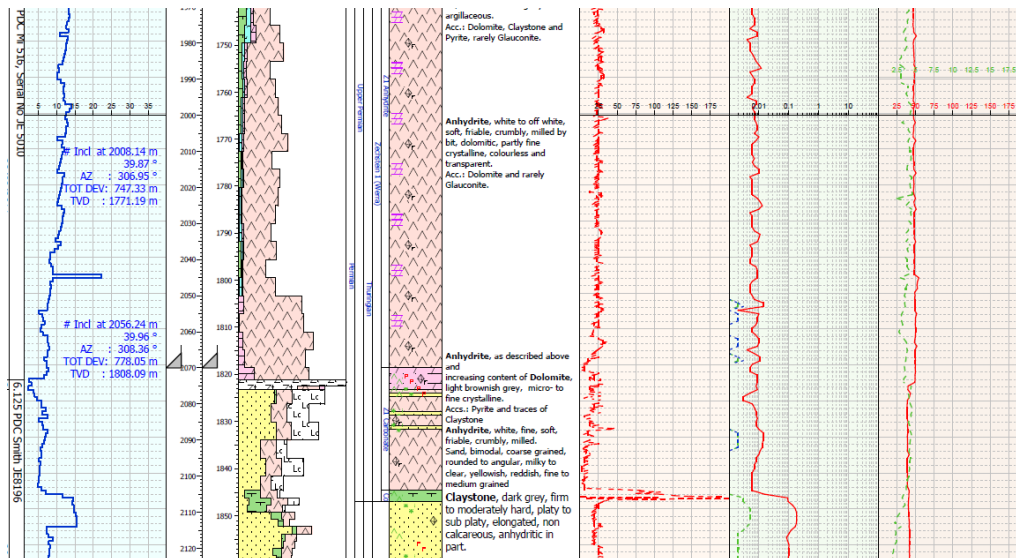


# Bodemenergie in de glastuinbouw - pilot Koekoekspolder -



## Geologische 'logging' voor aardwarmte

November 2013

Project in het kader van het programma Kas als Energiebron

### Contactgegevens:

Aardwarmtecluster 1 KKP BV  
p/a Hartogsweg 6  
8271 PE IJsselmuiden  
Nederland

Het project is ondersteund door:



Ministerie van Economische Zaken,  
Landbouw en Innovatie

## Inhoudsopgave

<b>1.</b>	<b>Algemene gegevens van het project</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>Aanleiding</b>	<b>4</b>
<b>3.</b>	<b>Beschrijving van een aardwarmtebron</b>	<b>5</b>
<b>4.</b>	<b>Probleemstelling en doelstellingen project</b>	<b>6</b>
<b>5.</b>	<b>Logging werkzaamheden</b>	<b>9</b>
<b>6.</b>	<b>Resultaten interpretatie logging data en overige geo data</b>	<b>12</b>
<b>7.</b>	<b>Mogelijkheden voor Hoge Temperatuur Opslag (HTO)</b>	<b>17</b>
<b>8.</b>	<b>Reservoir modelling</b>	<b>21</b>
<b>9.</b>	<b>Selectie ligging vervolgdoublotten</b>	<b>26</b>
<b>10.</b>	<b>Conclusies</b>	<b>30</b>

### **Leeswijzer:**

In dit rapport zijn de resultaten te vinden van een geologisch onderzoek naar eigenschappen van een aantal geologische lagen die gelegen is onder het tuinbouwgebied Koekoekspolder. De geologische informatie is verzameld tijdens de aanleg van een aardwarmtebron. Aangezien dit de eerste aardwarmteboring in de Slochteren-formatie betrof, is de verzamelde data van groot belang voor vervolprojecten die zich op dezelfde geologische laag richten. In dit rapport wordt de aanleiding voor en de doelstellingen van het onderzoek besproken. Vervolgens is er een korte beschrijving van logging technieken en de metingen die in het gebied Koekoekspolder verricht zijn. Vervolgens is te lezen tot welke inzichten deze geologische informatie heeft geleid voor de toepassing van 'diepe geothermie' en 'hoge temperatuur opslag'. Tenslotte is er informatie over de modellering van het reservoir te vinden en een doorkijk naar een verdere ontwikkeling van geothermie in het gehele gebied ten dienste van de glastuinbouw.

## 1) Algemene gegevens van het project

**Projecttitel:**

Bodemenergie in de glastuinbouw, pilot Koekoekspolder

**Projectnummer:**

1400008471

**Projectperiode:**

oktober 2011 - december 2013

Uitgevoerd in het kader van het transitiepad aardwarmte van het programma Kas als Energiebron

**Combinable Magnetic Resonance  
(meetapparaat voor porositeit en permeabiliteit)**

**CMR-Plus Combinable  
Magnetic Resonance Tool**



## 2) Aanleiding

In 2008 schoten de energieprijzen omhoog en de prijzen van olie en aardgas bereikten een piek. Een groep tuinders in het tuinbouwgebied Koekoekspolder besloot op zoek te gaan naar duurzame en minder marktprijsgevoelige warmtebron. Naar voorbeeld van een teler in Bleiswijk werd dit in de vorm van aardwarmte (geothermie) gevonden. Aardwarmte vervangt aardgas als warmtebron en dat paste prima binnen de duurzaamheidsambitie van de tuinbouwbedrijven.

Het idee van aardwarmte is simpel: Pomp warm water uit de diepe ondergrond op, verwarm er tuinbouwkassen mee en pomp het afgekoelde water weer terug de aarde in, zodat het daar weer kan opwarmen. Niet alleen de tuinders geloofden er in, maar ook andere partijen, zoals de Kas als Energiebron. Kas als Energiebron, samen met tuinders en overheden leverde een bijdrage.

Omdat er nog niet eerder geboord was in het tuinbouwgebied Koekoekspolder waren er grote onzekerheden m.b.t. de precieze opbouw van de geologische lagen en de geschiktheid van deze lagen voor aardwarmte en warmteopslag. Met ondersteuning van het programma Kas als Energiebron is een logging programma (logging is het in kaart brengen van eigenschappen van geologische lagen) uitgevoerd. Daarna zijn de logginggegevens door verschillende deskundigen uitgewerkt en vergeleken met de daadwerkelijke productiegegevens van de aardwarmtebron.

Logginggegevens zijn cruciaal voor het goed inschatten van de ondergrondse gesteldheid van de bodem en hebben een positieve weerslag op de kans van slagen van een naburig project. Dit is met name het geval in die gebieden, waar nog niet veel geboord is, zoals Koekoekspolder. De toegevoegde waarde neemt immers af als er al veel gelogde boringen in de nabije omgeving gezet zijn. Daarnaast helpt logging in combinatie met operationele gegevens op langere termijn in het vaststellen van het verloop van het ondergrondse processen van aardwarmte winning. Dit is ook van belang voor het verdelen/verkavelen van de ondergrond voor optimale uitnutting.

De kosten voor logging zijn in de orde van enkele tienduizenden tot honderdduizenden euro's en 'te overzien' in vergelijking tot de totale investeringen van een aardwarmteproject (deze lopen al gauw naar 10 miljoen of meer), maar toch gaat het om behoorlijke bedragen die tijdens de duur van het project terugverdiend moeten worden. De mogelijke baten in termen van een verlaagd risico voor de ontwikkeling van naburige projecten en de vermeden kosten van mogelijke schadelijke effecten in de toekomst, wegen op gebiedsniveau ruim op tegen de kosten voor de logging. Echter voor de eerste groep tuinders in Koekoekspolder waren deze kosten en de risico's voor logging erg hoog. De



voordelen zijn namelijk vooral voor toekomstige boringen en de individuele operator zal er daardoor in het algemeen veel minder belang bij hebben (de put is dan immers al geboord). In de olie- en gasconcessies zie je (bijna) altijd dat er gelogd wordt. Bij geothermie is er nog geen ervaring met logging. Koekoekspolder is het eerste aardwarmte project in Nederland waarbij een gedegen logging heeft plaatsgevonden.

### 3) Beschrijving van een aardwarmtebron

#### Wat is aardwarmte?

Aardwarmte (geothermische energie) komt voor in de diepe ondergrond van de aarde. De temperatuur in de kern is meer dan 5.000 graden Celsius. Naarmate je dichter bij de aardkorst komt wordt het minder warm. In Nederland stijgt de temperatuur in de bodem met ca. 3 graden Celsius voor iedere 100 meter diepte. In de Koekoekspolder is het water op 1.850 tot 1.950 meter diepte ongeveer 73 graden Celsius. Dat is voor tuinders een goede watertemperatuur om kassen mee te verwarmen.

Aardwarmte is een vorm van duurzame energie. Er is ongelofelijk veel warmte onder de aardkorst aanwezig. Er is wel elektriciteit nodig om het warme water op te pompen en over de tuinbouwbedrijven te verdelen. Daarna wordt het afgekoelde water terug in de aarde gebracht, om geleidelijk weer op te kunnen warmen.

De voordelen van aardwarmte zijn:

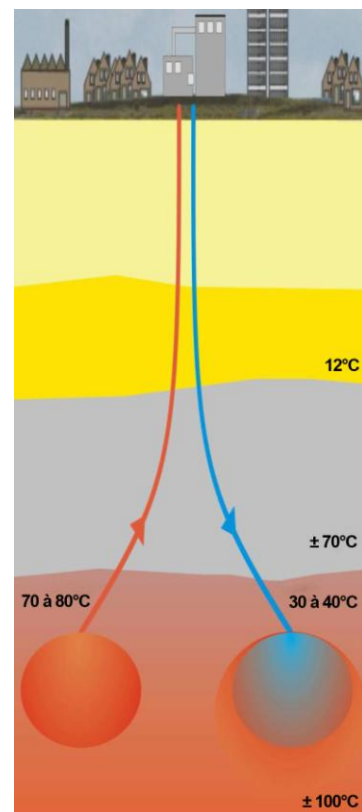
- Het gehele jaar beschikbaar, 24 uur per dag
- Schone energie die niet opdraakt
- Weinig milieubelastend, zeker als groene stroom gebruikt wordt
- Vermindering van de jaarlijkse CO<sub>2</sub>-uitstoot
- Goed te combineren met andere energiebronnen, zoals Warmtekracht Koppeling (WKK)
- Een stabiele energieprijis voor de tuinbouwbedrijven
- Een aardwarmtesysteem kan wel 30 jaar meegaan.

#### Hoe werkt de aardwarmtebron in Koekoekspolder

Om een werkende aardwarmtebron te maken is het nodig om twee putten (doublet) in de grond te boren. Deze putten zijn eigenlijk twee lange buizen die in Koekoekspolder meer dan 1950 meter diep de grond in gaan. De laatste 100 tot 150 meter van de buizen hebben zeefachtige openingen (screens) waardoor het warme water uit de ondergrond in de buis kan stromen. Door de waterdruk op die diepte stijgt het water in de buis van nature tot circa 20 meter onder het maaiveld.

