

Thermisch opslagrendement

Deelrapport Werkpakket III

Penvoerder onderzoek:

IF Technology bv
Velperweg 37
Postbus 605
6800 AP ARNHEM
T 026 - 35 35 555
F 026 - 35 35 599
E info@iftechnology.nl

Consortiumlid:

Universiteit van Utrecht
Postbus 80011
3508 TA UTRECHT

Symbolenlijst

Symbolenlijst		
Symbool	Betekenis	Eenheid (tenzij anders aangegeven)
H	Dikte watervoerendpakket	m
D	Dikte scheidende laag	m
k	Doorlatendheid	m/d
κ	Permeabiliteit	Darcy of m^2
λ	Warmtegeleidingcoëfficiënt	$W/m \cdot ^\circ C$
C	Warmtecapaciteit	$J/kg \cdot ^\circ C$
ρC	Volumetrische warmtecapaciteit	$J/(m^3 \cdot ^\circ C)$
d_{ll}	Longitudinale dispersiviteit	m
d_T	Transversale dispersiviteit	m
ϕ	porositeit	-
Q	Debiet	m^3/uur
R_w	Hydrologische straal	m
R_{th}	Thermische straal	m
ε	Thermisch opslagrendement	-
T_i	Temperatuur geïnjecteerd water	$^\circ C$
T_p	Temperatuur onttrokken water	$^\circ C$
T_a	Natuurlijke grondwater temperatuur	$^\circ C$
T'	Dimensieloze temperatuur	-
t_i, t_s, t_p, t_r	Duur van respectievelijk de injectie-, opslag-, productie- en rustperiode	d
Superscript		
h	horizontaal	
v	verticaal	
Subscript		
a	eigenschap aquifer	
c	eigenschap scheidende laag	
f	eigenschap water	
i	injectie	
s	opslag	
p	productie	
r	rust	

Samenvatting

Inleiding

Hogetemperatuuropslag wordt gezien als een veelbelovende techniek om de behaalde energiebesparing met behulp van WKO-systemen verder te vergroten. Tot op heden is hogetemperatuuropslag echter nog nauwelijks toegepast. Stijgende energieprijzen en een toenemende aandacht voor het beperken van de CO₂-uitstoot, hebben ervoor gezorgd dat hogetemperatuuropslag opnieuw in de belangstelling staat.

In hoeverre hogetemperatuuropslag daadwerkelijk interessant is wordt enerzijds bepaald door de investerings- en exploitatiekosten en anderzijds door de besparingen die kunnen worden behaald. Daarnaast spelen ook de technische risico's (bijv. putverstopping door kalkneerslag) en juridische randvoorwaarden (vergunbaarheid) en belangrijke rol.

De besparingen worden in belangrijke mate bepaald door de mate waarin de opgeslagen warmte weer kan worden teruggewonnen. Het opslagrendement dat kan worden behaald is dan ook essentieel voor hoge temperatuur warmteopslag. In dit onderzoek is het opslagrendement gedefinieerd als de verhouding tussen de onttrokken hoeveelheid energie en de opgeslagen hoeveelheid energie, gemeten ten opzichte van de natuurlijke grondwatertemperatuur in het gebruikte watervoerende pakket. Daarbij is aangenomen dat de onttrokken hoeveelheid water gelijk is aan de geïnfiltreerde hoeveelheid water.

In dit onderzoek naar het opslagrendement bij hogetemperatuuropslag zijn twee hoofdoelen nagestreefd, zoals bepaald in het projectvoorstel van de SKB tender hogetemperatuuropslag. Het eerste doel was het inzichtelijk maken van de factoren die de grootste invloed hebben op het opslagrendement. Dit is gedaan door middel van een literatuurstudie en een modelstudie waarin het opslagrendement voor een groot aantal verschillende scenario's is berekend en geanalyseerd. Ten tweede is een functionele relatie ontwikkeld tussen het opslagrendement en de factoren die daar de grootste invloed op hebben.

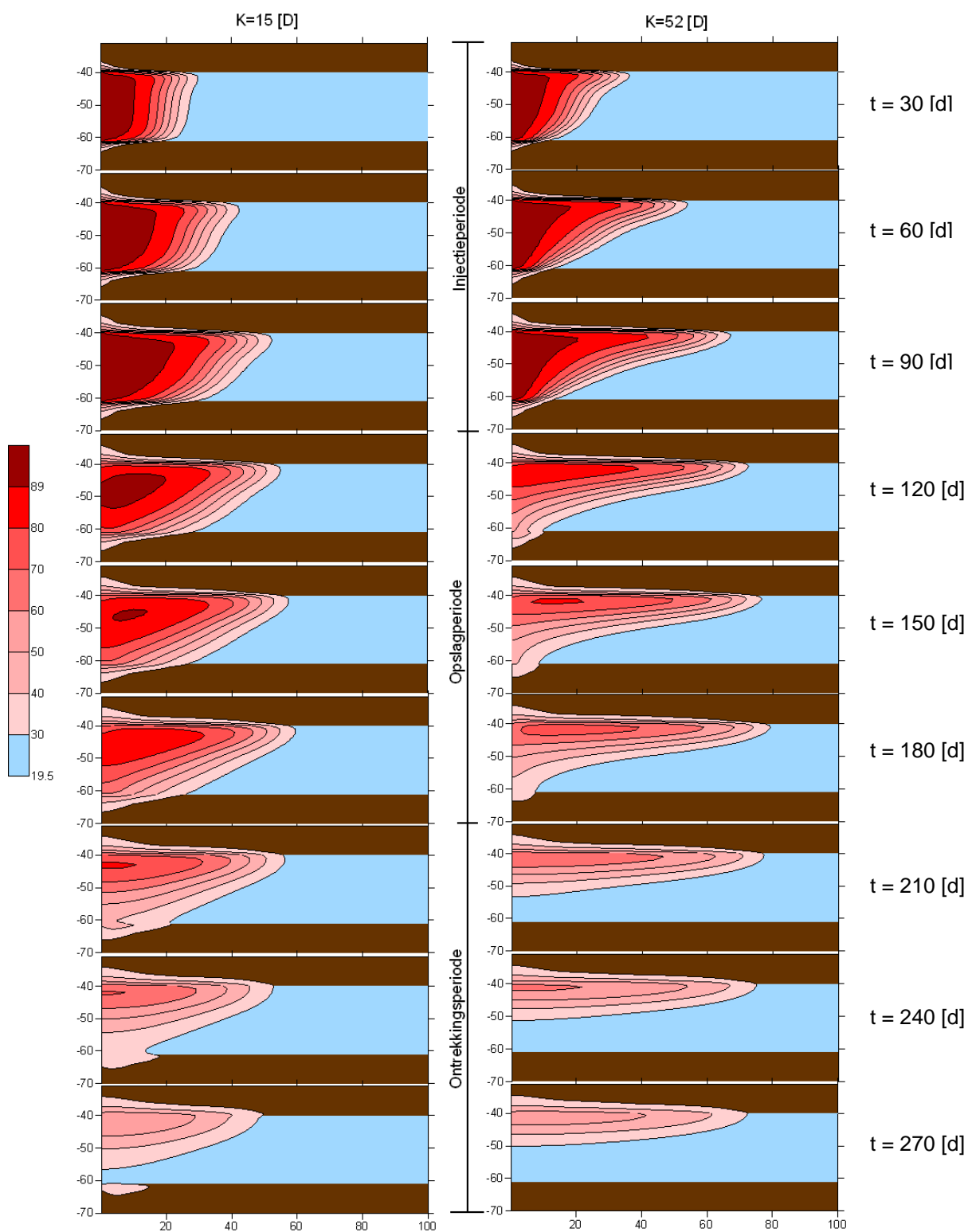
Invloedsfactoren

Het opslagrendement wordt bepaald door de warmteverliezen die optreden onder invloed van verschillende processen. Het gaat hierbij om warmtegeleiding, dispersie, grondwaterstroming en dichtheidsgedreven grondwaterstroming ('vrije convectie'). De relatieve grootte van de warmteverliezen door deze processen wordt bepaald door een aantal kenmerken van het hoge temperatuur warmteopslagsysteem (b.v. infiltratietemperatuur, opslagvolume en filterlengte) en door de eigenschappen van de ondergrond (b.v. dikte en permeabiliteit van het gebruikte watervoerende pakket en de eigenschappen van de scheidende lagen).

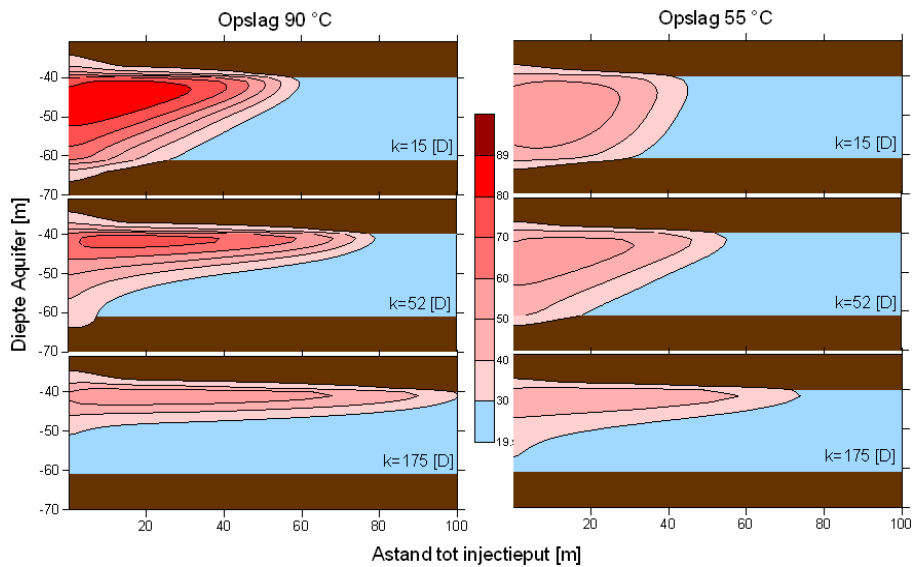
Uit zowel de uitgevoerde literatuurstudie als de modelberekeningen bleek dat de factoren die invloed hebben op de dichtheidsstroming het meest bepalend zijn voor het rendement bij hogetemperatuuropslag.

De dichtheidsstroming wordt veroorzaakt door het verschil in dichtheid tussen het geïnjecteerde water en het omgevingswater. Door de lagere dichtheid en viscositeit heeft het warmere water de neiging om naar het bovenste deel van het watervoerende pakket te stromen. Als het geïnjecteerde water zich onder een scheidende laag bevindt (dit zal vrijwel altijd het geval zijn) zorgt de dichtheidsstroming ervoor dat de (initieel verticale) overgangszone tussen het opgeslagen warme water en het omringende grondwater (het thermisch front) gaat kantelen. De mate van kanteling kan worden afgeleid uit de kantelhoek, welke gedefinieerd is als de hoek die de warme bel maakt met de verticale as. Uiteindelijk kan deze kanteling zich met het verstrijken van tijd steeds verder doorzetten, waardoor de kans toeneemt dat gedurende de onttrekkingfase relatief koud water wordt onttrokken uit het onderste deel van de aquifer.

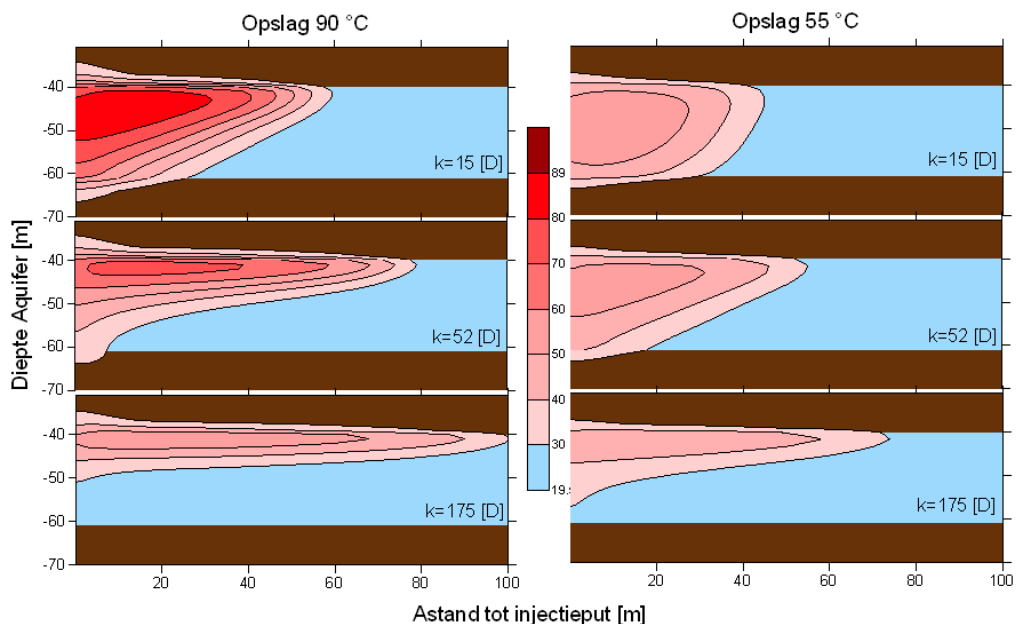
Het proces van het kantelen van het thermisch front en de ontwikkeling van de bodemtemperatuur rond de warme put gedurende het eerste jaar is in beeld gebracht in figuur 0.1. In de eerste 90 dagen is sprake van de opslag van warmte met een constant debiet (injectieperiode). Vervolgens staat het systeem gedurende 90 dagen uit (opslagperiode), waarna de warmte in 90 dagen weer wordt onttrokken (onttrekkingsperiode). Links is het standaardscenario weergegeven en rechts hetzelfde scenario, maar nu met een hogere permeabiliteit. Duidelijk is dat de kanteling bij een hogere doorlatendheid sneller optreedt en dat het opslagrendement daardoor lager zal zijn.



Figuur 0.1 Kanteling van het thermisch front en de ontwikkeling van de bodemtemperatuur rond de warme put gedurende de eerste 270 dagen van het eerste jaar (90 dagen injectie met een constant debiet, 90 dagen opslag en 90 dagen onttrekking). Links met $\kappa_a^h = 15$ Darcy en rechts $\kappa_a^h = 52$ Darcy. Bij een temperatuur van $12\text{ }^\circ\text{C}$ is dit gelijk aan een doorlatendheid van respectievelijk 10, 35 m/d.



Figuur 0.2 De invloed van de permeabiliteit op de kantelhoek. Links bij een injectie temperatuur van 90 °C en rechts bij 55 °C. Dwarsdoorsneden tonen de situatie na 180 dagen aan het einde van de opslagperiode, voor aanvang van de productieperiode. Van boven naar beneden met horizontale permeabiliteiten van respectievelijk 15, 52 en 175 **Darcy**. Bij een temperatuur van 12 °C is dit gelijk aan een doorlatendheid van respectievelijk 10, 35 en 120 **m/d**. De verticale anisotropie, $\kappa_h/\kappa_v = 10$, net als in het standaardscenario.



Figuur 0.2 De invloed van de permeabiliteit op de kantelhoek. Links bij een injectie temperatuur van 90 en rechts bij 55 . Dwarsdoorsneden tonen de situatie na 180 dagen aan het einde van de opslagperiode, voor aanvang van de productieperiode. Van boven naar beneden met horizontale permeabiliteiten van respectievelijk 15, 52 en 175 . Bij een temperatuur van 12 is dit gelijk aan een doorlatendheid van respectievelijk 10, 35 en 120 De verticale anisotropie, , net als in het standaardscenario.

De twee factoren die de grootste invloed hebben op de kanteling van het thermisch front, zijn de infiltratietemperatuur en de doorlatendheid. In Figuur 0.2 is te zien dat kanteling bij 90 °C (links) veel sneller plaatsvindt dan bij een infiltratietemperatuur van 55 °C, waardoor bij 90 °C meer koud omgevingswater wordt onttrokken in het onderste deel van het filter. De permeabiliteit van de aquifer heeft vergelijkbare invloed: bij een grotere permeabiliteit kan de kanteling van het thermisch front sneller optreden. Hierbij is zowel de horizontale permeabiliteit als de verticale permeabiliteit van belang.

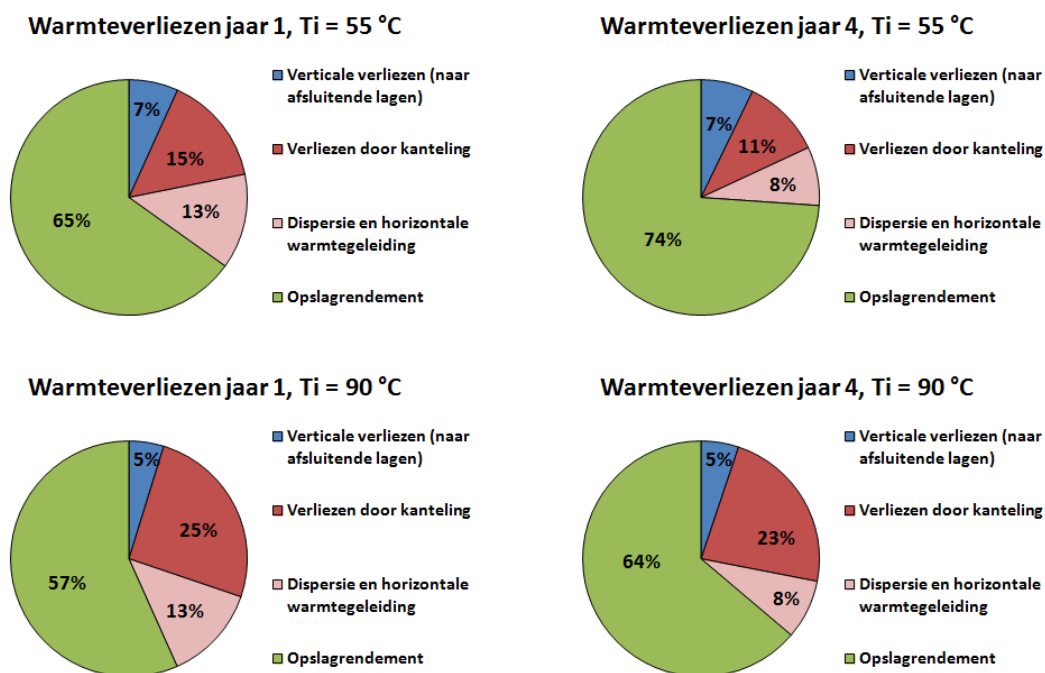
Ook het geïnjecteerde volume kan samen met de dikte van het gebruikte watervoerende pakket een grote invloed hebben op het opslagrendement. Een groter volume zorgt voor een gunstigere verhouding tussen de oppervlakte van de warme bel en het volume, waardoor de verliezen als gevolg van warmtegeleiding afnemen. Elk volume heeft een optimale verhouding tussen de hoogte en de thermische straal van de bel. Bij een kleinere hoogte neemt de straal van de bel toe, waardoor ook het contactoppervlak tussen de warme bel en de scheidende lagen toeneemt en dus ook de daaraan gekoppelde verliezen door warmtegeleiding naar de scheidende lagen. Bij een grotere hoogte neemt de straal van de bel af, waardoor de zijwaartse oppervlakte van de bel toeneemt en ook de daaraan gekoppelde verliezen in horizontale richting (kanteling, dispersie, horizontale warmtegeleiding). Bij een te dik pakket of een te klein volume zal kanteling dicht bij de put plaatsvinden en zal daardoor meer koud water worden onttrokken tijdens de onttrekkingsperiode.

In mindere mate zijn de warmtecapaciteit, warmtegeleidingcoëfficiënt en dispersiviteit van zowel de aquifer als de scheidende lagen van belang. Alleen als extreme waarden worden aangenomen is er een duidelijke verandering van het opslagrendement.

Uit de resultaten van de modelstudie is afgeleid welke processen bij hogetemperatuuropslag (>50 °C) de grootste warmteverliezen veroorzaken (zie figuur 0.3).

Hieruit blijkt dat de kanteling van het thermisch front, welke wordt veroorzaakt door de dichtheidsstroming, bij hoge temperaturen veruit het belangrijkste proces is. Uit figuur 0.3 blijkt dat in het standaard scenario (injectie temperatuur van 90 graden) de warmteverliezen door vrije convectie 25% van de totale hoeveelheid geïnjecteerde warmte bedroegen in het eerste jaar en 23% in het 4^e jaar. Verticale geleiding (door de scheidende lagen) en horizontale geleiding en dispersie waren aanzienlijk minder belangrijk. Gelijktijdig neemt het opslagrendement toe van 57% in het eerste jaar naar 64% in het vierde jaar, wat kan worden toegeschreven aan het opwarmen van de omgeving.

Bij 55 °C zijn de verliezen door kanteling duidelijk kleiner dan bij 90 °C en is het opslagrendement duidelijk groter. Desondanks zorgt de kanteling ook in dat scenario voor de grootste warmteverliezen.



Figuur 0.3 Het aandeel in de warmte verliezen van verschillende processen in het eerste en het 4^e jaar bij een injectie temperatuur van 90 en 55 °C voor het standaardscenario.

Inschatten opslagrendement

Met de kennis uit de literatuur en de resultaten van de modelstudie is een methode ontwikkeld voor het inschatten van het thermisch opslagrendement gebaseerd op de factoren die hierop de grootste invloed uitoefenen. Hierbij is voortgebouwd op werk van Gutierrez-Neri (2011). In die studie werd al aangetoond dat het opslagrendement bij HTO een sterke correlatie vertoont met het dimensieloze Rayleigh getal, en dat de relatie tussen beide een exponentiële vorm aanneemt.

Het Rayleigh getal is een maat voor de relatieve sterkte van warmtestroming onder invloed van de processen vrije convectie en warmtegeleiding.

Daar vrije convectie het grootste aandeel in warmteverliezen heeft bij HTO is de in dat onderzoek waargenomen correlatie tussen het Rayleigh getal en het opslagrendement niet verwonderlijk.

Voor deze studie is de relatie tussen beide in eerste instantie onder de loep genomen en vervolgens aangepast zodat deze geschikt is voor het inschatten van het opslagrendement. Hiervoor is een groot aantal scenario's doorgerekend met HSTWin-2D (radiaal-symmetrisch model). In deze scenario's is bewust voor gekozen om die variabelen te variëren waarvan uit het eerste deel van het onderzoek is gebleken dat zij de grootste invloed op het rendement hebben. Een drietal aanpassing aan het Rayleigh getal is nodig om te compenseren voor de factoren die niet in het Rayleigh getal zijn opgenomen, maar wel invloed hebben op het rendement. Deze factoren zijn de horizontale doorlatendheid van het watervoerende pakket, het opgeslagen volume en de dikte van het watervoerende pakket. Het aangepaste Rayleigh getal, Ra^* , ziet er na deze aanpassingen als volgt uit:

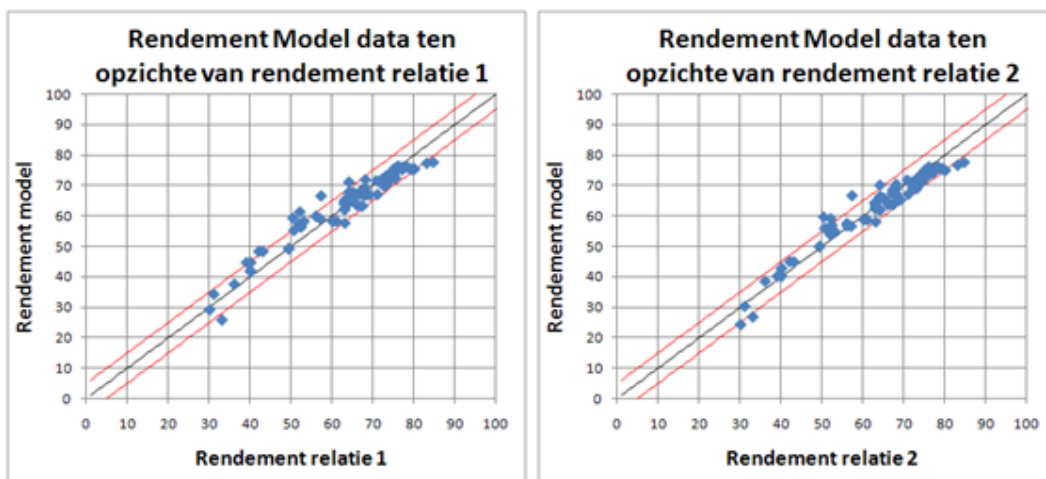
$$Ra^* = 1634 \cdot \frac{\rho \cdot H^{2.5} \sqrt{\kappa_v \cdot \kappa_h} \cdot \Delta T}{\mu \cdot \sqrt{V_i}}$$

De volgende twee relaties geven de hoogste correlaties tussen dit aangepaste Rayleigh getal en het berekende opslagrendement, afhankelijk van de dikte van het watervoerende pakket (H):

- 1: Als $60 < H < 200 \rightarrow \varepsilon = \left(82 - \frac{170}{H^{1.2}}\right) \cdot e^{(-2.7/H^{1.7}) \cdot Ra^*}$
- 2: Als $10 < H < 60 \rightarrow \varepsilon = \left(82 - \frac{170}{H^{1.2}}\right) \cdot e^{(-1.2/H^{1.35} + 0.0022) \cdot Ra^*}$

Deze relaties waren in staat het opslagrendement in het 4^e jaar van opslag van alle 74 gebruikte modelscenario's met een zeer lage gemiddelde afwijking te voorspellen. Het voorspelde rendement van bijna alle scenario's wijkt niet meer dan 5% af van de met HSTWin-2D berekende opslagrendementen (zie Figuur 0.3). Het ontwikkelen van dergelijke relaties is niet mogelijk wanneer rekening moet worden gehouden met complexe putconfiguraties. De formules gelden dus alleen voor een systeem van een enkele put zonder interferentie met andere putten. Ook regionale grondwaterstroming is niet meegenomen. Hierbij wordt opgemerkt dat de invloed van de grondwaterstroming meestal zeer gering zal zijn, omdat de stroomsnelheid in de diepere, fijnzandige watervoerende pakketten die gebruikt worden voor hogetemperatuuropslag laag is. Verder is de methode getoetst aan een set realistische waarden voor belangrijke factoren zoals permeabiliteit, anisotropie, de vorm en het volume van de bel en de eigenschappen van de scheidende lagen. De nauwkeurigheid van de methode is niet onderzocht voor extreme scenario's.

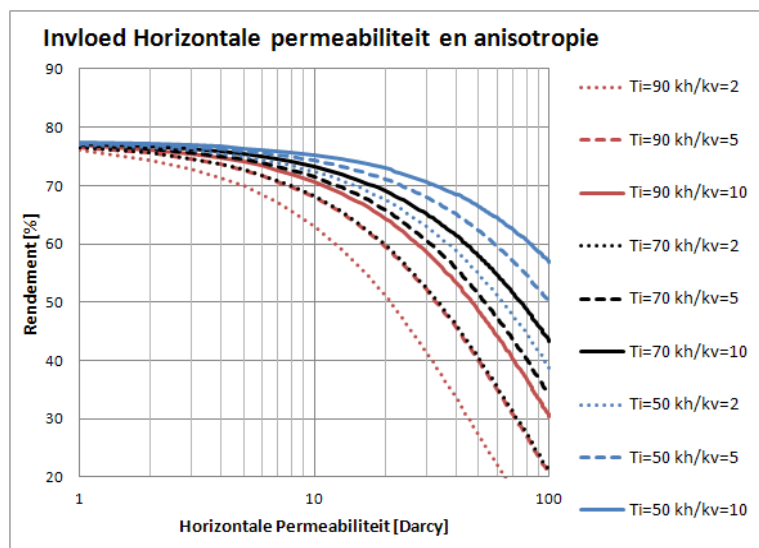
Het voorspelde rendement kan worden gezien als een minimaal haalbare waarde. Er zijn nog mogelijkheden om het rendement te verbeteren door bijvoorbeeld de 'koude putten' nabij de warme putten te plaatsen of maatregelen te nemen om de warmteverliezen te beperken (b.v. door alleen te onttrekken uit het bovenste deel van het bronfilter).



