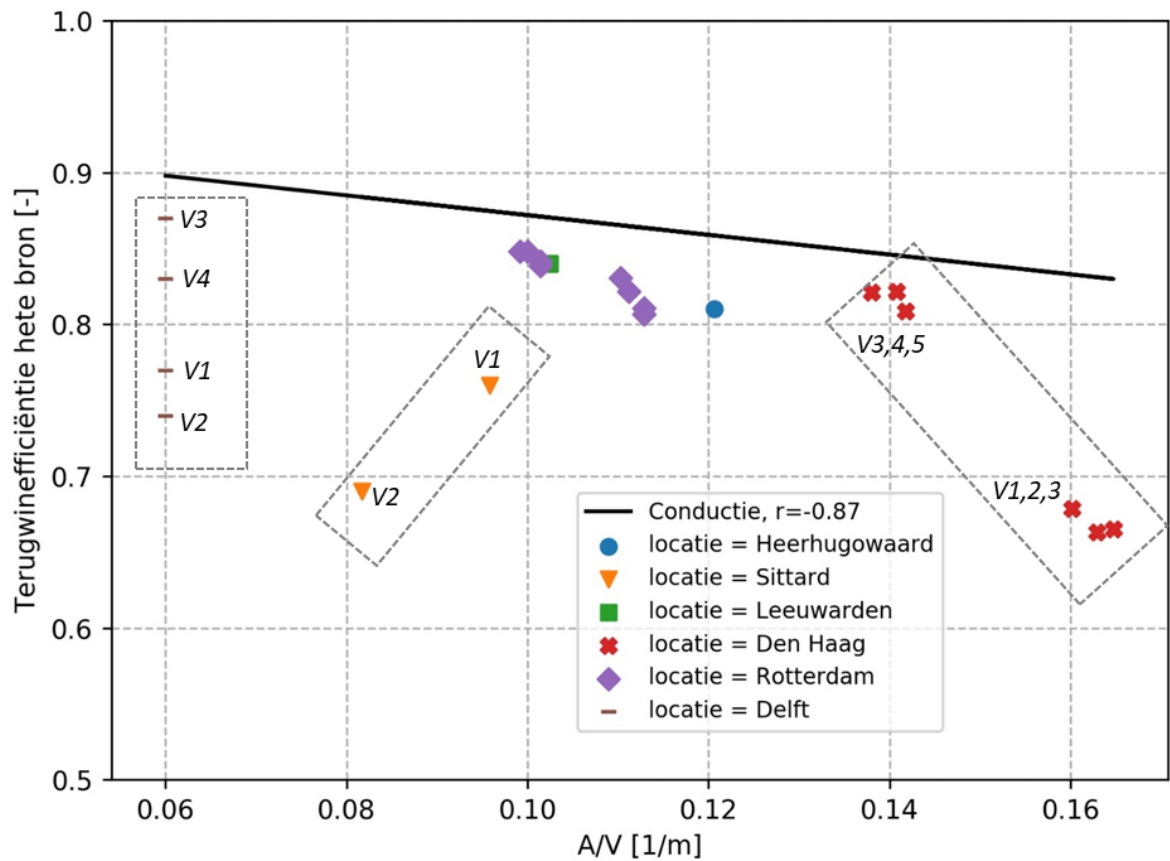
Variant (gesorteerd op terugwin-efficiëntie)	Terugwin-efficiëntie (-)	Laagdikte (m)	Opslagvolume m ³ (per laag)	K _h (m/d)
Variant 1	0.76	32	243,000	7
Variant 2	0.69	50	243,000	6

3. Variatie locatie Den Haag

Bij de locatie Den Haag is er een groot verschil tussen de terugwinefficiëntie van de varianten die zich bevinden in de 3 Maassluis zand 1,2 en 3 (variant 1,2,3, terugwinefficiëntie <0.7) en de Oosterhout aquifer (variant 4,5,6, terugwinefficiëntie >0.8), Figuur 4-4. Een deel van de lagere terugwinefficiëntie kan verklaard worden door de grotere conductieverliezen voor variant 1,2 en 3. Dit komt doordat het opslagvolume bij opslag in Maassluis zand 1,2 en 3 wordt verdeeld over de 3 lagen. Er is dus een relatief klein volume per zandlaag aanwezig, wat vervolgens zorgt voor de grotere A/V ratio (de formatie van Maassluis bestaat uit 3 ongeveer 18m dikke lagen, de formatie van Oosterhout is één 18m dikke laag). Daarnaast heeft de formatie van Maassluis een 3x hogere doorlatendheid (17 t.o.v. 6 m/d) dan de formatie van Oosterhout (Tabel 4-3). Dit resulteert er dus mogelijk in dat hier relatief meer verliezen door opdrijving kunnen optreden. Dit laatste heeft waarschijnlijk het grootste effect, omdat de terugwinefficiëntie nog een stuk lager is dan verwacht wordt o.b.v. de conductieverliezen voor die A/V. Samen kan dit de relatief lage terugwinefficiëntie verklaren voor varianten 1,2 en 3.

Tabel 4-3 Variant specifieke condities Den Haag

Variant (gesorteerd op terugwin-efficiëntie)	Terugwin-efficiëntie (-)	Laagdikte (m)	Opslagvolume m ³ (per laag)	K _h (m/d)
Variant 4,5,6	> 0.8	18m	-160,000	6
Variant 1,2,3	< 0.7	(3x) 18m	-53,000	17



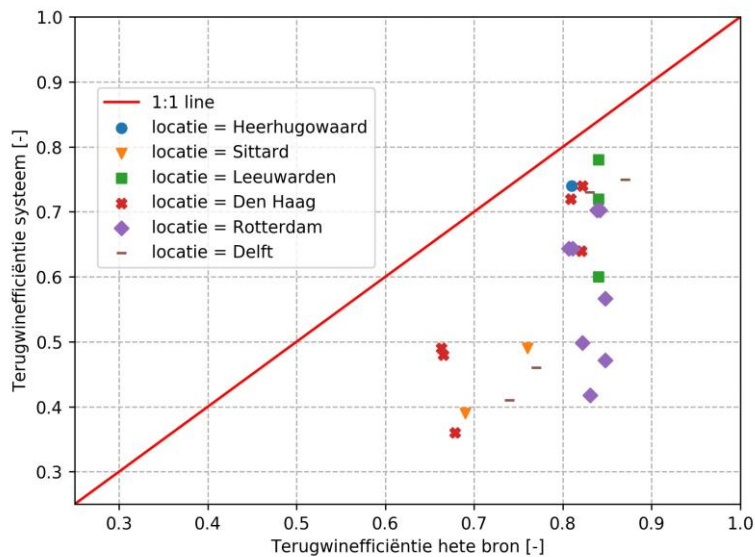
Figuur 4-4 Terugwinefficiëntie van de hete bron voor toenemende A/V voor alle simulatiesresultaten (Bloemendal & Hartog, 2018). Voor drie locaties (Delft, Sittard en Den Haag) zijn de locatie-specifieke condities weergegeven die invloed hebben op de waargenomen variatie in terugwinefficiënties. Verder uitleg staat in de bovenstaande tekst.

4.1.2 Conclusie

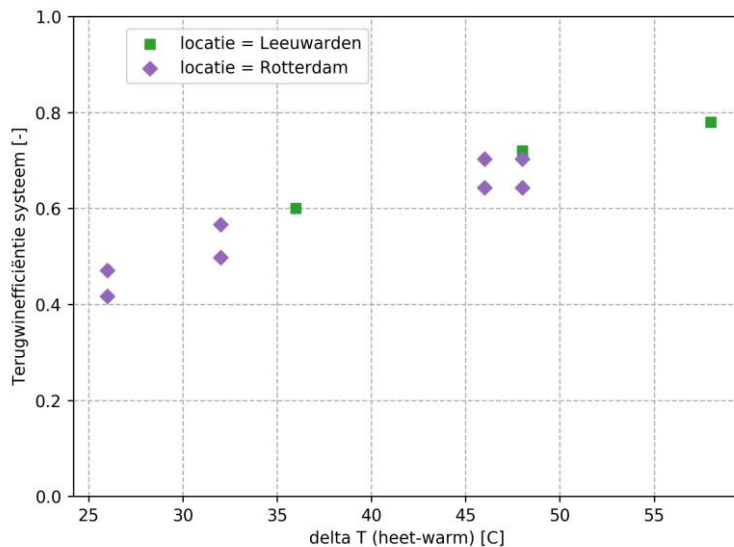
Uit de analyse van locatie-specifieke condities blijkt dat verschillende processen en energetische uitgangspunten van invloed zijn op de terugwinefficiëntie van de hete bron. Voor de meeste locaties is conductie het voornaamste proces dat tot thermische verliezen leidt. Echter, andere oorzaken kunnen er voor zorgen dat er meer thermische verliezen optreden. De afkapt temperatuur is alleen voor de locatie Delft (variant 1 en 2) van invloed op de terugwinefficiëntie. Doordat de afkapt temperatuur wordt bereikt na 4 maanden onttrekking is de terugwinefficiëntie tot bijna 10% verminderd (dit treedt op gedurende de gehele gesimuleerde periode, 50 jaar). Ook kan opdriving zorgen voor extra thermische verliezen. Opdriving is voornamelijk van grotere invloed bij enkele varianten met grotere laagdikte en/of hogere doorlatendheid.

4.2 Bepaling van de terugwinefficiëntie van het systeem

De terugwinefficiëntie van de hete bron, zoals bepaald met de axisymmetrische simulaties en onder aanname van gelijke terugwinefficiëntie voor de warme bron, is de algehele terugwinefficiëntie van het ondergrondse warmteopslagsysteem bepaald (Figuur 4-5). Hiervoor is vergelijking 13 (§3.4.1) gebruikt, uitgaande van het verschil tussen de beoogde opslag temperatuur voor de hete en warme bron. Deze systeemefficiëntie is altijd lager dan de efficiëntie van de hete bron. Dit komt omdat de terugwinefficiëntie van het systeem de resultante is van zowel de temperatuur van de hete bron (tijdens ontladen) maar ook de temperatuur van de warme bron (tijdens laden), zie ook §3.4.1. Hoewel er een positieve relatie bestaat tussen de terugwinefficiëntie van de hete bron en de geschatte terugwinefficiëntie van het systeem, is er een grote variatie zichtbaar in Figuur 4-5. Voor een aantal locaties is de terugwinefficiëntie van het systeem bijna gelijk aan de terugwinefficiëntie van de hete bron (bijv. Heerhugowaard), bij andere locaties is de terugwinefficiëntie van het systeem meer dan 30% lager (bijv. Leeuwarden en Rotterdam). Deze afwijkingen illustreren dat naast de efficiëntie van de bronnen, ook het temperatuurverschil tussen de warme en hete bronnen (ΔT_{HTO}) een sterke invloed heeft op de algehele terugwinefficiëntie van het ondergrondse warmteopslagsysteem (weergegeven voor locatie Rotterdam en Leeuwarden in Figuur 4-6).



Figuur 4-5 De relatie tussen de terugwinefficiëntie van de hete bron en het systeem voor alle simulaties (efficiëntie na 10 jaar).



Figuur 4-6 Terugwinefficiëntie van het warmteopslag systeem bij verschillende ΔT tussen de hete en warme bron ($^{\circ}\text{C}$). Ter illustratie voor Locatie Leeuwarden en Locatie Rotterdam.

Invloed ontwerp temperatuurverschil hete en warme bron (ΔT_{HTO})

Een grotere ΔT_{HTO} is positief voor de efficiëntie van het systeem, bij gelijk blijvende hete bron temperatuur, heeft het verlagen van de warme bron temperatuur dus een positief effect op de terugwinefficiëntie van het systeem. Dit is bijvoorbeeld goed te zien voor de varianten van Rotterdam en Leeuwarden in Figuur 4-6; de terugwinefficiëntie neemt toe met een groter wordende ΔT_{HTO} . Dit is te verklaren omdat een systeem met een grote ontworpen ΔT_{HTO} minder gevoelig is voor temperatuurverliezen in de hete en warme bron. Dit kan worden weergegeven, op basis van de terugwinefficiëntie van de hete en warme bron, met de volgende vergelijking:

$$\eta_{HTO} = \frac{(\Delta T_{HTO} - T_{heet}^{verlies})}{(\Delta T_{HTO} + T_{warm}^{verlies})} = \frac{(\Delta T_{HTO} - \eta_{heet} \cdot (T_{heet} - T_{natuurlijk}))}{(\Delta T_{HTO} + \eta_{warm} \cdot (T_{warm} - T_{natuurlijk}))} \quad (13)$$

Waarbij ΔT_{HTO} het ontworpen temperatuurverschil is tussen de hete en de warme bron en $T_{verlies}$ het gemiddelde temperatuurverlies in de hete bron (tijdens ontladen) en warme bron (tijdens laden).