Een speciale pomp (ESP = electrical submersible pump) hangt in één van de buizen (de productieput) op circa 450 meter diepte. De pomp zit dus ruim 430 meter onder water en pompt het warme water omhoog. Dat warme water wordt naar een aardwarmtecentrale gebracht, die tussen de bron en de deelnemende glastuinbouwbedrijven staat. In een warmtewisselaar wordt de warmte aan het water onttrokken en naar de kassen geleid. Het afgekoelde water (van ongeveer 35 graden Celsius) gaat via de andere put (de injectieput) weer terug, naar dezelfde laag als waaruit het onttrokken is. De in- en uitstroomopening liggen op ongeveer 1.950 meter diepte 1,7 km uit elkaar.

Afhankelijk van de geologische structuur kan het oppompen en injecteren van thermaal water makkelijker of moeilijker gaan. In een aardwarmtesysteem kan in de regel voor iedere kW (kiloWatt) pomp-elektriciteit ongeveer 10 tot 20 kW aan duurzame warmte gewonnen worden. Het aanleggen van een dergelijk aardwarmtesysteem vraagt een investering van miljoenen.



## 4) Probleemstelling en doelstellingen project

### Inleiding

Verduurzaming van het tuinbouwgebied Koekoekspolder staat hoog op de agenda bij zowel overheden als het tuinbouwbedrijfsleven. Energie (warmte) uit de bodem en energie-opslag in de bodem zijn belangrijke transitiepaden naar een tuinbouw, die steeds slimmer met energie (en reductie van CO<sub>2</sub> uitstoot) omgaat. In de Koekoekspolder liggen mogelijkheden om een tweetal bodemlagen tussen de 0 en 1000 meter te gebruiken voor het onttrekken en opslaan van warmte. Ook bieden deze lagen mogelijkheden voor ondiepe geothermie. Om beter te kunnen bepalen wat het 'energetisch potentieel' van deze lagen is, was het noodzakelijk dat geologisch onderzoek uitgevoerd werd. Dit gebeurde door de lagen te meten/loggen middels 'magnetic resonance'.

Bij de boring in Koekoekspolder is op beide putten een ESP-test uitgevoerd, op basis waarvan inzicht verkregen is van de werkelijke geschiktheid van het reservoir voor de onttrekking van aardwarmte. Kennis over de opbouw van het diepe reservoir werd vergroot door hier de 'magnetic resonance tool' in te zetten. Vanwege de grote diepte was dit een kostbare meeting.

Voor de toepassing van warmteopslag (Hoge Temperatuur Opslag) werden er mogelijkheden verwacht in de formatie Het Zand van Brussel. Van deze formatie van Brussel zijn weinig exacte gegevens over de permeabiliteit (doorlatendheid), porositeit (opslag volume) en waterkwaliteit bekend. Deze aspecten zijn belangrijk om het technisch en energetische functioneren van de warmteopslag nader te specificeren. Ook de Formatie van Breda is interessant voor warmte-opslag (hoge temperatuur opslag).

De volgende redenen kunnen onderscheiden worden bij het doen van loggings:

- De precieze dikte, de porositeit en de daaruit te berekenen permeabiliteit
- Het productiepotentieel
- Druk en temperatuur
- Zoutgehalte en watersamenstelling
- Het begrijpen van de relaties met andere boringen en dus ook tussen de producer en injector binnen het geboorde geothermisch doublet.

### Logging-programma (well-logging)

In een overleg tussen PanTerra en TNO zijn verschillende beschikbare technieken voor boorgatmetingen op een rij gezet. Afhankelijk van de beschikbare kennis van de ondergrond, voordat er geboord wordt, kan een beperkt of een uitgebreid meetprogramma opgesteld worden. Binnen een geothermisch doublet kan ervoor gekozen worden om in de eerste boring een uitgebreider meetprogramma uit te voeren dan tijdens de tweede boring.

Hieronder wordt een aantal typen boorgatmetingen besproken die in een meetprogramma opgenomen kunnen worden. Logmetingen kunnen worden verkregen tijdens het boren (Logging While Drilling, LWD) of na het boren in het open boorgat. LWD kan in bepaalde gevallen voordelen hebben zoals tijd- (en kosten-) besparing en vermindering van het technisch risico dat gepaard gaat met meten na het boren (bijvoorbeeld instorten van het gat of het vast komen te zitten van de meettool).

Uitgangspunt is dat een put-test tot de standaard voor geothermie behoort, maar dat het nemen en analyseren van boorkernen tot de uitzonderingen zal behoren (daar dit zeer kostbaar is). Dat neemt niet weg dat boorgruis ('cuttings') waardevol materiaal vormt om analyses over reservoirkwaliteit op te verrichten (bijvoorbeeld korrelgrootte, kleigehalte, etc.). Een meetprogramma kan uit de volgende onderdelen bestaan:

➤ **Gamma Ray log**

Minimaal moet een natural gamma ray log (evt. spectrale versie) worden opgenomen. Deze geeft aan waar de zand- en klei-intervallen zich bevinden en is daarmee kwalitatief een indicator voor de meer doorlatende intervallen. De gamma ray log is daarmee tevens een indicator voor het put-test programma.

➤ **Porositeit logs**

Er kan onzekerheid bestaan over de porositeit omdat de beoogde ondergrondse locatie bijvoorbeeld op grote afstand ligt van bestaande boringen. In dat geval is een Sonic-log een voor de hand liggende toevoeging. Hiermee kan ook een correlatie naar seismische gegevens gemaakt worden. Voor een nauwkeurige bepaling van de porositeit zijn ook andere typen well logging mogelijk (bijvoorbeeld Density en Neutron logs). Deze zijn doorgaans duurder dan de Sonic-log en berusten bovendien soms op radioactieve bronnen, die veiligheidsprocedures met zich mee brengen.

➤ **Weerstand logs**

Mocht er een gerede aanleiding zijn om te veronderstellen dat er (residuele) hoeveelheden koolwaterstoffen aangetroffen worden, dan is een weerstandslog ('resistivity') van toepassing. Binnen deze groep logs bestaan diverse varianten en combinaties (near, medium, deep; induction logs of laterologs) die per geval gekozen moeten worden. Opgemerkt zij, dat gas opgelost in het formatiewater, niet door dergelijke logging tools kan worden gedetecteerd. De verschillen tussen de near, medium en deep resistivity logs kunnen een indicatie zijn voor de permeabiliteit mits er voldoende verschil is tussen de weerstand van het mud filtraat en het formatiewater. Daarnaast is de weerstand log te gebruiken voor het berekenen van het zoutgehalte.

➤ **Drukmetingen**

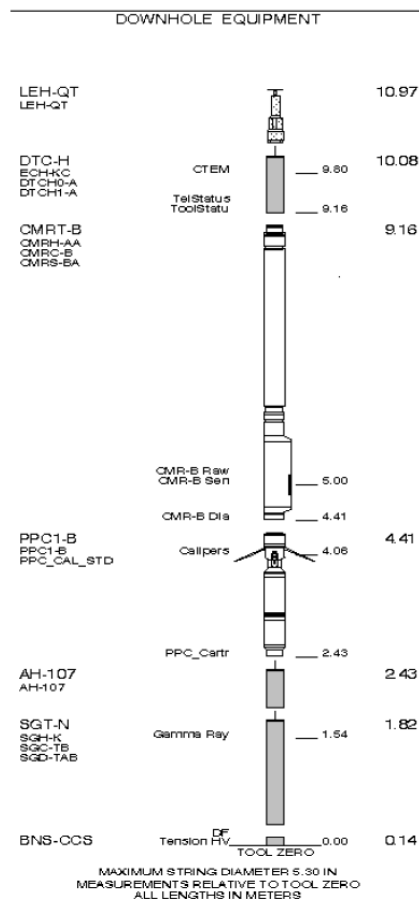
Laagsgewijze drukmetingen (b.v. Repeat Formation Tester, RFT) zijn relatief duur en alleen nuttig in situaties waarin drukdepletie ten gevolge van naburige gaswinning een rol speelt. Uit deze metingen komt permeabiliteitsinformatie beschikbaar.

➤ **Permeabiliteit**

Er bestaan geen logging tools die directe informatie geven over de permeabiliteit. Met bijvoorbeeld NMR logs is een goede correlatie naar permeabiliteit mogelijk. Dergelijke logs zijn relatief kostbaar en (daarom) alleen gerechtvaardigd in onbekende gebieden. Ook kan het nemen van een dergelijke log meerwaarde hebben ter calibratie voor een bepaald gebied.

Omdat permeabiliteit een zeer belangrijke factor voor het bepalen van het thermische vermogen van een doublet is, is in Koekoekspolder gekozen om te werken met een relatief nieuwe logging tool, de Combinable Magnetic Resonance (CMR of NMR) deze tool maakte het mogelijk om de volgende zaken in beeld te brengen:

- Total formation porosity (spectrum of pore sizes)
- Permeability (pore size distribution)
- Processing of data for formation fluid properties
- Powered Positioning Caliper
- Natural Gamma Ray (correlation)



## Doelstelling

De geplande aardwarmteboring in de Koekoekspolder bood een unieke gelegenheid om waardevolle geologische informatie te verzamelen. En om een grotere kennis van de opbouw van de bodem en diverse geologische parameters (met name permeabiliteit, porositeit en oriëntatie van aardlagen) te krijgen.

De toegevoegde waarde van boorgatmetingen/logging voor een project bestaat uit informatie die je beter in staat stelt te begrijpen hoe de performance van een aardwarmte doublet is. Valt die performance bijvoorbeeld lager uit dan aanvankelijk verwacht, dan kan uit de metingen mogelijk worden afgeleid wat daarvoor de reden is en - belangrijker - welke gerichte maatregelen bestaan om de performance te verbeteren. Omgekeerd zijn dergelijke maatregelen zonder meetgegevens niet (goed) te bepalen, wat per saldo tot een minder optimale benutting van de bron kan leiden.

Met de logging-activiteiten in Koekoekspolder werden de volgende doelen beoogd:

- Inzicht in de opbouw en ligging van geologische lagen in het gebied
- Inzicht in het gebruik van bodemlagen voor Hoge Temperatuur Opslag
- Inzicht in het functioneren van het aan te leggen geothermische doublet
- Inzicht in de mogelijkheden die het reservoir onder het gebied Koekoekspolder biedt
- Inzicht in een optimale benutting/exploitatie van het reservoir (i.c.m. vervolg boringen)

De directe waarde van de gegevens betreft het gebied rond Koekoekspolder (globaal een straal van 15 kilometer). Kennis over de onderzoeks aanpak, interpretatie van data voor bodemenergie in de tuinbouw en uitwerking in een businesscase heeft een veel bredere toepasbaarheid in Nederland en in de glastuinbouwsector. Deze gegevens zijn in dit rapport te vinden en zullen onder andere via het programma Kas als Energiebron breder beschikbaar komen.



Box met verschillende logging-tools voorafgaande aan de meting van het boorgat in Koekoekspolder.