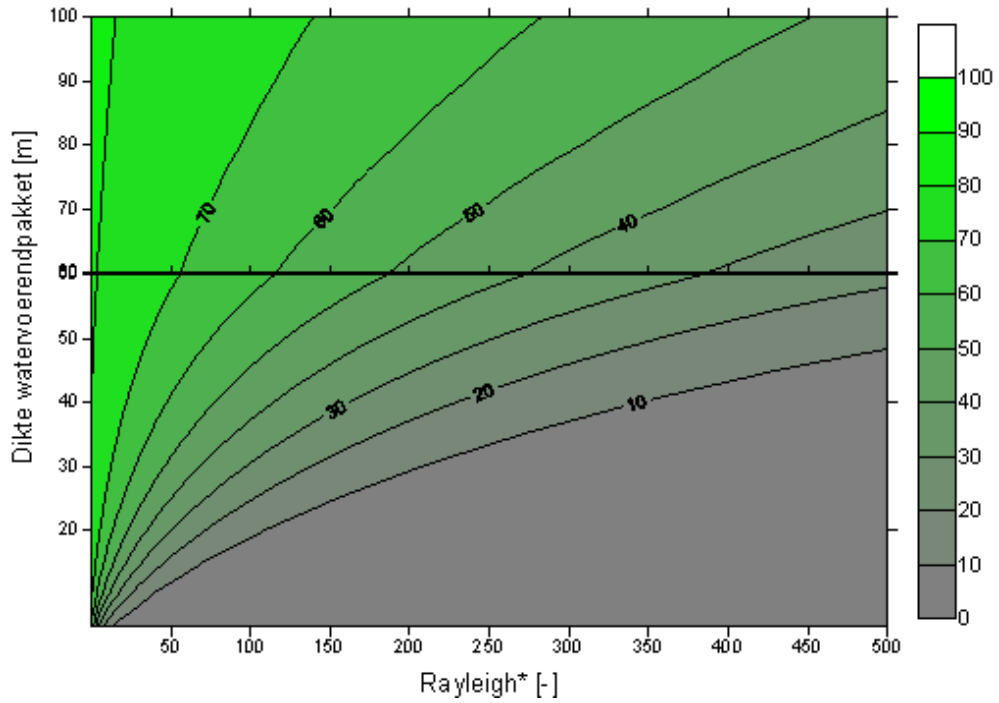
Figuur 0.4 Het door de 1^e (links) en 2^e relatie (rechts) voorspelde rendement, uitgezet tegen het rendement op basis van de modelberekeningen. De zwarte lijn toont de 1 op 1 relatie en de rode lijnen geven een 5% hoger dan wel lager rendement aan.

Door deze beperkingen zullen de ontwikkelde formules in de praktijk vooral van nut zijn bij het optimaliseren van een systeem in de ontwerpfase. Zonder een uitgebreide modelstudie uit te hoeven voeren, kan inzicht worden verschaft in de complexe relaties tussen de belangrijkste factoren die invloed hebben op het rendement bij hogetemperaturopslag. Een voorbeeld hiervan is Figuur 0.5, waar de invloed van de permeabiliteit, anisotropie en injectietemperatuur op het opslagrendement in beeld zijn gebracht. Hieruit kan worden afgeleid dat een lager opslagrendement kan worden "ingewisseld" voor een hogere doorlatendheid (en dus een besparing op de investeringskosten door de bijbehorende hogere capaciteit per put).

Tenslotte kan met de twee formules een contourplot gemaakt worden welke het mogelijk maakt het opslagrendement direct af te lezen met behulp van de dikte van het watervoerende pakket en het aangepaste Rayleigh nummer (Figuur 0.6).



Figuur 0.5 De invloed van de horizontale permeabiliteit op het rendement voor variaties op het standaard scenario. Bij injectie temperaturen van 90 (rood), 70 (zwart) en 50 (blauw) en anisotropie waarden van 10, 5 (streepjes lijnen) en 2 (stippel lijnen).



Figuur 0.6; Het rendement gebaseerd op het Ra^* en H . Rechts de kleurenschaal gebruikt om het rendement weer te geven. Boven en onder de $H = 60$ meter zijn de bijbehorende relaties gebruikt

Inhoudsopgave

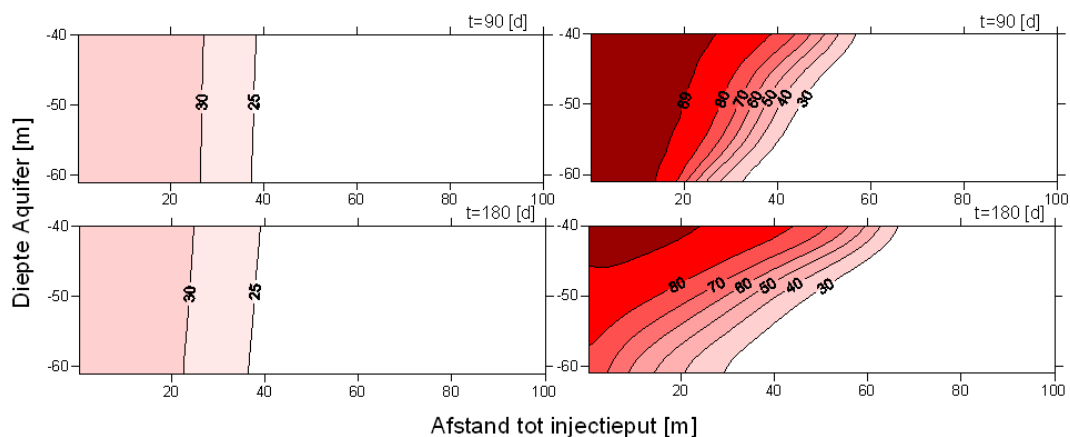
Symbolenlijst	2
Samenvatting	3
1 Introductie	13
1.1 Probleemstelling	13
1.2 Onderzoeksdoelen	14
2 Literatuuronderzoek	15
2.1 Factoren die invloed hebben op het opslagrendement	15
2.1.1 Opslagrendement WKO	15
2.1.2 Geleiding	16
2.1.3 Dispersie & heterogeniteit	19
2.1.4 Invloed aantal cycli	22
2.1.5 Dichtheidsgedreven grondwaterstroming	22
2.1.6 Grondwaterstroming	27
3 Modelleren HTO	31
3.1 Aanpak & Modelopbouw	31
3.2 Resultaten	33
3.2.1 Validatie	33
3.2.2 Belangrijkste factoren	33
3.2.3 Herkomst warmteverliezen	40
4 Inschatten van het opslagrendement	42
4.1 Het Rayleigh nummer	42
4.2 Correlatie model data met Rayleigh nummer	44
4.3 Aangepast Rayleigh nummer	45
4.3.1 Anisotropie	45
4.3.2 Injectie Volume	46
4.3.3 Vereenvoudiging	47
4.3.4 Aquifer dikte	48
4.4 Mogelijkheden van Rayleigh Methode	50
4.4.1 Toepasbaarheid	50
4.4.2 Inzichtelijk maken invloed parametercombinaties	52
4.4.3 Rendement inschatten	54
5 Conclusies	56
5.1 Literatuur- en modelstudie	56
5.2 Rayleigh methode	57
Bibliografie	59
Bijlagen:	
1 Schematisatie model grid	
2 Toetsing numerieke model met literatuur data	
3 Curve fitting exponentiële relatie	
4 Ontwikkeling van de bodemtemperatuur bij standaard scenario gedurende 1 cyclus	

1 Introductie

1.1 Probleemstelling

In vergelijking met 'lage temperatuur' energieopslag speelt het thermisch opslagrendement bij hogetemperatuuropslag (HTO) een belangrijkere rol. Door het grote temperatuurverschil kan het opslagrendement namelijk veel lager komen te liggen (van Elswijk & Willemsen, 2002). Voor het bepalen van de financiële en technische haalbaarheid is het daarom belangrijk vooraf een goede inschatting te kunnen maken van het opslagrendement: de hoeveelheid onttrokken energie gedeeld door de hoeveelheid geïnjecteerde energie gemeten ten opzichte van de natuurlijke grondwater temperatuur in de gebruikte aquifer bij een gelijke hoeveelheid onttrokken en geïnjecteerd water (zie vergelijking 2).

De voornaamste reden voor de relatief grote warmteverliezen is het optreden van dichtheidsgedreven grondwaterstroming, of vrije convectie, onder invloed van het verschil in dichtheid en viscositeit tussen het natuurlijke grondwater en het geïnjecteerde warme water. Door met name de dichtheidsverschillen zal het warmere en daardoor lichtere water zich naar boven willen begeven. Als het geïnjecteerde water zich onder een scheidende laag bevindt zal daardoor een kanteling van het thermische front gaan plaatsvinden. Dit proces is te zien in Figuur 1.1. Uiteindelijk zal deze kanteling zich met het verstrijken van tijd zich steeds verder doorzetten, waardoor de kans toeneemt dat gedurende productie relatief koud water wordt onttrokken uit het onderste deel van de aquifer.



Figuur 1.1; Links een KWO systeem met een injectie temperatuur van $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ bij een achte grondtemperatuur van $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rechts eenzelfde systeem met een injectie temperatuur van $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. De kanteling als gevolg van de hoge injectie temperatuur na 90 en 180 opslag dagen is goed zichtbaar.

Naast warmteverliezen door vrije convectie, wat alleen (significant) optreedt bij HTO, heeft de hogere injectietemperatuur ook een groot effect op warmteverliezen door geleiding, die naar gelang het temperatuurverschil tussen het natuurlijke en opgeslagen water zullen toenemen. Als laatste zullen er ook nog warmteverliezen middels macrodynamische dispersie en de grondwaterstroming optreden, welke in principe een stuk minder beïnvloed worden door de temperatuur van het opgeslagen water.

Al deze factoren tezamen zorgen er niet alleen voor dat het opslagrendement dat kan worden behaald lager is, maar maken het inschatten van het rendement en bepalen hoe verschillende factoren invloed daarop hebben zonder een complete modellering uit te voeren aanzienlijk lastiger. Het ontwikkelen van een methode die snel en eenvoudig inzicht kan geven in het thermisch opslagrendement van HTO systemen kan daarom van groot belang zijn voor der verdere ontwikkeling van HTO.

1.2 Onderzoekdoelen

De doelen van werkpakket 3 komen overeen met de doelen zoals zij vooraf in het projectplan bepaald zijn, namelijk:

- *Het in kaart brengen van het opslagrendement voor diverse parametercombinaties en in welke mate deze aspecten effect hebben op het opslagrendement*

Hiervoor zal worden gekeken naar welke factoren bepalend zijn voor warmte verliezen in de bodem, en in welke mate zij de vier genoemde processen (dichtheidsgedreven grondwaterstroming, geleiding, dispersie en grondwaterstroming) beïnvloeden. Dit zal voornamelijk gebeuren door middel van een literatuuronderzoek, aangevuld met resultaten uit eigen berekeningen. De focus zal hierbij in de eerste plaats liggen op de warmte verliezen door dichtheidsgedreven grondwaterstroming, aangezien deze specifiek zijn voor HTO. Daarnaast worden warmteverliezen door geleiding ook uitgebreid behandeld daar deze evenredig zijn met de temperatuurgradiënt, welke bij HTO aanzienlijk groter is dan bij 'lage temperatuur WKO'.

- *De afleiding van het functionele relatie tussen het opslagrendement en de factoren die het meest bepalend zijn voor dit rendement*

Hiervoor zal gebruik worden gemaakt van een groot aantal model simulaties van verschillende scenario's. De input parameters van deze scenario's zullen worden gebaseerd op de kennis verkregen in het literatuuronderzoek over welke aspecten het meeste invloed hebben op het opslagrendement. Vervolgens kunnen de resultaten van de modelleringen gebruikt worden voor het afleiden van een relatie tussen het rendement en de belangrijkste aspecten die invloed hebben op dit rendement. Hiervoor zal worden voortgeborduurd op het werk van Gutierrez-Neri et al. (2011). Hierin werd aangetoond dat wanneer men het berekende opslagrendement voor verschillende scenario's uitzet tegen het dimensieloze Rayleigh getal (een maat voor de relatieve sterkte van warmtestroming onder invloed van de processen vrije convectie en warmte geleiding). Een aantal aanpassingen aan dit Rayleigh getal maken het mogelijk een inschatting te maken van het opslagrendement gebaseerd op de belangrijkste factoren.

2 Literatuuronderzoek

2.1 Factoren die invloed hebben op het opslagrendement

2.1.1 Opslagrendement WKO

Het rendement van WKO wordt bepaald door de verliezen die optreden onder invloed van verschillende processen. Doughty et al (1982) geeft een overzicht van de bepalende factoren voor het opslagrendement en de onttrekkingstemperaturen voor lage temperatuur WKO. Voor het onderzoek is gebruik gemaakt van een groot aantal modelberekeningen voor één op zichzelf staande onttrekking- en infiltratieput met een volledig filter in een oneindig uitgestrekt watervoerend pakket met een constante dikte (H , zie symbolenlijst voor de eenheden). Aangenomen is dat de invloed van dichtheidsstroming en regionale grondwaterstroming te verwaarlozen is. Verder is aangenomen dat het watervoerende pakket homogeen is met een constante warmtegeleidingcoëfficiënt (λ_a), warmtecapaciteit (C_a) en dispersielengtes in de richting evenwijdig aan de stromingsrichting (longitudinale dispersie; $d_{||}$) en de richting loodrecht op de stromingsrichting (transversale dispersie d_{\perp}). Aan de boven- en onderzijde is het watervoerende pakket begrensd door ondoorlatende scheidende lagen met dikte D (boven) en oneindige dikte (onder). Ook de scheidende lagen hebben een constante warmtegeleidingcoëfficiënt (λ_c) en warmtecapaciteit (C_c). Zowel de temperatuur bij aanvang (T_0) als de temperatuur bij infiltratie (T_i) is constant.

De infiltratieperiode (t_i), opslagperiode (t_s), onttrekingsperiode (t_p) en rustperiode (t_r) zijn gelijk en vormen samen de duur van de gehele cyclus (t_c), dus $t_i = t_s = t_p = t_r = t_c/4$. Verder is het debiet tijdens infiltratie (Q_i) en onttrekking (Q_p) constant en is het geïnfiltreerde volume (V_w) gelijk aan het onttrokken volume, dus: $Q_i \cdot t_i = Q_p \cdot t_p = V_w$. Na afloop van de infiltratieperiode kan de maximale verbreiding van het infiltratiewater in het watervoerende pakket (R_w) worden berekend met $V_w = \phi \pi R_w^2 H$, waarin ϕ de porositeit van het watervoerende pakket is. Het thermisch bodemvolume (V_{th}) is het bodemvolume waarin opwarming dan wel afkoeling plaatsvindt en kan worden berekend met $V_{th} = \left(\frac{c_w}{c_a}\right) V_w$. Het thermisch bodemvolume (cilindrisch van vorm) heeft een constante temperatuur gelijk aan de infiltratietemperatuur en een energie-inhoud die gelijk is aan de energie-inhoud van het geïnfiltreerde water. Het thermisch volume kan ook worden uitgedrukt als $V_{th} = \pi R_{th}^2 H$, waarin R_{th} de thermische straal is. De thermische straal is dus als volgt gedefinieerd:

$$R_{th} = \sqrt{(V_{th}/\pi H)} = \sqrt{(V_w C_w / C_a \pi H)} \quad (\text{Vgl. 1})$$

In het artikel wordt het opslagrendement en de te verwachten onttrekkingstemperatuur in beeld gebracht aan de hand van een aantal dimensieloze parameters. Het opslagrendement (ε) is gedefinieerd als de verhouding tussen de onttrokken en geïnfiltreerde hoeveelheid energie als de onttrokken en geïnfiltreerde hoeveelheid water gelijk zijn. Voor het bepalen van de energie inhoud wordt gebruik gemaakt van de oorspronkelijke bodemtemperatuur (T_a) als referentie.

Het opslagrendement is dan als volgt gedefinieerd:

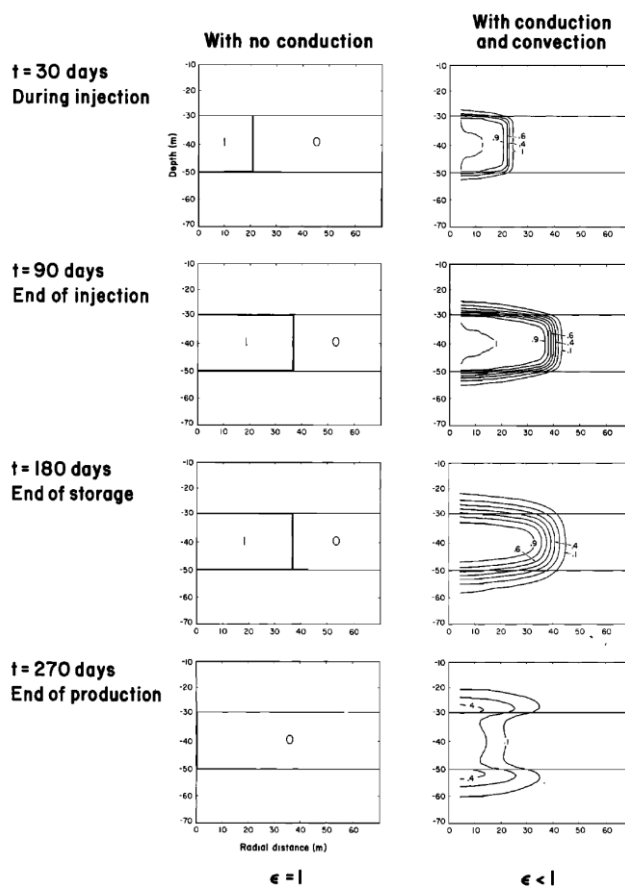
$$\varepsilon = \frac{\bar{T}_p - T_a}{T_i - T_a} \quad (\text{Vgl. 2})$$

Waarin \bar{T}_p de gemiddelde temperatuur van het onttrokken water is. Een dimensieloze temperatuur (T') is als volgt gedefinieerd:

$$T' = \frac{T - T_a}{T_i - T_a} \quad (\text{Vgl. 3})$$

2.1.2 Geleiding

Om de invloed van warmtegeleiding op de temperatuurverdeling in de ondergrond duidelijk te maken hebben Doughty et al (1982) berekeningen uitgevoerd met en zonder warmtegeleiding (zie figuur 2.1). De dwarsdoorsneden maken duidelijk dat door de warmtegeleiding een deel van de warmte verloren gaat in verticale richting (geleiding van warmte vanuit het watervoerende pakket naar de scheidende lagen) en een deel in horizontale richting (blijft na onttrekking van het geïnfilterde volume achter in het watervoerende pakket).



Figuur 2.1; Berekende temperatuurverdeling op verschillende momenten tijdens de eerste cyclus zonder warmtegeleiding (links) en met warmtegeleiding (rechts). Bron: Doughty et al. (1982).

Warmte geleiding vindt plaats onder invloed van een temperatuurgradiënt. Derhalve zorgt het zowel bij lage als bij hoge temperatuur systemen voor warmteverliezen in de bodem. De mate van warmtegeleiding is afhankelijk van een aantal factoren zoals beschreven in de Wet van Fourier;

$$q = \lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (\text{Vgl. 4})$$

q = Warmtegeleiding in [W]

λ = Warmtegeleidings coefficient [W/m · °C]

A = Oppervlakte waarover de geleiding optreedt [m²]

$\frac{dT}{dx}$ = Temperatuurgradiënt [°C/m]

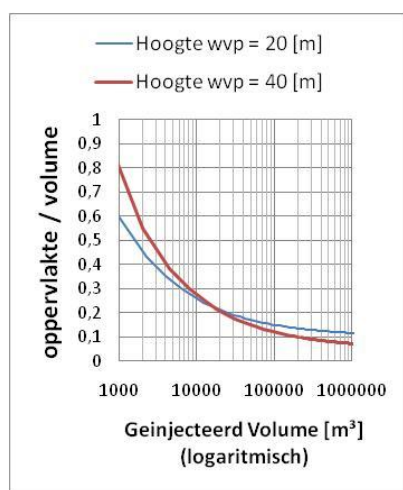
De Wet van Fourier toont aan dat warmtetransport in principe altijd zal plaatsvinden zolang er een temperatuurgradiënt aanwezig is over het medium. Het vermogen waarmee warmte verplaatst wordt door warmtegeleiding blijkt proportioneel te zijn aan deze temperatuurgradiënt. Dit verklaart waarom geleidingsverliezen bij HTO in absolute zin vele malen hoger zijn dan bij energieopslag met een lage temperatuur. Als warmtegeleiding het enige proces is dat voor warmteverliezen zorgt, dan is het opslagrendement bij hogetemperatuuropslag echter gelijk aan dat van 'lage temperatuur WKO': Bij HTO zijn de absolute warmteverliezen weliswaar groter, maar is de opgeslagen hoeveelheid energie in gelijke mate hoger.

Daarnaast leert de Wet van Fourier dat de grootte van warmtegeleiding verder bepaald wordt door de warmtegeleidingcoëfficiënt (λ). Een lage λ zal een isolerende werking hebben, terwijl een grote λ de warmteverliezen door geleiding juist vergroot. In theorie kan de warmtegeleidingcoëfficiënt dus van grote invloed zijn op het opslagrendement. In de praktijk is de onzekerheid in λ echter beperkt en daardoor ook de onzekerheid in de warmteverliezen door warmtegeleiding.

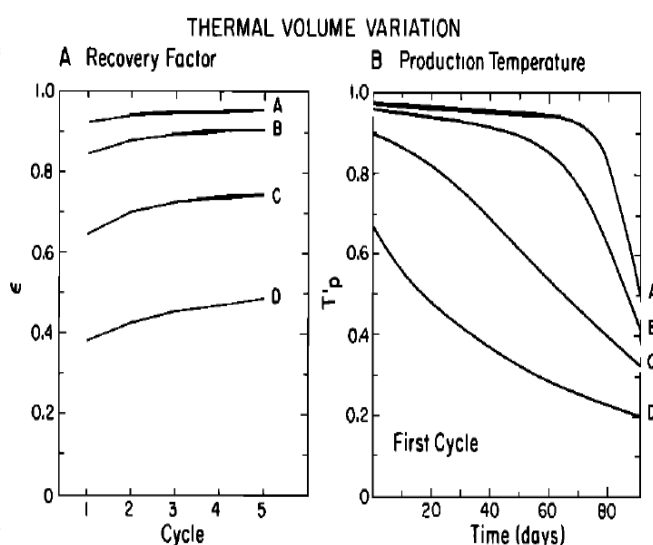
Niet alleen de geleidingscoëfficiënt van de aquifer λ_a maar ook die van de boven en onderliggende scheidende lagen λ_c kunnen van belang zijn. Een λ_c van nul zou betekenen dat het opslagsysteem van boven en onder thermisch geïsoleerd is. Warmte kan dan echter nog wel verloren gaan door convectie door de scheidende laag, maar deze verliezen zijn door de lage permeabiliteit van deze lagen over het algemeen klein. Toch kunnen deze verliezen relevant zijn, bijvoorbeeld in verband met de opwarming van bovenliggende aquifers.

Tenslotte blijkt uit de Wet van Fourier dat het oppervlakte waarover de warmtetransport plaatsvindt invloed heeft op de geleidingsverliezen. Die nemen toe naarmate het raakvlak tussen de warme bel en het koudere omgevingswater toeneemt. Een groter raakvlak hoeft echter niet altijd een slechter rendement te betekenen. Voor het rendement is de verhouding tussen de oppervlakte en het volume bepalend. Figuur 2.2 laat zien dat de verhouding tussen het oppervlakte en het volume steeds kleiner worden wanneer het geïnjecteerde volume groter wordt en de hoogte van het watervoerend pakket gelijk blijft. Hier is voor het berekenen van de oppervlakte (raakvlak van de warme bel) en voor het berekenen van het volume uitgegaan van een cilindervormige warme bel.

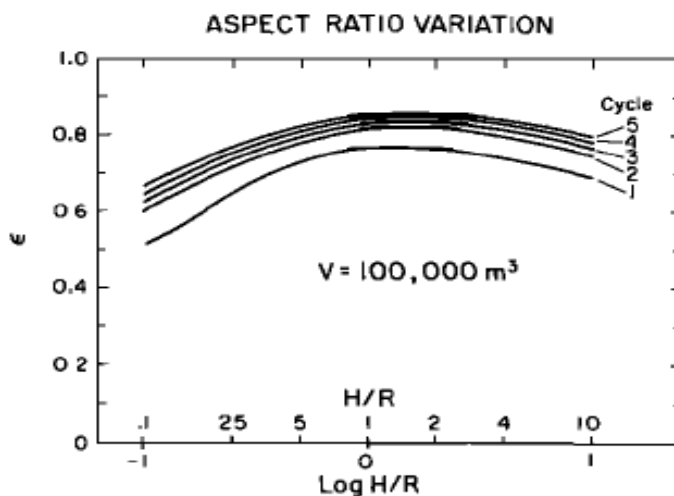
Figuur 2.3 laat duidelijk zien dat de grootte van geleidingsverliezen afnemen wanneer het volume toeneemt. Doughty et al. (1982) toonde echter aan dat wanneer men van een vast volume uitgaat en de aquiferdikte varieert er wel een bepaald optimum gevonden wordt, welke bepaald wordt door de geometrie van de bel. In figuur 2.4 is zowel het rendement als de onttrekkingstemperatuur uitgezet tegen de 'aspect ratio', wat een beschrijving is van de vorm van de bel en gedefinieerd is als H/R_{th} ; de hoogte van het watervoerend pakket gedeeld door de thermische straal van de opslag. Het laat zien dat bij een volume van 100.000 m^3 de optimale verhouding tussen de hoogte en de thermische straal tussen de 1 en 2 ligt. Als warmtegeleiding het enige proces is dat voor warmteverliezen zorgt, dan zal deze optimale verhouding niet alleen gelden voor een opslag volume van 100.000 m^3 , maar algemeen gelden.



Figuur 2.2;
Bij een constante aquifer dikte en een toename van het injectie volume neemt de verhouding van het oppervlakte tot dit volume af.