Voorbeeld: Systeem A heeft een hete en een warme bron. Deze bronnen hebben dezelfde terugwinefficiëntie. Voor de hete bron komt dit neer op een gemiddeld temperatuurverlies van 10 °C, voor de warme bron op een verlies van 5 °C. Systeem A heeft echter een relatief klein ontwerp temperatuur verschil tussen de hete en warme bron ($\Delta T_{HTO} = 25$ °C). Dit resulteert in een terugwinefficiëntie van het systeem van 50%. Om de ΔT_{HTO} te vergroten kan een hogere temperatuur worden gebruikt voor de hete bron of een lagere temperatuur voor de warme bron.

Door de warme bron temperatuur te verlagen zal de efficiëntie van deze warme bron waarschijnlijk iets verbeteren (want lagere temperatuur). Systeem B heeft een lagere warme bron temperatuur en een gelijke hete bron temperatuur t.o.v. systeem A. De $\Delta T_{HTO} = 50$ °C, de terugwinefficiëntie van de hete en warme bron is gelijk, dit resulteert in een temperatuurverlies van 10 °C in de hete bron (gelijk aan systeem A) en een temperatuurverlies van 3 °C in de warme bron. De terugwinefficiëntie van de systeem B is dus 75.5%.

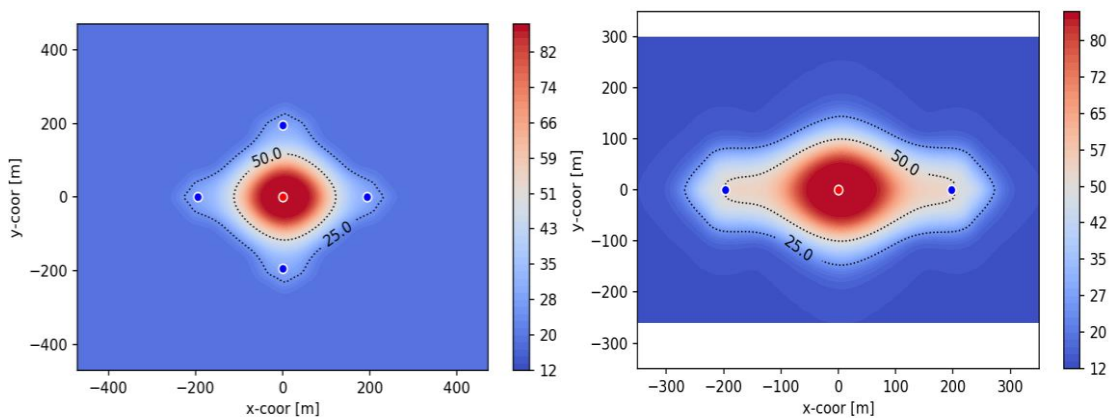
Wanneer de ΔT_{HTO} groter wordt doordat de temperatuur in de hete bron wordt verhoogd, zal aan de ene kant de terugwinefficiëntie van de hete bron afnemen (want hogere temperatuur en bij gelijkblijvend laadvermogen een kleiner opslagvolume) en er dus een groter temperatuurverlies ontstaan in de hete bron. Of de systeemefficiëntie dus hoger wordt hangt af van de mate waarin de terugwinefficiëntie afneemt. Hoe, en of, dit tegen elkaar opweegt is afhankelijk van het specifieke ontwerp en de opslagcondities.

4.3 Effect van interactie hete en warme bronnen (3D simulaties)

Voor iedere verkenning (6 locaties) is een 3D simulatie gedaan. Deze zijn uitgevoerd o.b.v. exact dezelfde uitgangspunten als de overeenkomende varianten bij de axisymmetrische simulaties (Tabel 4-4). De resultaten van de 3D simulaties zijn dus geanalyseerd en vergeleken met de resultaten van het axisymmetrische model om de invloed van het positioneren van warme bronnen rond de hete bron te bepalen. Iedere locatie heeft een specifiek aantal warme bronnen, variërend van 1 tot 5 hete bronnen en 2 tot 8 warme bronnen (Tabel 4-4). het bovenaanzicht van twee locaties is als voorbeeld weergegeven in Figuur 4-7.

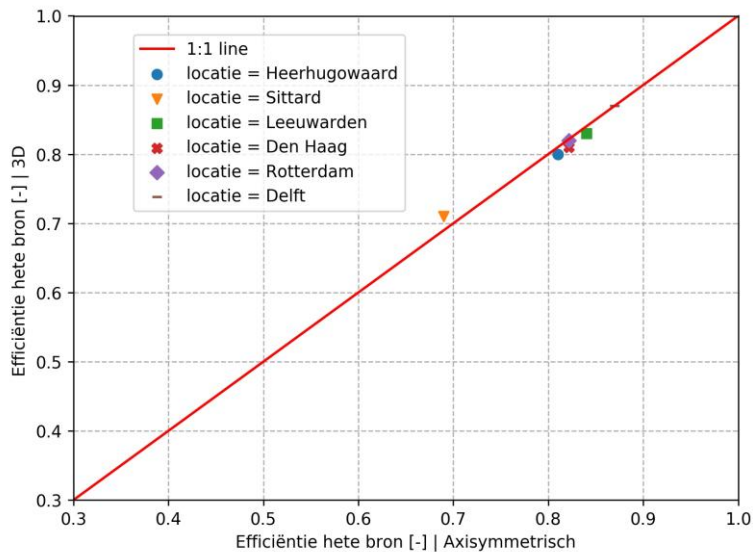
Tabel 4-4 Gegevens van de 3D simulaties

Locatie	Formatie	Variant	Laag dikte	Opslag volume (1000 m ³)	Thermische straal (R _{th})	Bronnen heet (-)	Bronnen warm (-)
Heerhugowaard	MSz3	1	20	380	97.1	2	4
Sittard	Brz4	2	50	243	48	1	2
Leeuwarden	MSz4	3	25	400	89.1	5	7
Den Haag	OOz2	4	18	165	67.5	3	4
Rotterdam	MSz3	2	22	432	98.7	2	2
Delft	MSz1	3	50	935	100	4	8



Figuur 4-7 Voorbeeld van een bovenaanzicht van de 3D simulatie na 10 jaar voor links: Heerhugowaard variant 1 (4 warme bronnen) en rechts: Rotterdam Nesselande variant 3 (2 warme bronnen).

In Figuur 4-8 zijn de terugwinefficiënties van de hete bron van de 3D simulaties vergeleken met die van het axisymmetrische model. Voor alle locaties is de terugwinefficiëntie nagenoeg gelijk voor beide modellen. De versimpeling van de geohydrologische opbouw en de plaatsing van warme bronnen rondom de hete bron hebben dus nagenoeg geen effect op de efficiëntie van de hete bron. Ook laat dit zien dat de afstand van 2 keer de thermische straal tussen de hete en warme bronnen niet tot kortsluitstroming van warmte leidt. Locatie Sittard, met een relatief lage efficiëntie, laat als enige locatie een kleine toename zien qua hete bron terugwinefficiëntie voor het 3D model. Opdrijving heeft voor deze locatie een relatief grote rol, zoals bepaald in hoofdstuk 4.1. Dit zou erop kunnen wijzen dat de interactie tussen de warme bronnen met de hete bron het negatieve effect van de opdrijving (en dus afdrijving) van warmte op de terugwinefficiëntie van de hete bron wat kan verminderen.

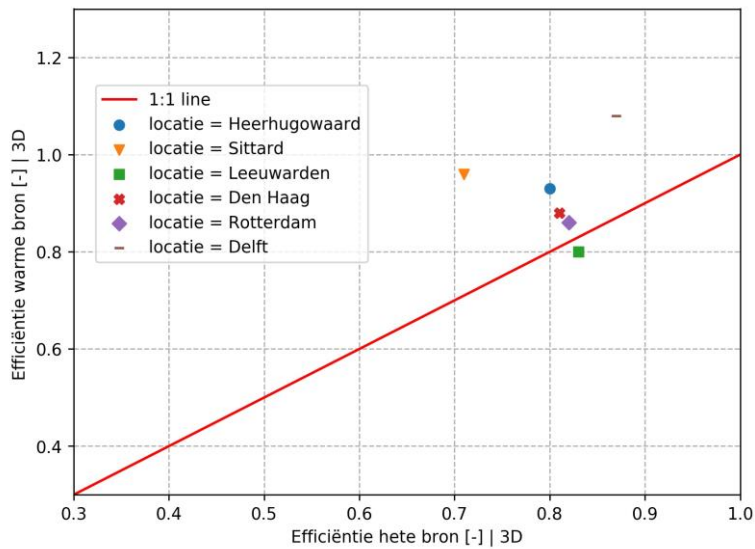


Figuur 4-8 Terugwinefficiëntie van de hete bron berekent met het axisymmetrische (x-as) en 3D model (y-as).

In Figuur 4-9 is voor de resultaten van het 3D model de efficiëntie van de warme bron(nen) vergeleken met de efficiëntie van de hete bron. De efficiëntie van de warme bronnen zijn over het algemeen hoger dan de hete bron efficiëntie. Alleen voor de locatie Leeuwarden is de terugwinefficiëntie van de warme bron lager voor het 3D model.

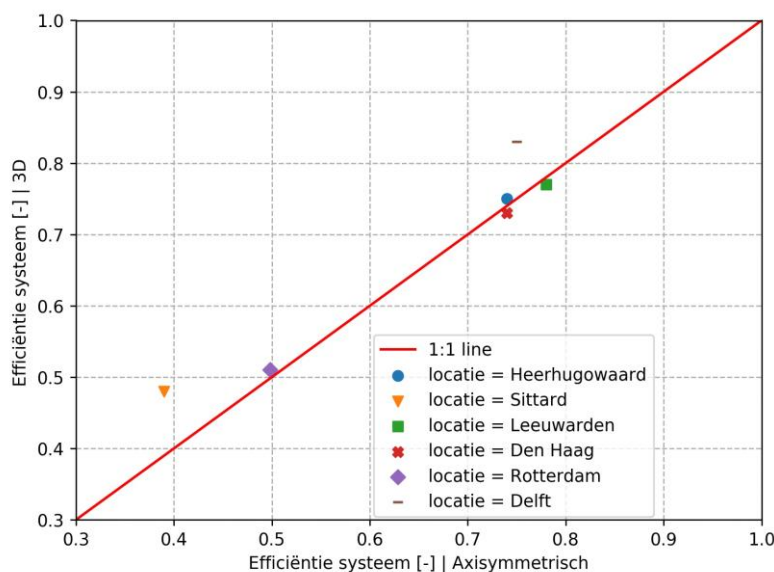
Hoewel voor de 3D simulaties geselecteerde varianten de bijdrage van oprijving aan de thermische verliezen beperkt was, kan de hogere terugwinefficiëntie van de warme bronnen ten opzichte van de hete bronnen kunnen allereerst deels verklaard worden door hun lagere temperatuur. Hierdoor is de bijdrage van oprijving aan de thermische verliezen bij de warme bronnen lager. Anderzijds kan er door de interactie met de hete bronnen een positief effect optreden doordat de warme bronnen de verliezen uit de hete bron (deels) kunnen opvangen. Dit kan zorgen voor een positieve interactie naarmate de thermische energie die verloren gaat uit de hete bron zich naar buiten toe uitbreidt. Dit effect is dus groter voor systemen waar de hete bron relatief veel energie verliest (e.g. Sittard) en kan er zelfs voor zorgen dat het ontvangen verlies uit de hete bron zo hoog is dat de terugwinefficiëntie in de warme bron groter dan 100% wordt. Naar verwachting bepaalt de afstand tussen de hete en warme bronnen de snelheid en mate waarmee het verlies uit de hete bron de terugwinefficiëntie van warme bron(nen) positief beïnvloedt.

Hoewel de verspreiding van een groter aantal warme bronnen rond de hete bron dus een groter deel van de verliezen uit de hete bron zou kunnen opvangen, kan dit ook een netto negatief effect hebben op de terugwinefficiëntie van de warme bronnen omdat het opslagvolume teveel wordt verspreid over losse warme opslagvolumes. Dit zorgt er voor dat er meerdere losse thermische volumes (toename A/V) ontstaan in de ondergrond die dus netto meer conductieverliezen kunnen ondervinden. Het laatste aspect heeft dus waarschijnlijk de overhand voor de locatie Leeuwarden (7 warme bronnen, Tabel 4-4), de enige locatie waar de terugwinefficiëntie van de warme bronnen lager is dan voor de hete bron. Op basis van deze inzichten is er dus een optimalisatie mogelijk tussen het clusteren van warme bronnen versus het verspreiden van de warme bronnen om de verliezen van de hete bron op te vangen.



Figuur 4-9 3D model resultaten. Terugwinefficiëntie van de hete bron (x-as) versus de terugwinefficiëntie van de warme bron (y-as).