## 5) Logging werkzaamheden

### Boorwerkzaamheden

Met de komst van de B12-boortoren van Daldrup & Söhne AG in mei 2011 kon de boring in Koekoekspolder daadwerkelijk starten. Met 3 kranen moest de boortoren boven de boorkelder gehesen worden en precies op de juiste plaats neergezet worden. Het opbouwen van de boortoren nam ca. 2 tot 3 weken in beslag. Nadat alle apparatuur aangesloten was kon op 28 mei de boor daadwerkelijk de grond in.



Het boren gebeurde in stappen. Nadat een sectie geboord is, worden de boorkop en de boorstangen uit het gat gehaald. Vervolgens laat men de buizen (casing) in het gat zakken. Zodra alles netjes op z'n plek zit wordt onder druk cement tussen het boorgat en de casing geperst. Zodra de cement hard geworden is kan de volgende sectie geboord worden. Op 10 juli 2011 bereikte de boorkop een diepte van 1.947 meter. Nadat de screens geplaatst waren, werd er warm water van ca 72-73 graden opgepompt. Daarmee was winbare aardwarmte aangetoond.

Nadat de boortoren verplaatst was en gepositioneerd boven de tweede boorkelder kon het gehele proces zich herhalen. Eind juni werd met de boring van de tweede put begonnen. Ook deze boring verliep voorspoedig. Op 30 augustus was de boorkop op een diepte van 1.924 meter aanbeland. Nadat de casing afgebouwd was en alles getest, kon de boortoren afgebouwd worden. Eind september lag de boorlocatie er weer leeg bij. Vervolgens werd de afwerking van de bovengrondse delen opgepakt. Het boorproces van een aardwarmte doublet duurt, afhankelijk van de diepte ongeveer 4 tot 6 maanden. Door geologische onzekerheden kunnen er zich problemen voordoen en kan de boring worden vertraagd.

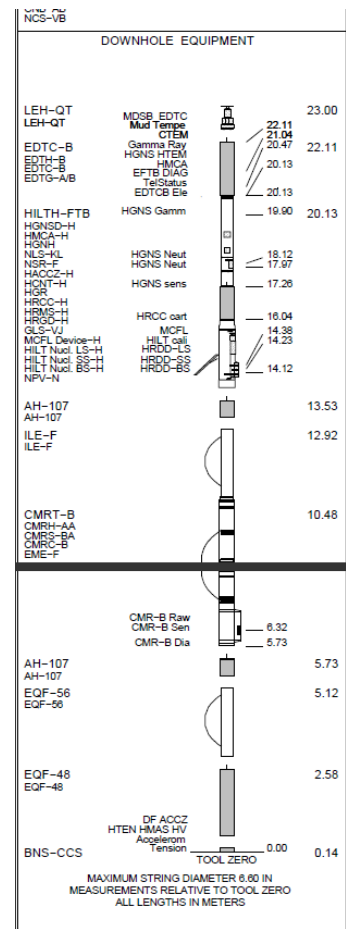
## Logging activiteiten

De logging activiteiten hebben op een aantal momenten plaatsgevonden. De logging is uitgevoerd in 'open hole', dit wil zeggen op het moment dat er nog geen casing of cement geplaatst is. Op deze wijze zijn de beste meetresultaten te verkrijgen.

Voordat de logging daadwerkelijk begint wordt de loggingtool in een string (aan elkaar gekoppelde apparatuur en onderdelen die het boorgat in gaat) klaar gemaakt. Er kunnen meerdere meetapparaten gecombineerd worden. Aan de rechterkant is de meetstring te zien die in Koekoekspolder gebruikt is. De string wordt, nadat deze is klaar gemaakt voorzichtig het boorgat ingelaten. Onderstaande foto laat zien hoe de string klaar ligt voordat de metingen beginnen.

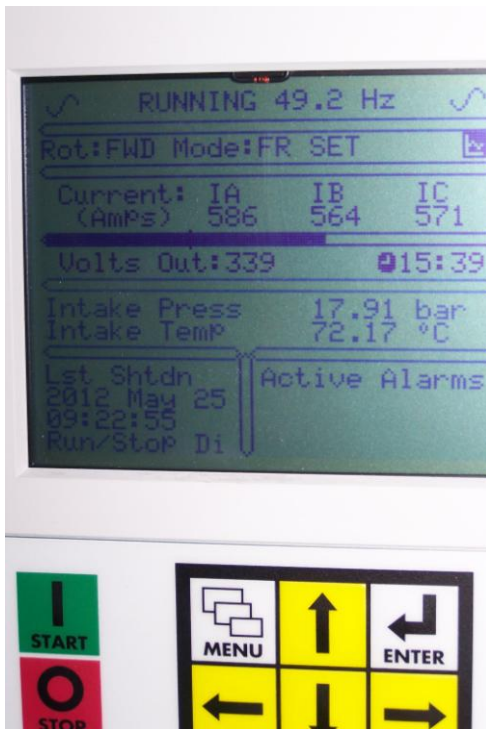
Punt van aandacht is dat de loggingtool verzekerd dient te worden indien er een 'loss' kan optreden. Deze verzekering is het makkelijkst te regelen via het bedrijf dat de logging uitvoert. In het geval van Koekoekspolder is de loggingtool verzekerd aangezien Koekoekspolder het risico niet kon en wilde lopen, wanneer het meetapparaat in het gat zou achterblijven en de opdrachtgever voor de kosten moet opdraaien.

Tenslotte moet rekening gehouden worden met het feit dat het uitvoeren van logging's tijd kost. In de regel zal de boorfirma kosten in rekening brengen voor de tijd die zij moet wachten, terwijl de meetwerkzaamheden plaatsvinden. Deze kosten worden in de regel bij de opdrachtgever in rekening gebracht. In sommige gevallen kan de logging gecombineerd worden met een calliper-meting die het boorbedrijf doet voordat zij met de cementeringswerkzaamheden start.



## De welltests

Het belangrijkste en meest spannende moment bij een aardwarmteboring is waarschijnlijk de welltest. Een aardwarmteboring vraagt om een grote investering, maar het resultaat is vooraf niet altijd zeker. Immers ondanks alle onderzoek van geologen en andere specialisten kan het voorkomen dat er geen of weinig winbare aardwarmte wordt aangetroffen. Dan is de gehele investering minder rendabel en of moet in het ergste geval met het project gestopt worden. Met name in gebieden waar weinig geologische informatie bekend is, is de onzekerheid groter m.b.t. de hoeveelheid water dat uiteindelijk opgepompt kan worden.



Bij een welltest wordt gekeken hoeveel water per uur opgepompt kan worden en wat de temperatuur van het water is. Bovendien wordt er gekeken naar de samenstelling van het water en of er eventueel opgeloste gassen mee naar boven komen. Een goede welltest vraagt 3 dagen van pompen en meten.

Tijdens zowel de eerste (KKP-GT-01) als tweede (KKP-GT-02) welltest in Koekoekspolder was het al snel duidelijk dat er voldoende warmte omhoog kwam. De warme waterdamp was goed te zien boven de opvangcontainer. Na 3 dagen van testen bleek dat er ongeveer 140 m<sup>3</sup> per uur opgepompt kon worden en dat de temperatuur van het water boven de 72 graden Celsius kwam.

Bij de test bleek verder dat de afpompings (drawdown) van het water groter dan verwacht was. Het kostte de pomp dus meer moeite om het water omhoog te pompen. De resultaten van de welltest zijn vergeleken met de data uit de logging en de voorspellingen die vooraf gedaan zijn door geologische adviesbureau's.

Naar aanleiding van de welltests is besloten om additionele injectiepompen te gaan installeren, zodat de beoogde hoeveelheid water verpompt kon worden. Dit vroeg wel om een zware extra investering. Met de installatie van deze pompen is bewezen dat de beoogde 4,9 MW (P90-waarde) geleverd kon worden, zij het wel tegen beduidend hogere pompdrukken. Door de inzet van deze pompen en de grotere drawdown is de COP lager uitgevallen, deze varieert tussen de 10 tot 15. In de praktijk levert het geothermische doublet in Koekoekspolder, zonder dit extra geïnstalleerde pompvermogen, beduidend minder thermisch vermogen dan aanvankelijk in de P90-situatie voorzien/voorspeld was.

In maart 2012 is een real-life testperiode begonnen waarbij de eerste maanden gewerkt is aan het stimuleren van de bron. In de eerste periode werd in het filter (filterkaarsen van 5 micron), naast zand ook vet afgevangen dat gebruikt was tijdens het installeren van de ESP en productietubing. Daarnaast bleek dat de injectiviteit duidelijk achter bleef, vergeleken met de productiviteit. Onder begeleiding van WEP en Bakker Oilfield Supply (BOS) is een uitvoerig stimuleringsprogramma van zowel de producer als de injector in gang gezet. In de eerste 3 maanden van de productietest (laagbeproevingfase) bleek de injectiviteit geleidelijk te verbeteren.

## 6) Resultaten interpretatie logging data en overige geo data

### Inleiding

Van de in 2011 uitgevoerde geothermieboringen Koekoekspolder-01 (KKP-01) en Koekoekspolder-02 (KKP-02), zijn waardevolle boorgatmetingen (logs) verzameld. Doelstelling van dit onderzoek was, middels petrofysische analyse van deze logs, de reservoir eigenschappen van het beoogde geothermische reservoir, de Slochteren Zandsteen Formatie, vast te stellen. Deze vastgestelde eigenschappen werden daarnaast vergeleken met geologische kennis, welke voorafgaand aan de boringen voor dit reservoir bekend waren of afgeleid konden worden.

Noodzakelijk voor het onderzoek waren de gegevens van de volgende in het boorgat uitgevoerde metingen: Combinable Magnetic Resonance (CMR), Density (RHOZ), Neutron (TNPH), Gamma Ray (GR) en Caliper (HCAL). Middels petrofysische analyse van deze beschikbaar gestelde boorgatmetingen zijn de voor toepassing van geothermie relevante reservoir eigenschappen van de Slochteren Zandsteen Formatie vastgesteld. Resultaten van deze analyse zijn vergeleken met gegevens uit puttests die in deze boringen zijn uitgevoerd (IF Technology, 2011) en met gegevens in twee vooraf opgestelde geologische rapporten (PanTerra Geoconsultants, 2008 en 2010). Op basis van de reservoir eigenschappen, die middels de uitgevoerde analyse van boorgatmetingen zijn afgeleid, is een uitspraak gedaan over het geothermisch vermogen van zowel het uit boringen KKP-01 en KKP-02 bestaande doublet als van de verdere in het concessiegebied geplande geothermische doubletten. Tevens is op basis van de analyseresultaten en gegevens over de samenstelling van watermonsters en het hierin aanwezige (opgeloste) gas een beeld gevormd van de mogelijke verdere benutting van het geothermische reservoir in het tuinbouwgebied Koekoekspolder.