Figuur 2.3;
Invloed van het injectie volume op het rendement en de onttrekkingstemperatuur.
A: $3.100.000 \text{ m}^3$, B: 390.000 m^3 , C: 25.000 m^3 , D: 3.100 m^3
Bron: Doughty et al., 1982

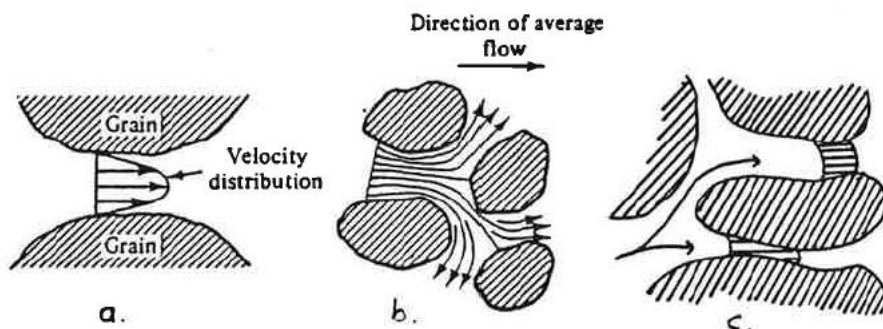


Figuur 2.4;
Opslagrendement bij verschillende verhoudingen tussen de dikte en de thermische straal
Bron: Doughty et al., 1982.

2.1.3 Dispersie & heterogeniteit

Dispersie is het proces waarbij menging van water optreedt als gevolg van lokale variaties in de stroomsnelheid rond de gemiddelde stroomsnelheid. Deze lokale variaties kunnen verschillende oorzaken hebben, namelijk (Sauty et al, 1978):

- De stroomsnelheidsverdeling binnen de poriën (porieschaal)
- De vervorming van de stroombanen doordat het water om de bodemdeeltjes heen moet, waardoor warmte-uitwisseling (door diffusie en/of geleiding) kan optreden tussen naast elkaar gelegen stroombanen (schaal van meerdere poriën)
- Verschillen in stroomsnelheden tussen zones met verschillende doorlatendheden (heterogeniteiten, gelaagdheid). In lagen met een relatief hoge doorlatendheid zal het warme (of koude) water zich sneller verspreiden, waardoor de temperatuur op enige afstand van de put in deze lagen eerder zal stijgen dan in minder doorlatende lagen. Als gevolg van de temperatuurverschillen die daardoor ontstaan zal onder invloed van geleiding warmte worden overgedragen van de goed doorlatende laag naar de minder doorlatende laag.



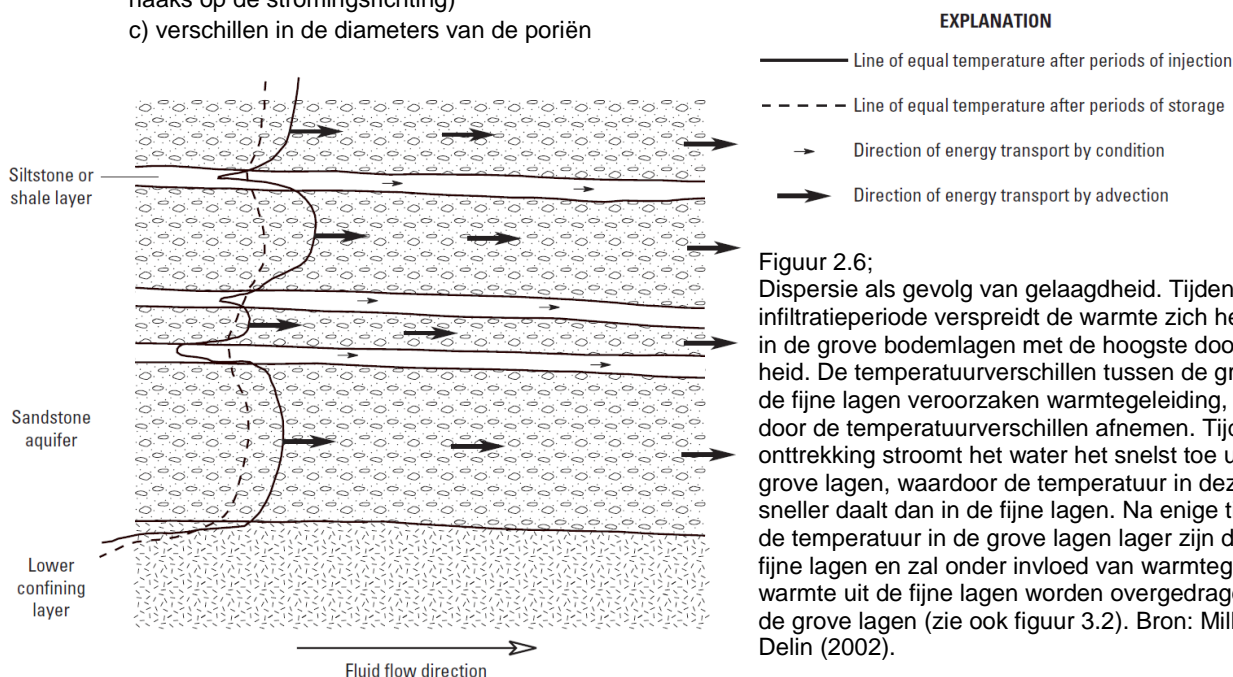
Figuur 2.5;

Processen op microschaal die dispersie veroorzaken (Bron: Kiwa, 1989; afkomstig uit Bear en Verruijt):

a) de snelheidsverdeling binnen de poriën

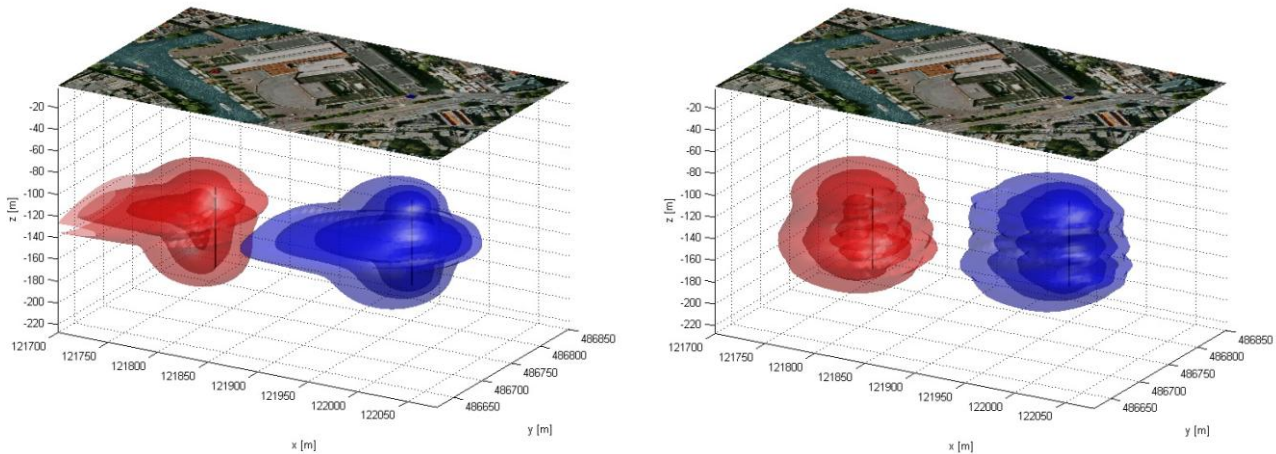
b) stroming om de korrels heen (spreiding in de snelheid in de stromingsrichting en verspreiding in richting haaks op de stromingsrichting)

c) verschillen in de diameters van de poriën



Figuur 2.6;

Dispersie als gevolg van gelaagdheid. Tijdens de infiltratieperiode verspreidt de warmte zich het snelst in de grove bodemlagen met de hoogste doorlatendheid. De temperatuurverschillen tussen de grove en de fijne lagen veroorzaken warmtegeleiding, waardoor de temperatuurverschillen afnemen. Tijdens de onttrekking stroomt het water het snelst toe uit de grove lagen, waardoor de temperatuur in deze lagen sneller daalt dan in de fijne lagen. Na enige tijd zal de temperatuur in de grove lagen lager zijn dan in de fijne lagen en zal onder invloed van warmtegeleiding warmte uit de fijne lagen worden overgedragen naar de grove lagen (zie ook figuur 3.2). Bron: Miller en Delin (2002).



Figuur 2.7

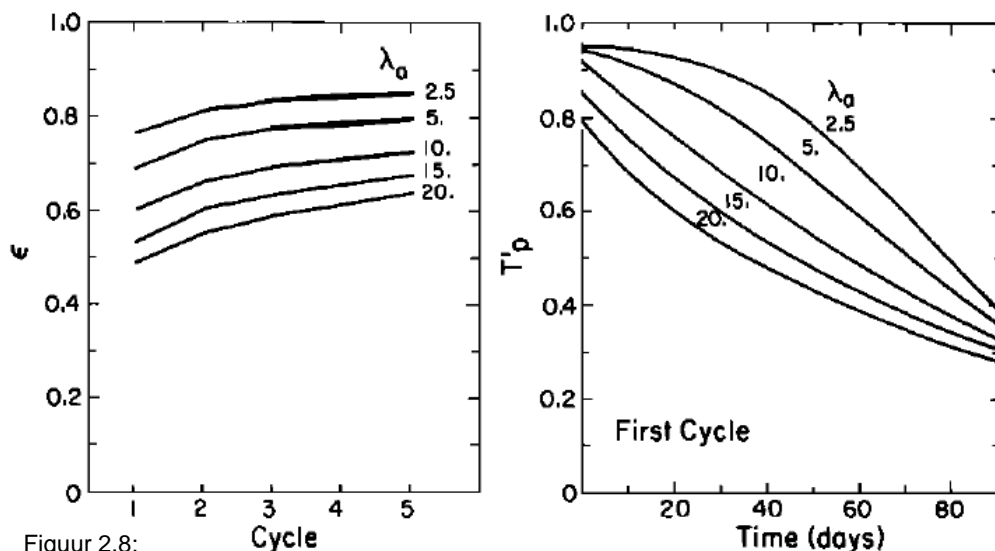
Invloed van heterogeniteit in de verticale richting als gevolg van gelaagdheid (Bron: Caljé, 2010).

Links: Homogeen watervoerend pakket met een 12 m dikke grindlaag (gemiddelde doorlatendheid watervoerende pakket 37 m/d en doorlatendheid grindlaag 250 m/d).

Rechts: Situatie waarin per laag van 5 m dik een ruimtelijke variatie in doorlatendheid is gegenereerd met een gemiddelde waarde van 37 m/d en een standaard deviatie van 18,5 m/d.

Het onderzoek door Sauty et al (1978) geeft aan dat de invloed van deze dispersie op de temperatuur van het onttrokken water goed kan worden verklaard door een hogere warmtegeleidingcoëfficiënt in de horizontale richting aan te nemen dan op grond van laboratoriumproeven mag worden verwacht: in de geanalyseerde proeven was de schijnbare warmtegeleidingcoëfficiënt respectievelijk 4, 7½ en 20 keer zo groot als de in het laboratorium gemeten waarde. Bij de hoge temperatuur experimenten die zijn uitgevoerd door de Auburn University was de schijnbare warmtegeleidingcoëfficiënt 2 keer zo groot als de laboratorium waarde. Doughty et al. (1982) geven een empirische relatie om de schijnbare warmtegeleidingcoëfficiënt ($\bar{\lambda}$) te berekenen op basis van de warmtegeleidingcoëfficiënt van het watervoerende pakket en de longitudinale dispersielengte.

$$\bar{\lambda} = \lambda_a + 0,3 \cdot \frac{d_l R_{th} C_a}{t_i} \quad (\text{Vgl. 5})$$



Figuur 2.8;

Opslagrendement en onttrekkingstemperatuur bij verschillende waarden voor de schijnbare warmtegeleidingcoëfficiënt van het watervoerende pakket.

$V_w = 60.000 \text{ m}^3$; $H = 50 \text{ m}$; $D = \infty$; $t_i = t_s = t_p = t_r = 90 \text{ d}$; $\lambda_c = 2,5 \text{ W/mK}$; $\rho C_a = 2,5 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$; ρC_c

Deze schijnbare warmtegeleidingcoëfficiënt kan worden gebruikt om een inschatting te verkrijgen van het opslagrendement. Figuur 2.8 toont de invloed van de warmtegeleidingcoëfficiënt van het watervoerende pakket op het opslagrendement en de onttrekkings-temperatuur. Een belangrijke kanttekening bij het werk van Sauty et al. (1978) en Dougty et al. (1982) (en dus bij figuur 2.8) is dat hierin is aangenomen dat de temperatuur in het watervoerende pakket over de gehele dikte gelijk is. Dit betekent dat is aangenomen dat de verticale warmtegeleidingcoëfficiënt oneindig groot is. In werkelijkheid wordt het warmteverlies uit het watervoerende pakket echter gehinderd doordat binnen het watervoerende pakket warmtegeleiding plaatsvindt, wat een relatief traag proces is.

Buscheck (1984) toonde aan dat een verandering van de geleidingscoëfficiënt van de aquifer een grote invloed kan hebben op het opslagrendement (zie tabel 2.1). Bij een verhoging van λ_a met een factor 20 in verticale richting en een factor 18,2 in de horizontale richting, neemt het opslagrendement af van 68 naar 47%.

Tabel 2.1; Berekend opslagrendement bij verschillende warmtegeleidingcoëfficiënten in horizontale en verticale richting.

$$H = 21 \text{ m}, V_i = 55000 \text{ m}^3, T_i = 90 \text{ }^\circ\text{C}, T_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}, \kappa_h = 15 D, \kappa_h/\kappa_v = 10$$

Bron: Buscheck (1984)

$\lambda_a^{hor} \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$	$\lambda_a^{vert} \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$	Opslagrendement [%]
2,52	2,29	68%
4,81	2,29	67%
45,8	45,8	47%

Tegelijkertijd werd het belang van deze ondervinding ondermijnt aangezien de natuurlijke variatie in λ over het algemeen erg klein is. Aangenomen wordt dat deze variatie in de praktijk niet veel groter zal zijn dan een factor 2. Dit is niets vergeleken met bijvoorbeeld de variatie in permeabiliteit, welke per locatie meerdere ordes van grootten kan veranderen (Buscheck, 1984). Uit tabel 2.1 blijkt dat bij een variatie van λ_a met een factor 2 de invloed op het opslagrendement slechts 1% was.

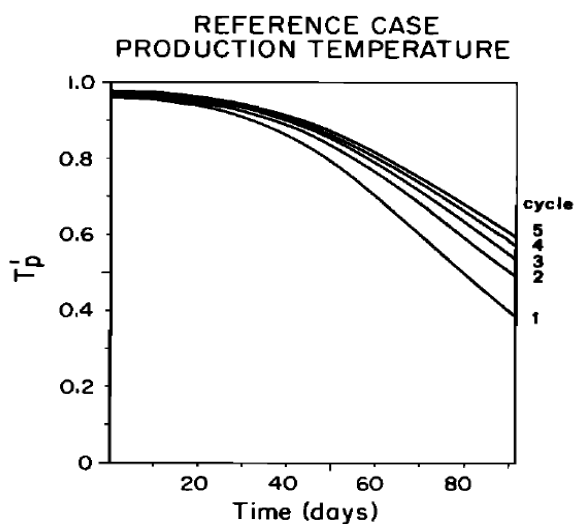
De invloed van heterogeniteit op het opslagrendement van WKO-systemen is (en wordt) nader onderzocht in het kader van het Meer Met Bodemenergie promotieonderzoek van Wijk Sommer. De resultaten zijn gepresenteerd op het 1e Nationaal Congres Bodemenergie (oktober 2011). De resultaten gaven aan dat het rendement in een heterogene situatie zowel beter als slechter kan zijn dan het rendement in een homogene situatie. Een reeks berekeningen met verschillende maten van (statistisch gegenereerde) heterogeniteit gaven aan dat heterogeniteit zorgt voor een bepaalde onzekerheidsmarge op het opslagrendement dat is berekend met een homogeen model. Hoe groter de afstand tussen de warme en de koude bron, hoe kleiner deze onzekerheidsmarge. Bij een afstand van 3 maal de thermische straal (wat de ontwerpnormen van de NVOE aangeven) is deze onzekerheidsmarge beperkt en lijkt er geen grote nadelige invloed op te treden als gevolg van heterogeniteiten in de ondergrond. Dit komt grotendeels overeen met bevindingen uit eerder uitgevoerd onderzoek. Op grotere schaal lijkt enige heterogeniteit weliswaar invloed te hebben op de temperatuurverdeling in de ondergrond gedurende de opslagcyclus, maar is de invloed op het opslagrendement relatief klein (Buscheck et al., 1983; Ferguson, 2007; Caljé, 2010).

De verklaring hiervoor is dat de beter doorlatende delen weliswaar meer water opnemen bij infiltratie, maar bij onttrekking ook weer meer water afgeven. Consequentie is dat de effecten tijdens infiltratie en onttrekking elkaar grotendeels compenseren. Voorwaarde hierbij is dat de afstand tussen de warme en “koude” bronnen groot genoeg is, zodat kortsluiting/rondpompen wordt voorkomen. Onder sterk heterogene omstandigheden zal de heterogeniteit overigens wel degelijk een merkbare invloed hebben op het opslagrendement (zie o.a. Sauty et al., 1978 en Doughty et al., 1982). Verder lijken heterogeniteiten in verticale richting (gelaagdheid) meer invloed te hebben dan heterogeniteiten in horizontale richting (Caljé, 2010), zie ook Figuur 2.7.

Bij de eerste experimenten met WKO in de jaren '70 zijn relatief kleine volumes opgeslagen. Gebleken is dat de opslagrendementen bij deze experimenten relatief laag waren. Dit wordt verklaard doordat de schaal van de heterogeniteiten in dit geval relatief groot is ten opzichte van de schaal van de bel, wat betekent dat heterogeniteiten verhoudingsgewijs veel effect hebben op het rendement (Buscheck, 1984).

2.1.4 Invloed aantal cycli

Doordat elke cyclus een deel van een opgeslagen warmte verloren gaat, zal de temperatuur in de omgeving van de bron na afloop van elke cyclus iets hoger zijn dan bij aanvang van de voorgaande cyclus. Gevolg is dat de warmteverliezen door geleiding en dispersie in de eerste cyclus het grootst zijn en met elke volgende cyclus kleiner worden. Dit betekent dat de temperatuur van het onttrokken water en het opslagrendement toenemen met het aantal doorlopen cycli (zie figuur 2.9).



Figuur 2.9 ; Verloop van de temperatuur van het onttrokken water in de eerste 5 cycli.

Bron: Doughty et al., 1982.

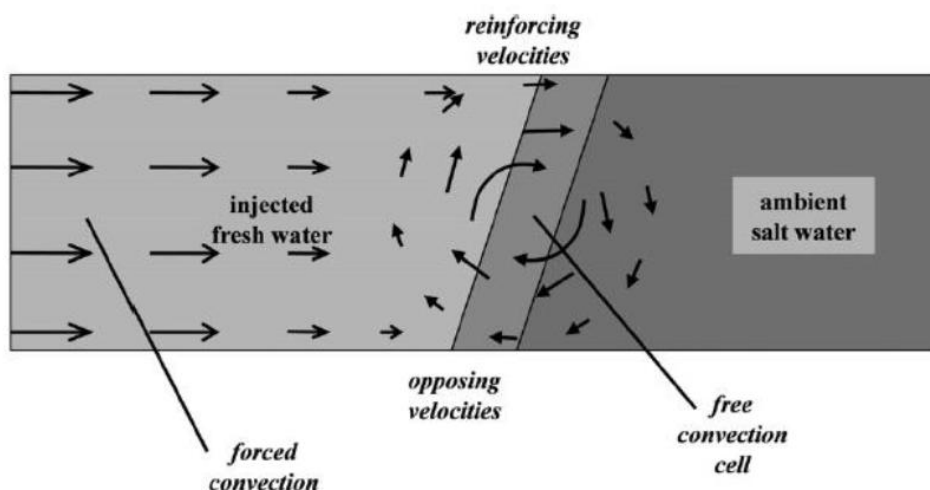
2.1.5 Dichtheidsgedreven grondwaterstroming

Bij HTO is door de hogere temperatuur zowel de dichtheid als de viscositeit van het warme water lager dan van het omringende grondwater. Een belangrijke consequentie daarvan is dat dichtheidsgedreven grondwaterstroming gaat optreden, wat bij lagetemperaturopslag niet of nauwelijks een rol speelt.

Bij gebruik van een verticale put zal het grensvlak (of beter gezegd: de overgangszone) tussen het warmere water en het omringende grondwater in eerste instantie vrijwel verticaal zijn.

Door het verschil in dichtheid tussen het warmere en het koudere water is echter sprake van een instabiele situatie. Als gevolg van de lagere dichtheid heeft het warmere water de neiging om naar het bovenste deel van de aquifer te stromen zodat de overgangszone tussen het warmere en het koudere grondwater gaat kantelen. Aan de bovenzijde van de aquifer breidt de warme zone zich dan uit en aan de onderzijde van de aquifer krimpt de warme zone.

Dit fenomeen wordt vrije convectie genoemd en is ook bekend uit de wereld van de ondergrondse opslag van zoet water (in buitenland bekend als Aquifer Storage Recovery: ASR) in brak of zout water bevattende aquifers. Ook in dit geval heeft het opgeslagen water (zoet) een lagere dichtheid heeft dan het oorspronkelijke grondwater (brak of zout). Bij warmteopslag speelt ook de invloed van de temperatuur op de viscositeit nog een rol. Bij het infiltreren van warm water zal het infiltratiewater namelijk makkelijker infiltreren in de zones waar veel warmte aanwezig is dan in zones die minder warm zijn (Hellström et al., 1979: geciteerd in Buscheck et al., 1983). Ook bij de onttrekking zal het water makkelijker toestromen uit de relatief warme zones.



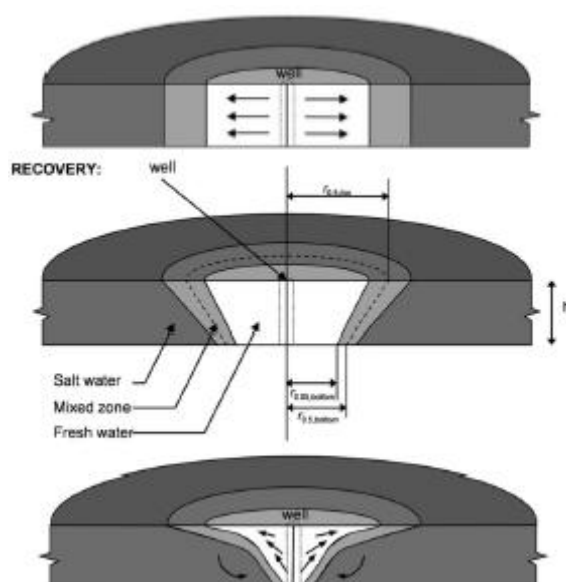
Figuur 2.10;

Stromingsprocessen die zorgen voor de verspreiding van de opgeslagen warmte (of van het opgeslagen zoete water in het geval van ASR). Gedwongen convectie ('forced convection') is de stroming rond de put als gevolg van de infiltratie (of onttrekking). Vrije convectie is de stroming die het gevolg is van de dichtheidsverschillen tussen het warme water (of het zoete water bij ASR) en het omringende grondwater. Bron: Ward et al. (2007).

Voor het rendement van hogetemperatuuropslag kan deze dichtheidsgedreven stroming van groot belang zijn. Het kantelen van de overgangszone tussen het warmere en het koudere grondwater heeft een aantal consequenties (Buscheck, 1984). Ten eerste verandert het de eerder beschreven geometrie van de warme bel. Hierdoor neemt het thermisch contactoppervlak tussen de warme bel en de boven- en onderliggende scheidende laag toe. Zoals beschreven in sectie 2.2 zal door een groter contactoppervlak zal meer warmteverlies optreden door geleiding van warmte vanuit het watervoerende pakket naar de scheidende lagen. Ook veroorzaakt de kanteling een groter contact oppervlak aan de zijkant van de warme bel waardoor de oppervlakte waarover warmtegeleiding optreedt nog verder toeneemt.

Ten tweede zorgt de vrije convectie voor de versnelde aanvoer van warm water naar het grensvlak tussen het watervoerende pakket en de bovenliggende scheidende laag. Dit zorgt voor een grotere temperatuurgradiënt en dus voor grotere warmteverliezen door geleiding. De mate waarin dit effect optreedt wordt bepaald door de kantelsnelheid van de overgangszone tussen het warmere en het koudere grondwater.

Kanteling van het front van de warme bel kan in potentie nog voor veel grotere verliezen zorgen als de kanteling sterk genoeg is. Het koude omgevingswater kan dan de onderzijde van het bronfilter bereiken voordat de onttrekking start wat de uiteindelijke onttrekkingstemperatuur drastisch kan verlagen.



Figuur 2.11;

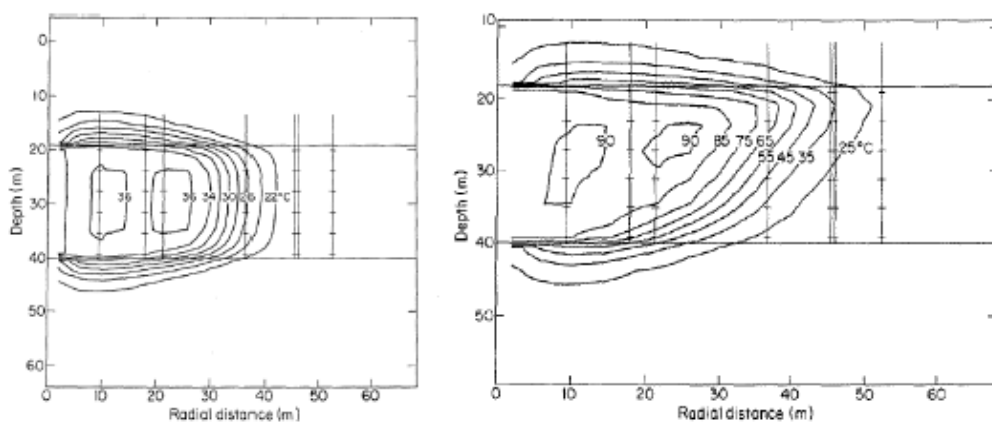
Schematische weergave van het kantelen van een overgangszone tussen water van een lagere dichtheid (in dit geval zoet water) en water van een hogere dichtheid (in dit geval zout grondwater). In het bovenste plaatje is geen vrij convectie opgetreden, wat bijvoorbeeld het geval zal zijn als het zoete water instantaan geïnfilteerd wordt (er is dan geen tijd voor het optreden van vrije convectie). De onderste twee plaatjes laten zien wat er vervolgens tijdens de opslagperiode gebeurt bij beperkte vrije convectie (middelste plaatje) en sterke vrije convectie (onderste plaatje: hier is het geïnjecteerde volume kleiner).

Bron: Ward et al. (2007).

Het bovenstaande maakt duidelijk dat het kantelen van de overgangszone tussen het warmere en het koudere grondwater om meerdere redenen nadelige invloed heeft op het opslagrendement. Het is bij hogetemperatuuropslag dan ook van belang om dit kantelen beperkt te houden. Uit onderzoek is namelijk gebleken dat de gevolgen voor het opslagrendement bij een beperkte kanteling ook beperkt zijn. Vanaf een kantelhoek van 60 à 70 graden (aan het einde van de opslagperiode) neemt het opslagrendement echter sterk af (Buscheck, 1984). Het heeft daarom de voorkeur om de hogetemperatuuropslag zodanig te ontwerpen dat de kantelhoek kleiner dan 60 graden blijft.