De terugwinefficiëntie van het systeem is afhankelijk van zowel de terugwinefficiënties van de hete en de warme bron zoals aangetoond in hoofdstuk 4.2. Systemen die een hogere warme bron efficiëntie hebben in het 3D model t.o.v. het axisymmetrische model door de positieve interactie hebben ook een hogere terugwinefficiëntie van het systeem (bijvoorbeeld Sittard en Delft in Figuur 4-10). De verschillen met de ingeschatte systeemefficiëntie o.b.v. het axisymmetrische model (alleen de hete bron gesimuleerd) zijn klein. Dit laat zien dat dit soort simulaties goed bruikbaar zijn om de individuele terugwinefficiëntie van de hete bron te bepalen en de terugwinefficiëntie van het systeem in te schatten van een warmteopslag systeem. De positieve beïnvloeding van de hete bronnen op de warme bronnen in de meeste simulaties resulteert dus in een verhoging van de terugwinefficiëntie van het systeem. De terugwinefficiëntie van het systeem wordt hoger omdat er naarmate de warme bron minder afkoelt er minder energie hoeft worden ingestopt tijdens het laden van het systeem. Echter, omdat de hete bron nog steeds even veel warmte verliest blijft het vermogen van de HTO (tijdens warmtelevering) gelijk.



Figuur 4-10 Systeem efficiëntie berekent met het axisymmetrische model (x-as) en het 3D model (y-as)

4.4 Discussie

4.4.1 Broncondities voor injectie

In de besproken simulaties is de hete bron gerepresenteerd als één thermisch volume. In werkelijkheid zullen er vaak meerdere hete bronnen nodig zijn. Er wordt dus aangenomen dat de hete bronnen zo kunnen worden geplaatst dat het fungeert als een thermisch volume. Tijdens het injecteren van het grondwater ontstaat er drukverhoging rondom de bron die niet te hoog mag zijn om opbarsten tegen te gaan (IF-Technology, 2012). Dit zal voornamelijk bepalen hoe dicht de hete bronnen bij elkaar kunnen worden geplaatst. Echter, omdat de temperatuur hoger is, daalt de viscositeit en dichtheid van het water en wordt de ondergrond beter permeabel voor het warmere water. De drukopbouw zal dus ook lager zijn dan t.o.v. een vergelijkbare situatie bij WKO. Echter, doordat de doorlatendheid groter is, zal het injectiedebiet waarschijnlijk groter worden ontworpen, wat weer resulteert in een grotere drukopbouw. Mogelijk voordeel bij opslag op grotere diepte hierbij is dat er een grotere druk kan worden uitgeoefend op de ondergrond door de grotere lithostatische druk van bovenaf. De verwachting is dus dat dit bij grotere diepte minder van invloed gaat zijn op het 3D ontwerp van de HTO. Daarnaast kan er rekening worden gehouden met de pompenergie die nodig is voor het injecteren van het grondwater. Wanneer bronnen dicht bij elkaar worden geplaatst is de totale drukopbouw groter en is er meer pompenergie nodig om het grondwater op te slaan. Hoe op basis van al deze aspecten de onderlinge afstand tussen de hete bronnen en de afstand tussen de hete bronnen en warme bronnen kan worden geoptimaliseerd dient nog nader bepaald te worden.

4.4.2 Onzekerheid gegevens ondergrond

Voor de simulaties in dit onderzoek zijn voor de verschillende locaties parameters gevarieerd die relatief goed bekend zijn (laagdikte). Er zijn echter ook parameters die minder goed bekend zijn voor de Nederlandse ondergrond, waarvoor uit dit onderzoek en voorgaand onderzoek blijkt dat deze van grote invloed kunnen zijn op de prestaties van een HTO systeem (Schout et al., 2013). De doorlatendheid en de verhouding tussen de verticale en de horizontale doorlatendheid is hiervan een goed voorbeeld.

De doorlatendheid is in meerdere opzichten van invloed op het HTO systeem. Het bepaalt hoeveel bronnen er nodig zijn om het maximale debiet te kunnen leveren en in welke mate verliezen door opdrijving kunnen optreden. De horizontale doorlatendheid varieert tussen alle locaties tussen de 5 en 17 m/d. Deze waarden zijn geïnterpoleerd o.b.v. de meest dichtbij zijnde boringen en die op hun beurt weer zijn afgeleid uit de relatie tussen lithologie, afzettingsmilieu en hydraulische eigenschappen. De verwachte onzekerheid is dus groot (TNO, 2019). De verticale doorlatendheid is nog veel minder goed bekend en wordt over het algemeen bepaald door middel van een aanname over de anisotropie factor die de verhouding tussen de verticale en de horizontale component representeert. De anisotropie factor is in principe altijd groter dan 1, wat dus betekent dat de verticale doorlatendheid nooit groter kan zijn dan de horizontale component (Freeze et al., 1979). In deze studie is op basis van de ondergrondscans gekozen voor een relatief lage vaste waarde de anisotropie: 2 voor zand en 3 voor klei. Echter, in andere studies wordt dit doorgaans hoger geschat in de range van 2 - 10. De variatie hierin wordt bepaald door de korrelgrootte verdeling en de pakking van het materiaal, het afzettingsmilieu en de aanwezigheid van kleiige laagjes of niet (van Lopik et al., 2020).

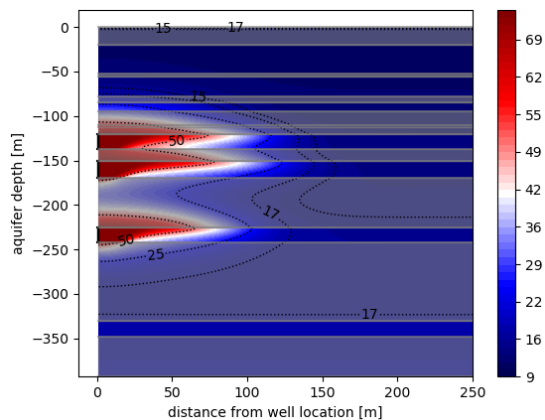
Doordat in deze studie A) een relatief hoge doorlatendheid is ingeschat voor de zandlagen (§3.5.1) samen met B) een relatief lage anisotropie factor maakt het waarschijnlijk dat er een relatief hoge verticale doorlatendheid gebruikt is voor de simulaties. Dit resulteert erin dat opdrijving van warm water relatief makkelijk kan optreden (Hellström et al., 1988). Als de gehanteerde horizontale doorlatendheden kloppen zullen de verliezen die plaatsvinden door opdrijving in werkelijkheid dus waarschijnlijk minder groot zijn dan uit de simulaties blijkt.

4.4.3 Invloed opslagcondities op de terugwinefficiëntie (bronefficiëntie)

De resultaten van deze studie laten zien dat de opslagcondities een grote invloed hebben op de efficiëntie van de HTO. Voor HTO wordt vaak oprijving als grootste verliespost gezien. Uit de resultaten van deze analyse blijkt echter dat voor de relatief grote opslagvolumes in deze studie conductie voor de meeste van de gesimuleerde locaties het dominante proces is dat leidt tot warmte verliezen. Echter, wanneer de opslagcondities het toelaten (e.g. grote laagdikte, hoge verticale doorlatendheid) kan oprijving ook in belangrijke mate bijdragen aan de verliezen (bijvoorbeeld casus Sittard). Een breder pallet aan opslagcondities moet worden meegenomen om een generiek beeld te kunnen schetsen van de verwachte prestatie van de HTO.

De laagdikte zou vanuit economisch perspectief zo groot mogelijk moeten zijn, omdat er dan minder bronnen nodig zijn en er dus minder kosten zijn verbonden aan het boren van de bronnen. Daarentegen kan een grotere laagdikte onder bepaalde condities leiden tot een sterke invloed van oprijving en daarmee een lagere efficiëntie van de HTO. Echter, de specifieke geohydrologische condities in het opslagpakket (doorlatendheid, effectieve anisotropie) bepalen of een grote laagdikte gaat leiden tot een grote mate van oprijving. Vanuit conductieperspectief (zonder oprijving) zou de laagdikte voor alle locaties in deze studie nog dikker mogen zijn. Het zijn nu allemaal relatief platte thermische volumes, Figuur 3-12 (Bloemendal & Hartog, 2018; Doughty et al., 1982).

Een interessante casus in deze context is variant 1,2 en 3 van locatie Den Haag. Bij deze locatie bestaat het opslagpakket uit 3 losse zandlagen (Figuur 4-11). Als een opslagpakket wordt onderverdeeld door een aantal dunne scheidende lagen, is de gemiddelde verticale doorlatendheid voor het hele pakket relatief laag (van Lopik et al., 2020). Dit kan er voor zorgen dat de thermische verliezen door oprijving afnemen. Dit zou dus positief kunnen werken voor de bronefficiëntie. Echter, wanneer deze scheidende lagen te dik zijn en dus het thermische volume niet meer als 'één warme bel' fungeert, worden de conductieverliezen relatief groot. Dit kan goed worden gezien bij de casus Den Haag (Figuur 4-11). Er kan dus worden gezocht naar de optimale dikte van scheidende lagen in één opslagpakket om zowel oprijving te minimaliseren en conductieverliezen relatief laag te houden.



Figuur 4-11 Voorbeeld van locatie Den Haag met opslag in formatie van Maassluis zand 2, 3 en 4.

4.4.4 Waarde van de terugwinefficiëntie van het systeem

De terugwinefficiënties van de hete en warme bronnen bepalen in grote mate samen de terugwinefficiëntie van het systeem. De terugwinefficiëntie van het systeem laat dus zien hoeveel van de warmte die er wordt ingestopt (laden van hete bron) weer kan worden onttrokken (ontladen van hete bron). De terugwinefficiëntie van de warme bron is daarbij van invloed bij het laden van de hete bron, de terugwinefficiëntie van de hete bron is bepalend tijdens het ontladen van de hete bron. Echter, de waarde van de warmte in de hete en/of de warme bronnen is niet gelijk voor iedere HTO. Bijvoorbeeld: indien de hoge temperatuur warmte die kan worden geladen relatief goedkoop is (of gratis), maakt de terugwinefficiëntie van de warme bron minder uit, maar is vooral de terugwinefficiëntie van de hete

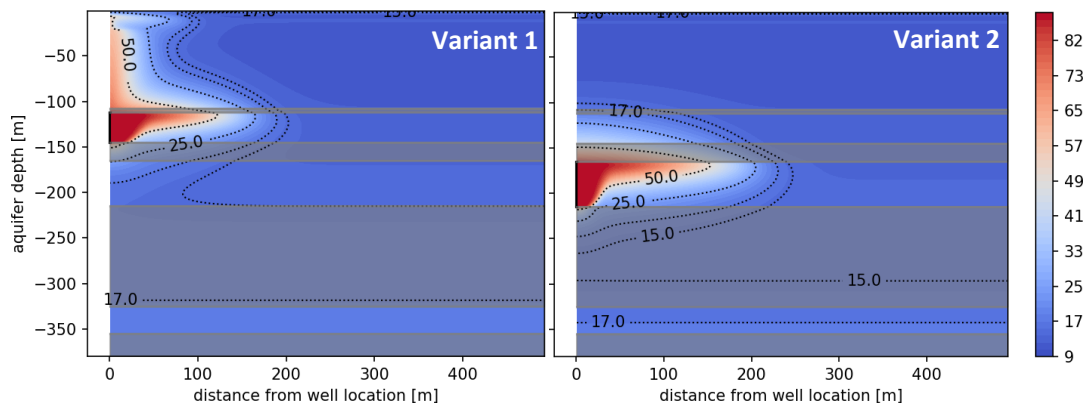
bron(nen) belangrijk. Voor een systeem waar de warmte relatief duur is kan het zo zijn dat de warme bron efficiëntie relatief belangrijk is omdat dit er voor zorgt dat er minder energie hoeft worden gebruikt tijdens het laden van de hete bron(nen). De terugwinefficiëntie van het systeem is dus een goede maat om meerdere systemen te kunnen vergelijken en om inzicht te verkrijgen in de prestatie van het HTO systeem, maar voor een individueel systeem is het ook altijd van belang om inzicht te hebben in de individuele terugwinefficiëntie van de hete en warme bronnen. Naar wens kan vervolgens de terugwinefficiëntie van de hete en/of de warme bronnen geoptimaliseerd worden.

5 Resultaat B: temperatuur verandering in de ondergrond door warmteverlies van HTO

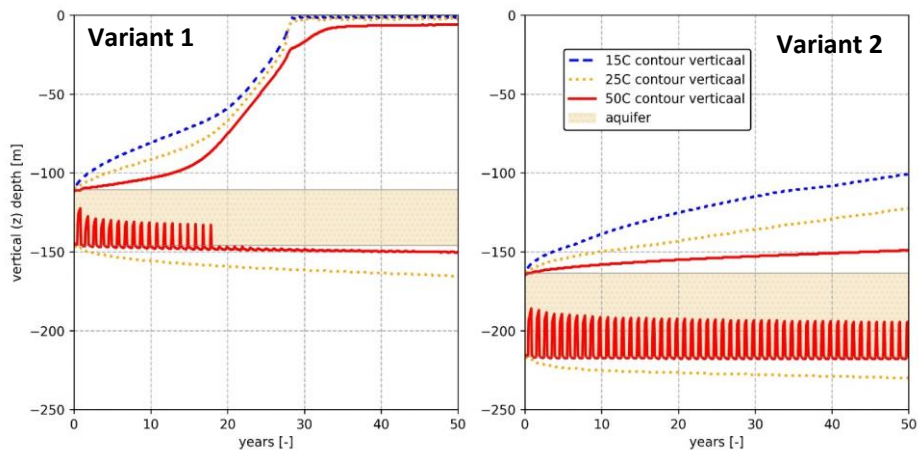
In de axisymmetrische simulaties is er, naast de thermische prestaties van de beschouwde ondergrondse warmteopslag-varianten ook gekeken naar de thermische beïnvloeding van de ondergrond. Vanzelfsprekend verandert de temperatuur van de ondergrond binnen het thermische volume van de opslag, maar wat gebeurt er met de warmte die niet teruggewonnen wordt? En welke invloed hebben de opslagcondities en de geohydrologische opbouw op de verticale en horizontale verspreiding van warmte buiten het opslagvolume? Deze vragen zijn in deze eerste fase van het onderzoek voor het eerst beschouwd.