### Analyse van de boorgatmetingen

Metingen aan de tijdens het boorproces doorboorde gesteenten resulteren in specifieke gegevens over de eigenschappen van deze gesteenten. Uit de twee geothermieboringen KKP-01 en KKP-02 zijn de diverse boorgatmetingen beschikbaar.

Boorgatmetingen (*wireline logs; logs*) worden in deze studie gebruikt voor de identificatie en afbakening van het Slochteren Zandsteen Formatie reservoir. Tevens worden deze gegevens gebruikt om verdere, voor de toepassing van geothermie relevante eigenschappen van dit reservoir vast te stellen. Uit de logs van beide geothermieboringen zijn de porositeiten en permeabiliteiten vastgesteld. De in voorgaande studies gehanteerde onderverdeling van het reservoir en de kwantificering van de reservoir eigenschappen per interval, is in dit project, voor zover mogelijk, aangehouden. In tabel 1 zijn deze onderverdeling en de voor beide geothermieboringen geprognoseerde diktes opgenomen.

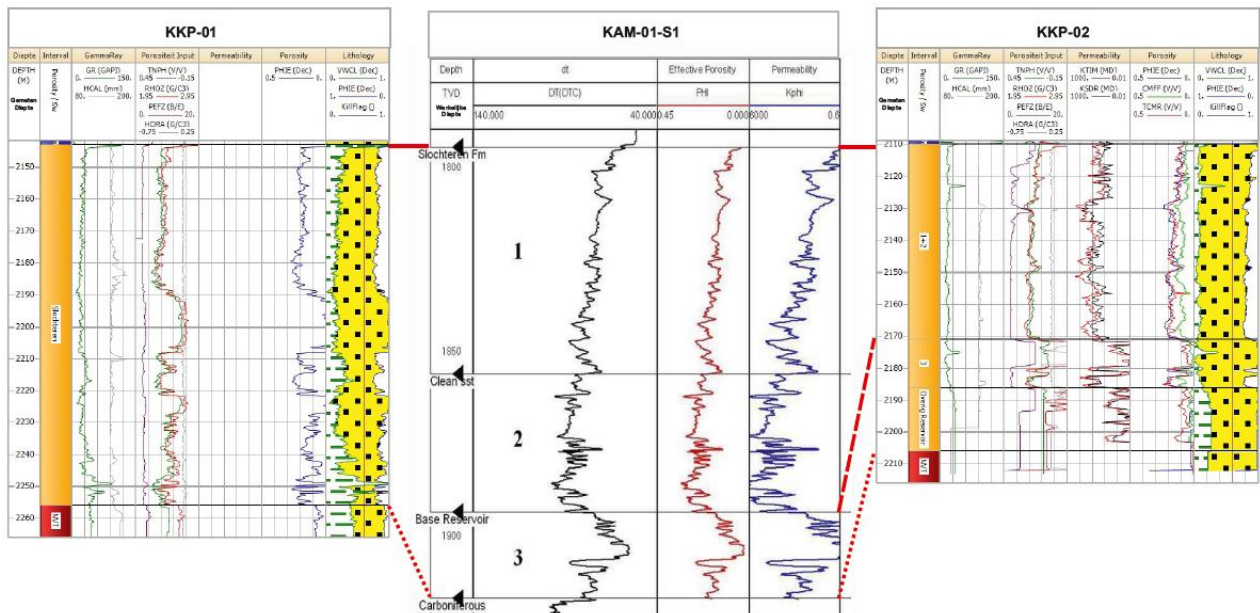
Interval /formatie	Dikte (m) in KAM-01-S1	Dikte (m) well proposal KKP-01	Dikte (m) well proposal KKP-02
1	61,5	47	47
2	37,5	29	29
3	23,5	--	--
Reservoir (1+2)	99,0	76	76
Slochteren (geheel)	122,5	100	90

Tabel 1      Overzicht van de in het *Well proposals* rapport (PanTerra, 2010) gehanteerde onderverdeling en diktes van de Slochteren Zandsteen formatie.

In de berekeningen van de eigenschappen van het reservoir in beide putten zal met gelijke calibratie en cut-off waardes worden gerekend als toegepast in genoemde *Well proposals*. Bij de berekening van de gemiddelde porositeit zal een cut-off waarde van 8 % worden gehanteerd. Voor de berekening van de werkelijke, verticale reservoirdikte in boring KKP-01 uit het langs het boorgat gemeten traject door het reservoir, is uitgegaan van een omrekenfactor van 0,8. Deze factor correspondeert met een aanboringshoek van het reservoir van 37 graden.

Op basis van de Gamma Ray en de Density log is in beide geothermieboringen de Slochteren Zandsteen Formatie geïdentificeerd. Hoewel de top van deze formatie duidelijk herkenbaar is, geldt dat niet voor de basis. In de beschikbaar gestelde geologische studie van PanTerra (2010) is de formatie op basis van Sonic log gegevens van boring KAM-01-S1 onderverdeeld in drie intervallen (zie tabel 1).

Onder interval 3 bevinden zich gesteentes van een oudere geologische eenheid (Laat-Carboon ouderdom). Per interval zijn de reservoir eigenschappen vastgesteld. In de boring KKP-01 is bovengenoemde onderverdeling in de logs niet herkenbaar (zie figuur hieronder). In de boring KKP-02 zijn de intervallen 1 en 2 wel in de logs te herkennen. In het daaronder doorboorde traject van circa 35 meter wordt de intervalindeling echter onzeker aangezien de log-informatie hier niet betrouwbaar is.



N.B. De schaal van de drie logpanels is zodanig aangepast dat in verticaal verband de diktes overeen komen

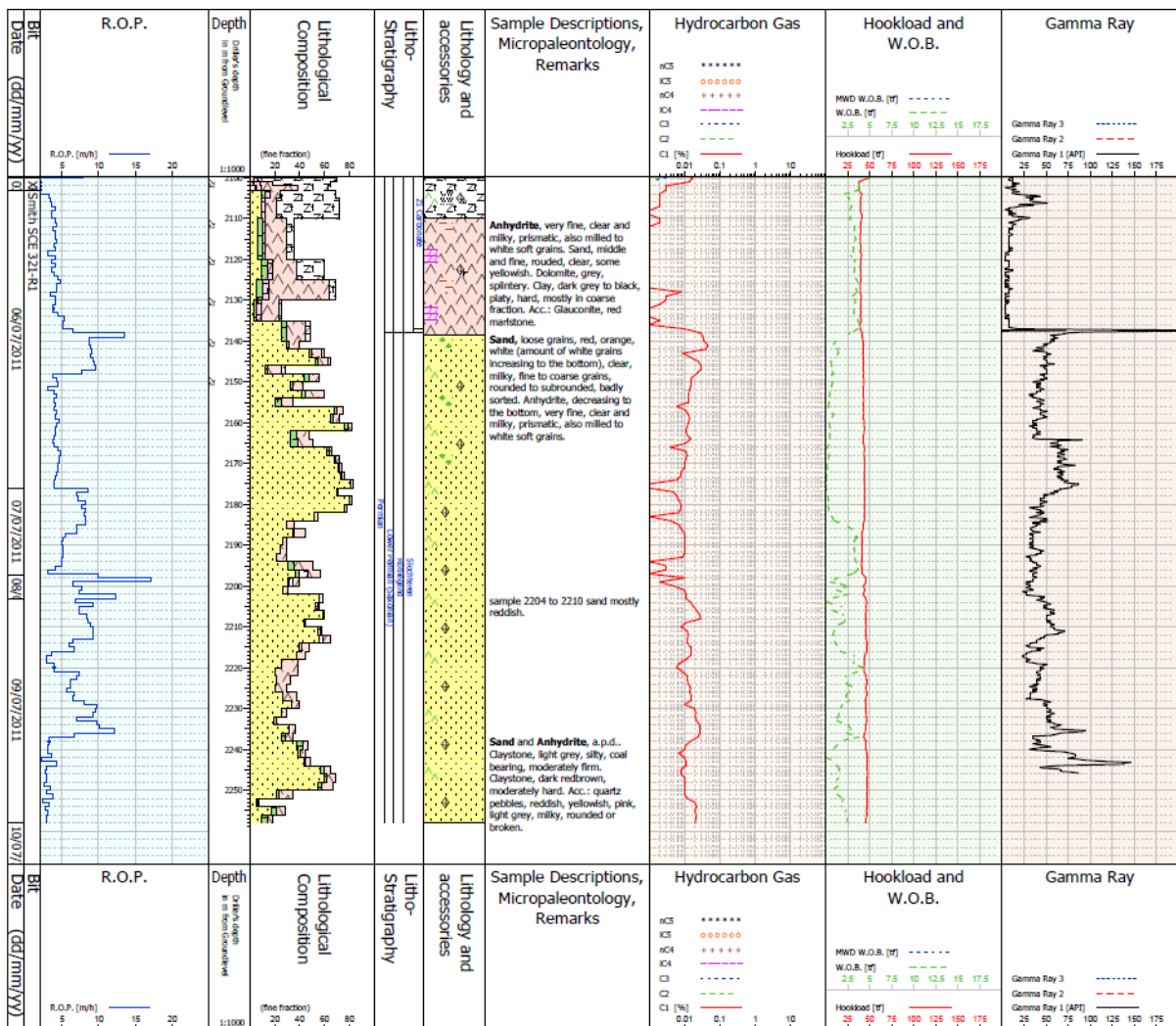
### Boorgatmeting van KKP-01

In boring KKP-01 zijn over het traject van 2143 tot 2264 meter langs het boorgat (gemeten diepte; MD) de volgende logs beschikbaar: Density (RHOZ), Neutron (TNPH), Gamma Ray (GR), Photo Electric Factor (PEFZ) en Caliper (HCAL). Op basis van het karakter van het signaal en de Density-correctie (DHRA) log zijn deze logs betrouwbaar bevonden over het traject van 2143 tot 2260 meter (MD). De Slochteren Zandsteen Formatie is aangeboord tussen 2143 en 2256 m (MD). Aangezien het reservoir is aangeboord onder een hoek van 37 graden, bedraagt de verticale dikte van deze formatie hier 90 meter.

Berekening van de porositeit is voor deze boring uitgevoerd op basis van de Density log (RHOZ). De vastgestelde gemiddelde porositeit van de Slochteren Zandsteen Formatie bedraagt 18,3 %; met een laagste waarde van 8,2 % en een hoogste waarde van 27,9 %. Op basis van de in de geologische studie van PanTerra (2010) gehanteerde porositeit-permeabiliteitsvergelijking bedraagt de gemiddelde aritmetische permeabiliteit van de Slochteren Zandsteen Formatie circa 170 milliDarcy. De in genoemde geologische studie gemaakte onderverdeling van de Slochteren Zandsteen Formatie, wordt in de logs van boring KKP-01 niet teruggezien.