De belangrijkste factoren die van invloed zijn op de kantelhoek zijn de doorlatendheid van het watervoerende pakket in horizontale en verticale richting (k_a^h en k_a^v) en het temperatuurverschil tussen het opgeslagen water en het omgevingswater. De invloed van de temperatuur is geïllustreerd in figuur 2.12.

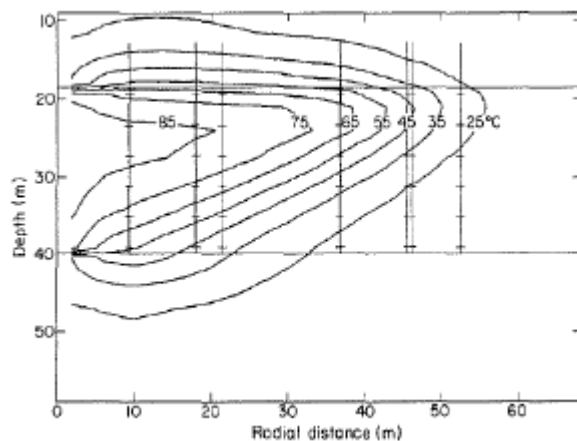
Duidelijk is dat bij de lage temperatuur niet of nauwelijks vrije convectie optreedt, terwijl bij een hogere temperatuur sprake is van sterke vrije convectie. Dit verschil komt ook duidelijk naar voren in de behaalde opslagrendementen (zie tabel 2.2). Naast de invloed van de opslagtemperatuur zijn in tabel 2.2 ook de berekende opslagrendementen gepresenteerd voor verschillende doorlatendheden, waaruit blijkt dat ook de doorlatendheid belangrijk is voor het rendement: hoe hoger de doorlatendheid, hoe lager het opslagrendement.



Figuur 2.12;

Temperatuurverdeling in de ondergrond aan het einde van de infiltratieperiode van 90 dagen bij opslag van water met een temperatuur van 36 °C (linksboven) en 90 °C (rechtsboven). Voor de case van 90 °C is ook de situatie aan het einde van de opslagperiode (180 dagen na aanvang van de infiltratie) weergegeven (rechtsonder). De oorspronkelijke bodemtemperatuur $T_a = 20$ °C. $H = 21,2$ m; $V_i = 55.000$ m³; $t_i = t_s = 90$ d; $\kappa_a^h = 15$ D; $\kappa_a^v = 1,5$ D; $\lambda_a^h = 4,69$ W/m°C; $\lambda_a^v = 2,29$ W/m.K; $\lambda_c = 2,56$ W/m°C; $\rho C_a = \rho C_c = 1,81 \cdot 10^6$ J/m³°C; $\phi_a = 0,25$; $\phi_c = 0,35$.

Bron: Buscheck (1984).



Tabel 2.2;

Berekend opslagrendement bij verschillende opslagtemperaturen en doorlatendheden, waarbij:

$\kappa_a^h/\kappa_a^v = 10$, $H = 21$ m, $V_i = 55000$ m³, $T_i = 90$ °C, $T_a = 20$ °C, $\lambda^h = 2,56$ W/m · K

Bron: Buscheck, 1984

opslagtemperatuur [°C]	Opslagrendement bij $\kappa_a^h = 15$ [Darcy]	Opslagrendement bij $\kappa_a^h = 52$ [Darcy]	Opslagrendement bij $\kappa_a^h = 175$ [Darcy]
36	69%	67%	niet beschikbaar
55	68%	57%	31%
70	niet beschikbaar	46%	24%
90	58%	34%	niet beschikbaar

Om de verliezen als gevolg van vrije convectie beperkt te houden mag de kantelhoek aan het einde van de opslagperiode niet groter zijn dan 60 graden. De tijd die verstrijkt om deze hoek van 60 graden te bereiken, is gedefinieerd als de karakteristieke kanteltijd (t_0). Deze karakteristieke kanteltijd kan voor de situatie waarin sprake is van een oneindig lang recht thermisch front als volgt worden berekend (Hellström en Tsang, 1988a):

$$t_0 = \frac{H}{\sqrt{\kappa_a^h \cdot \kappa_a^v}} \cdot \frac{C_a}{C_w} \cdot \frac{\pi^2(\mu_0 + \mu_1)}{32G(\rho_0 - \rho_1)g} \quad (\text{Vgl. 6})$$

Waarin μ_0 en μ_1 de dynamische viscositeiten van het omringende water en het opslagwater zijn, ρ_0 en ρ_1 de dichtheden en G de constante van Catalan (0,916). Met de bovenstaande vergelijking kan voor verschillende opslagtemperaturen, diktes van het watervoerende pakket en waarden van de verticale anisotropie worden berekend bij welke horizontale doorlatendheid een kantelhoek van 60 graden wordt bereikt (zie tabel 2.3). Omdat hier wordt uitgegaan van seizoensopslag is het uitgangspunt dat de karakteristieke kanteltijd 180 dagen is. Voor de omgevingstemperatuur is uitgegaan van 14 °C.

Tabel 2.3; Horizontale doorlatendheid in Darcy ($1 D = 10^{-12} m^2$), waarbij de karakteristieke kanteltijd gelijk is aan 180 dagen voor verschillende situaties.

opslagtemperatuur [°C]	κ_a^h bij $H = 10 m$ en $\kappa_a^h/\kappa_a^v =$			κ_a^h bij $H = 25 m$ en $\kappa_a^h/\kappa_a^v =$			κ_a^h bij $H = 50 m$ en $\kappa_a^h/\kappa_a^v =$		
	2	5	10	2	5	10	2	5	10
30	16	26	37	41	65	92	82	129	183
50	4,1	6,4	9,1	10	16	23	20	32	46
70	1,8	2,8	4,0	4,4	7,0	9,9	8,8	14	20
90	1,0	1,5	2,2	2,4	3,8	5,4	4,9	7,7	11

De doorlatendheden in tabel 2.2 en 2.3 zijn weergegeven in Darcy ($1 \text{ Darcy} = 10^{-12} m^2$). Het gaat hier om een intrinsieke doorlatendheid (eenheid; m^2): een doorlatendheid die kenmerkend is voor het bodemmateriaal. In de hydrologie wordt normaalgesproken gerekend met doorlatendheden in [m/d]. De doorlatendheid in [m/d] geeft aan hoe makkelijk het water door het bodemmateriaal stroomt en is niet alleen afhankelijk van de eigenschappen van het bodemmateriaal, maar ook van de eigenschappen van het water. De eigenschappen van het water (dichtheid en viscositeit) zijn echter temperatuurafhankelijk, waardoor bij grote temperatuurverschillen gerekend moet worden met de intrinsieke doorlatendheid. De relatie tussen de “gewone doorlatendheid” en de intrinsieke doorlatendheid is als volgt:

$$k = \kappa \cdot \rho \cdot g / \mu \quad (\text{Vgl. 7})$$

$k = \text{doorlatendheid [m/s]}$

$\kappa = \text{intrinsieke doorlatendheid [m}^2\text{]}$

$\rho = \text{dichtheid grondwater [kg/m}^3\text{]}$

$g = \text{zwaartekrachtsversnelling [m}^2\text{/s}^2\text{]}$

$\mu = \text{dynamische viscositeit [kg/(m \cdot s)]}$

De “gewone doorlatendheid” wordt meestal bepaald bij de natuurlijke bodemtemperatuur, die in Nederland (afhankelijk van de locatie en diepte) meestal tussen 10 en 14 °C ligt. Bij een temperatuur van 12 °C kan worden berekend dat een doorlatendheid van 1 Darcy gelijk is aan een “gewone doorlatendheid” van 0,68 m/d. De waarden uit tabel 2.2 kunnen nu eenvoudig worden omgerekend naar “gewone doorlatendheden” (zie tabel 2.3).

Tabel 2.4 Horizontale doorlatendheid in m/d, waarbij de karakteristieke kanteltijd gelijk is aan 180 dagen voor verschillende situaties.

opslagtemperatuur [°C]	k_a^h bij H= 10 m en $k_a^h/k_a^v =$			k_a^h bij H= 25 m en $k_a^h/k_a^v =$			k_a^h bij H= 50 m en $k_a^h/k_a^v =$		
	2	5	10	2	5	10	2	5	10
30	11	18	25	28	44	62	56	88	124
50	2,8	4,4	6,2	6,9	11	15	14	22	31
70	1,2	1,9	2,7	3,0	4,8	6,7	6,0	9,5	13
90	0,7	1,0	1,5	1,7	2,6	3,7	3,3	5,2	7,4

Tabel 2.4 maakt duidelijk dat vooral bij hoge temperaturen van groot belang is dat gebruik wordt gemaakt van een watervoerend pakket met een lage doorlatendheid en/of een hoge verticale anisotropie. Ook de dikte van het gebruikte watervoerende pakket is van belang: hoe kleiner de dikte, hoe gevoeliger de opslag is voor rendementsverliezen door vrije convectie.

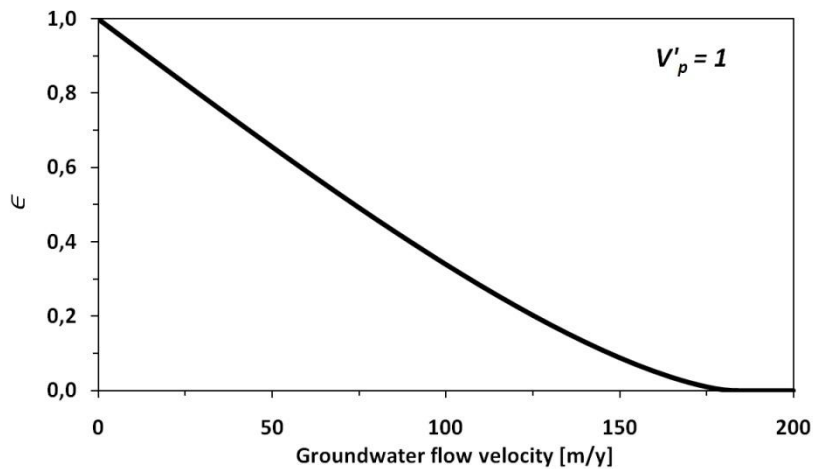
Een eerste inschatting van de geschiktheid van de op de locatie beschikbare watervoerende pakketten kan worden verkregen met behulp van tabel 2.4. Bij de opslag van warmte met temperaturen van 90 °C is een doorlatendheid nodig die lager ligt dan 7 m/d en in de meeste gevallen zelfs lager dan 5 m/d. Ook bij de opslag van 70 graden is de maximale doorlatendheid in veel gevallen lager dan 7 m/d. Dit verklaart waarom bij hogetemperatuuropslag gebruik wordt gemaakt van fijnzandige aquifers. Deze aquifers liggen in Nederland vaak op grotere diepte. Bijkomende voordelen van het gebruik van dieper gelegen watervoerende pakketten zijn (1) dat de invloed van de regionale grondwaterstroming op deze dieptes vaak verwaarloosbaar is, (2) de warmteverliezen naar het maaiveld zijn door de dikte van de bovenliggende bodemlagen zeer gering en (3) dat de temperatuur van het grondwater op deze diepte hoger is dan in ondiepe lager zodat de temperatuurverschillen (en dus de warmteverliezen) kleiner zijn (Sauty et al., 1982). Ook is in Nederland op grotere dieptes vaak ook sprake van relatief zout grondwater, wat niet interessant is voor de drinkwaterwinning. Eventuele ongunstige waterkwaliteitseffecten hebben daardoor minder nadelige gevolgen dan bij de toepassing van hogetemperatuuropslag in zoet grondwater.

2.1.6 Grondwaterstroming

Horizontale grondwaterstroming

Om een indruk te verkrijgen van de invloed van de horizontale grondwaterstroming zijn berekeningen uitgevoerd, waarbij de invloed van geleiding, dispersie en vrije convectie buiten beschouwing zijn gelaten. Verder is aangenomen dat zowel de infiltratie als de onttrekking instantaan plaatsvindt ($t_i = t_p = 0$) en dat de opslagperiode en rustperiode een half jaar zijn ($t_s = t_r = 0,5 j$). Figuur 2.13 toont het rendement als functie van de snelheid van de grondwaterstroming in de situatie dat zowel het geïnfilterde volume (V_i) als het onttrokken volume (V_p) 60.000 m³ zijn.

Als de afstroming van de warme (of koude) bel groter is dan de diameter van de bel, dan is de opgeslagen warmte afgestroomd tot buiten het bereik van de onttrekking en is het rendement 0.

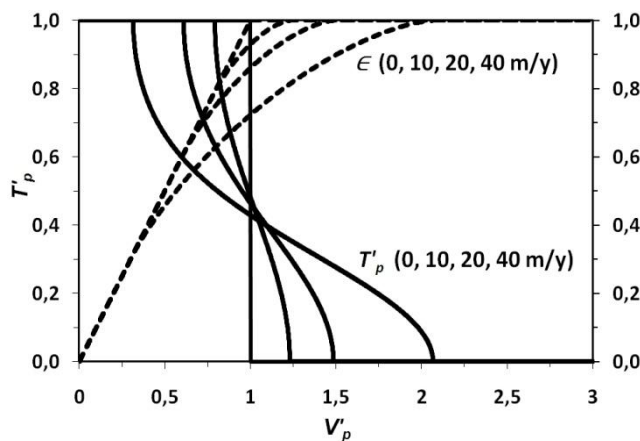


Figuur 2.13;
 Opslagrendement bij verschillende snelheden van de (horizontale) regionale grondwaterstroming. $V_i = V_p = 60.000 \text{ m}^3$; $H = 50 \text{ m}$; $t_i = t_p = 0$; $t_s = t_r = \frac{1}{2}$ jaar;
 $\lambda_a = \lambda_r = 0 \text{ W/mK}$; $\rho C_a = 2,5 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$; $\rho C_w = 4,2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$; $\phi = 0,33$.

Als geen afstroming plaatsvindt, zal alle geïnfiltreerde warmte weer worden onttrokken en is het rendement 100% ($\epsilon = 1$). Hierbij moet rekening worden gehouden met het feit dat de afstroming van warmte en koude trager verloopt dan de afstroming van het water zelf: er is sprake van retardatie. De verhouding tussen de snelheid waarmee het thermisch front zich verplaatst en de stroomsnelheid van het water kan als volgt worden berekend (Scheatzle et al., 1980; geciteerd in Dickinson et al. 2009):

$$\frac{v_{th}}{v_w} = \frac{\phi \cdot C_w}{C_a} = \frac{\phi \cdot C_w}{\phi \cdot C_w + (1 - \phi) C_r} \quad (\text{Vgl. 8})$$

Waarin C_r de warmtecapaciteit van de bodemdeeltjes (matrix/gesteente) is. Figuur 2.14 toont de dimensieloze onttrekkingstemperatuur en het opslagrendement als functie van de verhouding tussen de onttrokken en geïnfiltreerde hoeveelheid water ($V'_p = V_p/V_i$) bij een regionale stroomsnelheid van 0, 10, 20 en 40 m/jaar. Bij hogetemperaturopslag wordt meestal gebruik gemaakt van diepe fijnzandige watervoerende pakketten. Dit betekent dat de regionale stroomsnelheid meestal laag is, zodat ook de thermische verliezen



Figuur 2.14;
 Opslagrendement en dimensieloze onttrekkingstemperatuur bij een regionale stroomsnelheid van 0, 10, 20 en 40 m/j.

$V_i = 60.000 \text{ m}^3$; $H = 50 \text{ m}$;
 $t_i = t_p = 0$; $t_s = t_r = \frac{1}{2}$ jaar;
 $\lambda_a = \lambda_c = 0 \text{ W/m}^2\text{C}$; $C_a = 2,5 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{C}$; $C_w = 4,2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{C}$; $\phi = 0,33$.

Ceric en Haitjema (2005) ontwikkelden een andere methode om vast te stellen wanneer rekening gehouden moet worden met (horizontale) grondwaterstroming in rendement berekeningen. In tegenstelling tot de voorgaande methode wordt hier niet uitgegaan van een instantane injectie en onttrekking, maar voor een injectie/onttrekking schema zonder tussentijdse opslagperiode ($t_s = 0$). De methode is gebaseerd op het bepalen van de vorm van een opgeslagen volume. Wanneer, ondanks de superpositie van de effecten van stroming door injectie in de put en stroming door regionalen grondwaterstroming het opgeslagen volume cirkelvormig blijft mag worden aangenomen dat de invloed van regionale grondwater stroming miniem is. De superpositie van deze effecten wordt weergegeven in figuur 2.15. Figuur 2.15 toont respectievelijk de 'capture area' (L_r) (onttrekkingsgebied), de herkomst van het onttrokken water gegeven een bepaalde grondwaterstroming, en het gebied wat ingenomen wordt door het geïnjecteerde water (L_i). Bij een verwaarloosbare grondwater stroming zullen L_i en L_r hetzelfde, cirkelvormige gebied innemen. Bij een grote horizontale grondwater stroming (zoals in figuur 2.15) overlappen L_i en L_r slechts gedeeltelijk, wat in de praktijk inhoud dat slechts een deel van het geïnjecteerde water zal worden onttrokken.

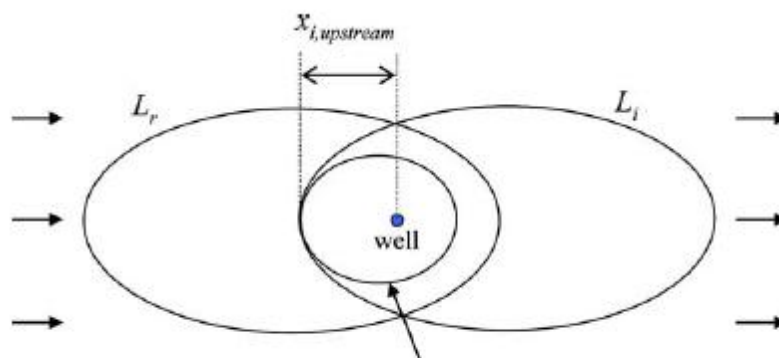
De methode van Ceric en Haitjema (2005) is voor ASR aangepast door Ward et al. (2009) en vanwege de gelijkenissen tussen ASR en HTO ook te gebruiken voor HTO. Er wordt uit gegaan van een dimensieloze parameter voor tijd, \bar{t} . Deze is als volgt gedefinieerd;

$$\bar{t} = \frac{2\pi t_i H}{\Phi Q} \cdot (k_h I)^2 \quad (\text{Vgl. 9})$$

I = Natuurlijke stijghoogte gradient in de richting van de grondwaterstroming [m/m]

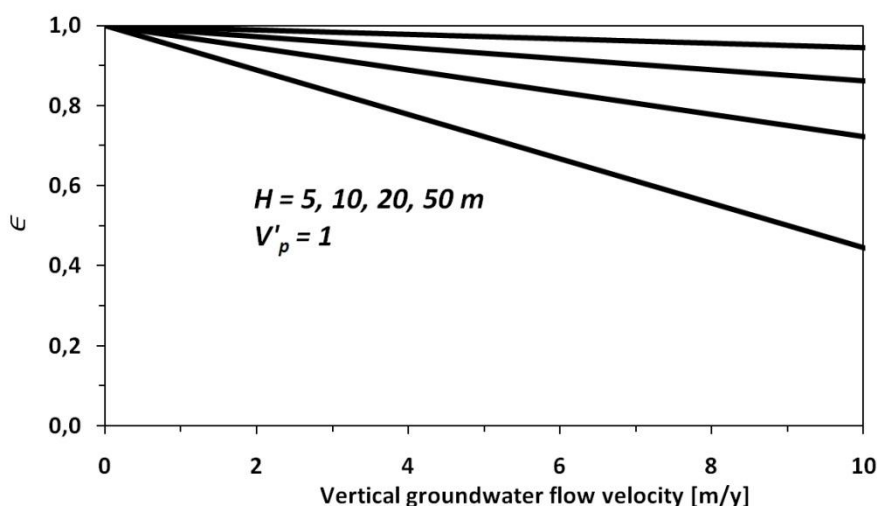
Verder is de duur van de injectie periode gelijk aan de duur van de onttrekkingsperiode en is de onttrokken en geïnjecteerde hoeveelheid water gelijk. Wanneer $0 < \bar{t} \leq 0,1$ zal de vorm van L_i nagenoeg cirkelvormig zijn en daarmee de invloed van regionale grondwaterstroming te verwaarlozen. Wanneer $\bar{t} > 0,1$ moet wel rekening gehouden worden met grondwater stroming en vanaf $\bar{t} > 1$ is de vervorming van het geïnjecteerde volume dusdanig dat het rendement hier ernstig onder zal leiden (Ceric & Haitjema, 2005).

Verticale grondwaterstroming



Figuur 2.15; De invloed van horizontale grondwaterstroming op de vorm van een geïnjecteerd volume water. L_r is de vorm van het te onttrekken gebied en L_i de vorm van een geïnjecteerd volume. Bron: Ward et al. (2009)

Onder invloed van verticale grondwaterstroming (kwel of infiltratie), zal de opgeslagen warmte (of koude) vanaf de onder- of bovenzijde worden verdrongen door het kwel- of infiltratiewater. De kwel ligt in Nederland normaalgesproken tussen 0 en 2 mm per dag en de infiltratie tussen 0 en 1 mm per dag. Dit komt overeen met een verticale grondwaterstroomsnelheid tussen 2 meter per jaar opwaarts (kwel) en 1 meter per jaar neerwaarts. Op grotere diepten neemt de verticale stroomsnelheid over het algemeen af. Figuur 2.16 toont de invloed van de verticale grondwaterstroming op het opslagrendement voor verschillende diktes van het watervoerende pakket. Duidelijk is dat de invloed van de verticale grondwaterstroming het grootst is bij een relatief dun watervoerende pakket (5 m) en bij grotere diktes al snel te verwaarlozen is. Zelfs bij een dikte van 5 m is de invloed van de verticale grondwaterstroming klein, omdat de verticale stroomsnelheden klein zullen zijn op de dieptes waar hogetemperatuuropslag wordt toegepast.



Figuur 2.16;
 Opslagrendement bij verschillende snelheden van de (verticale) regionale grondwaterstroming en een aantal waarden voor de dikte van het watervoerende pakket.
 $V_i = V_p = 60.000 \text{ m}^3$; $t_i = t_p = 0$; $t_s = t_r = \frac{1}{2}$ jaar; $\lambda_a = \lambda_c = 0 \text{ W/m}^2\text{C}$;
 $C_a = 2,5 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{C}$; $C_w = 4,2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{C}$; $\Phi = 0,33$.

3 Modelling HTO

3.1 Aanpak & Modelopbouw

Standaardscenario

De 'base case' voor de modellering is gelijk gekozen aan de base case uit het werk van Buscheck (1984, zie tabel 3.1)). Hier is voor gekozen omdat er slechts enkele hogetemperatuuropslag systemen zijn gerealiseerd en daarvan niet of nauwelijks bruikbare data beschikbaar is. Het werk van Buscheck biedt de mogelijkheid tot validatie van de uitkomsten van de eigen berekeningen en is gekalibreerd met meetgegevens van een daadwerkelijke pilot studie uitgevoerd in de Verenigde Staten in het begin van de jaren tachtig (zie Buscheck et al., 1983).

Daarbij was wel een vereiste dat bij het uiteindelijke standaardscenario een representatieve set aan waarden voor alle parameters gebruikt werd.

Operationele Eigenschappen			
Parameter	Symbool	Waarde	Eenheid
Volume (injectie en onttrekking)	$V_i = V_p$	55000	m ³
Temperatuur	T_i	90	°C
Debiet	$Q_i = Q_p$	25,5	m ³ /uur
Pompschema	t_i, t_s, t_p, t_r	90-90-90-90	dagen
Eigenschappen Watervoerend Pakket			
Parameter	Symbool	Waarde	Eenheid
Horizontale Permeabiliteit	κ_h	15	Darcy
Anisotropie	(κ_h/κ_v)	10	-
Verticale Permeabiliteit	κ_v	1,5	Darcy
Dikte	H	21	m
Porositeit	ϕ_a	0,25	-
Warmtegeleidingcoëfficiënt	λ	2,56	W/(m.°C)
Longitudinale dispersiviteit	d_{ll}	0,7	m
Schijnbare Warmtegeleidingcoëfficiënt	$\bar{\lambda}$	4,69	W/(m.°C)
Volumetrische Warmtecapaciteit	ρC_a	1,81.10 ⁶	J/(°C.m ³)
Oorspronkelijk Temperatuur Aquifer	T_a	20	°C
Eigenschappen Scheidende Lagen			
Parameter	Symbool	Waarde	Eenheid
Horizontale Permeabiliteit	κ_c^h	15.10 ⁻⁵	Darcy
Anisotropie	(κ_c^h/κ_c^v)	10	-
Verticale Permeabiliteit	κ_c^v	15.10 ⁻⁶	Darcy
Warmtegeleidingcoëfficiënt	λ_c	2,56	W/(m.°C)
Volumetrische Warmtecapaciteit	ρC_c	1,81	J/(°C.m ³)
Dikte	L	7	m
Porositeit	ϕ_c	0,35	-

Tabel 3.1; Gebruikte waarden voor het gekozen standaardscenario

Voor de horizontale permeabiliteit is als basis waarde **15 Darcy** gebruikt. Bij een temperatuur van **12 °C** komt dit overeen met een doorlatendheid van $\pm 10 \text{ m/d}$. Er is gekozen voor een anisotropie van **10**, hetgeen betekent dat de verticale permeabiliteit gelijk is aan **1,5 Darcy**. Het injectie volume van **55000 m³** wordt geïnjecteerd in 90 dagen, wat overeenkomt met een gemiddeld debiet van ruim **25 m³** per uur. Dit valt binnen de huidige ontwerpnormen voor WKO's, welke gebaseerd zijn op een maximale stroomsnelheid op de boorgatwand ter hoogte van het bronfilter. Een injectie temperatuur van **90 °C** is aangehouden. De waarden van de thermische parameters zijn gelijk gekozen aan die uit het werk van Buscheck. De precieze opbouw van de base case is te zien in tabel 3.1.

In de studie van Buscheck is gebruikt gemaakt van een schijnbare warmtegeleidingcoëfficiënt ($\bar{\lambda}$) van **4,69 W/m · K**. Die waarde is gekalibreerd aan experimentele data uit het veld. De werkelijke warmtegeleiding die bepaald is in het laboratorium (λ) was **2,56 W/m · K**. $\bar{\lambda}$ is echter een samenvoeging van de effecten van warmtegeleiding en dispersie. De in Doughty (1982) gepubliceerde relatie tussen deze 3 factoren (sectie 2.1.2) maakt het mogelijk om de longitudinale dispersiviteit af te leiden. Met de eerder genoemde waardes voor λ en $\bar{\lambda}$ komt deze uit op **0,7 m**.

Modelopbouw

Voor de simulaties is gebruikt gemaakt van een radiaal-symmetrisch model in de radiale/horizontale richting. De dikte is in totaal 39 meter, bestaande uit een aquifer van 21 meter met aan de boven en onderzijde twee 9 meter dikke scheidende lagen. Het bronfilter bevindt zich over de gehele lengte van deze aquifer. De lengte is 1000 meter. Alle drie de lagen zijn homogeen. Radiaal-symmetrisch modelleren geniet de voorkeur bij dit standaardscenario daar slechts een enkele put gemodelleerd wordt en de te verwachten effecten rond deze put (radiaal) symmetrisch zijn. Een radiaal-symmetrisch model is in vergelijking met een 3D model vele malen sneller. Dit biedt de mogelijkheid om vele verschillende scenario's door te rekenen binnen relatief korte tijd.