5.1 Verticale verspreiding warmte in ondergrond

Voor de verschillende varianten van iedere verkenning is de maximale verticale verspreiding van de warmte in de ondergrond bepaald, dat is dus boven en onder de hete bron. De resultaten geven aan dat doordat er verschillende opslagformaties zijn gebruikt bij de verkenningen, en de ondergrond per locatie varieert, de warmteverspreiding tussen verschillende locaties sterk varieert. Natuurlijk beïnvloedt de diepte van de opslag op welke diepte de verticale verspreiding plaatsvindt (Figuur 5-1), maar ook de snelheid waarmee de verticale verspreiding plaatsvindt kan sterk verschillen, zoals geïllustreerd voor de scenario's van locatie Sittard voor de verspreiding van de 15, 17, 25 en 50 °C contouren in Figuur 5-2. Voor het vergelijken van de verticale thermische verspreiding van alle varianten is de afstand van de 25 °C en de 50 °C contour na 30 jaar vergeleken. De simulatieresultaten voor alle locaties is gepresenteerd in Bijlage 2.



Figuur 5-1 Voorbeeld van de ruimtelijke temperatuurverdeling in het warmteopslag systeem van locatie Sittard na 50 jaar voor variant 1 (links) en variant 2 (rechts).

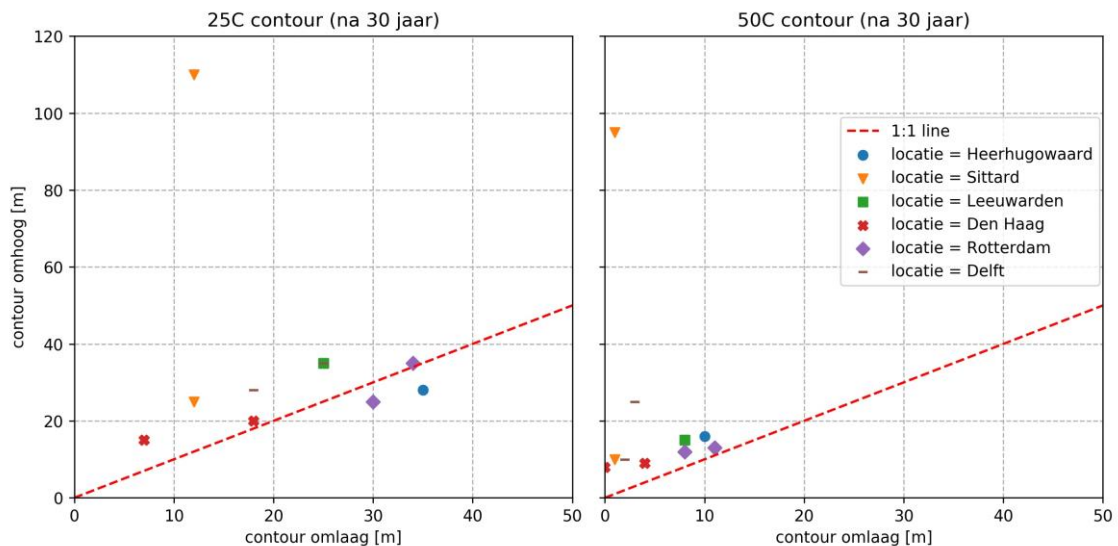


Figuur 5-2 Voorbeeld van de verticale warmteverspreiding bij het ondergronds warmteopslag systeem van locatie Sittard (opslag bij 88 °C). Links: opslag in Breda zand 3, rechts: opslag in Breda zand 4. Boven Breda zand 3 (ondiepe variant) bevindt zich een dunne kleilaag met daarboven een dik zandpakket.

Verticale verspreiding 25 °C en 50 °C contour

In Figuur 5-3 is de verspreiding omhoog (richting maaiveld) en omlaag weergegeven voor de 25 en 50 °C na 30 jaar. Vanzelfsprekend loopt in de thermische verspreiding de 25 °C contour voor op de ontwikkeling van de 50 °C contour. De verspreiding van de 25 °C en 50 °C is over het algemeen groter naar boven toe dan naar onderen toe. Er zijn twee locaties (Heerhugowaard en Rotterdam) waar de 25 °C zich sneller naar onderen toe beweegt. Voor de 50 °C contour is de verspreiding naar onderen toe altijd kleiner t.o.v. naar boven toe. De verspreiding van de 25 °C contour gaat gemiddeld ongeveer 2x zo ver als de verspreiding van de 50 °C na 30 jaar.

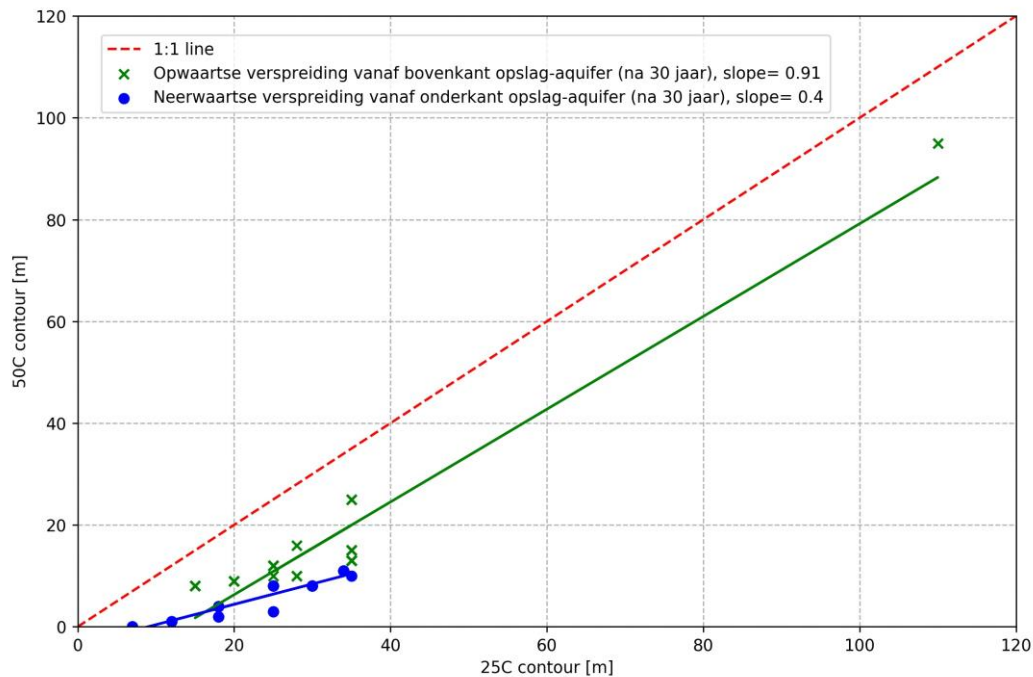
Één van de varianten van locatie Sittard is een duidelijke uitschieter (variant 1, Figuur 5-1). De verticale verspreiding van warmte naar boven toe gebeurt hier duidelijk sneller en verder t.o.v. de andere varianten. De verspreiding van de 25 °C en de 50 °C is hier niet alleen veel groter (>3x zo groot) maar ook zijn de 25 °C en 50 °C bijna even ver verspreid na 30 jaar. Dit wordt verderop in de analyse nader onderzocht.



Figuur 5-3 De 25°C (links) en 50°C (rechts) contour omhoog (y-as) en omlaag (x-as) na 30 jaar.

De afstandsverhouding tussen de verspreiding van de 25 °C en de 50 °C contouren verschillen in opwaartse (richting maaiveld) en neerwaartse richting. Dit is weergegeven met de groene en de blauwe lijn in Figuur 5-4. De 50 °C contour is omhoog slechts 90% minder ver dan de 25 °C. Omlaag is dit 40%

(helling van groene en blauwe lijn). Omhoog volgt de 50 °C contour de 25 °C contour dus meer dan 2x sneller t.o.v. omlaag. Dit laat zien dat er een ‘vertragsingsfactor’ is voor de verspreiding van relatief hoge temperaturen naar onderen toe.



Figuur 5-4 De verhouding tussen de 50 °C (y-as) en 25 °C (x-as) contour omhoog (groene kruis) en omlaag (blauwe punten) na 30 jaar.

De gepresenteerde verschillen kunnen worden uitgelegd door te kijken naar de warmteoverdracht processen die spelen in de ondergrond. Conductie heeft in alle richtingen een gelijke werking en wordt veroorzaakt door het temperatuurverschil tussen het warme opgeslagen water en het koudere omringende water. Opdrijving speelt echter alleen een rol bij relatief hogere temperaturen (Figuur 3-1). Er zijn daarom twee verklaringen voor de relatief snellere verdeling van de 50 °C naar boven toe t.o.v. naar onder toe:

1. Door de opdrijving in de opslag-aquifer is de temperatuur in het onderste deel van de aquifer met regelmaat van relatief lage temperatuur (na ontladen, zie Figuur 5-1 en Figuur 5-2). Dit leidt er toe dat de kleilaag onder de opslag-aquifer niet aldoor wordt verwarmd door het thermische volume in de aquifer, maar gedurende het seizoen ook weer wordt afgekoeld door het koudere grondwater dat zich dan in de onderste delen van de opslag-aquifer bevindt. Dit zorgt er voor dat de warmteoverdracht naar onderen toe wordt geremd.
2. Opdrijving kan ook buiten de opslag-aquifer een effect hebben op de verspreiding van warmte. Omdat de opdrijvende kracht altijd gericht is richting maaiveld werkt dit versterkend voor warmteverspreiding naar boven toe en verzwakkend voor warmteverspreiding naar onderen toe. Als de temperatuur onder de aquifer hoger wordt neemt de potentie tot opdrijving ook toe. Dit zorgt er voor dat de verspreiding van de relatief warme energie naar onderen toe wordt geremd.

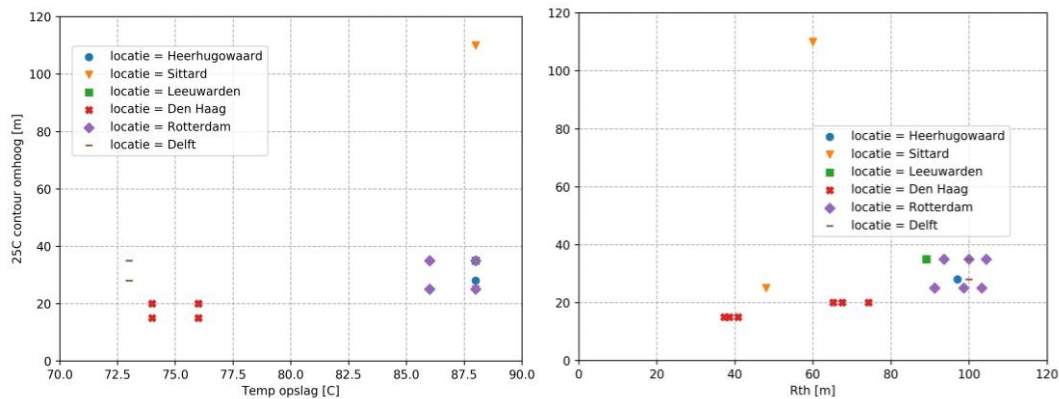
Deze processen verklaart de ‘vertragsingsfactor’ voor relatief hoge temperaturen naar onderen toe. Daarnaast kan op basis van deze processen de grotere warmteverspreiding bij locatie Sittard (variant 1) worden verklaard. Deze casus heeft een relatief dunne afsluitende kleilaag boven de opslag-aquifer. Direct daarboven zit een dikke (>100m) homogene zandlaag (Figuur 5-1 & Figuur 5-2). De dunne kleilaag zorgt ervoor dat de warmte al binnen korte tijd in de onderkant van dit zandige pakket komt. De verspreiding gaat in het zandige pakket sneller door conductie, en, omdat na verloop van de tijd de temperatuur onderin dit zandpakket oploopt tot een relatief hoge temperatuur neemt de potentie tot opdrijving toe. Het zandpakket is relatief dik, homogeen en heeft een relatief hoge doorlatendheid. Dit

zorgt er voor dat door opdrijving het front met relatief hoge temperatuur (e.g. $>45\text{ }^{\circ}\text{C}$) zich na een aantal jaar relatief snel naar boven kan bewegen in het zandige pakket. Dit verklaart de steile toename van jaar 18 tot jaar 28 in Figuur 5-2 (links).