In de studie van PanTerra (2010) is de gemiddelde porositeit van de Slochteren Zandsteen Formatie vastgesteld op 17,7 %. De hiermee corresponderende permeabiliteit is geprognostiseerd op circa 490 milliDarcy. In de twee voor de toepassing van geothermie meest geschikte intervallen 1 en 2 (zie tabel 1) bedraagt de gemiddelde porositeit 19,6 %. Over deze twee intervallen bedraagt de gemiddelde permeabiliteit 602 miliDarcy.

Uit de analyse van de boorgatmetingen van boring KKP-01 komt naar voren dat de gemiddelde berekende porositeit van de complete Slochteren Zandsteen Formatie (18,3 %) slechts 0,6 procentpunt afwijkt van de voorgaand vastgestelde waarde (17,7 %). De hiermee corresponderende permeabiliteit is echter bijna drie keer zo laag als geprognostiseerd. Met 90 meter is de vastgestelde dikte van de Slochteren Zandsteen Formatie 10 meter minder dan vooraf werd verwacht. Hieronder is de lithografie te zien van het reservoir van KKP-01.



## Boorgatmeting van KKP-02

In de boring KKP-02 zijn over het traject van 2106 tot 2190 meter langs het boorgat (gemeten diepte; MD) de volgende logs beschikbaar: Density (RHOZ), Neutron (TNPH), Gamma Ray (GR), Photo Electric Factor (PEFZ), Caliper (HCAL) en Combinable Magnetic Resonance (TCMR, CMFF). Op basis van het karakter van het signaal en de Density-correctie (DHRA) log zijn deze logs betrouwbaar bevonden over het traject 2106 tot 2170 meter (MD). De Combinable Magnetic Resonance logs zijn betrouwbaar bevonden over het traject van 2106 tot 2190 meter (MD).

De Slochteren Zandsteen Formatie is aangeboord over 99 meter, tussen 2106 en 2205 m (MD). Aangezien het reservoir is aangeboord onder een hoek van 37 graden bedraagt de verticale dikte van deze formatie hier 76 meter. Berekening van de porositeit is voor deze boring uitgevoerd op basis van de Density log (RHOZ). Hieruit blijkt dat de gemiddelde porositeit van de Slochteren Zandsteen Formatie 17,0 % bedraagt, met een laagste waarde van 8,2 % en een hoogste waarde van 24,3 %. Op basis van de in de geologische studie van PanTerra (2010) gehanteerde porositeit-permeabiliteitsvergelijking bedraagt de gemiddelde aritmetische permeabiliteit van de Slochteren Zandsteen Formatie circa 120 milliDarcy.

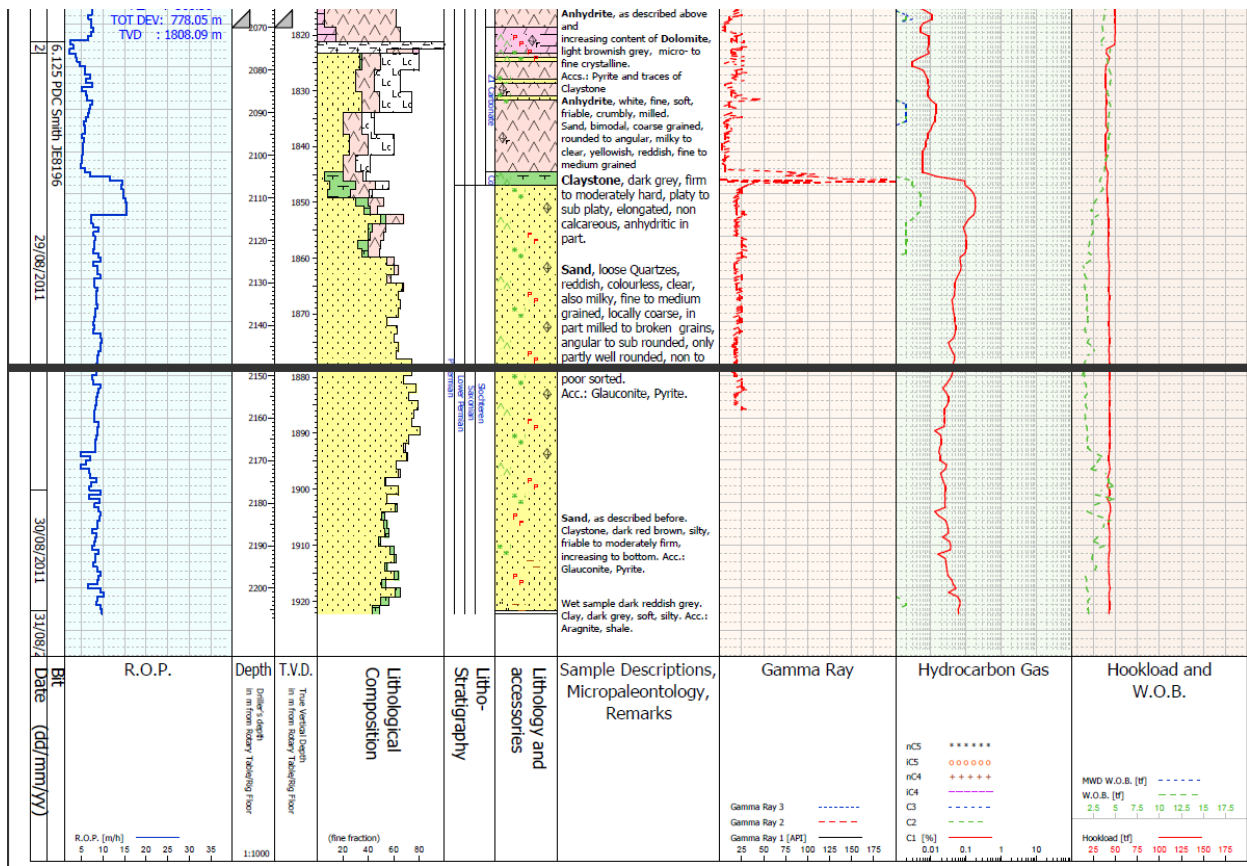
In boring KKP-02 is het reservoir met behulp van de CMR tool gemeten. Deze methode geeft directe porositeiten en berekent de hiermee corresponderende permeabiliteiten. De Free-Fluid porositeit bedraagt gemiddeld 10,6 %, met een laagste waarde van 8,0 % en een hoogste waarde van 15,9 %. De gemiddelde permeabiliteit (aritmetisch Timur-Coates permeabiliteit) bedraagt 18 milliDarcy, met een minimale waarde van 0,01 milliDarcy en een maximale waarde van 142 milliDarcy.

In voorgaande studies is de gemiddelde porositeit van de Slochteren Zandsteen Formatie vastgesteld op 17,7 %. Over de twee meest geschikte intervallen 1 en 2 (zie tabel 1) bedraagt de gemiddelde porositeit 19,6 %. De permeabiliteit is vooraf vastgesteld op circa 490 milliDarcy. Over de twee meest geschikte intervallen bedraagt de gemiddelde permeabiliteit 602 milliDarcy. Uit de analyse van de boorgatmetingen blijkt dat de uit Density logs berekende porositeit 0,7 procentpunt lager uitvalt dan geprognoseerd, dat de uit de *Total Porosity* (TCMR) berekende porositeit 2,6 procentpunt lager uitvalt en dat de *Free Fluid* porositeit (CMFF) 7,6 procentpunt lager uitvalt. Met name het laatstgenoemde verschil is groot.

Verder blijkt uit de boorgatmetingen dat de uit de CMR-log berekende gemiddelde permeabiliteit (KTIM) over het meest geschikte reservoirgedeelte 26 keer kleiner is dan de geprognoseerde gemiddelde permeabiliteit. Hoewel de uit berekende porositeit afgeleide permeabiliteit niet kan worden vergeleken met de uit een puttest af te leiden permeabiliteit, is de KTIM permeabiliteit in verhouding te laag om te kunnen corresponderen met de porositeit en permeabiliteit die uit de Density log zijn verkregen. Daarom wordt de uit de CMR tool afgeleide permeabiliteit niet bruikbaar geacht.

Voor de berekening van het te verwachte vermogen van het geothermie doublet en toekomstige doubletten wordt de Density porositeit en de daaruit berekende permeabiliteit het meest betrouwbaar geacht. De dikte van de Slochteren Zandsteen Formatie kan niet worden geverifieerd met de geprognoseerde waarden. Het gedeelte van het reservoir dat vooraf werd gedacht thermaal water te kunnen produceren (porositeit > 8 %) is in werkelijkheid 27 meter minder dik.

Op de volgende pagina is de lithografie te zien van het reservoir van KKP-02.



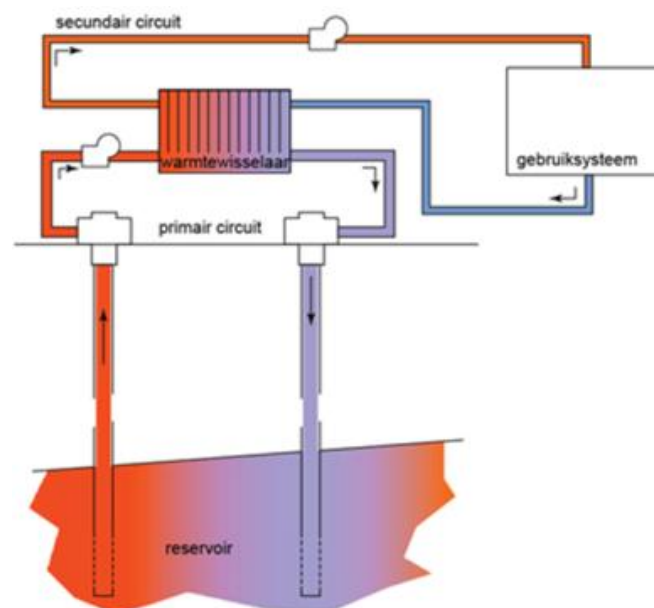


## 7) Mogelijkheden voor Hoge Temperatuur Opslag (HTO)

### Inleiding

Voor het verwarmen van tuinbouwkassen in de Koekoekspolder is een aardwarmtesysteem gerealiseerd. Aardwarmte zal het hele jaar worden ingezet. In de zomer en tussenseizoenen zal de warmtevraag van de glastuinbouwbedrijven afnemen, waardoor het aanbod de vraag ver overstijgt. Door het toepassen van een lange termijn warmtebuffer in de bodem kan de overtollige warmte worden opgeslagen. De opgeslagen warmte wordt vervolgens in de winter, samen met de diepe geothermische warmte, benut voor verwarming van de kassen. Hieronder worden de gegevens die verkregen zijn door de logging verder toegelicht en vertaald in een businesscase voor HTO.

Voorgaand onderzoek heeft uitgewezen dat de Formatie van Breda of het Zand van Brussel mogelijk geschikt zijn voor een dergelijke toepassing. Helaas is er zeer weinig data beschikbaar over deze laagpakketten. Om de eigenschappen van de formaties beter te bepalen is een CMR uitgevoerd.