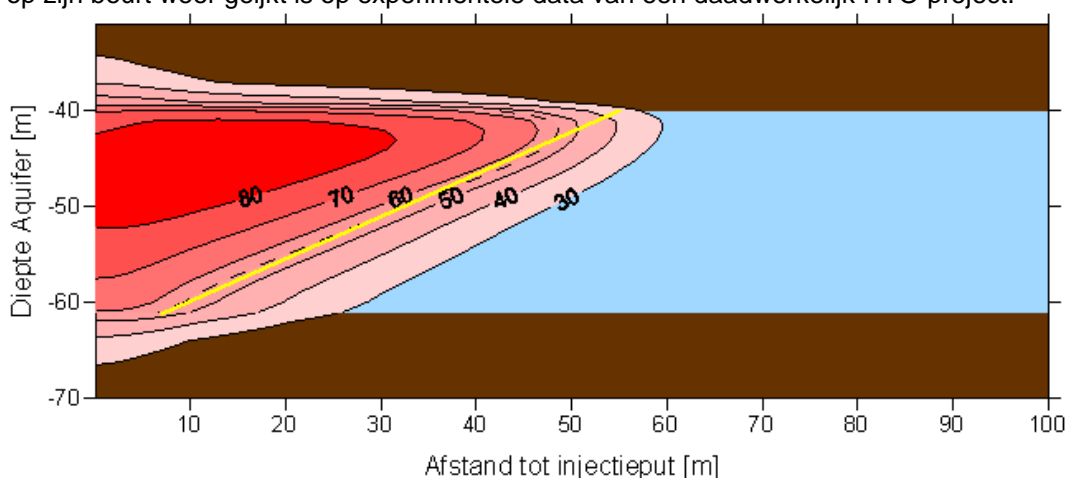
Bij het opstellen van het model is rekening gehouden met de effecten van numerieke dispersie. De grootte van numerieke dispersie is afhankelijk van de grootte van de individuele cellen en van de stroomsnelheid en stapgrootte (in de tijd). Om de effecten van numerieke dispersie tegen te gaan is gekozen voor een klein grid in en rond de put (tot en met een afstand van **10 m** vanaf de put) waar de stroomsnelheden het hoogst zijn. Daarna is tot **110 m** een celgrootte van 3 meter gebruikt, waarna de cellen geleidelijk groter worden tot **1000 m**. 110 meter is ruim twee keer de lengte van de thermische straal van het standaardscenario. Met deze opzet bleek de invloed van numerieke dispersie verwaarloosbaar. Een afbeelding van het grid voor het standaardscenario is te vinden in bijlage 1.

De prestaties van een scenario kunnen op verschillende manier benadert worden. Op het meest integrale niveau kan er gekeken worden naar het opslagendement. Soms kan het echter wenselijk zijn meer inzicht en detail in de temperatuur in de tijd dan wel in de ruimte te verkrijgen. Om dit te bereiken zullen ook productietemperatuur grafieken en contourplots worden gebruikt.

3.2 Resultaten

3.2.1 Validatie

In het werk van Buscheck (1984) is de kantelhoek van veel verschillende scenario's bepaald op een aantal tijdstippen. Deze scenario's zijn allen opnieuw doorgerekend en de door modellering verkregen kantelhoek is vergeleken met die uit de literatuur. De gemiddelde afwijking van de modeldata met die uit het onderzoek van Buscheck bedroeg $2,83^\circ$. De volledige resultaten zijn beschikbaar in Bijlage 2. Figuur 3.1 toont een voorbeeld van een contourplot (van het standaardscenario) waaruit de kantelhoek opgemeten kan worden. De berekende data is dus in goede overeenstemming met de literatuur data, welke op zijn beurt weer geijkt is op experimentele data van een daadwerkelijk HTO project.



Figuur 3.1;
Contourplot van het gekozen standaardscenario, aan het eind van de rustperiode ($t=180$ dagen). De kantelhoek is de hoek die het thermisch front maakt met de horizontale as. Voor het meten van de kantelhoek is gebruik gemaakt van de 55°C contour, wat overeen komt met het gemiddelde van de injectie en de achtergrondtemperatuur.

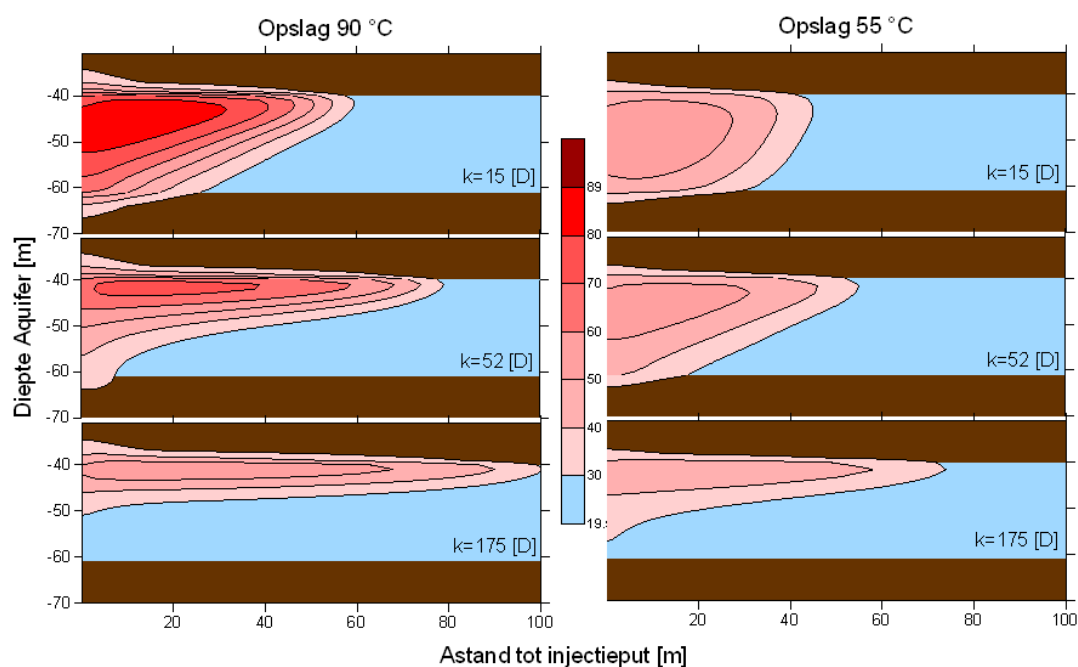
3.2.2 Belangrijkste factoren

In deze paragraaf zijn de belangrijkste bevindingen die volgen de modelberekeningen kort behandeld en de effecten van de belangrijkste factoren vergeleken met de op basis van de literatuur verwachte effecten. Telkens is hiertoe één of een specifieke combinatie van factoren gevarieerd ten opzichte van het standaardscenario.

Permeabiliteit

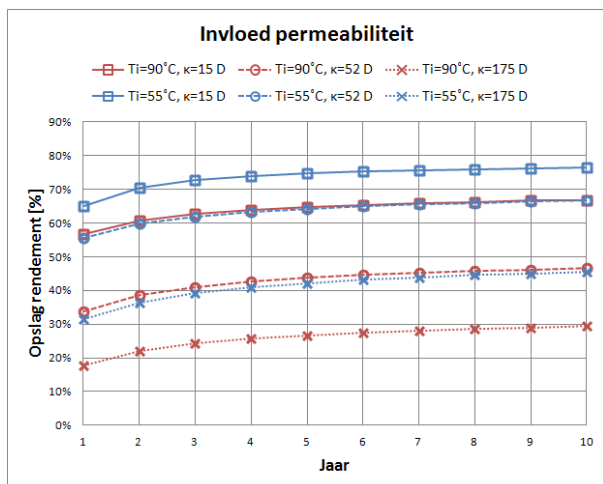
Volgens de literatuur heeft de permeabiliteit een grote invloed op vrije convectie, en is de invloed van de permeabiliteit daardoor ook groter bij hogere temperaturen. Deze effecten komen ook duidelijk naar voren uit de resultaten van de modellering. In bijlage 4 en figuur 3.2 zijn deze resultaten weergegeven. In bijlage 4 is de ontwikkeling van de temperatuur in de omgeving van de put gedurende een complete cyclus weergegeven voor een permeabiliteit van 15 en 52 Darcy. Deze bijlage geeft voor elke 30 dagen na aanvang van de opslag de dwarsdoorsnede met de bijbehorende temperatuurverdeling, zodat een goed inzicht wordt verkregen in veranderingen in het temperatuurveld tijdens de cyclus.

In figuur 3.2 is duidelijk zichtbaar dat de kanteling van het thermisch front het grootst is bij een hoge permeabiliteit en verder gedreven wordt door het temperatuurverschil. Ook is zichtbaar dat er bij een hoge permeabiliteit na één opslag periode veel energie verloren gaat doordat water met lage temperaturen onttrokken zal worden bij aanvang van de productie. Dit komt ook duidelijk naar voren in het rendement. De rendementen van de getoonde scenario's in Figuur 3.2 zijn te zien in Figuur 3.3. Bij een permeabiliteit van 175 *Darcy* is te zien dat het rendement niet boven de 50% komt voor beide injectie temperaturen. Ook valt op te maken uit Figuur 3.3 op te maken dat bij een hogere ΔT permeabiliteit meer invloed heeft. Waar bij een T_i van 55 °C en een permeabiliteit van 52 *Darcy* nog een rendement van ±60% wordt behaald, ligt het rendement bij dezelfde permeabiliteit maar een T_i van 90 °C ruim 20% lager.



Figuur 3.2;

De invloed van de permeabiliteit op de kantelhoek. Links met een injectie temperatuur van 90 °C en rechts 55 °C. Van boven naar beneden met horizontale permeabiliteiten van respectievelijk 15, 52 en 175 *Darcy*. Bij een temperatuur van 12 °C is dit gelijk aan een doorlatendheid van respectievelijk 10, 35 en 120 *m/d*. De verticale anisotropie, $\kappa_h/\kappa_v = 10$, net als in het standaardscenario. Dwarsdoorsneden tonen de situatie na 180 dagen aan het einde van de opslag, voor aanvang van de productieperiode.



Figuur 3.3;

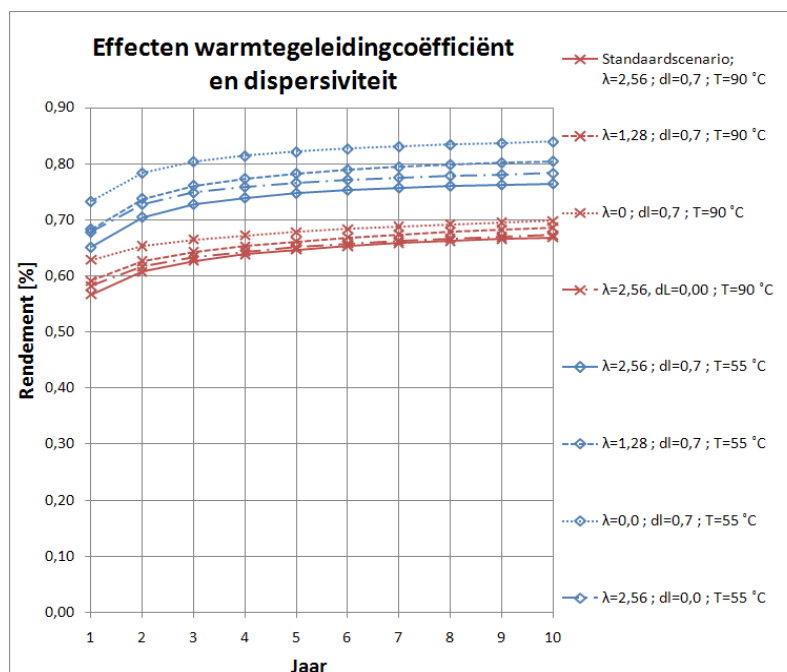
De invloed van permeabiliteit op het rendement. Bij een temperatuur van 90 °C (Rode lijnen) en 55 °C (blauwe lijnen). Niet weergegeven parameters zijn gelijk aan het standaardscenario (zie tabel 3.1).

Injectietemperatuur

Figuur 3.2 en 3.3 geven ook inzicht in het effect van het verschil tussen de achtergrondtemperatuur en de injectietemperatuur. In het standaard scenario is gekozen voor een injectie temperatuur van 90 °C en een achtergrondtemperatuur van 12 °C. Met een injectie temperatuur van 55 °C is de kanteling van het thermisch front aanzienlijk minder (Figuur 3.2). Het effect hiervan op het rendement is duidelijk zichtbaar in Figuur 3.3. De scenario's met een injectie temperatuur van 90 °C leveren een aanzienlijk lager rendement op dan de vergelijkbare scenario's met een rendement van 55 °C. Het verschil tussen de getoetste scenario's bedraagt 10 tot ruim 20 procent. Zo bedraagt het opslagrendement bij 55 °C opslag met een permeabiliteit van 52 Darcy 55%, tegenover een opslagrendement van 34% bij een injectietemperatuur van 90 °C.

Warmtegeleidingcoëfficiënt en dispersiviteit

De grootte van warmteverliezen door geleiding wordt beschreven in de Wet van Fourier (sectie 2.1.2). Volgens deze wet zijn de geleidingsverliezen proportioneel aan het temperatuurverschil en tegelijkertijd afhankelijk van het warmtegeleidingcoëfficiënt. Net als dispersiviteit resulteert warmtegeleiding in een lager rendement door verspreiding van warmte tot buiten het intrekgebied van de put. In Figuur 3.4 zijn de effecten van beide parameters op het rendement in beeld gebracht voor zowel een injectie temperatuur van 90 als van 55 °C. Het eerste geteste scenario voor beide temperaturen is een halvering van de warmtegeleidingcoëfficiënt. Bij 55 °C resulteert dit ieder jaar in een ongeveer twee tot drie procent hoger rendement, bij 90 °C is dat maximaal 1 procent.

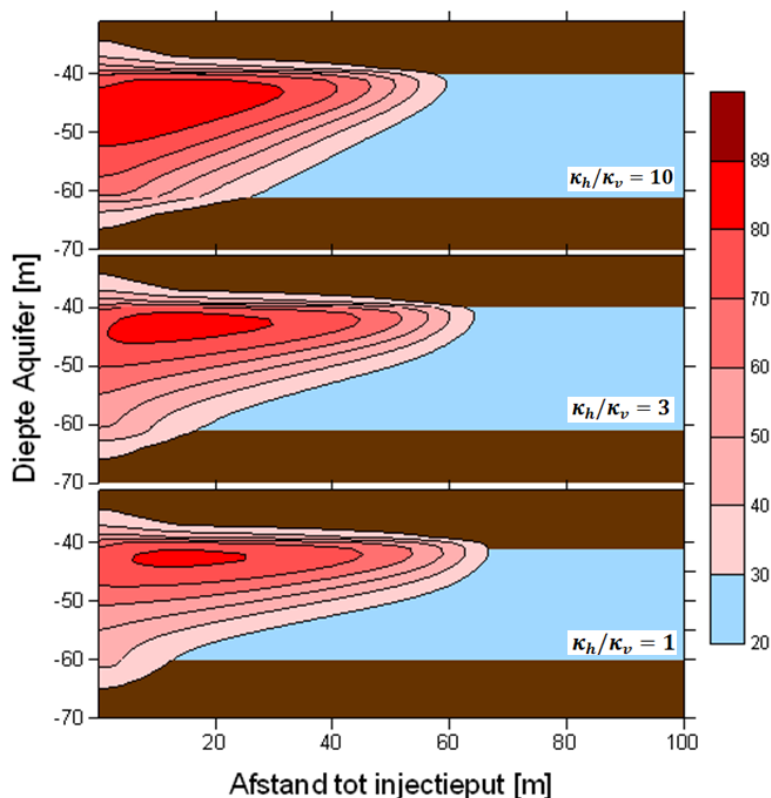


Figuur 3.4;
De invloed van warmtegeleiding en dispersiviteit op het opslagrendement van het standaardscenario (rood) en bij een injectie temperatuur van 55 °C (blauw).

De andere twee getoetste scenario's zijn respectievelijk een λ van 0 [$W/m \cdot K$] als een d_{II} van 0 [m]. Aangezien het rendement niet aanzienlijk verbetert in deze scenario's kan worden geconcludeerd dat de warmteverliezen door dispersie en geleiding in de aquifer beperkt zijn. Beide scenario's leveren een slechts enkele procenten hoger rendement op. Bij een injectie temperatuur van 55 °C zijn de effecten enigszins groter, maar vergeleken met de totale warmteverliezen zijn ook bij 55 °C warmtegeleiding en dispersie minder significant. Daar komt bij dat deze scenario's zeer hypothetisch zijn, aangezien in werkelijk altijd een bepaalde mate van dispersie en geleiding voor zal komen.

Anisotropie

Om de anisotropie te variëren moet de verhouding tussen de horizontale en verticale permeabiliteit veranderen. Er is voor gekozen alleen de verticale permeabiliteit te variëren omdat de horizontale permeabiliteit vaak redelijk kan worden ingeschat en de verticale permeabiliteit vaak onzeker is. In het standaardscenario is de anisotropie 10, dat wil zeggen $\kappa_h/\kappa_v = 1$ (bij $\kappa_h = 15$ en $\kappa_v = 1,5$). Ook anisotropieën van 3 en 1 bij een κ_h van 15 Darcy zijn doorberekend ($\kappa_v = 5, \kappa_v = 15$). De rendementen van deze scenario's waren respectievelijk 57%, 50% en 46% in het eerste jaar. De bijbehorende contourplots (Figuur 3.5) tonen aan dat vrije convectie en de daardoor veroorzaakte kanteling van het thermisch front hieraan ten grondslag liggen. In Figuur 3.5 wordt duidelijk dat bij een lagere anisotropie minder warmte rond de filter bewaard blijft aan het einde van de opslagperiode (en de start van de onttrekkingsperiode).

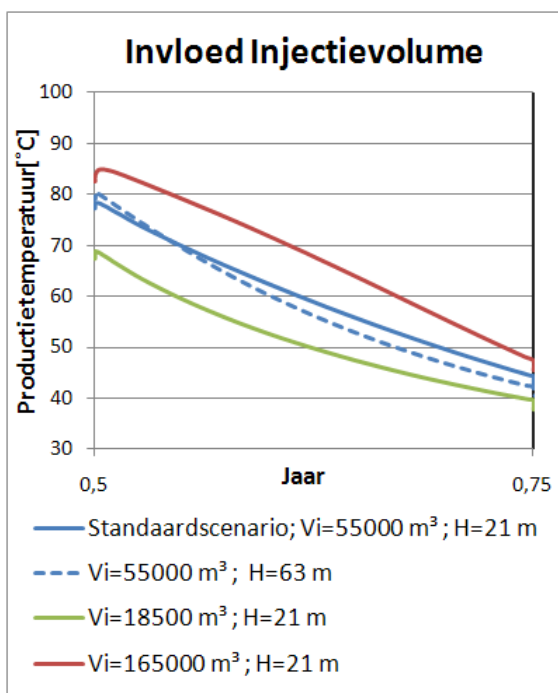


Figuur 3.5;
De invloed van anisotropie op het rendement bij opslag met een injectie temperatuur van 90 °C en een horizontale permeabiliteit van 15 Darcy. Linksboven het standaard scenario waar geldt $\kappa_h/\kappa_v = 10$. Daaronder $\kappa_h/\kappa_v = 3$ en daaronder $\kappa_h/\kappa_v = 1$. Na een periode van 180 dagen (voor aanvang van de onttrekkingsperiode).

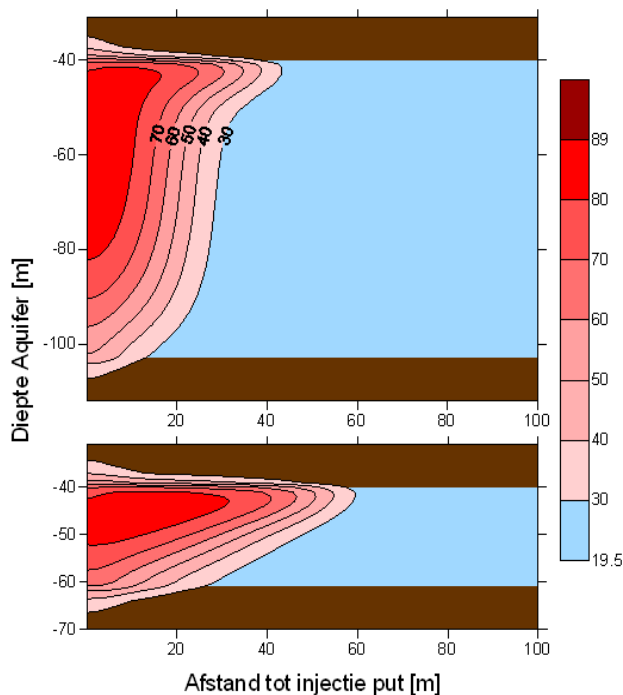
Geometrie Warme Bel

Zoals verwacht tonen de modelresultaten aan dat een groter volume resulteert in een hoger rendement. Dit is te indirect af te lezen uit Figuur 3.6. Daarin is de productietemperatuur weergegeven voor het standaard scenario (blauw), een scenario met 1/3 van het standaardvolume (groen) en een scenario met een drie keer zo groot injectievolume (rood). Het grootste volume zorgt bij een gelijke dikte voor een kleinere oppervlakte volume verhouding waardoor de verliezen door warmtegeleiding minder worden.

Er geldt echter ook dat er een optimaal aspect ratio (H/R_{th}) is voor ieder volume. Bij een bepaald volume kan het dus gunstiger zijn om een minder dik of juist dikker watervoerend pakket te gebruiken. Dit effect is zichtbaar in zowel Figuur 3.6 als 3.7. De gestreepte blauwe lijn in Figuur 3.6 heeft hetzelfde volume als het standaardscenario maar geïnjecteerd in een 3 keer zo dik watervoerend pakket wat resulteert in een lagere gemiddelde onttrekkingstemperatuur en een lager rendement. Hoewel de kanteling in dit scenario minder is dan in het standaardscenario vindt deze kanteling veel dichterbij de put plaats (Figuur 3.7) waardoor gemiddeld een lagere temperatuur onttrokken wordt. Een groter injectie volume zal dus altijd het rendement verhogen, maar de geometrie van de bel kan belangrijk zijn voor optimalisatie van het systeem.



Figuur 3.6; Invloed van de geometrie van de warme bel op de productietemperatuur in de eerste onttrekkingsperiode.

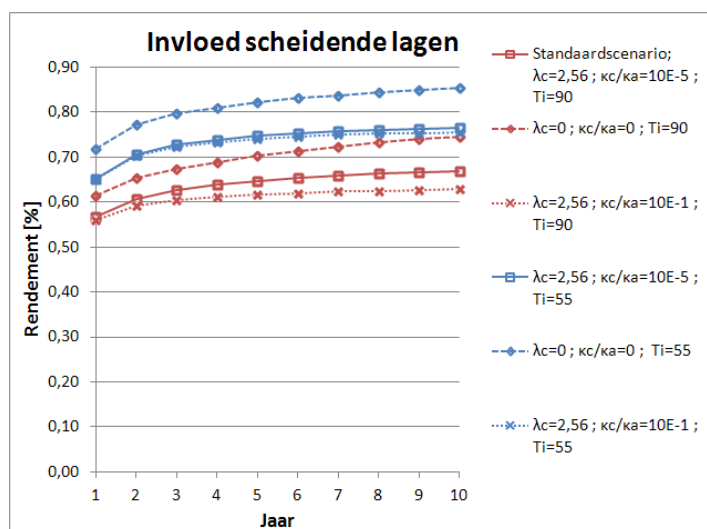


Figuur 3.7; Het standaardscenario na $t=180$ d (onder) en boven hetzelfde scenario maar nu met een 3x zo dik watervoerend pakket.

Eigenschappen scheidende lagen

Naaste de permeabiliteit en warmtegeleidingcoëfficiënt van de aquifer kunnen ook de permeabiliteit en warmtegeleidingcoëfficiënt van de scheidende lagen κ_c van belang zijn. De invloed hiervan wordt gepresenteerd in figuur 3.8. Naast het standaardscenario is hier een perfect isolerende scheidende laag geplot ($\lambda_c = 0$ en $\kappa_c = 0$) en een scenario met een 'lekkende' scheidende laag. Bij de laatste is de verhouding tussen de permeabiliteit van de aquifer en de scheidende laag veel minder groot.

Het verschil tussen de perfect isolerende scenario's en de niet isolerende scenario's maakt duidelijk dat er verticale warmteverliezen optreden naar de scheidende lagen. Bij zowel een injectietemperatuur van 90 als van 55 °C is echter te zien dat de permeabiliteit van de scheidende laag ten opzichte van de permeabiliteit van de aquifer vervolgens weinig invloed heeft op het rendement. Bij 55 °C maakt het geen verschil of λ_c een factor 10 of een factor 10^5 kleiner is dan λ_a . Bij een injectie temperatuur van 90 °C leidt dit vooral in latere jaren tot een paar procent verschil in rendement. De verliezen door warmte geleiding naar de scheidende lagen bedragen in dit geval 5 a 20% van de opgeslagen hoeveelheid warmte.



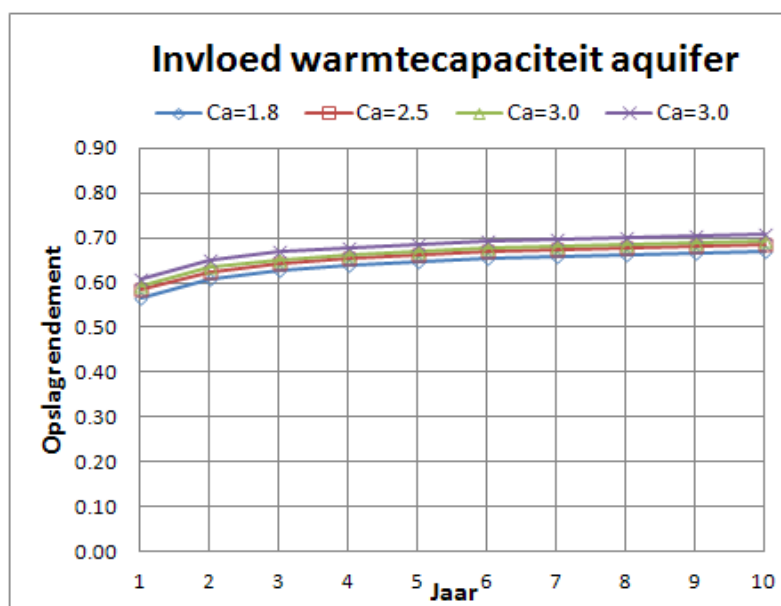
Figuur 3.8;
De invloed van de scheidende lagen boven en onder de aquifer.
Voor alle scenario's geldt $\kappa_a = 15 D$

Warmtecapaciteit van de aquifer

Ook de invloed van de warmtecapaciteit op het opslagrendement is onderzocht. Een hogere warmtecapaciteit zorgt voor een grotere retardatie van de warmte. Dit effect van de warmtecapaciteit kan in potentie het rendement op verschillende manieren beïnvloeden. De hogere retardatie leidt tot een kleinere warme bel. Enerzijds zorgt dit voor een kleiner raakvlak met het koudere omgevingswater, waardoor geleidingsverliezen kleiner worden en het vermindert de snelheid waarmee kanteling plaatsvindt. Anderzijds vindt deze kanteling wel dichterbij de put plaats wat weer een negatief effect op het rendement kan hebben. Deze effecten zijn dus tegenstrijdig.