De opbouw van de ondergrond bepaalt dus in grote mate welke processen een belangrijke rol kunnen spelen in de verspreiding van warmte. Een dikke afsluitende kleilaag boven de opslag-aquifer lijkt een relatief snelle opwaartse thermische verspreiding in de bovenliggende aquifer te kunnen voorkomen.

Invloed van systeemconcept

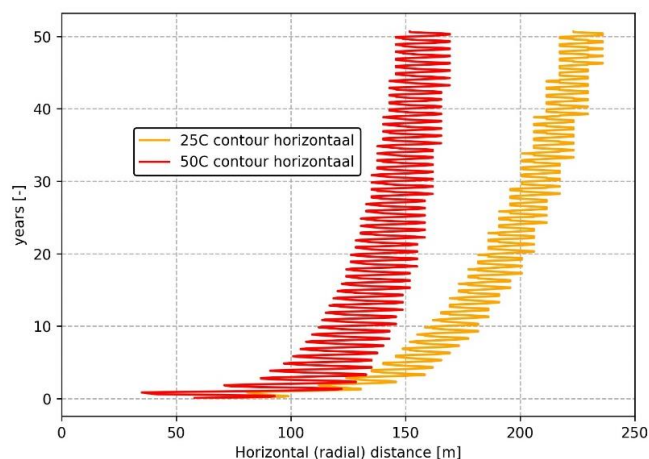
De opslagtemperatuur van de HTO, en, de grootte van de HTO (thermische straal, R_{th}) hebben voor de beschouwde range slechts een beperkte invloed op de verticale verspreiding van de warmte (Figuur 5-5). De uitzondering daar gelaten (Sittard), is er een lichte toename zichtbaar qua verspreiding van de 25°C voor de systemen met een hogere temperatuur. Een sterkere relatie lijkt er te zijn met de variatie van de thermische straal (R_{th}) van de gesimuleerde varianten. Doordat de thermische straal groter is zal er een groter oppervlak zijn in de aquifer die warmte geleidt naar de bovenliggende kleilaag. Samen met een hogere opslagtemperatuur zorgt dit dus voor een toename qua verticale verspreiding door conductie.



Figuur 5-5 relatie tussen de opslagcondities en de verspreiding van de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ contour verticaal omhoog na 30 jaar. Links: invloed van temperatuur, Rechts: invloed van de thermische straal

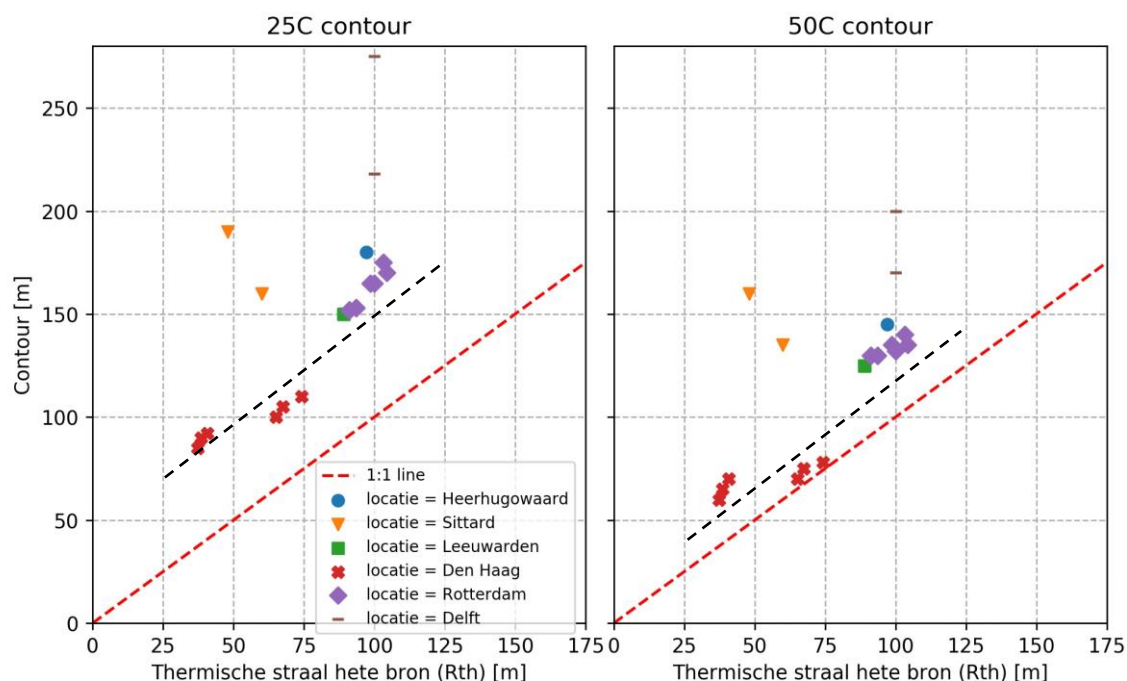
5.2 Horizontale verspreiding warmte in opslagpakket

De horizontale verspreiding van de warmte in de opslag-aquifer is gevolgd voor 50 jaar gebruik van de HTO voor de verschillende varianten. De contouren zijn gemonitord als als de horizontale afstand vanaf de hete bron in het bovenste deel van de opslag-aquifer. Hier is de horizontale verspreiding het grootst, doordat daar de verspreidingseffecten van eventuele dichtheidsstroming optreden. De thermische straal is daarbij de minimale afstand die de warmte per definitie bereikt tijdens opslag, bij cilindrische vorming van het thermische opslagvolume (§2.2). Dat is de verspreiding die al bij de eerste volledige injectiecyclus gerealiseerd wordt (97m in Figuur 5-6). Tijdens het gebruik van de HTO verspreidt de warmte zich in de tijd verder naar buiten toe, en neemt de afstand van de 25 en 50°C contour toe. De afstand van de contour beweegt iedere opslagcyclus mee met het thermische volume door het laden (opslag van volume) en ontladen (onttrekking van volume) uit de hete bron. Dit is goed zichtbaar in de beweging van de contouren in Figuur 5-6.



Figuur 5-6 Voorbeeld van de verspreiding van de temperatuurcontour voor een systeem met een thermische straal van 97m met een opslagtemperatuur van 88 °C.

De correlatie tussen de thermische straal van de bron en de afstand van de 50 °C en de 25 °C contour na 10 jaar is gegeven in Figuur 5-7. Een grotere thermische straal zorgt over het algemeen voor een grotere contourafstand. Indien de punten dicht bij de 1:1 lijn liggen betekent dit dat de warmte relatief weinig is verspreid. Afgezien van de locaties waaruit bleek dat die een relatief verdere verspreiding hebben door het grotere effect van opdriving (Sittard en Delft, hieronder besproken) lijkt de thermische straal voor de overige locaties en varianten een redelijk relatie te hebben met de afstand van de verspreiding van de contouren in de opslag-aquifer (zie zwarte stippellijn).

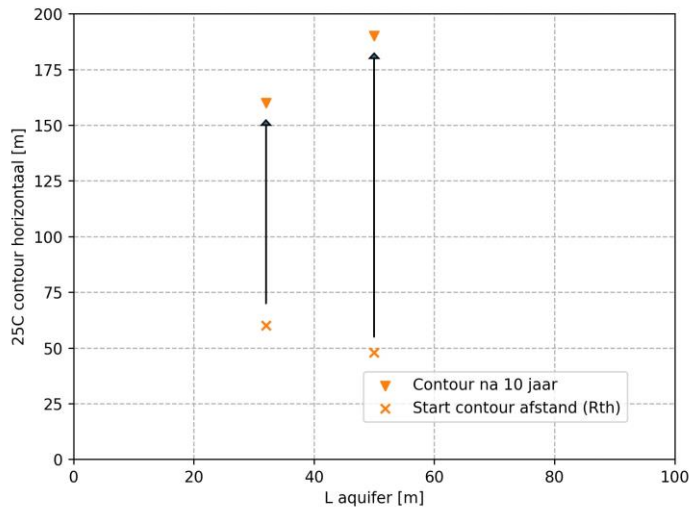


Figuur 5-7 De (basis) thermische straal van de hete bron voor de varianten versus de 25 °C contour (links) en de 50°C (rechts) na 10 jaar gebruik van de HTO. De zwarte stippellijn is aangegeven om de ogenschijnlijke lineaire relatie tussen de contourafstand en de R_{th} aan te geven voor locatie Heerhugowaard, Leeuwarden, Den Haag en Rotterdam.

Grotere horizontale verspreiding Delft en Sittard

De locatie Sittard en Delft laten een relatief grotere horizontale verspreiding zien van de 25 °c en de 50 °C contour t.o.v. de andere locaties. Zoals is bepaald in §4.1 ondervinden deze twee locaties relatief veel effecten door opdriving t.o.v. de andere locaties doordat ze een relatief grote laagdikte hebben. In Figuur 5-8 zijn beide varianten voor locatie Sittard vergeleken om dit effect toe te lichten. Het opslagvolume is gelijk voor de twee varianten, dit wordt echter opgeslagen in twee lagen met een

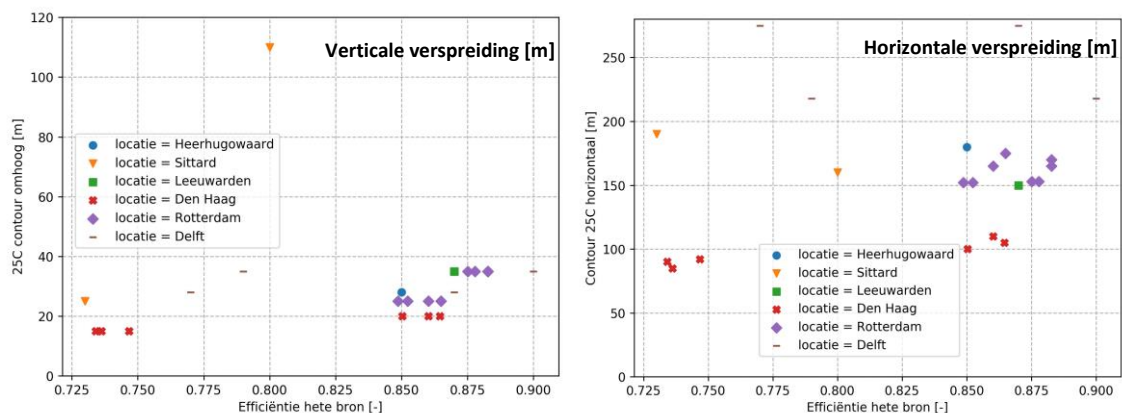
andere laagdikte (Variant1 = 32m t.o.v. variant 2 = 50m laagdikte), Figuur 5-1. In de basis heeft variant 1 dus een grotere thermische straal dan variant 2 (want kleinere laagdikte). Echter, na 10 jaar gebruik van de HTO is de 25°C meer dan 25m verder verspreid voor variant 2 (Figuur 5-8). Dit is te wijden aan het sterkere effect van opdrijving bij een grotere laagdikte. De opdrijvende kracht zorgt dus niet alleen voor opdrijving maar ook voor afdrijving (sterkere horizontale verspreiding) van warmte in het bovenste deel van de aquifer. Dit laat zien dat de specifieke opslagcondities een sterke invloed kunnen hebben op de verspreiding van de warmte in de opslag-aquifer.



Figuur 5-8 De relatie tussen de dikte van het opslagpakket en de verspreiding van de 25°C contour voor locatie Sittard.

5.3 Terugwinefficiëntie vs. thermische impact

Hoewel bij lagere terugwinefficiëntie er meer warmte verlies naar de omgeving van de opslag is, vertaald dat zich, zoals verwacht, niet in een simpele relatie tussen de efficiëntie van de hete bron en de verticale/horizontale verspreiding van warmte (Figuur 5-9). Op basis van alleen de efficiëntie van de hete bron valt dus weinig te zeggen over de verwachte verspreiding van warmte. Het is met name de laagopbouw boven en onder de opslag-aquifer die de mate van verticale verspreiding bepaalt. In horizontale richting lijkt de mate en sterkte van opdrijving in de opslag-aquifer een bepalende rol te spelen. Het effect van opdrijving zorgt dus voor afdrijving van warmte boven in de opslag-aquifer en dus een sterkere horizontale verspreiding.



Figuur 5-9 De relatie tussen de terugwinefficiëntie van de hete bron en de verticale (links) en horizontale (rechts) verspreiding van de 25°C contour.

5.4 Discussie

5.4.1 Verspreiding vanuit de hete bron versus gehele HTO systeem

De hier gepresenteerde resultaten zijn gebaseerd op de axisymmetrische resultaten van alleen de hete bron van het HTO systeem. Dit betekent dat de interactie tussen de warme bronnen en de hete bronnen en het effect hiervan op de verspreiding van warmte niet is meegenomen. Het mee simuleren van de warme bronnen zal voornamelijk van invloed zijn op de horizontale verspreiding van warmte, en in minder mate op de verticale verspreiding van warmte. Zoals is aangetoond in §4.3 kunnen de warme bronnen een deel van de verliezen uit de hete bron weer opvangen. Echter, de warme bronnen verliezen zelf ook warmte naar het omringende grondwater. Hoe dit tegen elkaar opweegt en of het mee simuleren van warme bronnen dus voor een grotere of kleinere horizontale verspreiding leidt, valt nog niet op te maken. Dit hangt ook af van de temperatuur van de warme bron(nen) en de locatie van de warme bronnen t.o.v. de hete.