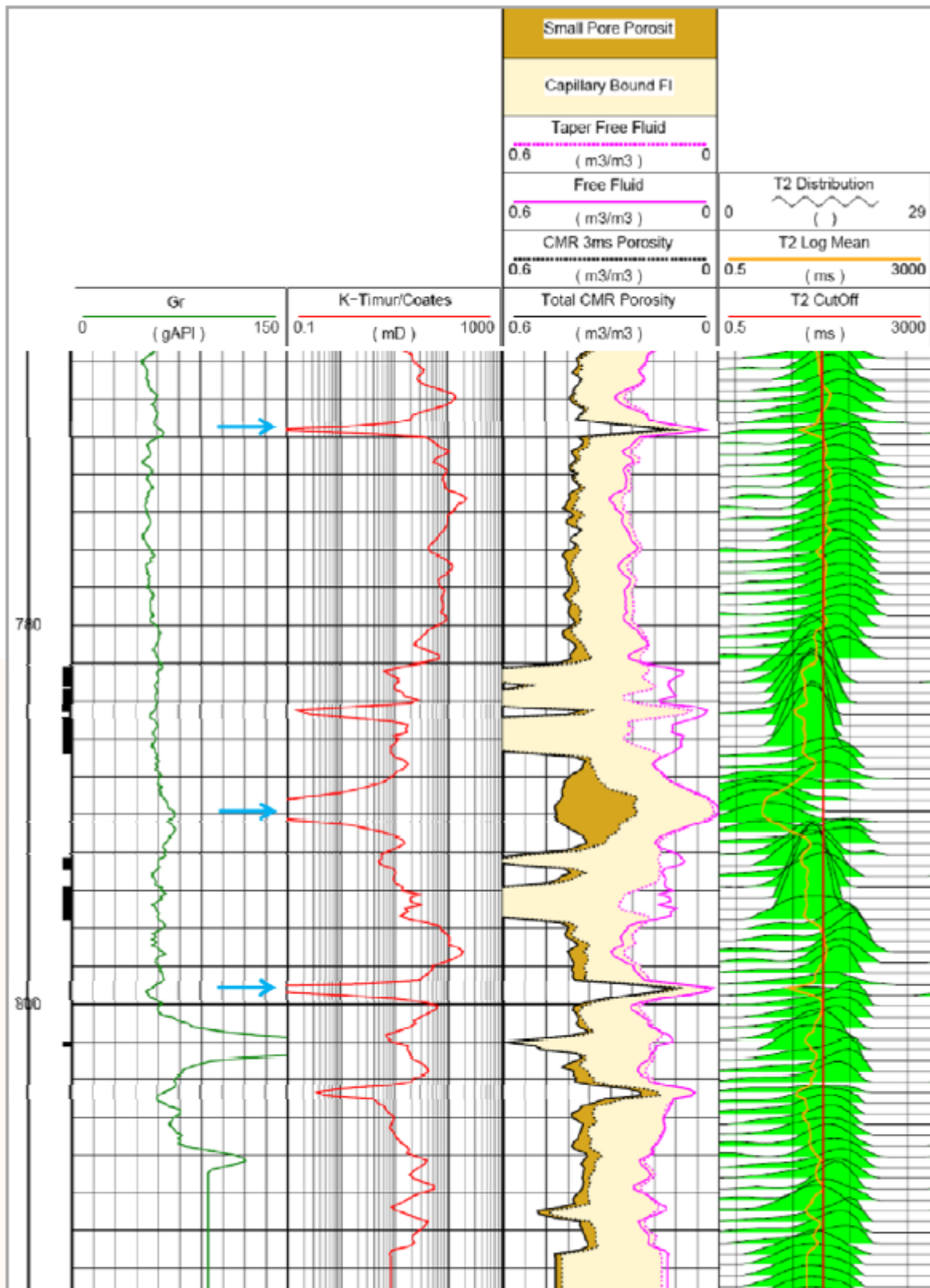
### Netto zanddikte

Op basis van de Gamma Ray en permeabiliteit log is een inschatting gemaakt van de netto zanddikte en het doorlaatvermogen van beide formaties, zie figuur 1. Uit deze interpretatie is gebleken dat de Formatie van Breda niet geschikt is voor hoge temperatuur opslag. In deze notitie is deze formatie verder buiten beschouwing gelaten.

Op basis van de Gamma Ray log kunnen de top en basis van het Zand van Brussel gezet worden op 730 en 820 m-mv respectievelijk. Voor het bepalen van de netto zanddikte zijn eerst de kleilagen geïdentificeerd. Aan de hand van de logdata is een cutoff waarde van 1 mD gehanteerd, dit resulteert in een netto zanddikte van 86 m.

### Permeabiliteit

Aan de hand van de beschikbare metingen zijn het gemiddelde en de mediaan van de permeabiliteit bepaald. De gemiddelde permeabiliteit bedraagt circa 485 mD, en de mediaan (de middelste waarde) bedraagt 234 mD. De gemiddelde doorlatendheid wordt aanzienlijk verhoogd door een aantal uitzonderlijk goed doorlatende lagen. De log in beschouwing houdende geeft de mediaan een betere weergave van de werkelijkheid. De resultaten zijn weergegeven in tabel 1.



Figuur 1 Onderdeel van de CMR log binnen het traject van het Zand van Brussel, waar uitzonderlijk lage permeabiliteiten (aangegeven met blauwe pijl) veroorzaakt worden door de aanwezige kleilagen.

### Temperatuur

Tijdens het loggen wordt een temperatuurmeting gedaan op de grootste diepte. Tijdens het boren wordt een koude boorspoeling gebruikt. De temperatuur wordt gemeten in de boorspoeling

waardoor de gemeten temperatuur in de formatie mogelijk met enkele graden wordt onderschat ten opzichte van de werkelijke temperatuur op diepte. In dit geval is een temperatuur van 43 °C gemeten op een diepte van 1.100 m, 16 uur na circulatie van de boorspoeling. Dit komt neer op de onderstaande temperatuurgradiënt:

$$T [^{\circ}\text{C}] = 0,03 [^{\circ}\text{C}/\text{m}] \times \text{diepte} [\text{m}-\text{mv}] + 10,0 [^{\circ}\text{C}]$$

Voor een betrouwbare correctie van een dergelijke Bottom Hole Temperature (BHT) zijn minimaal drie metingen op dezelfde diepte nodig. Helaas zijn deze nu niet beschikbaar. Het effect van de boorspoeling is moeilijk in te schatten, daarom zal de huidige meting worden aangenomen.

Tabel 1. Resultaten log-analyse

parameter	eenheid	waarde	gemiddelde	mediaan
diepte	[m-mv]	730-820		
netto dikte	[m]	86		
gemiddelde temperatuur reservoir	[°C]	33		
permeabiliteit	[mD]		485	234

### Debiet

De hoeveelheid grondwater (m<sup>3</sup>/h) die uit een bron gewonnen en in een bron geïnfiltreerd kan worden, is afhankelijk van een aantal factoren. De belangrijkste factoren zijn de doorlatendheid van de bodem en de temperatuur van het grondwater, ook het aantal uren dat de bron in bedrijf is speelt een rol. Binnen de velden van diepe (geothermie) en ondiepe (KWO) toepassingen van aardwarmte bestaan verschillende ontwerpeisen.

Het debiet ligt per ontwerpeis sterk uit elkaar. Als de KWO-normen in acht worden genomen kan een debiet van circa 10 m<sup>3</sup>/h worden verwacht. Bij geothermie is dit significant hoger, circa 100 m<sup>3</sup>/h. Gezien de diepte van het Zand van Brussel, en dus de mate van consolidatie, zal de norm uitkomen tussen deze twee uitersten. Dusdanig wordt een debiet van 40-50 m<sup>3</sup>/h verwacht.

### Business case

Om de gewenste hoeveelheid warmte in de laag op te slaan en te onttrekken is uitgegaan van een debiet van 85 m<sup>3</sup>/h. Uit de interpretatie van de meetgegevens blijkt dat dit debiet niet gehaald kan worden. Het gevolg hiervan is dat er twee doubletten nodig zijn om de gewenste hoeveelheid warmte te kunnen opslaan, te leveren en aan het gewenste vermogen te kunnen voldoen. In onderstaande tabellen is uitgewerkt wat dit voor de business case betekent.

Tabel 2. Uitgangspunten HTO Koekoekspolder

maximaal benodigd vermogen warmteopslag	2,5 MWth
maximaal benodigd grondwaterdebiet warmteopslag	85 m <sup>3</sup> /h
maximaal haalbaar debiet per put	50 m <sup>3</sup> /h
aantal benodigde doubletten	2 stuks
gemiddelde infiltratietemperatuur laden bron	65°C
warmteoverschot geothermie (P90)	7.300 MWth
jaarlijkse waterverplaatsing opslagseizoen	240.000 m <sup>3</sup> /jaar
simulatieperiode opslag/rust/ontladen	150/90/125 dagen
minimale onttrekkingstemperatuur HTO	52°C
infiltratietemperatuur warmtelevering HTO	37°C

Tabel 3. Energetische en financiële uitgangspunten

gemiddelde COP warmteopslag (opslag/levering)	55
elektriciteitskosten	0,10 €/kWhe
gaskosten	0,25 €/m <sup>3</sup>
onderhoudskosten ketel	4%
onderhoudskosten warmteopslag (incl. waterbehandeling)	2,5%
afschrijfperiode	15 jaar
verdisconteringvoet	4%
onderste verbrandingswaarde aardgas	8,8 kWhth/m <sup>3</sup>
rendement ketel	95% op onderwaarde

Tabel 4. Investeringsraming HTO, 2 doubletten

	Kosten
totale investering warmteopslag installatie	€ 2.362.000
onderzoek/ontwerp	€ 150.000
fiscaal voordeel (EIA 11,2%)	€ 281.000
<b>totaal warmteopslag</b>	<b>€ 2.231.000</b>

Tabel 5. Jaarlijkse exploitatiekosten HTO

kostenpost kosten	Kosten
elektriciteitskosten	€ 24.000
onderhoud en beheer bronnen en technische ruimte	€ 40.000
onderhoud en beheer waterbehandeling (stelpost)	€ 5.000
<b>totale exploitatiekosten</b>	<b>€ 69.000</b>

Tabel 6. Kostprijs HTO

Kostprijs	warmteopslag	piekketel
€/m <sup>3</sup> a.e.	0,40	0,28

Uit tabel 6 blijkt dat de kostprijs van een eenheid warmte vanuit de HTO niet kan concurreren met de kostprijs van warmte opgewekt door een piekketel. Het enige voordeel van de HTO is dat de kostprijs van warmte minder gevoelig is voor de energieprijzen.

### Vervolg

De belangrijkste oorzaak dat de kostprijs van warmte vanuit de HTO hoger uitvalt dan aanvankelijk gedacht, heeft te maken met het debiet dat uit de putten onttrokken en geïnfiltreerd kan worden. Dit debiet wordt bepaald aan de hand van ontwerpnormen. Daarnaast is de aanleg voor het HTO doublet hoog. Nieuwe boortechnieken zijn nodig om de kostprijs van deze systemen te verlagen. Daarnaast is het belangrijk dat er passende eisen komen voor het boren naar deze lagen. De huidige eisen voor boringen onder 500 meter diepte, mijnbouwwetgeving, leiden mede tot deze hoge investeringskosten.