Uit de modelresultaten volgde dan ook dat de warmtecapaciteit geen grote invloed heeft op het rendement (zie Figuur 3.9). In de scenario's is gekozen voor waarden voor de warmtecapaciteiten die rond de gemiddelde waarden voor de Nederlandse (zand of klei) bodem liggen: 2 tot 3 $MJ/m^3\text{°C}$.

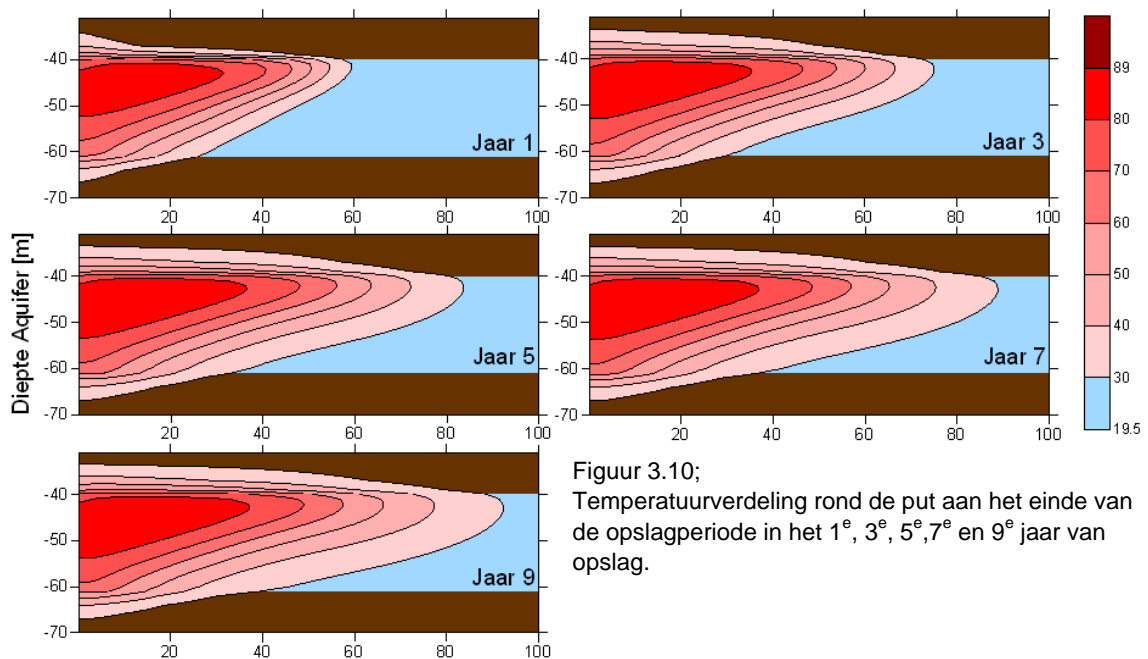
Tevens is één scenario doorgerekend met een warmtecapaciteit dat onder dat gemiddelde ligt (1,8 $MJ/m^3\text{°C}$) en één daarboven (4 $MJ/m^3\text{°C}$). Uit Figuur 3.9 valt goed op te maken dat de invloed van deze variatie in de warmtecapaciteit minimaal is, en dat het hooguit een verschil in opslagrendement van 2 tot 3 procent met zich meebrengt.



Figuur 3.9;
De invloed van de warmtecapaciteit van de aquifer op het rendement bij het standaardscenario

Aantal Cycli

In de verschillende figuren waarin het rendement is uitgezet tegen het aantal operationele jaren van het systeem is duidelijk te zien dat dit rendement in de eerste paar jaar nog duidelijk oploopt en vervolgens naar een bepaald maximum toegaat. Dit gebeurt omdat de achtergebleven energie in feite een hogere achtergrondtemperatuur veroorzaakt, met als gevolg dat de temperatuurgradiënt in latere cycli kleiner is. Een lagere temperatuurgradiënt leidt vervolgens tot gereduceerde dichtheidsgedreven stroming en geleiding. Daarnaast zal de menging tussen het omgevingswater en het opgeslagen water minder effect hebben door de hogere temperatuur van het omgevingswater. De achterblijvende warmte en de resulterende kleinere temperatuurgradiënt zijn duidelijk te zien in Figuur 3.10. Ook valt op dat dit effect het grootst is in de eerste paar cycli en naar een bepaald maximum toegaat. Dit komt overeen met de rendementen die na een aantal jaar een maximale waarde benaderen. Deze overgang naar een 'steady-state' is ook te zien in Figuren 3.3, 3.4 en 3.8.



Figuur 3.10; Temperatuurverdeling rond de put aan het einde van de opslagperiode in het 1^e, 3^e, 5^e, 7^e en 9^e jaar van opslag.

3.2.3 Herkomst warmteverliezen

Tabel 3.2 bevat een samenvatting van de berekende scenario's in het modelonderzoek. Dikgedrukt in de kolommen zijn de waarden weergegeven die afwijken van de waarden van het standaardscenario. Ook is het verschil in rendement met het standaardscenario berekend. Hieruit blijkt dat (zoals verwacht op basis van de literatuurstudie) permeabiliteit, anisotropie, injectietemperatuur en het injectievolume/de geometrie van de bel veruit de grootste invloed hebben op het rendement.

Variatie	Opslagrendement (jaar 4) [%]	Δ Opslagrendement	κ^h [D]	κ^v [D]	κ^h/κ^v	T_i [°C]	V_i [m ³]	H [m]	R_{th} [m]	λ_h [W/m · K]	d_{ll} [m]	κ_c/κ_a^h
<i>base case</i>	64	-	15	1,5	10	90	55.000	21	43,5	2,56	0,7	10 ⁻⁵
κ	43	-21	52	5,2	10	90	55.000	21	43,5	2,56	0,7	10 ⁻⁵
κ^h/κ^v	59	-5	15	5	3	90	55.000	21	43,5	2,56	0,7	10 ⁻⁵
κ^h/κ^v	57	-7	15	15	1	90	55.000	21	43,5	2,56	0,7	10 ⁻⁵
T_i	74	+10	15	1,5	10	55	55.000	21	43,5	2,56	0,7	10 ⁻⁵
V_i	74	+10	15	1,5	10	90	165.000	21	75,3	2,56	0,7	10 ⁻⁵
V_i	52	-12	15	1,5	10	90	18.333	21	25,2	2,56	0,7	10 ⁻⁵
H	63	-1	15	1,5	10	90	27.500	10	43,5	2,56	0,7	10 ⁻⁵
H	65	+1	15	1,5	10	90	110.000	42	43,5	2,56	0,7	10 ⁻⁵
λ_h	67	+3	15	1,5	10	90	55.000	21	43,5	0	0,7	10 ⁻⁵
d_{ll}	64	0	15	1,5	10	90	55.000	21	43,5	2,56	0	10 ⁻⁵
κ_c/κ_a^h	64	0	15	1,5	10	90	55.000	21	43,5	2,56	0,7	10⁻³
κ_c/κ_a^h	61	-3	15	1,5	10	90	55.000	21	43,5	2,56	0,7	10⁻¹

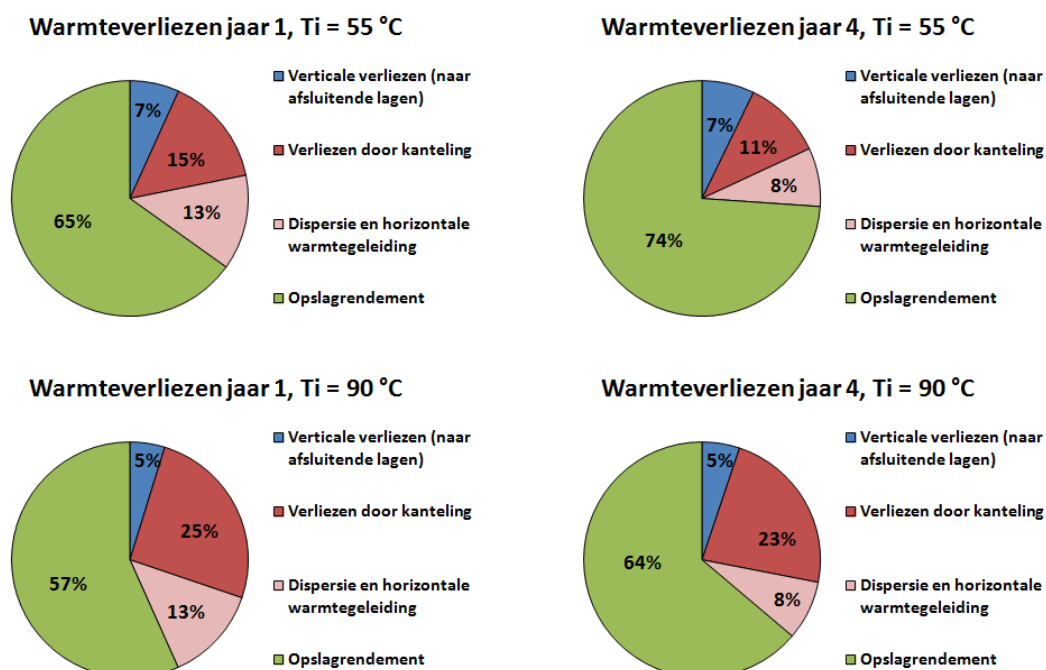
Tabel 3.2; Overzicht van de berekende opslagrendementen en de gebruikte waarden voor de invoerparameters uit de scenario's gebruikt in 3.2.2. Weergegeven zijn de opslagrendementen in het 4^e jaar, en het verschil in het opslagrendement met het standaardscenario (onder het kopje Δ Opslagrendement).

De invloed van dispersiviteit, de warmtegeleidingcoëfficiënt, en de eigenschappen van de scheidende laag blijken van ondergeschikt belang, zolang geen extreme waarden worden aangenomen.

Ook is onderzocht welke achterliggende processen ervoor zorgen dat deze parameters invloed hebben op het opslagrendement bij hogetemperatuuropslag. In Figuur 3.11 is de herkomst van warmteverliezen bij een injectietemperatuur van zowel 90 als 55 °C in het eerste en vierde jaar van opslag weergegeven. Te zien is dat de kanteling van het thermisch front voor de grootste verliezen zorgt bij beide injectietemperaturen. Zoals verwacht is de invloed van de kanteling aanzienlijk groter bij 90 °C dan bij 55 °C en is de invloed van kanteling ook in het 4^e jaar nog groot significant groter dan andere verliezen. Bij 55 °C is te zien dat de verliezen door kanteling in het 1^e jaar duidelijk groter zijn dan in het 4^e jaar.

Verticale verliezen naar de scheidende lagen treden vooral op door middel van geleiding. Hier speelt mee dat de gekozen waarden van κ_c klein is, maar in tabel 3.2 is te zien dat variatie in deze parameter weinig invloed heeft op het rendement: Zelfs wanneer de permeabiliteit van de scheidende laag slechts 10 keer zo klein is als die van de aquifer leidt dit tot slechts 3% vermindering in het opslagrendement.

Wat betreft horizontale verliezen door warmtegeleiding en dispersie is te zien dat deze kleiner zijn bij een opslagtemperatuur van 90 °C. Dit heeft te maken hebben met de mate van kanteling. Een deel van de geleiding- en dispersieverliezen wordt door kanteling ongedaan gemaakt doordat normaliter verloren warmte in het onderste deel van de aquifer binnen het intrekgebied van de put blijft. Ook is te zien dat deze verliezen in het 4^e jaar kleiner zijn doordat de omgeving van de put bij aanvang van de van de warmteopslag warmer is dan in het 1^e jaar.



Figuur 3.11; Het aandeel in de warmte verliezen van verschillende processen in het eerste en het 4^e jaar bij een injectie temperatuur van 90 en 55 °C. Zie tabel 3.1 (het standaardscenario) voor de gebruikte parameter waarden.

4 Inschatten van het opslagrendement

4.1 Het Rayleigh nummer

Uit het voorgaande is gebleken dat bij hogetemperatuuropslag de mate van dichtheids-gedreven grondwaterstroming, ofwel vrije convectie, kan leiden tot grote warmteverliezen in de bodem en daarmee het belangrijkste proces is voor het rendement. Het Rayleigh nummer, geïntroduceerd door Lord Rayleigh in het begin van de 20e eeuw, biedt een mogelijkheid tot inzicht in zowel de aanvang van vrije convectie als de relatieve invloed van vrije convectie ten opzichte van de invloed van geleiding.

Het Rayleigh nummer wordt daarom veel gebruikt voor het bestuderen van vrije convectie in een poreus medium. In de meeste gevallen wordt dan uitgegaan van 'Bernard convectie', opwaartse vrije convectie veroorzaakt door verhitting van de vloeistof vanaf de onderzijde (Nield, 1996; Tan en Sam, 1999). Onderzoek naar dit type stroming wordt inmiddels gebruikt in een breed scala aan geofysische, astrofysische en technische toepassingen (Otero et al. 2004).

Recentelijk is het Rayleigh nummer ook gebruikt voor het analyseren van de vrije convectie van water geïnjecteerd in een poreus medium middels een verticale put. Ward et al. (2007) deden dit voor Aquifer Storage and Recovery en Gutierrez-Neri et al. (2011) in een onderzoek naar hogetemperatuuropslag. In het onderzoek van Gutierrez-Neri werd het Rayleigh nummer als volgt gedefinieerd;

$$Ra = \frac{\alpha_f \rho g H \kappa_v \Delta T}{\mu \cdot D_a} \quad (\text{Vgl. 10})$$

Met;

ρ = Dichtheid water [m^3/kg]

g = zwaartekrachtsconstante [m^2/s]

H = Dikte watervoerendpakket [m]

κ_v = verticale permeabiliteit [m^2]

ΔT = Temperatuur verschil tussen natuurlijk en geïnjecteerd water [$^{\circ}C$]

μ = Viscositeit water [$kg/(m \cdot s)$]

D_a = Thermische diffusiviteit van de aquifer [m^2/s]

Waarbij de dichtheid en de viscositeit berekend dienen te worden op basis van de 'gemiddelde systeem temperatuur', T_m .

$$T_m = \frac{T_{min} + T_{max}}{2} = \frac{T_a + T_i}{2} \quad (\text{Vgl. 11})$$

Met;

T_a = Natuurlijke achtergrondtemperatuur [$^{\circ}C$]

T_i = Temperatuur van het geïnjecteerde water [$^{\circ}C$]

De thermische diffusiviteit dient te worden berekend aan de hand van de volumetrische warmtecapaciteit en de geleidingscoëfficiënt van de aquifer.

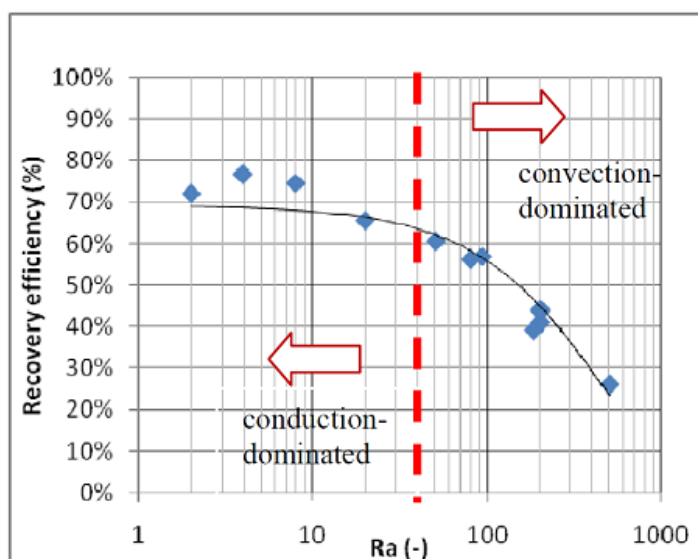
$$D = \frac{\lambda_a^n}{\rho C_a} \quad (\text{Vgl. 12})$$

Dit dimensieloze Rayleigh nummer is in feite een maat voor de kracht van vrije convectie gedeeld door de kracht van geleiding. Als het Rayleigh groter dan of gelijk is aan het kritisch Rayleigh nummer dan bevindt het systeem zich in een door vrije convectie gedomineerd regime. Bij een Rayleigh nummer kleiner dan het kritisch Rayleigh nummer mag men er vanuit gaan dat geleiding het dominante proces is. Uit een aantal studies is gebleken dat dit kritische Rayleigh nummer, Ra_c , gelijk is aan $4\pi^2 \approx 39,5$ (Tan & Sam, 1999).

Aan de hand van een modelstudie hebben Gutierrez-Neri et al. (2011) onderzocht hoe dit nummer zich verhoudt tot het opslagrendement, op basis van de aanname dat een systeem dat zich in een regime bevindt waar geleiding dominant is een hoger rendement zal hebben dan een systeem waar vrije convectie dominant is. Voor verschillende scenario's werd het rendement uitgezet tegen het bijbehorende Rayleigh nummer. De resultaten hiervan zijn te zien in Figuur 4.1. Belangrijk is dat het hier (en in het vervolg) gaat om het rendement in het 4e jaar van een systeem. Dit heeft te maken met de invloed van het aantal cycli. Na het 4e jaar benaderen het merendeel van de scenario's een 'steady-state' situatie. Dat wil zeggen dat het rendement na het 4e jaar niet veel meer zal veranderen. Dit is een aanname die in sommige gevallen een onderschatting en in sommige gevallen een overschatting zal zijn.

Uit Figuur 4.1 kunnen een aantal conclusies getrokken worden. Ten eerste valt op dat er een sterke correlatie is tussen het opslagrendement bij HTO en het Rayleigh nummer. De tweede conclusie is dat de relatie tussen het opslagrendement en het Rayleigh nummer exponentieel is. Dit houdt onder meer in dat er een bepaald maximaal rendement verbonden is aan hogetemperatuuropslag en de relatie de tussen opslagrendement (ϵ) en het Rayleigh nummer (Ra) de volgende vorm heeft;

$$\epsilon = A \cdot e^{B \cdot Ra} \quad (\text{Vgl. 13})$$



Figuur 4.1; Relatie tussen het Rayleigh getal (Ra) en de opslagrendement behaald door een modelstudie. De rode lijn geeft het kritische Rayleigh getal weer ($4\pi^2$) weer. Scenario's met een Ra hoger dan Ra_c bevinden zich in een door vrije convectie gedomineerd regime. (Gutierrez-Neri et al. 2011)

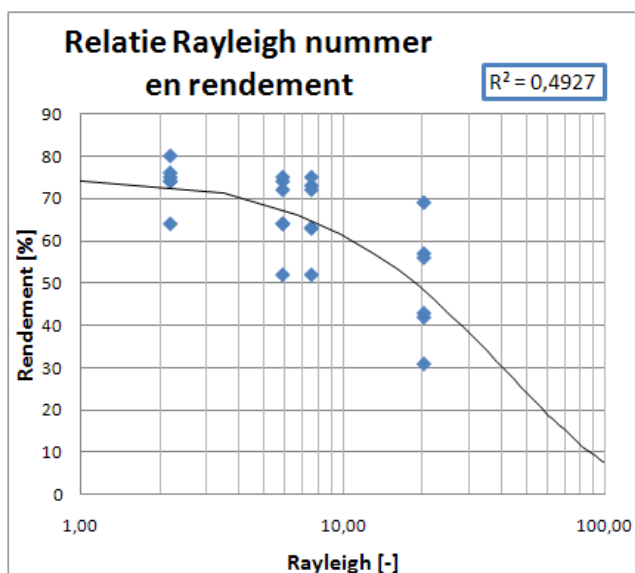
Ook geeft een exponentiële functie duidelijk het belang van Ra_c weer. Wanneer het Rayleigh nummer op een logaritmische as wordt geplotted wordt zichtbaar dat het rendement bij Rayleigh bij waarden groter dan Ra_c snel lager wordt. De belangrijkste conclusie is dat het Rayleigh nummer potentie biedt als indicator van het rendement. Hiermee wordt het mogelijk om in het vooronderzoek en bij het ontwerp van een HTO systeemgebruik te maken van de factoren die bepalend zijn voor de waarde van het Rayleigh nummer (Gutierrez-Neri et al. 2011). De voornaamste van deze factoren zijn de permeabiliteit, de dikte van het watervoerend pakket en het temperatuurverschil tussen het geïnjecteerde en onttrokken water. Uit zowel de literatuur studie als de modellering bleek al eerder dat dit inderdaad bepalende factoren voor het opslagrendement zijn.

4.2 Correlatie model data met Rayleigh nummer

Daar het Rayleigh nummer een maat is voor de aanvang alsmede de sterkte van vrije convectie biedt het potentie voor het ontwikkelen van een methode waarmee inschattingen van het thermisch opslagrendement kunnen worden gemaakt. Ten einde een dergelijke methode te ontwikkelen zijn eerst de rendementen van een aantal berekende scenario's uitgezet tegen het bijbehorende Rayleigh nummer.

De scenario's die zijn meegenomen zijn opgebouwd uit realistische waarden die in de praktijk kunnen voorkomen. Daarnaast is er voor gekozen de factoren te variëren die volgens het literatuur- en modelleringonderzoek het meeste invloed hebben. Op die manier is onderzocht of het Rayleigh nummer daadwerkelijk alle belangrijke factoren meeneemt. In totaal zijn er 74 verschillende scenario's doorgerekend en gebruikt. De factoren die zijn gevarieerd ten opzichte van het standaardscenario (in verschillende combinaties) zijn;

- Permeabiliteit (15 en 52 *Darcy*)
- Anisotropie ($\kappa_a^h/\kappa_a^v = 10$, $\kappa_a^h/\kappa_a^v = 3$, $\kappa_a^h/\kappa_a^v = 1$)
- Injectie Temperatuur (55 en 90 °C)
- Dikte aquifer (10, 21, 42 en 63 *meter*)
- Injectie Volume (afhankelijk van de dikte; een klein, middelmatig en groot volume op basis van de huidige ontwerpnormen)
- Permeabiliteit scheidende laag ($\kappa_c^h/\kappa_c^v = 10^{-3}$ en $\kappa_c^h/\kappa_c^v = 10^{-5}$)



Figuur 4.2; Relatie tussen het Rayleigh getal en het rendement voor de berekende scenario's met een dikte van 21 meter.

In eerste instantie is gekeken naar scenario's met dezelfde dikte van het watervoerend pakket als in het standaardscenario $H = 21$. Figuur 4.2 toont de correlatie van deze scenario's met het Rayleigh nummer. Net als in Gutierrez-Neri et al. (2011) lijken deze scenario's een exponentiële curve tussen het Rayleigh nummer en het rendement te vormen. De gevonden relatie is echter veel minder sterk dan in dat onderzoek gezien de lage correlatiecoëfficiënt, R^2 , van slechts 0,49.

4.3 Aangepast Rayleigh nummer

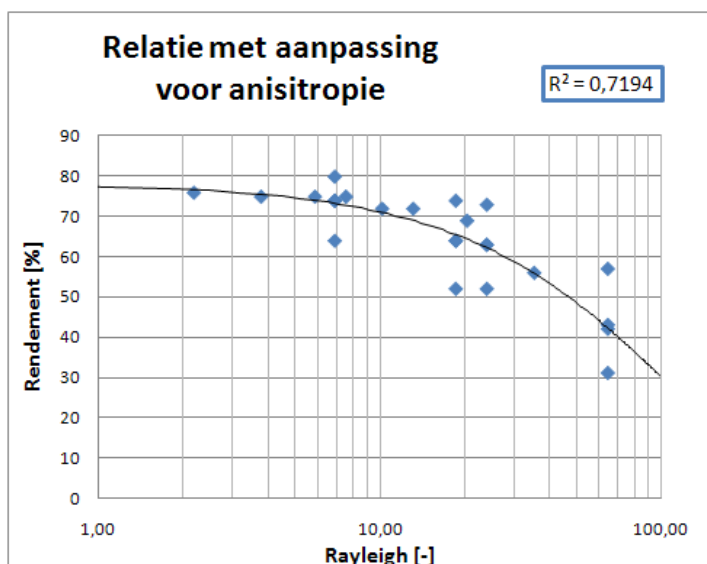
Uit figuur 4.2 blijkt dat de relatie tussen het Rayleigh nummer en het opslagrendement verre van perfect is. In paragraaf 4.3 worden een aantal aanpassingen aan het originele Rayleigh nummer voorgesteld die de correlatie met het opslagrendement verbeteren en het mogelijk maken het Rayleigh nummer te gebruiken als indicator voor het opslagrendement.

4.3.1 Anisotropie

Wat specifiek opvalt aan Figuur 4.2 is dat alle scenario's bij elkaar uitkomen op slechts 4 verschillende waarden van het Rayleigh nummer. Dit betekent dat een aantal factoren die voor verschillen tussen de opslagrendementen van deze scenario's zorgen niet worden meegenomen in de berekening van het Rayleigh nummer. Een voor de hand liggende factor die niet wordt meegenomen is de horizontale doorlatendheid κ_h .

Uit dit onderzoek is duidelijk gebleken dat niet alleen de verticale permeabiliteit invloed heeft op vrije convectie. Dit wordt direct duidelijk uit de vergelijking voor het berekenen van de karakteristieke kanteltijd (Hellström & Tsang, 1979), waarom gebruik wordt gemaakt van $\sqrt{\kappa_v \cdot \kappa_h}$. Wanneer enkel de horizontale permeabiliteit wordt veranderd (en daarmee de anisotropie) heeft dit dus ook grote invloed op de sterkte van vrije convectie en op het rendement. De horizontale permeabiliteit moet daarom worden meegenomen in het Rayleigh nummer. Het Rayleigh nummer is echter een dimensieloos nummer en om dat zo te houden is κ_v in het Rayleigh nummer vervangen door $\sqrt{\kappa_v \cdot \kappa_h}$, resulterend in;

$$Ra = \frac{\alpha_f \rho g H \sqrt{\kappa_v \cdot \kappa_h} \Delta T}{\mu \cdot D_a} \quad (\text{Vgl. 14})$$



Figuur 4.3; De relatie tussen het Rayleigh getal en het opslag rendement na de aanpassing voor anisotropie. *Scenario's met een dikte van 21 meter.