5.4.2 Onzekerheid thermische eigenschappen

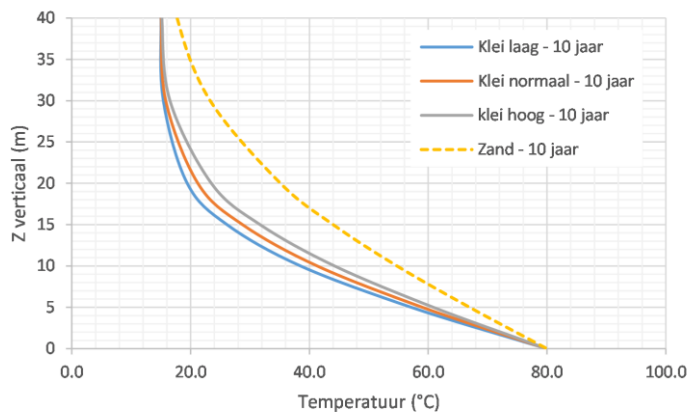
De resultaten van deze analyse laten zien dat de afsluitende laag (e.g. kleilaag) boven en onder de aquifer een grote invloed heeft op de snelheid waarmee warmte zich verticaal verspreidt vanuit de opslag-aquifer. Het gaat hierbij dus om conductie door de afsluitende laag. De thermische eigenschappen van deze laag kunnen dus grote invloed hebben op de mate waarmee de warmte zich door deze laag kan verplaatsen (Anderson, 2005). Op basis van een analytisch³ model kunnen we inzichtelijk maken hoe de temperatuur zich verspreidt door een laag o.b.v. specifieke thermische eigenschappen. De porositeit en de warmtegeleidingscoëfficiënt van de klei wordt hierbij met 20% gevarieerd. Dit resulteert in 3 verschillende condities; een relatief lage diffusiviteit door klei (0.0165, de gebruikte waarde van 0.0197 in dit onderzoek en een relatief hoge waarde (0.0240).

Figuur 5-10 laat zien dat de variatie in thermische eigenschappen van de klei zoals verwacht invloed heeft op de snelheid van de opwaartse verspreiding door de kleilaag. Echter, de invloed van de variatie aan thermische eigenschappen is relatief klein t.o.v. het verschil met conductie door een zandlaag, waar bovendien ook dichtheidsstroming de verspreiding kan versnellen. De onzekerheid qua thermische eigenschappen kan dus een effect hebben op de snelheid waarmee de warmte zich verspreidt. In vervolg onderzoek moet blijken hoe sterk de thermische eigenschappen variëren en in welke mate deze overeenkomen met de in deze studie aangenomen waardes.

Tabel 5-1 Variatie in eigenschappen van de afsluitende kleilaag. De porositeit en de K_t zijn met 20% gevarieerd.

		Klei (laag)	Klei (simulaties)	Klei (hoog)
Porositeit (-)	ϕ	0.6	0.5	0.4
Warmtegeleidingscoëfficiënt ($W/m/^\circ C$)	K_t	1	1.2	1.4
Warmtegeleidingscoëfficiënt aquifer ($W/m/^\circ C$) ¹	K_t aquifer	0.76	0.9	1.08
Dichtheid (kg/m^3)	P	2640	2640	2640
Specifieke warmte capaciteit ($J/kg/^\circ C$)	C_p	1400	1400	1400
Volumetrische warmtecapaciteit ($J/m^3/^\circ C$)	C_v	3696000	3696000	3696000
Volumetrische warmtecapaciteit aquifer ($J/m^3/^\circ C$)	C_{aq} aquifer	3988200	3939500	3890800
Thermische diffusiviteit (m^2/dag)	D_t	0.0165	0.0197	0.0240

³ Niet-steady state analytische oplossing voor conductie

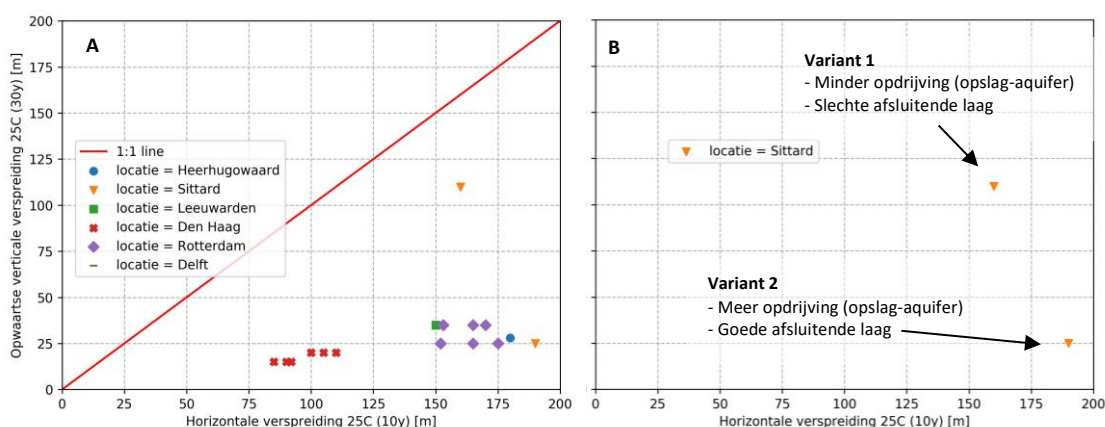


Figuur 5-10 Verspreiding (analytisch) door middel van conductie in de afsluitende laag boven een opslagpakket door 4 verschillende materialen. De opslagtemperatuur in de aquifer is 80 °C.

5.4.3 Verticale versus horizontale verspreiding

De temperatuurverspreiding in de ondergrond bij HTO is vanaf de hete bron in absolute zin sterker in de horizontale richting dan in de verticale richting (Figuur 5-11A). Een grote horizontale verspreiding van de warmte betekent niet dat er ook in de verticale richting veel warmte wordt verspreid, en vice versa.

De twee varianten van locatie Sittard (gelijk volume en opslagtemperatuur) zijn een goed voorbeeld om de verschillen die optreden bij verticale en horizontale warmteverspreiding te illustreren (Figuur 5-11B). Voor variant 1 is de opslag-aquifer een dunner pakket, wat leidt tot minder opdrijving in de opslag-aquifer en dus tot een mindere verspreiding van de 25 °C contour in de horizontale richting. Echter, De afsluitende laag boven deze laag is relatief dun, wat er toe leidt dat de warmte snel naar boven beweegt en door opdrijving in het bovenliggende zandpakket richting maaiveld wordt getransporteerd (versnelt door opdrijving). Voor variant 2 is de situatie omgekeerd; de laag is afgesloten door een relatief dikke afsluitende laag, de verticale verspreiding is dus beperkt. Echter, doordat het opslagpakket dikker is, zorgt opdrijving voor een verdere verspreiding van de 25 °C in de horizontale richting. Al met al laat dit nogmaals zien dat de laagopbouw en de opslagcondities bepalend kunnen zijn in de mate van warmteverspreiding in de ondergrond.



Figuur 5-11 Horizontale versus verticale verspreiding van warmte voor alle locaties (A) en uitgelicht voor de twee varianten van locatie Sittard (B).

5.4.4 Natuurlijke grondwaterstroming

Eventuele natuurlijke grondwaterstroming draagt ook bij aan de verspreiding van de warmte van de HTO. Dit is bij de simulaties in deze studie niet meegenomen. Grondwaterstroming gaat naar verwachting zorgen voor een verdere verspreiding van de temperatuurcontour in één richting, het zorgt er daarbij ook voor dat de verspreiding in de tegengestelde richting minder sterk is.

Grondwaterstroming kan er dus voor zorgen dat thermische effecten verder worden verspreid in stroomafwaartse richting, bijvoorbeeld richting andere gebruikers van de ondergrond zoals WKO systemen of grondwaterwinningen. In hoeverre dit zal optreden en welke invloed achtergrondstroming heeft op de verspreiding en mate van thermische impact vereist het opnemen van achtergrondstroming in gedetailleerdere modelstudies.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Prestaties HTO

Voor de verkenningen van de eerste fase van het WINDOW project zijn 26 axisymmetrische en 6 3D-modellen in detail doorgerekend. Op basis van de analyse van deze gezamenlijke resultaten, zijn de volgende conclusies getrokken:

Hete Bron (axisymmetrisch):

- Conductieverliezen treden altijd en zijn bij alle varianten in deze studie een belangrijke verliespost. Conductieverliezen zijn te verkleinen door de ratio oppervlak/volume (A/V) te minimaliseren
- Conductie is voor de meeste varianten in deze studie de voornaamste oorzaak van warmteverlies
- De onzekerheid van de toegepaste geohydrologische parameters is relatief hoog, door het toepassen van relatief hoge verticale doorlatendheid in de simulaties zijn de resulterende verliezen door opdriving waarschijnlijk een overschatting

Hete en warme bronnen (3D):

- De efficiëntie van de hete bron ondervindt bij de toegepaste onderlinge afstand weinig tot geen positieve invloed door de aanwezigheid van warme bronnen
- De efficiëntie van de warme bronnen rondom de hete bron wordt positief beïnvloedt door het verlies van warmte uit de hete bron, dit resulteert in een verbetering van de terugwinefficiëntie van het systeem

Aanbevelingen voor vervolgonderzoek:

- Bepalen hoe een bredere en uitgebreidere range aan opslagcondities de efficiëntie van een HTO beïnvloedt
- Evalueren in welke mate de onzekerheid van de geohydrologische parameters invloed kan hebben op de gemodelleerde prestatie van een HTO systeem
- Bekijken hoe de plaatsing van de hete en warme bronnen geoptimaliseerd kan worden o.b.v. de totale terugwinefficiëntie van het systeem

6.2 Thermische effecten

Op basis van de analyse van de WINDOW simulaties zijn de eerste generieke inzichten verkregen omtrent de verspreiding in de verticale en horizontale richting vanuit de hete bron van een HTO systeem.

De verticale verspreiding van warmte wordt voornamelijk bepaald door de specifieke laagopbouw boven en onder de opslag-aquifer. De dikte van de afsluitende kleilaag is hierbij een belangrijk aspect. De verticale verspreiding van warmte wordt zowel beïnvloed door het optreden van conductie (thermische eigenschappen belangrijk) en oprijving (verticale doorlatendheid belangrijk). Oprijving heeft hierbij een versterkend effect richting maaiveld en een afremmend effect van de thermische impact naar onderen toe. De grootte en temperatuur van het systeem hebben in kleine mate invloed op de snelheid van de verticale thermische verspreiding.

De absolute horizontale verspreiding van warmte wordt gedomineerd door de specifieke opslagcondities en grootte van het opslagsysteem die per variant verschilt. Over het algemeen is de thermische straal een goede manier om inzicht te krijgen in de horizontale verspreiding van warmte. Voor locaties waar oprijving in grote mate invloed heeft kan de horizontale verspreiding groter zijn.

Aanbevelingen voor vervolgonderzoek:

Aanvullend onderzoek moet laten zien in hoeverre de warme bronnen ook belangrijk zijn in het bepalen van de thermische effecten van het HTO systeem en hoe dit zich verhoudt tot de hier gepresenteerde resultaten. Het is belangrijk om de mate van onzekerheid qua thermische en geohydrologische parameters in de ondergrond in kaart te brengen, en, om met aanvullende simulaties te bekijken hoe een bredere range aan opslagcondities invloed kan hebben op de thermische verspreiding vanuit het HTO systeem. Ook is het van belang om te evalueren wat de invloed van achtergrondstroming op de verspreiding en mate van thermische impact is.