## **8) Reservoir modelling (in Engels)**

### **Introduction**

At the location of the Koekoekspolder project, a geothermal doublet has been completed. Two wells have been drilled: KKP-GT-01 (producer) and KKP-GT-02 (injector). Geological studies, wireline logging and well testing activities have resulted in a large dataset of the reservoir geology and properties. A three dimensional flow and heat transport model is used to simulate the temperature and pressure changes after 30 years of production and injection.

### **Geology**

#### **Lithostratigraphy**

The geothermal target reservoir in which the doublet is situated is the sandstone of the Slochteren Formation. The reservoir is bounded at the top by the Coppershale Member, Z1 Carbonate Member and Z1 Anhydrite Member which are all members of the Zechstein Group. At the bottom the reservoir is bounded by the Ruurlo Formation of the Limburg Group.

#### **Depths and thickness**

It was chosen to adopt the seismic interpretation of formation depths from the geological report by Panterra. Maps of the top, bottom and thickness of the Slochteren Fm (figure 4.7, 4.8 and 4.9 in the Panterra report) have been digitalized. However, the depths at which the top and bottom of the target formation are actually penetrated by the wells - described in the end of well reports - deviate from the seismic interpretations.

For both the injector and producer well, the drilled depths of the top of the target formations are 30 m lower than the seismic interpretation. Therefore it was decided to lower the seismic horizon of the top of the formation with 30 m. This way, the horizon's topography is maintained while the seismic depths correspond to the drilled depths.

The thickness map of the Slochteren Fm from the seismic interpretations was not used because it does not correspond with the thicknesses found in both KKP wells. Formation thicknesses are reported in the end of well reports. The gross thickness of the target formation in KKP-GT-01 is 90 m; the gross thickness in KKP-GT-02 is 75 m. These values correspond to the gross thickness values used in the well testing report addenda by IF Technology. As a conservative scenario, a constant formation thickness of 75 m is assumed for the entire reservoir.

The horizon of the bottom of the reservoir resulted from lowering the horizon of the top of the formation by 75 m. The topography of both the top and bottom of the target formation is therefore identical.

#### **Faults**

The seismic interpretations by Panterra show several faults in the vicinity of the geothermal doublet. The influence of nearby faults has not yet been visible during the well tests - probably due to short pumping times. However, it is possible that during longer operations the faults will have an impact on the temperature and pressure distribution. In the reservoir model two scenario's will be run; one without faults and one in which the interpreted faults by Panterra will be implemented.

#### **Model setup**

##### **Numerical code**

Numerical simulations were performed with the multiphase, multicomponent fluid and heat flow code TOUGH2 V2 [6] in combination with the fluid property module EWASG (Equation of State for

Water, Salt and Gas). The program is able to handle three-component mixtures of water, sodium chloride, and a slightly soluble non-condensable gas (NCG). The dependence of density, viscosity, enthalpy, and vapour pressure of brine on temperature, pressure and salt concentration are taken into account, as well as the effects of salinity on gas solubility in the liquid phase and related heat of solution. The pre- and post-processor PetraSim is used for data integration and visualization.

**Wells and grid**

Table 1 lists the locations as well as other characteristics of the geothermal wells. The locations of the producer and injector correspond to the coordinates at the top of the reservoir.

Table 1 Geothermal wells and grid.

Parameter	Unit	Value
KKP-GT-01 (producer)	[RD-coord]	X: 193,942; Y: 510,425
KKP-GT-02 (injector)	[RD-coord]	X: 192,400; Y: 510,864
Distance between wells	[m]	±1,620 m
Depths modelled	[m TVD]	1,400 (top) - 2,400 (bottom)
Coordinates model	[RD- coord]	189,500; 506,000 (lower-left) 198,024; 515,000 (upper-right)
Horizontal cell area	[m <sup>2</sup> ]	Polygonal distribution max=100,000; min = 10
Vertical cell size (per layer)	[m]	Reservoir: 15 (constant) Top: 50 - 115 (increasing towards top domain) Bottom: 50 - 190 (increasing towards bottom domain)

The producer and injector are drilled deviated along the reservoir thickness with an inclination of approximately 40 degrees. This deviation is not taken into account in the current simulations. The wells are modelled as vertical wells fully penetrating the reservoir. Figure 1 is a schematic view of the reservoir model setup.

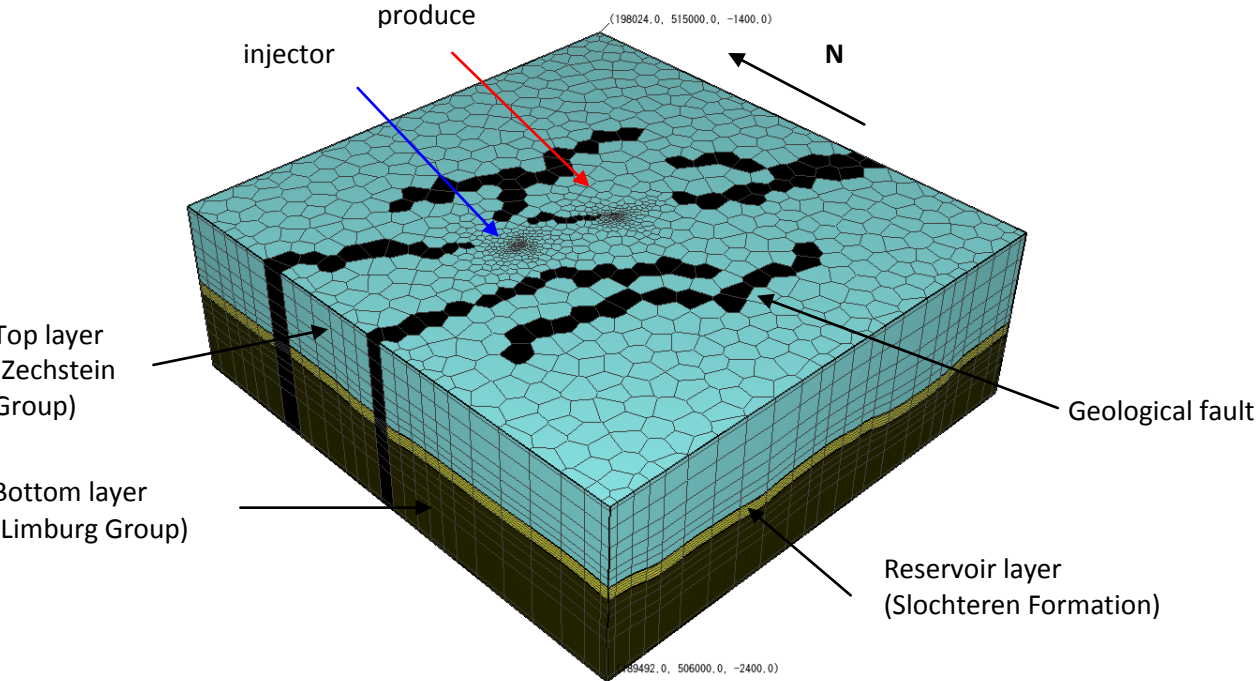


Figure 1 Model grid showing the geological layers and the location of the producer and injector. The geological faults - shown in black - are only included in that particular scenario.

The model is divided into three layers. The reservoir layer is bounded by a top and base layer, corresponding to the Zechstein and Limburg Groups. In the reservoir layer heat transport is dominated by advection. In the bounding layers, heat transport is dominated by conduction.

The model has been updated iteratively to find a correct grid cell size - for realistic pressure distribution on the reservoir scale - and domain size to prevent unwanted boundary effects.

### Reservoir properties

Well testing activities performed in 2011 and 2012 have resulted in the latest and most reliable values of the reservoir permeability. The reservoir permeability for KKP-GT-01 is  $\pm 175$  mD; that of KKP-GT-02 is  $\pm 205$  mD. For the reservoir model, one averaged value of 190 mD is used.

The average porosity of the target formation is taken from a summarizing geological report by T&A Survey to be 18%.

The temperature gradient of 33 °C/km from the T&A Survey report was used in combination with a surface temperature of 16 °C to result in the measured temperature of 73.0 °C at the sensor depth. This results in a top reservoir temperature of 74.5 °C, assuming a temperature loss of 1.5 °C in the pipes.

The NaCl concentration of the geothermal fluid was determined from water analyses to be approx. 185 g/l. The total TDS content is 205 g/l. Reservoir properties are summarized in table 2.

Table 2 Properties of the target reservoir.

<i>Parameter</i>	<i>Unit</i>	<i>Value</i>
Reservoir	-	Slochteren Formation
Top	[m]	Top Slochteren Fm from seismics
Bottom	[m]	75 m below top Slochteren Fm
Average permeability	[mD]	190
Porosity	[%]	18
Salinity (NaCl)	[g/l]	185

The permeability of the upper and lower formations is assumed to be very low, 0.01 mD. This assures that there is heat exchange through conduction but (almost) no flow between the reservoir and adjacent layers. Table 3 summarises the thermal properties of the geological layers. The numbers are typical for the layer lithology and are taken from a handbook.

Table 3 Thermal parameters of the model layers.

<i>Layer</i>	<i>Bulk thermal conductivity (W/m K)</i>	<i>Density (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Specific heat (J/kg K)</i>
Zechstein	4.0	2,200	1,500
Slochteren	3.0	2,500	2,200
Limburg	2.1	2,600	2,300

In the reservoir model, the geological faults are assumed to be impermeable to consider a worst-case scenario. The faults will have the same thermal properties as the reservoir layer.

The permeability distribution in the model is assumed to homogeneous and isotropic. This implies density-driven flow is not limited by vertical anisotropy. During earlier studies the permeability

anisotropy was set to 4, but it was decided to model an isotropic reservoir as a conservative scenario. This assumption results in faster transport and cooling effects.

The effect of dissolved gas on reservoir temperature and pressure has been neglected.

### Initial conditions

Steady state simulations were first run in order to obtain a temperature and pressure distribution as an input for the transient simulations (injection/production period).

The pressure is assumed to be hydrostatic and the temperature distribution with depth follows the regional geothermal gradient. To obtain the initial conditions, the top and bottom mesh layer were assigned a constant temperature and pressure.

Figure 2 shows the initial temperature distribution at the top of the reservoir from a three dimensional perspective. Initial temperature differences in the top are caused by the topography of the layer.