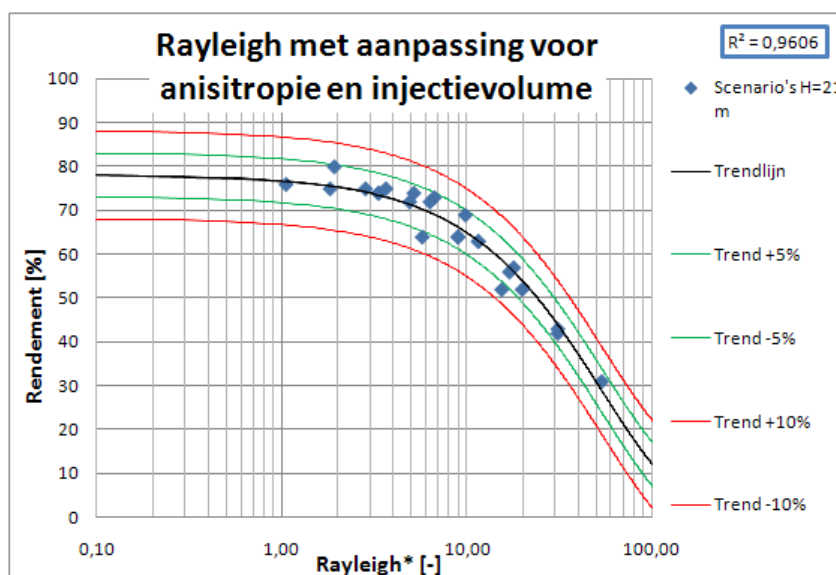
Wanneer dezelfde scenario's als in Figuur 4.2 nu nogmaals worden geplot is een duidelijke verbetering van de relatie tussen het opslagrendement en het Rayleigh nummer zichtbaar. Deze verbetering komt ook naar voren in de waarde van R^2 welke omhoog gaat van 0,49 naar 0,72. Er zijn echter toch nog een aantal scenario's met hetzelfde Rayleigh nummer maar met een groot verschil in opslagrendement.

4.3.2 Injectie Volume

Zoals eerder aangetoond kan het injectievolume van groot belang zijn voor het opslagrendement. In de huidige vorm van het Rayleigh getal zat echter alleen de dikte van het watervoerendpakket verwerkt. Om een maat voor het volume in het Rayleigh nummer te verwerken is het vermenigvuldigt met het aspect ratio, H/R_{th} ;

$$Ra^* = \frac{\alpha_f \rho g H^2 \sqrt{\kappa_v \cdot \kappa_h} \Delta T}{\mu \cdot D_a \cdot R_{th}} \quad (\text{Vgl. 15})$$

Samen met de hoogte van het watervoerend pakket H die al in het Rayleigh nummer zat geeft dit een maat voor het geïnjecteerde volume. Tegelijkertijd blijft het een dimensieloos nummer. De resulterende relatie is te zien in Figuur 4.4. Een R^2 van 96% toont aan dat de nieuwe relatie veel beter in staat is om de berekende datapunten te verklaren. Figuur 4.4 toont ook het aantal metingen die binnen een bandbreedte van plus of min 5 of 10% vallen van het door de nieuwe relatie voorspelde rendement. Te zien is dat bijna alle metingen binnen 5% van het voorspelde rendement vallen (bijv. $70 \pm 5\% = 65-75\%$), en een aantal daar net buiten.



Figuur 4.4;
De relatie tussen het Rayleigh nummer en het opslag rendement na de aanpassing voor anisotropie en het injectievolume
*Scenario's met een dikte van 21 meter.

4.3.3 Vereenvoudiging

Volgens de modelberekeningen is het rendement niet gevoelig voor de warmtecapaciteit en de warmtegeleidingcoëfficiënt, binnen de bandbreedte waarin deze in de Nederlandse ondergrond voorkomen (zand of klei). In hoofdstuk drie bleek dat bij een halvering van de warmtegeleidingcoëfficiënt slechts 1 a 2 % verschil in het opslagrendement waarneembaar was. Voor warmtecapaciteit geldt ook dat deze binnen realistische waarden voor de Nederlandse ondergrond (2 tot 3 MJ/m^3K) weinig tot geen invloed heeft op het thermisch opslagrendement.

In de huidige formulering van het Rayleigh nummer weegt variatie in de warmtecapaciteit en de warmtegeleiding nog onproportioneel zwaar mee, waardoor kleine variaties in de gekozen waarden voor deze parameters er toe kunnen leiden dat het rendement niet goed wordt voorspeld. Om dit te voorkomen is zowel de warmtecapaciteit als de warmtegeleiding als constante aangenomen. Dit is mogelijk dankzij de kleine natuurlijke variatie in deze waarden en de kleine invloed op het rendement die zij uitoefenen binnen deze natuurlijke bandbreedte.

Uit de formule voor het Rayleigh nummer die dan ontstaat kunnen een aantal constanten worden samengevoegd, waardoor voor het aangepaste Rayleigh nummer minder invoerparameters nodig zijn. De diffusiviteit, $\frac{\lambda_a}{\rho C_a}$, wordt een constante en de warmtegeleiding welke in de thermische straal (vgl. 1) is opgenomen kan er uit worden gehaald. Daarnaast zijn de zwaartekrachtsconstante, de thermische uitzettingsconstante en het getal pi uit het Rayleigh nummer gehaald. Uitgaande van de volgende waarden (waar de correlatie tussen het Rayleigh nummer en het opslagrendement in dit onderzoek op gekalibreerd is),

$$\begin{aligned}\lambda_a^h &= 2,56 [W/m^2C] \\ \rho C_a &= 1,81 [W/m^3^{\circ}C] \\ \alpha_f &= 0,0002 [1/^{\circ}C] \\ g &= 9,81 [m/s^2]\end{aligned}$$

, kan het Rayleigh nummer (vgl. 15) dan worden vereenvoudigd tot;

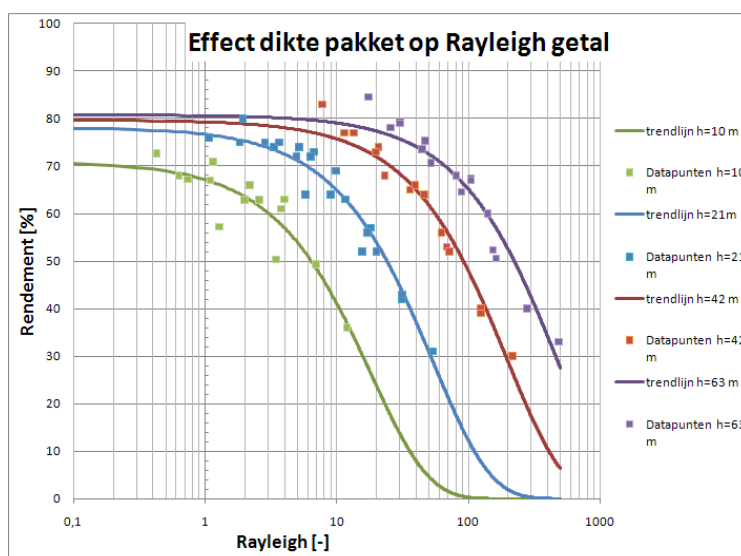
$$Ra^* = 1634 \cdot \frac{\rho \cdot H^{2,5} \sqrt{\kappa_v \cdot \kappa_h} \cdot \Delta T}{\mu \cdot \sqrt{V_i}} \quad (\text{Vgl. 16})$$

De variabelen die dan overblijven zijn enkel die waarvan al aangetoond is dat zij bepalend zijn voor het opslagrendement bij HTO: het temperatuurverschil, de dichtheid en viscositeit bij de gemiddelde systeem temperatuur, de permeabiliteit in de horizontale en verticale richting, de hoogte van de warme bel en het geïnjecteerde volume. Daarnaast is er over de variabelen die nu als constante worden genomen (warmtegeleidingcoëfficiënt en warmtecapaciteit) vaak weinig bekend.

4.3.4 Aquifer dikte

Ondanks de sterk ogende correlatie tussen het nieuwe Rayleigh nummer en het rendement treedt er nog een probleem op. Wanneer de scenario's van alle verschillende diktes in één figuur geplot worden blijkt dat scenario's met een grotere dikte een steeds groter wordend Rayleigh nummer hebben; er lijkt een aparte exponentiële functie te zijn voor iedere afzonderlijke pakket dikte. Dit effect is goed te zien in Figuur 4.5. Overduidelijk is dat wanneer een trendlijn zou worden getrokken door alle datapunten hier een weinig overtuigend resultaat uit zou komen. De verschillende trendlijnen hebben echter wel eenzelfde (exponentiële) vorm, maar zijn als het ware verschoven in de grafiek. De lijnen voor een grotere dikte liggen meer naar rechts en wat hoger in de grafiek.

Alle vier de getoonde trendlijnen getoond in Figuur 4.5 hebben de vorm;



Figuur 4.5; De relatie tussen het Rayleigh nummer en het opslag rendement na de aanpassing voor anisotropie en het injectievolume. Groen, blauw, rood en paars zijn respectievelijk de datapunten en de exponentiële trendlijn voor de geteste aquifer diktes van 10, 21, 42 en 63 meter.

$$\varepsilon = A \cdot e^{B \cdot Ra^*} \quad (\text{Vgl. 17})$$

Met;

Ra^* = Aangepast Rayleigh getal (zie vergelijking 16)

De parameter A in deze functie is bepalend voor het maximale rendement dat haalbaar is bij een laag Rayleigh getal. De parameter B bepaalt grotendeels de vorm van de curve. Omdat het verschil tussen de vier getoonde trendlijnen in feite alleen in de hoogte van het pakket H zit, is een relatie gemaakt waarin A en B een functie zijn van H ;

$$\varepsilon = A(H) \cdot e^{B(H) \cdot Ra^*} \quad (\text{Vgl. 18})$$

De vier gevonden datapunten voor A en B (voor iedere dikte/curve één waarde) zijn in een grafiek uiteengezet tegen H . Vervolgens is middels 'curve-fitting' een waarde voor A en B als functie van H gezocht. Toelichting op deze procedure is te vinden in bijlage 3.

Voor de parameter A was het resultaat eenduidig. De volgende functie resulteerde in de beste fit;

$$A = 82 - 170/H^{1,2} \quad (\text{Vgl. 19})$$

Voor de parameter B geldt dat er twee mogelijke fits zijn, beide met voor- en nadelen welke hier onder zijn toegelicht. Deze twee functies zijn;

$$B = -2,7/H^{1,7} \quad (\text{Vgl. 20})$$

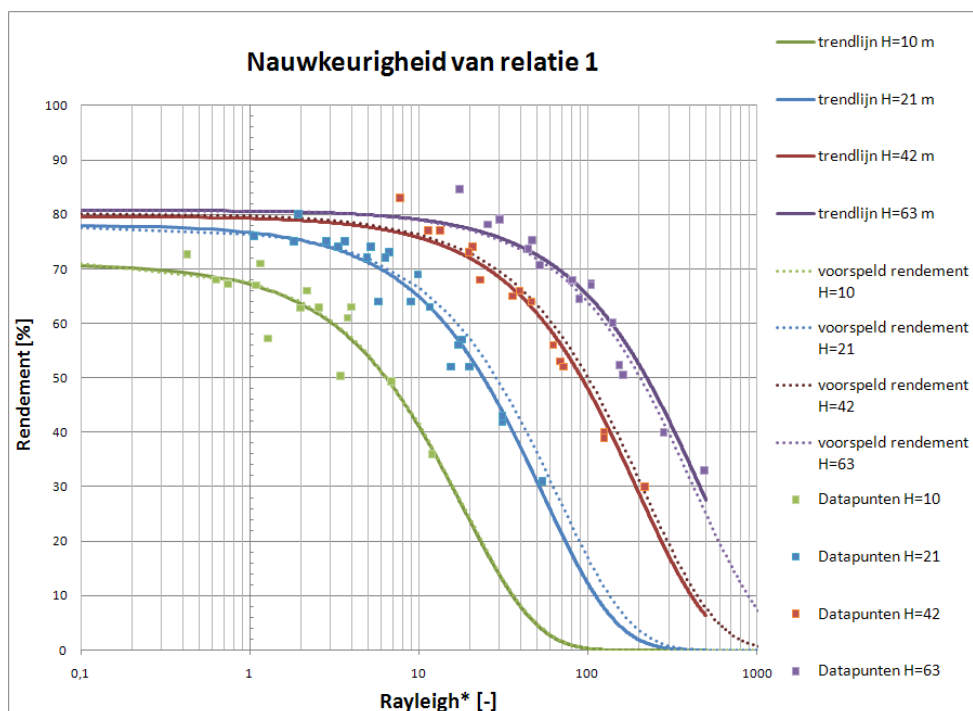
en

$$B = -1,2/H^{1,35} + 0,0022 \quad (\text{Vgl. 21})$$

Uiteindelijk levert dat twee mogelijke relaties op tussen het rendement, het aangepaste Rayleigh getal en de hoogte H . De eerste van de twee relaties is;

$$\varepsilon = \left(82 - \frac{170}{H^{1,2}}\right) \cdot e^{(-2,7/H^{1,7}) \cdot Ra^*} \quad (\text{Vgl. 22})$$

Wanneer vervolgens H en Ra^* van elke doorgerekend scenario hierin worden ingevuld blijkt dat deze relatie alle berekende datapunten met een gemiddelde afwijking van 2,78% voorspeldt. Figuur 4.6 geeft een beeld van de nauwkeurigheid waarmee deze relatie de experimentele data verkregen met het model verklaart. Figuur 4.6 is vergelijkbaar met 4.5, maar nu zijn met stippellijnen de trendlijnen aangegeven die door deze 1^e nieuwe relatie worden voorspeld. Te zien is dat de relatie nauwkeuriger is bij pakketdikten van 10, 42 en 63 meter dan bij een pakketdikte van 21 meter.



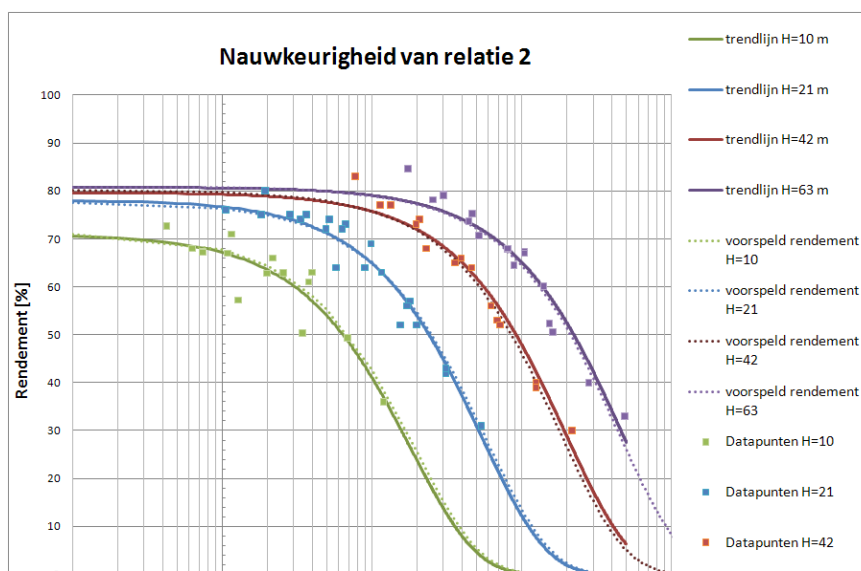
Figuur 4.6;

De overeenkomst tussen de experimenteel verkregen exponentiele trendlijnen en de door de nieuwe relatie voorspelde waarden (stippellijnen).

De andere mogelijke relatie is;

$$\varepsilon = \left(82 - \frac{170}{H^{2,2}} \right) \cdot e^{(-1,2/H^{1,85} + 0,0022) \cdot Ra^*} \quad (\text{Vgl. 23})$$

Deze relatie tussen ε , H en Ra^* voorspeldt alle berekende datapunten met een gemiddelde afwijking van 2,45%, meer dan drie tiende procent beter dan de eerste relatie. Figuur 4.7 toont de overeenkomst tussen de experimenteel verkregen trendlijnen en de waarden voorspeldt door deze 2^e nieuwe relatie. Ook uit dit figuur blijkt dat de 2^e relatie beter in staat is om alle experimentele data te verklaren. Op het eerste gezicht lijkt de 2^e relatie dus beter dan de 1^e.



Figuur 4.7;
De overeenkomst tussen de experimenteel verkregen exponentiele trendlijnen en de door de (nieuwe relatie voorspelde waarden (stippellijnen).

4.4 Mogelijkheden van Rayleigh Methode

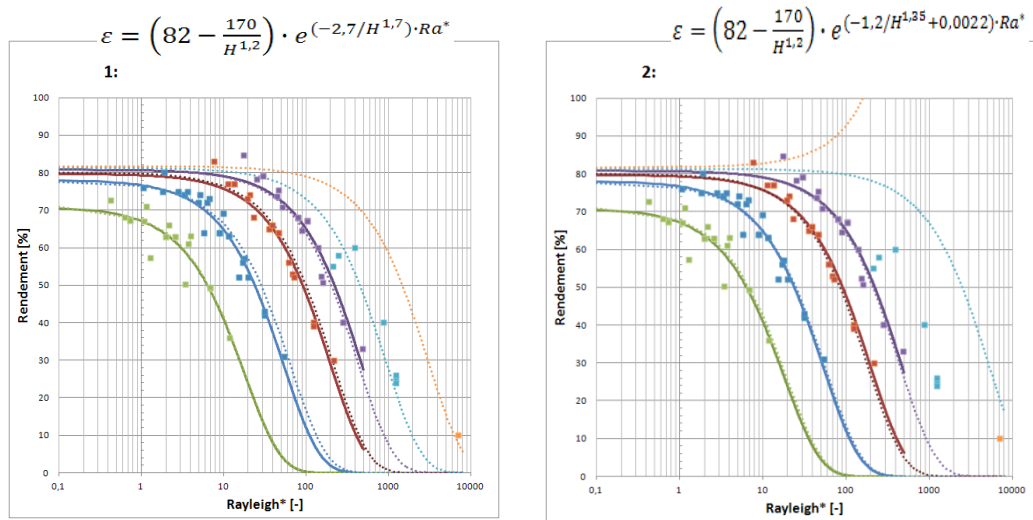
4.4.1 Toepasbaarheid

De twee verschillende relaties hebben ieder een bandbreedte aan hoogtes waarin zij het beste werken. Ondanks dat de tweede relatie een lagere gemiddelde afwijking heeft en daardoor beter in staat is het rendement te voorspellen van de voor deze studie doorge-rekende scenario's, blijkt dat hij niet geschikt voor grotere pakket diktes. Dit wordt duidelijk in figuur 4.8. De lichtblauwe en oranje stippellijnen en datapunten komen uit Gutierrez-Neri et al. (2011) en hebben een pakketdikte van 100 (lichtblauw) en 200 meter (oranje). De 1^e relatie is door zijn formulering wel in staat tot grote pakketdiktes het rendement te voorspellen, maar de 2^e zit er bij $H > 63 \text{ m}$ naast. De 2^e relatie is echter wel beter geschikt voor $H < 63 \text{ m}$. Voor beide formuleringen geldt dat zij niet getest zijn voor waarden van $H < 10 \text{ m}$ en $H > 200 \text{ m}$.

Er geldt dus;

$$1: \quad \text{Als } 60 < H < 200 \rightarrow \varepsilon = \left(82 - \frac{170}{H^{1,2}}\right) \cdot e^{(-2,7/H^{1,7}) \cdot Ra^*}$$

$$2: \quad \text{Als } 10 < H < 60 \rightarrow \varepsilon = \left(82 - \frac{170}{H^{1,2}}\right) \cdot e^{(-1,2/H^{1,35} + 0,0022) \cdot Ra^*}$$



Figuur 4.8; De toepasbaarheid van de 2 mogelijke relaties bij grotere pakketdiktes. Groen, blauw, rood en paars zijn respectievelijk $H = 10, 21, 42$ en 63 m . De stippellijnen zijn de voorspelde data. De lichtblauwe en oranje stippelijijn zijn de voorspelde rendement bij aquifer diktes van respectievelijk 100 en 200 m . De lichtblauwe en oranje datapunten komen uit Gutierrez-Neri et al. (2011) .

Verder geldt dat deze methode voor het inschatten van het rendement vooral getoetst is voor een groep realistische en 'praktische' waarden. De nauwkeurigheid waarmee voorspeld wordt zal afnemen bij extreme scenario's waar het model niet op getoetst is. Extreem grote of kleine injectievolumes waardoor onrealistische aspect ratio's ontstaan zullen niet goed voorspeld worden. Ook bij hoge waarden voor de dispersiviteit is het model niet getest. Binnen de bandbreedte van de uitgevoerde berekeningen is echter aangetoond dat het model functioneert.

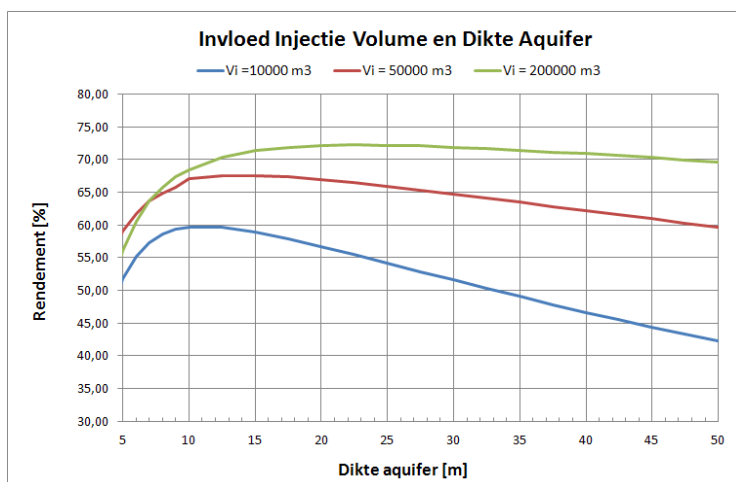
Een ander criterium voor het gebruik van deze methode is dat het opgaat voor hogetemperatuuropslag en niet bij 'gewone' WKO's. Bij gewone WKO's zal vrije convectie, waarop het Rayleigh nummer gebaseerd is, geen rol spelen. De behaalde rendementen zullen over het algemeen dus hoger uitvallen dan de rendementen bij HTO waar de methode op geijkt is. Vanaf $T \geq 50^\circ\text{C}$ lijkt de methode te werken. Een methode om het opslagrendement voor lagetemperatuur systemen in te schatten is gegeven door Doughty et al. (1982).

Tenslotte wordt geen rekening gehouden met effecten van een eventuele koude put en regionale grondwaterstroming. Wanneer de verwachting is dat grondwaterstroming en/of interferentie met een andere bron invloed heeft op het rendement moeten deze effecten apart worden bepaald. In de fijnzandige pakketten waar HTO potentieel toegepast gaat worden speelt regionale grondwaterstroming echter vaak geen rol.

Daarnaast is de 'koude' bron bij HTO warmer dan het natuurlijke grondwater. Eventuele interferentie tussen een koude en een warme bron zal daarom een positief effect op het rendement hebben.

4.4.2 Inzichtelijk maken invloed parametercombinaties

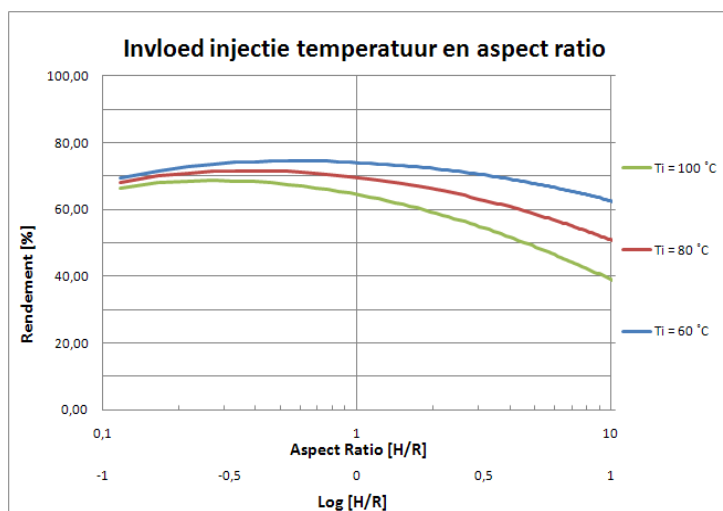
De voorgestelde methoden voor het inschatten van het rendement met een aangepast Rayleigh getal maakt het mogelijk het effect van verschillende parameter combinaties op het rendement snel inzichtelijk te maken. Hieronder zijn enkele voorbeelden hiervan gegeven;



Figuur 4.9; De invloed van de dikte van het watervoerend pakket bij verschillende injectievolumes

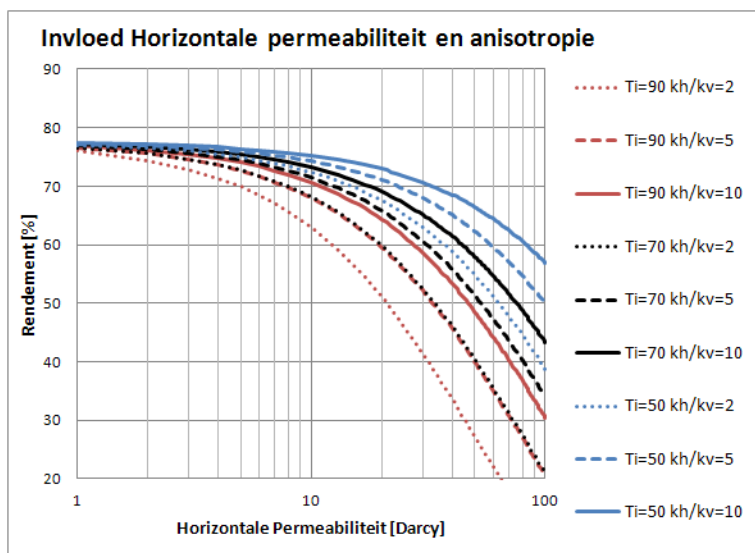
Figuur 4.9 geeft inzicht in de invloed van de geometrie van de warme bel. Er valt uit op te maken dat bij ieder injectievolume een optimale pakketdikte hoort. Ook is te zien dat bij een klein injectievolume de hoogte van het watervoerendpakket een veel grotere invloed heeft dan bij een groot volume. Bij grote volumes is het alleen van belang dat het pakket dikker is dan een bepaalde minimum waarde. In de praktijk zal bij een groot opslagvolume overigens niet snel gekozen worden voor een watervoerendpakket met een beperkte dikte in verband met de financiële haalbaarheid (veel putten nodig).

Figuur 4.10 toont de invloed van het aspect ratio en de injectietemperatuur. Hieruit valt op te maken dat de injectie temperatuur voornamelijk invloed heeft wanneer de dikte van het pakket groter is dan de thermische straal $H > R_{th}$. Bij een grote dikte zijn de warmteverliezen door dichtheidsgedreven grondwater ook relatief groot, door de grote zijwaartse oppervlakte van de bel.



Figuur 4.10; De invloed van het aspect ratio op het rendement bij verschillende injectietemperaturen en een constant opslagvolume

Wanneer $R_{th} \gg H$ blijkt dat de injectie temperatuur steeds minder invloed heeft op het opslagrendement. De nadelige invloed van dichtheidsstroming kan dus worden onderdrukt door te kiezen voor een beperkte aquifer dikte. Een belangrijk nadeel hiervan is echter ook dat meer putten nodig zijn (lagere capaciteit per put) en de kosten hoger zullen zijn.



Figuur 4.11; De invloed van de horizontale permeabiliteit op het rendement voor variaties op het standaard scenario. Bij injectie temperaturen van 90 (rood), 70 (zwart) en 50 (blauw) en anisotropie waarden van 10, 5 (streepjes lijnen) en 2 (stippel lijnen).