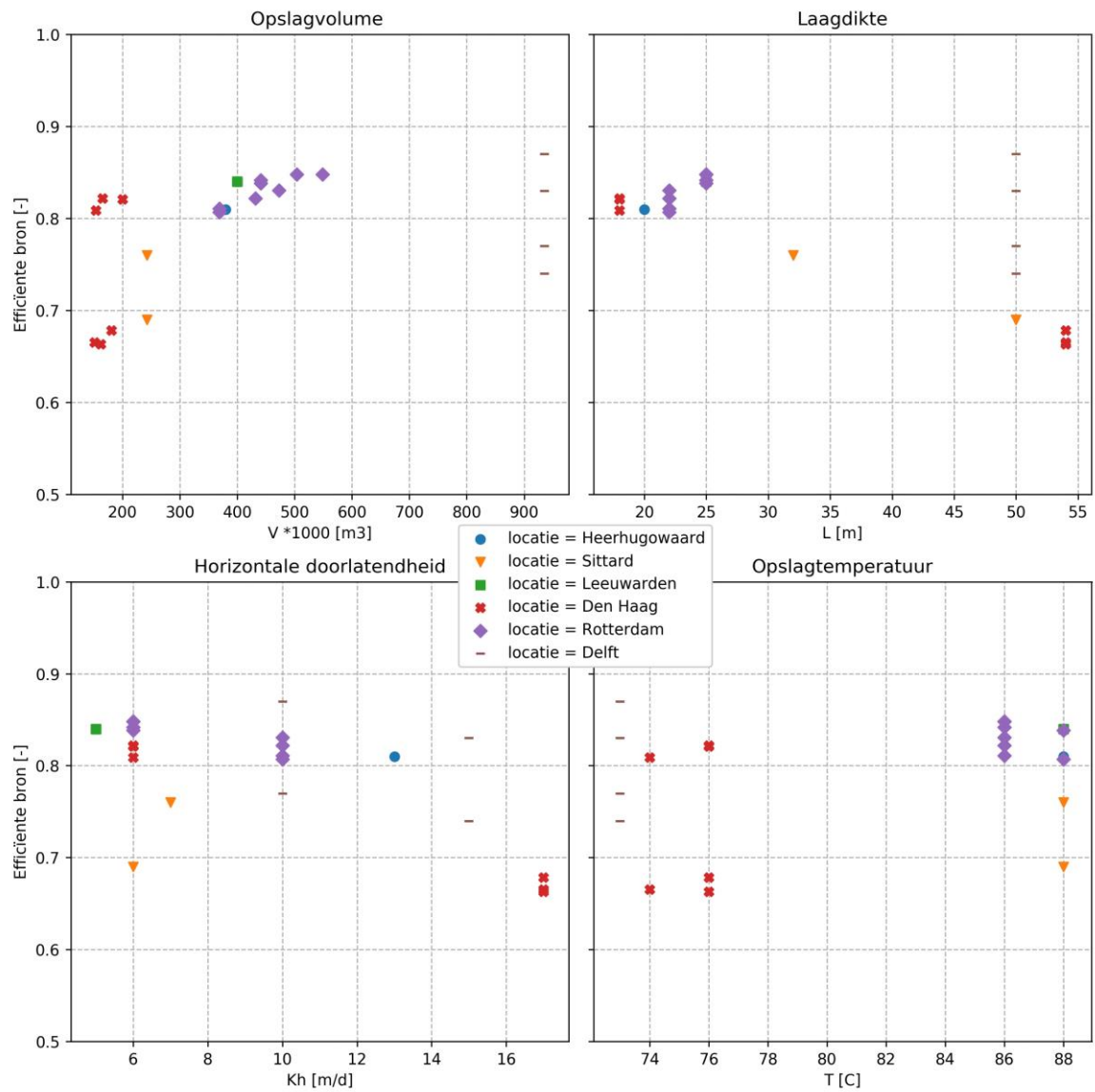
Referenties

- Anderson, M. P. (2005). Heat as a Ground Water Tracer. *Ground water*, 43(6), 951-968. doi:10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x
- Bakker, M., Post, V., Langevin, C. D., Hughes, J. D., White, J. T., Starn, J. J., & Fiene, M. N. (2016). Scripting MODFLOW Model Development Using Python and FloPy. *Groundwater*, n/a-n/a. doi:10.1111/gwat.12413
- Bloemendal, M. (2018). *The hidden side of cities*. Delft.
- Bloemendal, M., & Hartog, N. (2018). Analysis of the impact of storage conditions on the thermal recovery efficiency of low-temperature ATES systems. *Geothermics*, 17, 306-319. doi:10.1016/j.geothermics.2017.10.009
- Bloemendal, M., Lopik, v. J., Jansen, J. H. F., Drijver, B., Bergen, v. F., Koenen, M., . . . Khoshnevis, N. (2020). *Literatuurstudie Brontechniek | WINDOW werkpakket C1*. Retrieved from Nieuwegein:
- Dalla Santa, G., Galgaro, A., Sassi, R., Cultrera, M., Scotton, P., Mueller, J., . . . Bernardi, A. (2020). An updated ground thermal properties database for GSHP applications. *Geothermics*, 85, 101758. doi:https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101758
- Doughty, C., Hellström, G., & Fu Tsang, C. (1982). A Dimensionless parameter Approach to the Thermal Behavior of an Aquifer Thermal Energy Storage System. *Water Resources Research*, 18(3), 571-578.
- Duijff, R. (2019). *Interaction between multiple ATES systems*. Retrieved from Delft: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Acf4bcee3-b775-4676-b683-0e38fabb70ee>
- Freeze, R. A., Cherry, J. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall.
- Hantschel, T., & Kauerauf, A. I. (2009). *Fundamentals of basin and petroleum systems modeling*. Springer Science & Business Media.
- Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C., & McDonald, M. G. (2000). *MODFLO, THE U.S Geological Survey modular ground-water model. User guide to Modularization concepts and the ground-water flow process*. Retrieved from Reston, Virginia:
- 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). Retrieved from
- Hellström, G., Tsang, C.-F., & Claesson, J. (1988). Buoyancy flow at a two-fluid interface in a porous medium: Analytical studies. *Water Resources Research*, 24(4), 493-506. doi:10.1029/WR024i004p00493
- Hill, M. C. (1990). *PRECONDITIONED CONJUGATE-GRADIENT 2 (PCG2), A COMPUTER PROGRAM FOR SOLVING GROUND-WATER FLOW EQUATIONS, second printing 2003*. Retrieved from
- IF-Technology. (2012). *Ontwerpnormen fijnzandige aquifers, Deelrapport Werkpakket I (26.723/61335/RW)*. Retrieved from Arnhem:
- Kosowska-Golachowska, M., Gajewski, W., & Musib, T. (2014). Determination of the effective thermal conductivity of solid fuels by the laser flash method. *Archives of Thermodynamics*, 35, 3-16.
- Langevin, C. (2009). *SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Variable-Density Groundwater Flow and Multi-Species Solute and Heat Transport (2009-3047)*. Retrieved from
- Langevin, C. D. (2008). Modeling Axisymmetric Flow and Transport. *Ground water*, 46(4), 579-590. doi:10.1111/j.1745-6584.2008.00445.x
- Schout, G., Drijver, B., Gutierrez-Neri, M., & Schotting, R. (2013). Analysis of recovery efficiency in high-temperature aquifer thermal energy storage: a Rayleigh-based method. *Hydrogeology Journal*, 22(1), 281-291. doi:10.1007/s10040-013-1050-8
- 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

- TNO. (2019). *Totstandkomingsrapport Hydrogeologisch Model (REGIS II)*. Retrieved from Utrecht:
- van Lopik, J. H., Hartog, N., & Schotting, R. J. (2020). Taking advantage of aquifer heterogeneity in designing construction dewatering systems with partially penetrating recharge wells. *Hydrogeology Journal*. doi:10.1007/s10040-020-02226-7
- 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
- Voss, C. I. (1984). *A FINITE-ELEMENT SIMULATION MODEL FOR SATURATED-UNSATURATED, FLUID-DENSITY-DEPENDENT GROUNDWATER FLOW WITH ENERGY TRANSPORT OR CHEMICALLY REACTIVE SINGLE-SPECIES SOLUTE TRANSPORT*. Retrieved from Reston, Virginia:
- 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*. Retrieved from

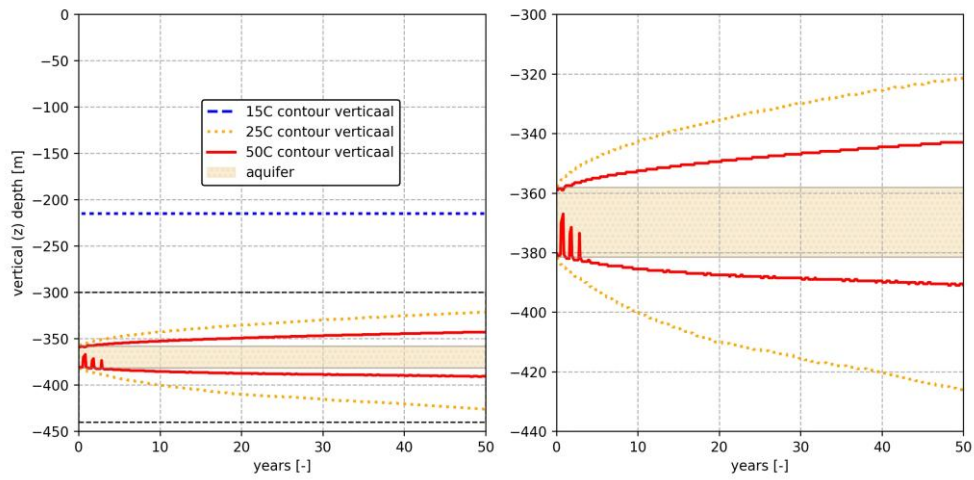
Bijlagen

Bijlage 1 Invloed opslagcondities op terugwinefficiëntie hete bron

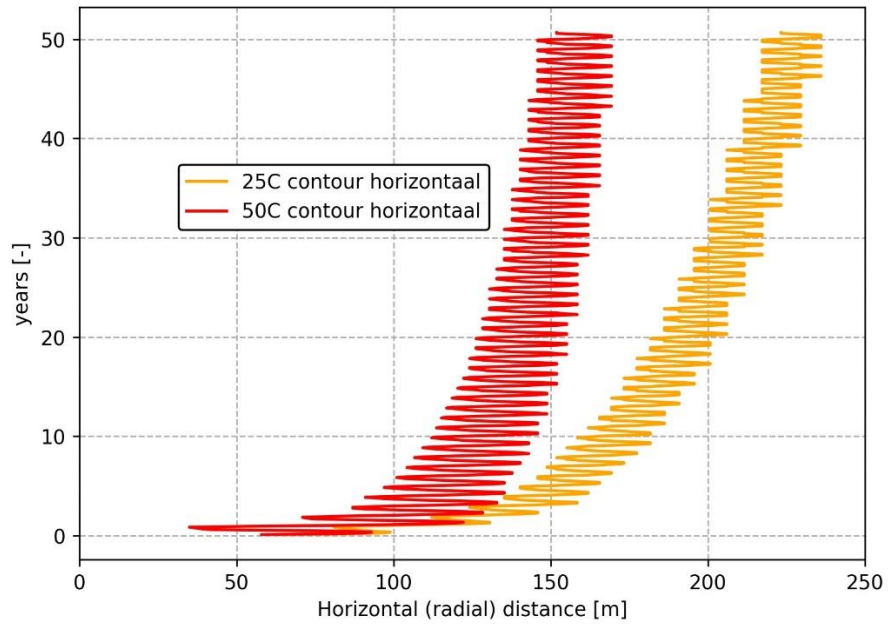


Bijlage 2 Resultaten simulaties verkenningen: thermische verspreiding

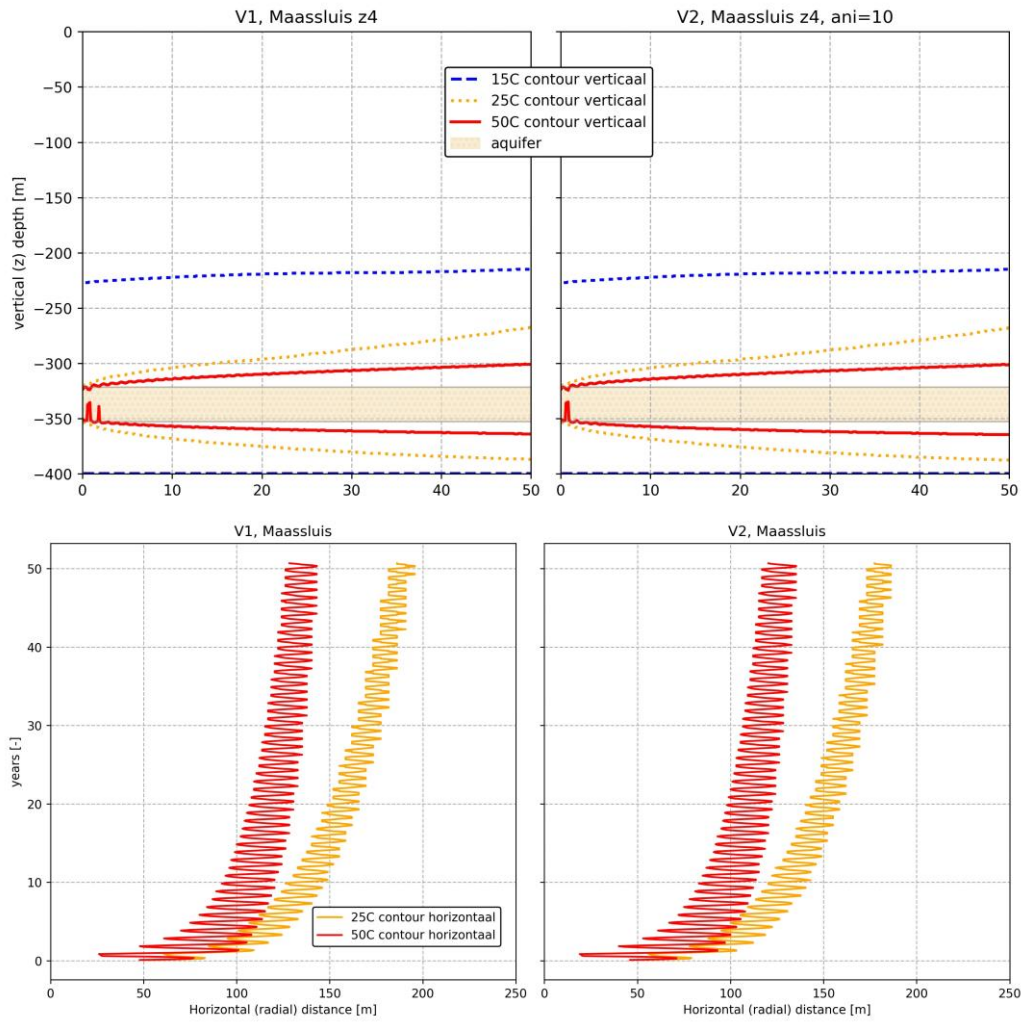
Locatie Heerhugowaard



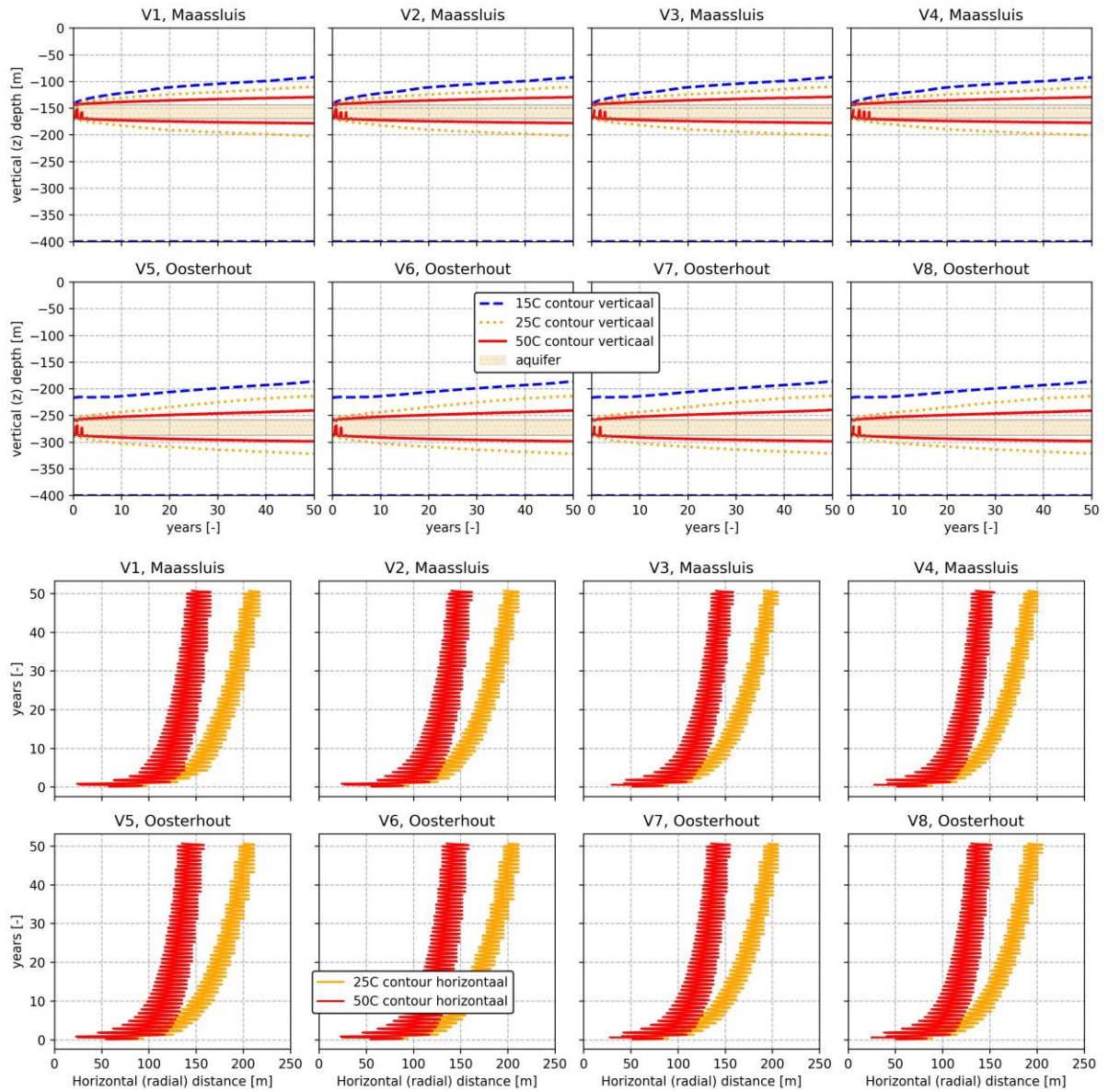
Variante 1



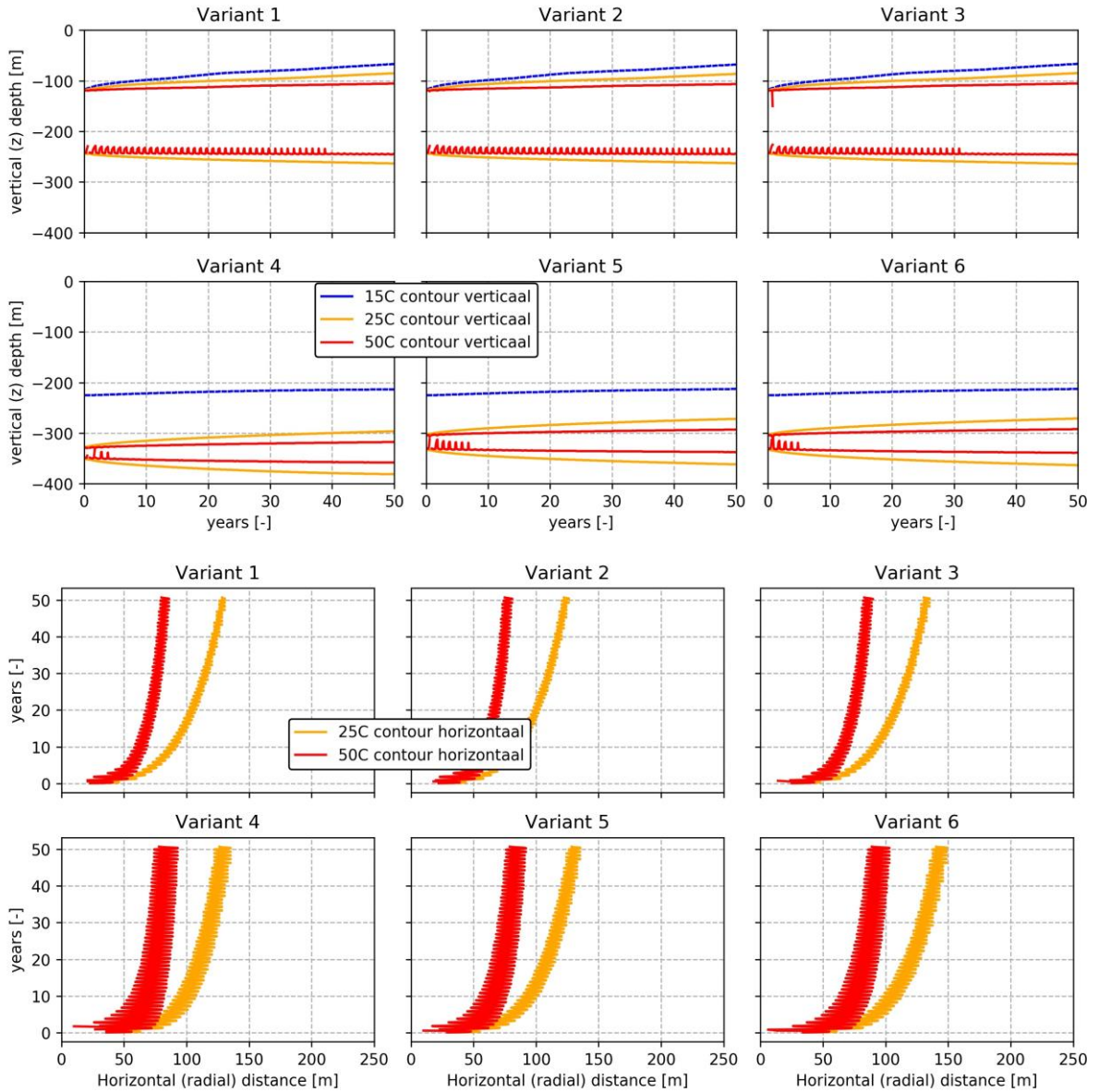
Locatie Leeuwarden



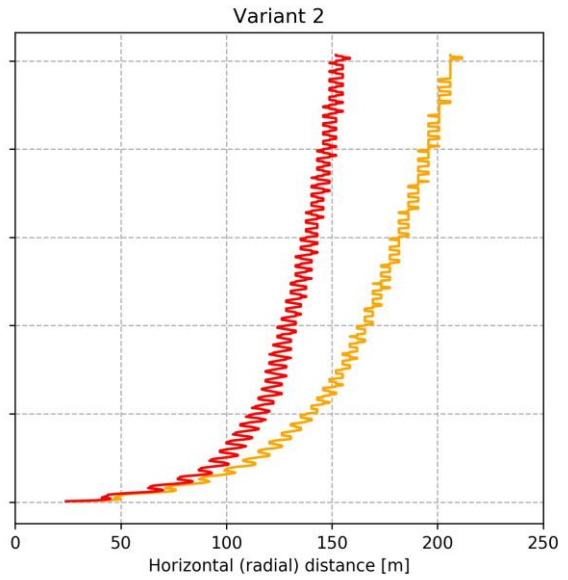
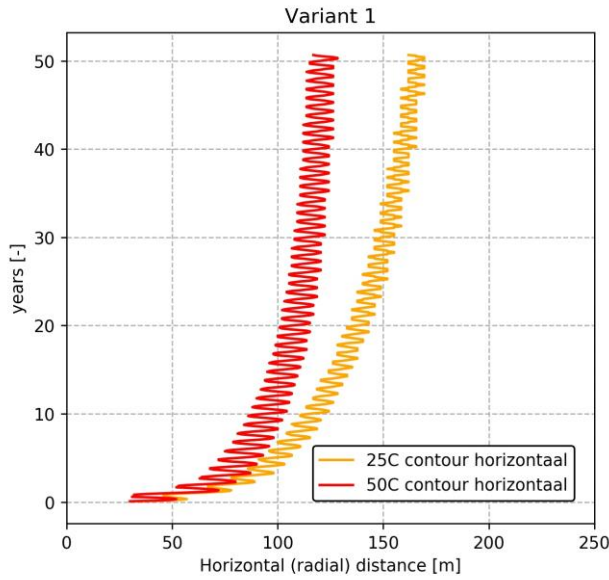
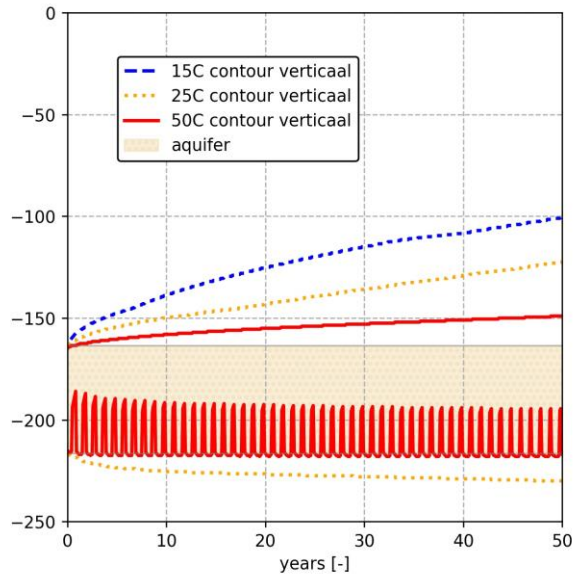
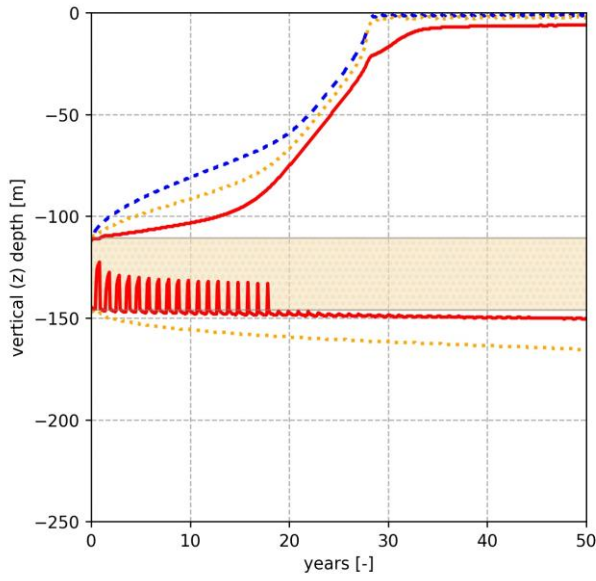
Locatie Rotterdam



Locatie Den Haag



Locatie Sittard/Geleen



Locatie Delft