In het laatste voorbeeld, Figuur 4.11, is te zien dat bij een oplopende horizontale permeabiliteit de factoren injectietemperatuur en anisotropie steeds belangrijker worden. Voor de doorgerekende waarden in het Figuur blijkt het opslagrendement bij een maximale horizontale permeabiliteit van 10 *Darcy* bij alle scenario's boven de 50% te liggen. Er kan dus geconcludeerd worden dat in een watervoerendpakket met een maximale horizontale permeabiliteit van 10 *Darcy* (doorlatendheid van $\mp 6,67 \text{ m/d}$) factoren als injectie temperatuur en anisotropie relatief weinig invloed hebben.

Afhankelijk van de gestelde eisen aan het opslagrendement is een bepaalde maximale horizontale permeabiliteit van de aquifer toelaatbaar. Tabel 4.1 geeft hiervan een overzicht. Door het vereiste opslagrendement te verlagen kan gekozen worden voor een watervoerendpakket met een hogere permeabiliteit. Dit kan belangrijke voordelen opleveren voor de financiële haalbaarheid van HTO, doordat de capaciteit per put toeneemt en dus het benodigde aantal putten afneemt.

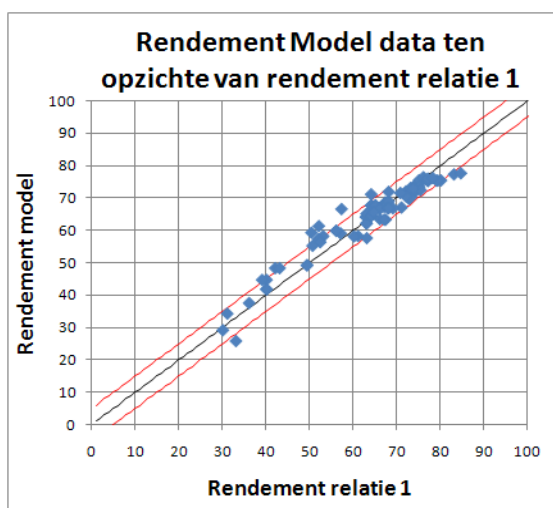
Opslagtemperatuur	Vereist opslagrendement	$H = 10 \text{ m}$			$H = 25 \text{ m}$			$H = 50 \text{ m}$		
		$\kappa_a^h \text{ bij } \kappa_a^h / \kappa_a^v =$			$\kappa_a^h \text{ bij } \kappa_a^h / \kappa_a^v =$			$\kappa_a^h \text{ bij } \kappa_a^h / \kappa_a^v =$		
		2	5	10	2	5	10	2	5	10
50 °C	50 %	97	153,5	217	48	76	107,5	30,7	48,5	69
	60 %	47,1	74,5	105,5	28,6	45,2	64	18,9	29,9	42,3
	70 %	5	7,8	11,1	12,2	19,2	27,1	9	14,2	20,1
70 °C	50 %	52	82	115,5	25,6	40,4	57,5	16,4	25,8	36,5
	60 %	25,1	39,7	56,5	15,2	24	34	10,1	15,9	22,5
	70 %	2,7	4,2	5,9	6,5	10,2	14,5	4,8	7,6	10,7
90 °C	50 %	32,2	51	72	15,9	25,2	35,6	10,2	16,1	22,8
	60 %	15,7	24,7	35	9,5	15	21,2	6,3	10	14,1
	70 %	1,7	2,6	3,7	4,1	6,4	9	3	4,7	6,7

Tabel 4.1; Maximaal toelaatbare permeabiliteit [*Darcy*] afhankelijk van een rendementseis van 50, 60 of 70% voor variaties op het standaardscenario.

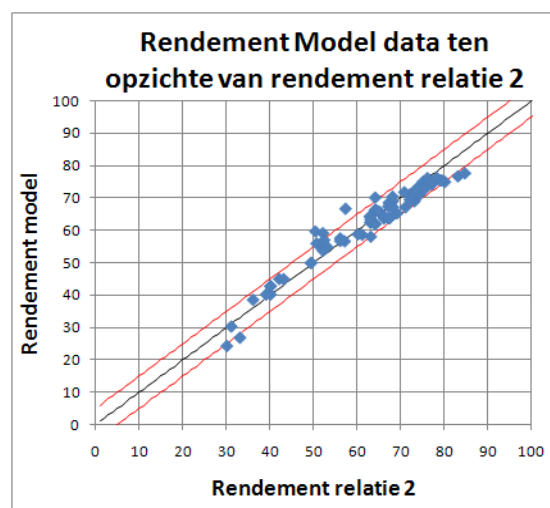
4.4.3 Rendement inschatten

De gegeven formules maken het mogelijk het rendement in te schatten van een willekeurig scenario. Figuur 4.12 en 4.13 laten zien dat alle twee de voorgestelde relaties het opslagrendement voor het merendeel van de 74 gemodelleerde scenario's binnen een marge van 5% voorspellen. In de ideale situatie zou iedere observatie op de zwarte lijn in deze figuren liggen. Ligt een datapunt buiten de rode lijnen dan houdt dat in dat er meer dan 5% afwijking is tussen het voorspelde rendement en het gemodelleerde rendement.

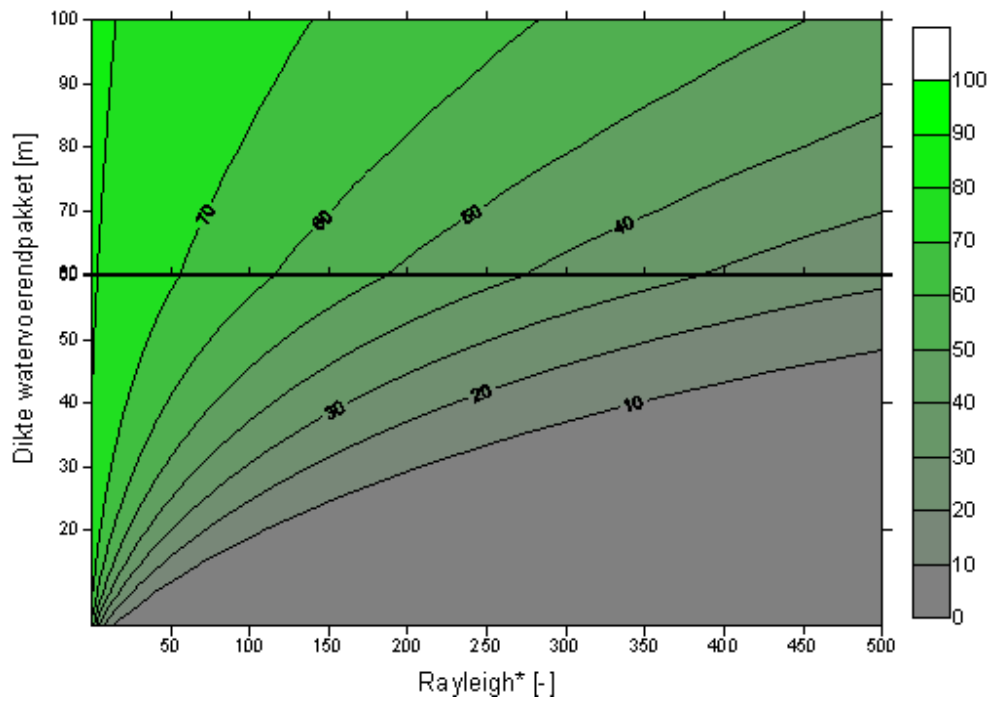
De relaties zijn dus accuraat genoeg om een inschatting te kunnen maken van het te verwachten rendement. Dat kan door rechtstreek het rendement te berekenen of door een contourplot, zoals in figuur 4.14, met het aangepaste Rayleigh nummer op één as en de aquifer dikte op de andere.



Figuur 4.12;
Het door de 1^e relatie voorspelde rendement
($\varepsilon = 82 - 170/H^{1,2} \cdot e^{(-2,7/H^{1,2}) \cdot Ra^*}$)
De rode lijnen geven 5% afwijking aan.



Figuur 4.13;
Het door de 2^e relatie voorspelde rendement
($\varepsilon = 82 - 170/H^{1,2} \cdot e^{(-1, \frac{2}{H^{1,35}} + 0,0022) \cdot Ra^*}$)
De rode lijnen geven 5% afwijking aan.



Figuur 4.14;
 Het rendement gebaseerd op het Ra^* en H . Rechts de kleurschaal gebruikt om het rendement weer te geven. Boven en onder de $H = 60$ meter zijn de bijbehorende relaties gebruikt: Vergelijking 22 boven $H = 60$ m en vergelijking 23 onder $H = 60$ m.

5 Conclusies

5.1 Literatuur- en modelstudie

De resultaten uit de modelstudie komen overeen met de resultaten van de literatuurstudie. Uit beiden onderzoeken bleek dat de factoren die een invloed hebben op de kanteling van het front een grote impact hebben op het rendement van hogetemperatuuropslag. Ten eerste omdat deze kanteling ervoor zorgt dat gedurende productie het onderste deel van het onttrekkingfilter al snel water met een lagere temperatuur zal worden aange trokken. Ten tweede vergoot kanteling ook het raakvlak van de warme bel met het koude re omgevingswater. In feite verandert het de verhouding tussen de oppervlakte en het volume van de warme bel. Hierdoor nemen de verticale geleidingsverliezen naar de scheidende lagen toe. Ook de warmteoverdracht door warmtegeleiding in de aquifer neemt toe, maar dit wordt deels teniet gedaan door de kanteling. De door geleiding verspreide warmte wordt in het onderste deel van de aquifer namelijk alsnog onttrokken door de put. De voornaamste factoren die invloed hebben op kanteling zijn de permeabiliteit, anisotropie en de injectietemperatuur.

Ook de vorm en omvang van de warme bel hebben een grote invloed op het rendement. Een groter volume zorgt voor een gunstigere ratio tussen het oppervlakte van de warme bel en het volume. Hierdoor nemen geleidingsverliezen af en het rendement toe. De dikte van het gebruikte pakket heeft ook invloed op de geometrie. Bij een zelfde volume kan een kleinere of juist grotere pakketdikte tot een hoger rendement leiden. De juiste verhouding tussen de pakketdikte en de thermische straal van de bel zorgt voor een optimale verhouding tussen oppervlakte en volume. Verder blijkt de geometrie ook invloed te hebben op de kanteling van het front en op de warmteverliezen als gevolg van deze kanteling. Bij een te dik pakket of een te klein volume zal kanteling dicht bij de put plaatsvinden en meer koud water worden onttrokken tijdens productie. Aan de andere kant bleek dat een grotere dikte leidt tot een vermindering van de snelheid van de kanteling. Hogere maximale rendementen kunnen dan ook worden behaald in dikkere pakketten (in combinatie met grote opslagvolumes).

In mindere mate kunnen de eigenschappen van de scheidende laag van invloed zijn. Vanzelfsprekend leidt een hydraulisch en thermisch goed isolerende scheidende laag tot een beter rendement. Uit de modelstudie bleek echter dat de invloed van deze eigenschappen vrij constant is, en pas echt gaat variëren wanneer extreme waarden worden aangenomen (een perfect isolerende scheidende laag of een scheidende laag met een zeer hoge doorlatendheid).

Ook warmtegeleiding en dispersie in het watervoerend pakket bleken een relatief kleine invloed te hebben. Ondanks dat warmtegeleiding gedreven wordt door een temperatuurgradiënt bleek vooral bij hoge temperaturen dat de relatieve verliezen veroorzaakt door warmtegeleiding binnen het pakket bijna te verwaarlozen zijn ten opzichte van de verliezen veroorzaakt door vrije convectie. In de praktijk is er ook relatief weinig variatie in de waarde van de warmtegeleidingcoëfficiënt, waardoor warmteverliezen door geleiding kunnen worden gekarakteriseerd als relatief klein en constant. Voor warmteverliezen door dispersie geldt hetzelfde.

Het effect van dispersie op de temperatuur van het teruggewonnen water is vergelijkbaar met het effect van geleiding daar beiden leiden tot een uitsmering van het thermisch front. In de literatuurstudie bleek echter dat op de effecten van dispersie bij grote opslagvolumes relatief klein zijn steeds kleiner worden. Uit de modelstudie bleek ook dat voor de gekozen waarden voor dispersiviteit de warmteverliezen door dispersie bij 90 °C veel kleiner waren dan warmteverliezen door vrije convectie.

5.2 Rayleigh methode

Het Rayleigh getal is een maat voor de kracht van vrije convectie ten opzichte van de kracht van geleiding. Aangezien vrije convectie de grootste invloed heeft op het rendement bij HTO kan het Rayleigh nummer gebruikt worden voor het inschatten van het rendement. Wanneer het rendement uitgezet wordt tegen het Rayleigh nummer levert dit een exponentiële functie op. Hieruit kan worden opgemaakt dat er een bepaald maximum rendement is bij HTO.

Uit de model studie bleek echter dat de relatie tussen het opslagrendement en het Rayleigh zoals gedefinieerd in Gutierrez-Neri et al. (2011) niet perfect is. Dit omdat in die vorm van het Rayleigh nummer geen rekening wordt gehouden met de anisotropie in het watervoerendpakket en de geometrie van de warme bel, factoren waarvan in de literatuur en modelstudie is aangetoond dat zij een grote invloed op het rendement kunnen hebben. Ten einde deze relatie beter te maken zijn in hoofdstuk 4 een aantal onderbouwde aanpassingen aan het Rayleigh nummer doorgevoerd. Het gewone Rayleigh nummer,

$$Ra = \frac{\alpha_f \rho g H \kappa_v \Delta T}{\mu \cdot D_a}$$

, is aangepast tot;

$$Ra^* = 1634 \cdot \frac{\rho \cdot H^{2.5} \sqrt{\kappa_v \cdot \kappa_h} \cdot \Delta T}{\mu \cdot \sqrt{V_i}}$$

De relatie tussen en opslagrendement (in het 4e jaar van opslag) en het aangepaste Rayleigh nummer, Ra^* , kan dan als volgt worden gedefinieerd:

1. Als $60 > H > 200$: $\varepsilon = 82 - 170/H^{1.2} \cdot e^{(-2.7/H^{1.7}) \cdot Ra^*}$
2. Als $10 > H > 60$: $\varepsilon = 82 - 170/H^{1.2} \cdot e^{(-1.2/H^{1.35} + 0.0022) \cdot Ra^*}$

Deze beide relaties waren in staat het opslagrendement in het 4^e jaar van opslag van alle 74 gebruikte modelscenario's met een zeer lage gemiddelde afwijking te voorspellen. Het voorspelde rendement van bijna alle scenario's wijkt niet meer dan 5% af van de numeriek gemodelleerde waarden. Het ontwikkelen van dergelijk relaties is niet mogelijk wanneer rekening moet worden gehouden met complexe putconfiguraties.

De formules gelden dus alleen voor een systeem van een enkele put zonder interferentie met andere bronnen. Ook regionale grondwaterstroming is niet meegenomen. De effecten van deze beiden factoren kunnen eventueel wel los meegenomen worden in een inschatting van het rendement. Verder is de methode getoetst aan een set realistische waarden voor belangrijke factoren als permeabiliteit, anisotropie, de aspect ratio en de eigenschappen van de scheidende lagen. De nauwkeurigheid van de methode is niet onderzocht in extreme scenario's.

Door deze limitaties zullen de ontwikkelde formules in de praktijk vooral van nut zijn bij het optimaliseren van een systeem in de ontwerpfase. Zonder een uitgebreide modelstudie uit te hoeven voeren kan inzicht worden verschaft in de complexe relaties tussen de belangrijkste factoren die invloed hebben op het rendement bij hogetemperatuuropslag.

Het voorspelde rendement kan worden gezien als een minimaal haalbare waarde. Er zijn nog mogelijkheden om het rendement te verbeteren door bijvoorbeeld de 'koude putten' nabij de warme te plaatsen of maatregelen te nemen om de warmteverliezen te beperken. Deze optimalisatiemogelijkheden verdienen nader onderzoek.

Bibliografie

- Buscheck, T. A. (1984). *The hydrothermal analysis of aquifer thermal energy storage*. PHD Thesis, University of California, Berkeley.
- Buscheck, T. A., Doughty, C., & Tsang, C. F. (1983). Prediction and analysis of a field experiment on a multi-layered aquifer thermal energy storage system with strong buoyancy flow. *Water Resources Research*, Vol. 19 (No. 5), 1307-1315.
- Caljé, R. (2010). *Future use of Aquifer Thermal Energy Storage below the historic centre of Amsterdam*. Waternet - TU Delft: Master's Thesis.
- Ceric, A., & Haitjema, H. (2005). On using simple time-of-travel capture zone delineation methods. *Ground Water*, Vol. 43 (No. 3), 408-412.
- Dickinson, J. S., Buik, N., Matthews, M. C., & Snijders, A. (2009). Aquifer thermal energy storage: theoretical and operational analysis. *Géotechnique*, Vol. 59 (No. 3), 249-260.
- Doughty, C., Hellstrom, G., & Tsang, C. F. (1982). A dimensionless parameter approach to the thermal behavior of an aquifer thermal energy storage system. *Water Resources Research*, Vol. 18 (No. 3), 571-587.
- Ferguson, G. (2007). Heterogeneity and thermal modelling of ground water. *Ground Water*, Vol. 45 (No. 4), 485-490.
- Gutierrez-Neri, M., Buik, N., Drijver, B., & Godschalk, B. (2011). Analysis of recovery efficiency in a high-temperature energy storage system. *1e Nationaal Congres Bodemenergie*. Utrecht.
- Gutierrez-Neri, M., Buik, N., Drijver, B., & Godschalk, B. (2011). Analysis of recovery efficiency in a high-temperature energy storage system. Utrecht: 1e Nationaal Congres Bodemenergie.
- Heidemij Adviesbureau BV. (1987). *Rekenmodellen aquiferopslag complexe putmodellen*. peo-samenwerkingsovereenkomst nr. 23.14-027.10.
- Hellström, G., & Tsang, C. F. (1988b). Combined forced-convection and buoyancy flow at a two-fluid interface in a porous medium: Analytical studies. *Water Resources Research*, Vol. 24 (No. 4), 507-515.
- Hellström, G., & Tsang, C. F. (1988a). Buoyancy flow at a two fluid interface in a porous medium: Analytical studies. *Water Resources Research*, Vol. 24 (No. 4), 493-506.
- Hellström, G., Tsang, C. F., & Claesson, J. (1979). *Heat storage in aquifers: Buoyancy flow and thermal stratification problems*. Lund Inst. of Technology. (Sweden), Dept. of Mathematical Physics. California: Lawrence Berkeley Lab.
- Hooman, K., & Gurgenci, H. (2008). Effects of temperature-dependent viscosity on Bénard convection in a porous medium using a non-Darcy model. *International Journal of Heat and Mass Transfer* (No. 51), 1139-1149.
- Nield, D. A. (1997). Notes on convection in a porous medium: (i) an effective Rayleigh number for an anisotropic layer, (ii) the Malkus Hypothesis and wavenumber selection. *Transport in Porous Media* (No. 27), 135-142.
- Otero, J., Dontcheve, L. A., Johnston, H., Worthing, R. A., Kurganov, A., Petrova, G., et al. (2004). High Rayleigh number convection in fluid-saturated porous media. *J. Fluid Mechanics* (No. 500), 263-281.

Sauty, J. P., Gringarten, A. C., & Landel, P. A. (1978). The effect of thermal dispersion on injection of hot water in aquifers. *Proceedings*. Berkeley, California : Second Invitational Well Testing Symposium.

Sauty, J. P., Gringarten, A. C., Menjoz, A., & Landel, P. A. (1982). Sensible energy storage in aquifers 1. Theoretical study. *Water Resources Research* , Vol. 18 (No. 2), 245-252.

Tan, K. K., & Sam, T. (1999). Simulations of the onset of transient convection in porous media under fixed surface temperature boundary conditions. *Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*. Melbourne, Australia: CSIRO.

van Elswijk, R. C., & Willemsen, A. (2002). *Optimalisatie van het temperatuurniveau bij warmteopslag*. Arnhem: IFtechnology.

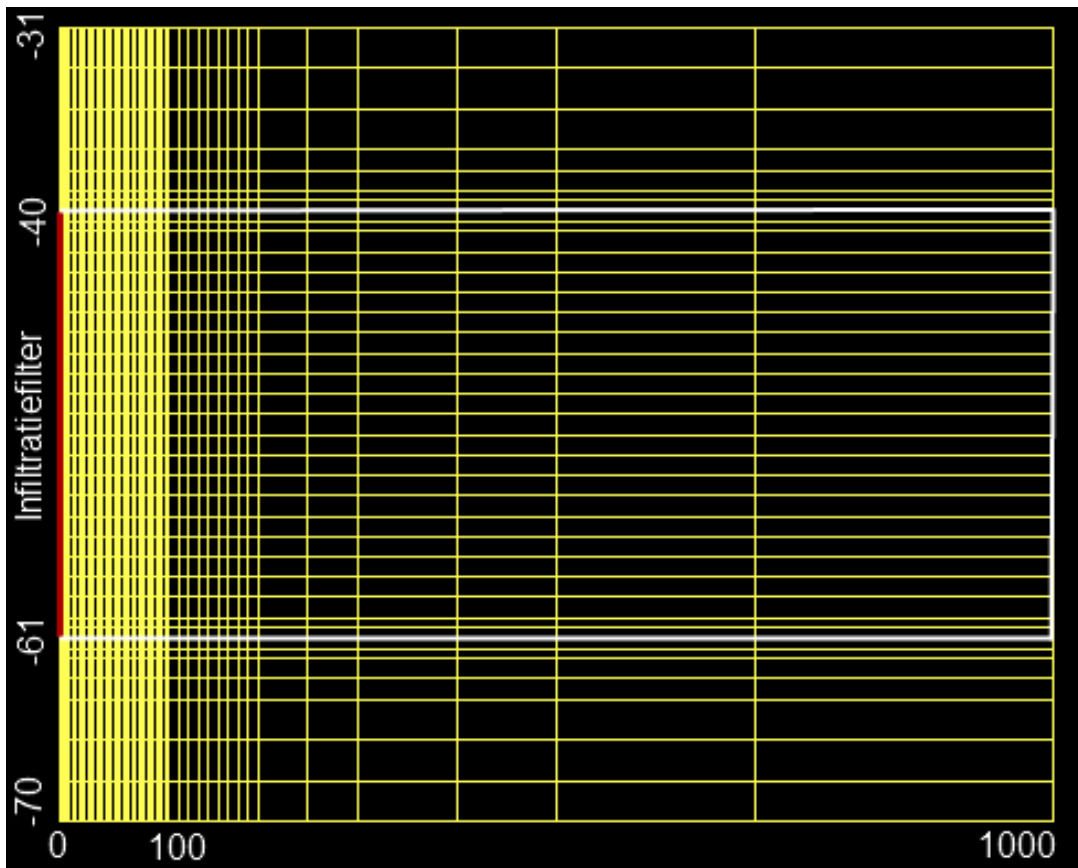
Ward, J. D., Simmons, C. T., & Dillon, P. J. (2007). A theoretical analysis of mixed convection in aquifer storage and recovery: How important are density effects? *Journal of Hydrology* (No. 343), 169-189.

Ward, J. D., Simmons, C. T., Dillon, P. J., & Pavelic, P. (2009). Integrated assessment of lateral flow, density effects and dispersion in aquifer storage and recovery. *Journal of Hydrology* (No. 370), 83-2009.

Bijlage 1

Schematisatie model grid

De rode lijn geeft de strekking van het injectiefilter weer.
Het watervoerend pakket bevindt zich tussen de witte lijnen



Bijlage 2

Toetsing numerieke model met literatuur data

α_{lit} = Kantelhoek uit literatuur (Buscheck, 1984)

α_{model} = Berekende kantelhoek

$\Delta\alpha$ = Verschil

Scenario	Time [d]	α_{lit} [deg]	α_{model} [deg]	$\Delta\alpha$
AI90	90	46,1	49	2,9
	180	64,6	65,5	0,9
AT90	90	40,3	43	2,7
	180	65,5	65,5	0
AL90	90	36	38	2
	180	63,9	64,5	0,6
AI55	90	16,6	13	3,6
	180	32,2	34	1,8
AT55	90	13,9	14	0,1
	180	23	34	11
AL55	90	13	14	1
	180	24	29	5
BI90	90	71	75,5	4,5
	180	82,8	84,5	1,7
BT90	90	68	75	7
	180	80,9	85	4,1
BL90	90	66,4	73,5	7,1
	180	81,7	85	3,3
BI55	90	44	47	3
	180	64,5	66,5	2
BT55	90	39,2	38	1,2
	180	64,9	66	1,1
BL55	90	35	33	2
	180	64,1	64,5	0,4
CI55	90	71,3	68	3,3
	180	83,7	84	0,3
CT55	90	67,1	66	1,1
	180	80,8	84	3,2
CL55	90	67	62	5
	180	81	84	3
Gemiddelde afwijking =				2,83

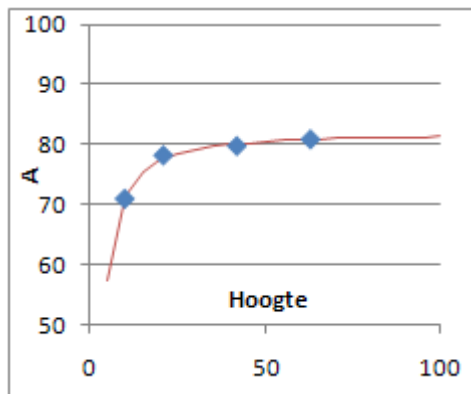
Bijlage 3

Curve fitting exponentiële relatie

De beschikbare data was;

Thickness	a	b
10	70,91509	-0,054670972
21	78,1137	-0,01854536
42	79,67062	-0,005078918
63	80,77587	-0,002152912

Dat levert voor A de hieronder getekende curve op: $A = 82 - 170/H^{1,2}$

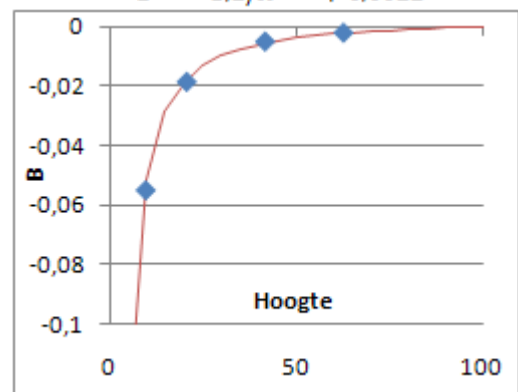
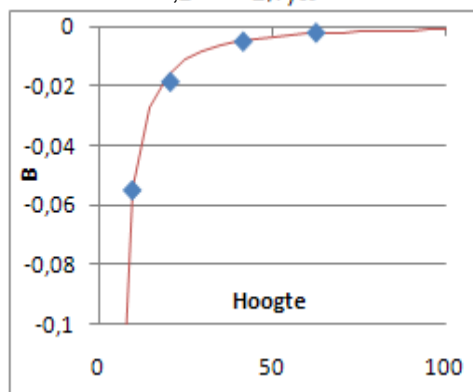


Voor B levert dat een van de volgende twee curven op

$$; B = -2,7/H^{1,7}$$

of

$$B = -1,2/H^{1,35} + 0,0022$$



Bijlage 4

Ontwikkeling van de bodemtemperatuur bij standaard scenario gedurende 1 cyclus