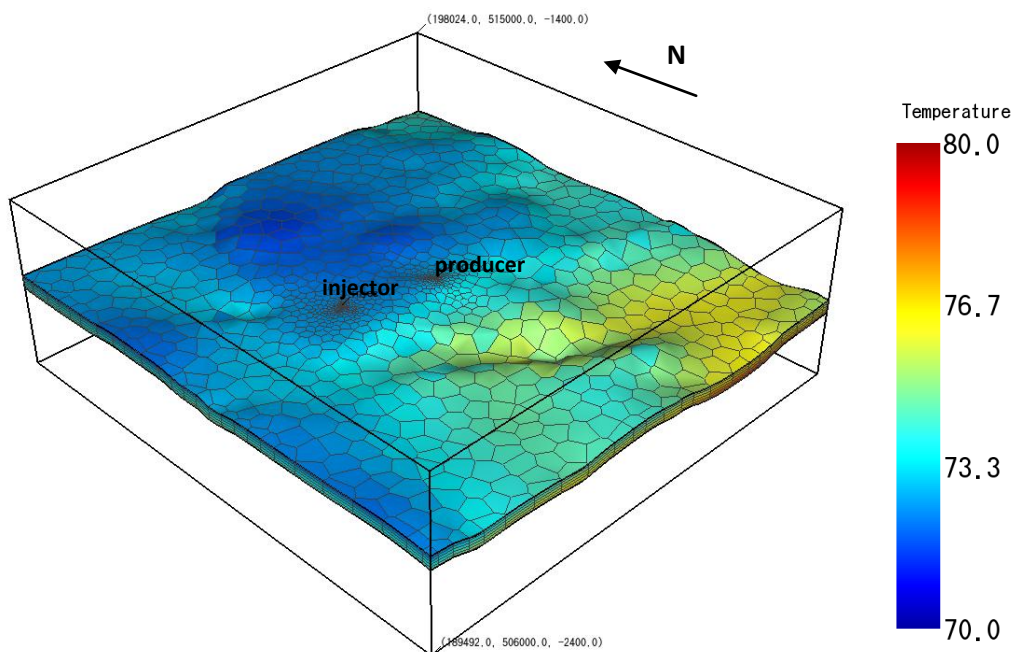


Figure 2 Initial temperature distribution in the reservoir layer. Vertical exaggeration 3x.

### Transient conditions

It is estimated that the surface facilities connected to the geothermal doublet will consume approximately 160.000 GJ per year. The aim is to have the system operational for 7,000 hours per year with 157 m<sup>3</sup>/h which results in a thermal capacity of 6.5 MWth.

The reservoir simulator is only capable to model full-time (8,760 hours per year). In this case the flow rate - to yield the same total pumped volume per year of 1.1 million m<sup>3</sup> - is 125 m<sup>3</sup>/h.

We assume a volume balance in the model domain. Water is injected at a constant rate and with a constant temperature of 35 °C.



During the transient simulations, the temperature and pressure in the most outer cells of the model - on all four sides - are fixed, implying the reservoir is infinite. The top and bottom mesh layer are open, because sensitivity runs showed that temperature and pressure changes did not occur in these outer mesh layers.

## Model results after 30 years

### With faults

Figure 3 shows pressure and temperature changes with respect to the initial temperature and pressure after 30 years of operation, for the scenario with geological faults. Although the cooling front is slightly more elongated towards the production well, there are still no signs of a thermal breakthrough in the production well. The former can be related to the presence of faults, which 'guide' the cold water towards the producer. The area of thermal influence around the injector is still approximately 800 m.

The faults also cause the 1 bar pressure contour lines to follow these geological features. This is only because the faults are assumed to be impermeable boundaries, which is not necessarily the case. In that sense figure 3 shows a conservative scenario.

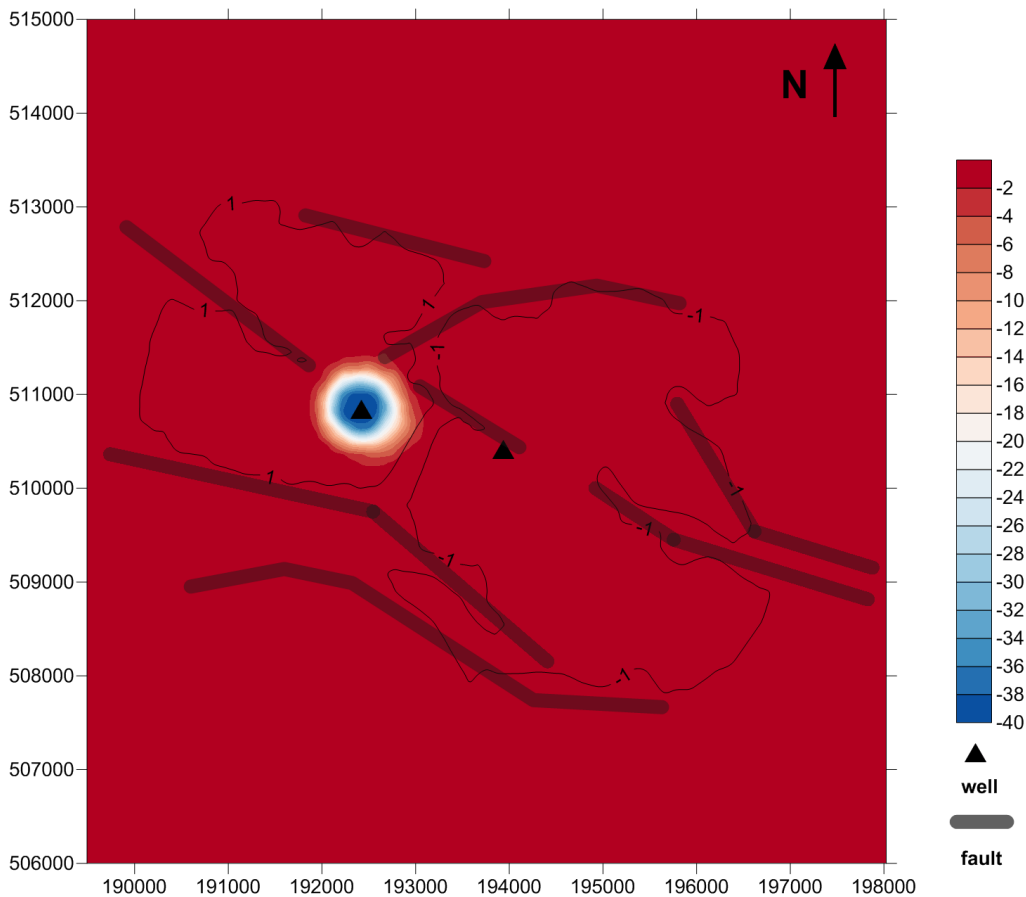
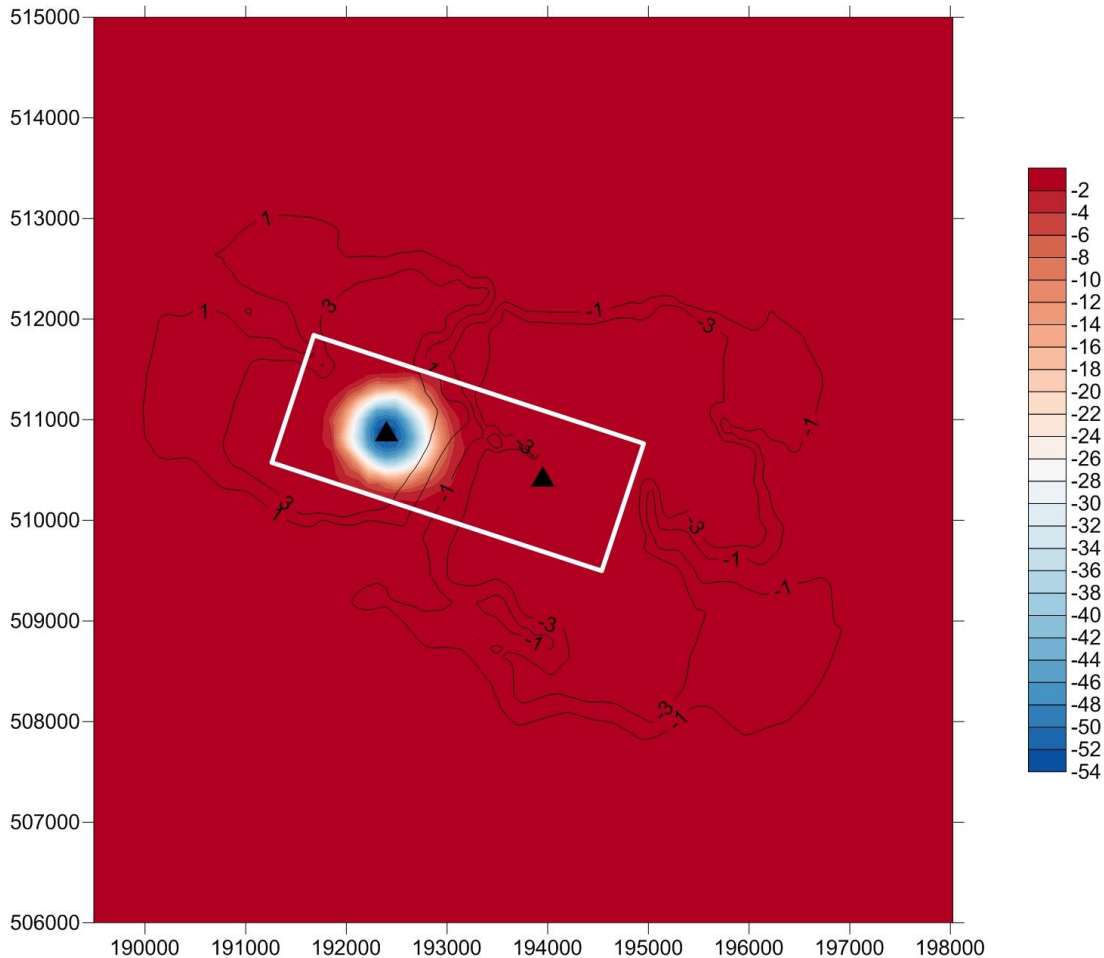


Figure 3 Temperature and pressure changes in top reservoir after 30 years for grid including geological faults. Contour lines show 1 bar difference.

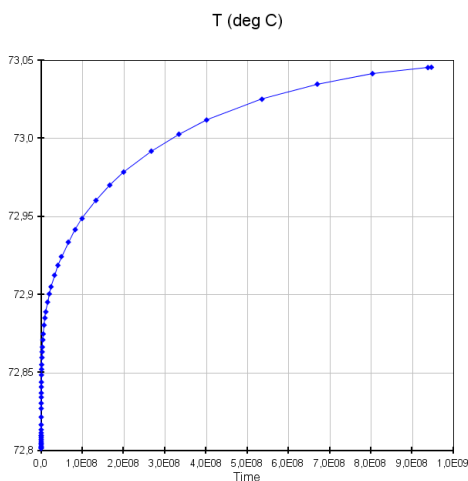
## 9) Selectie ligging vervolgdoublingen

Op basis van alle beschikbare geologische data is gekeken naar de mogelijkheden om het gebied Koekoekspolder verder te ontwikkelen op het gebied van geothermie. Daarbij is ook gekeken naar de effecten wanneer het retourwater wordt afgekoeld tot 20 graden.

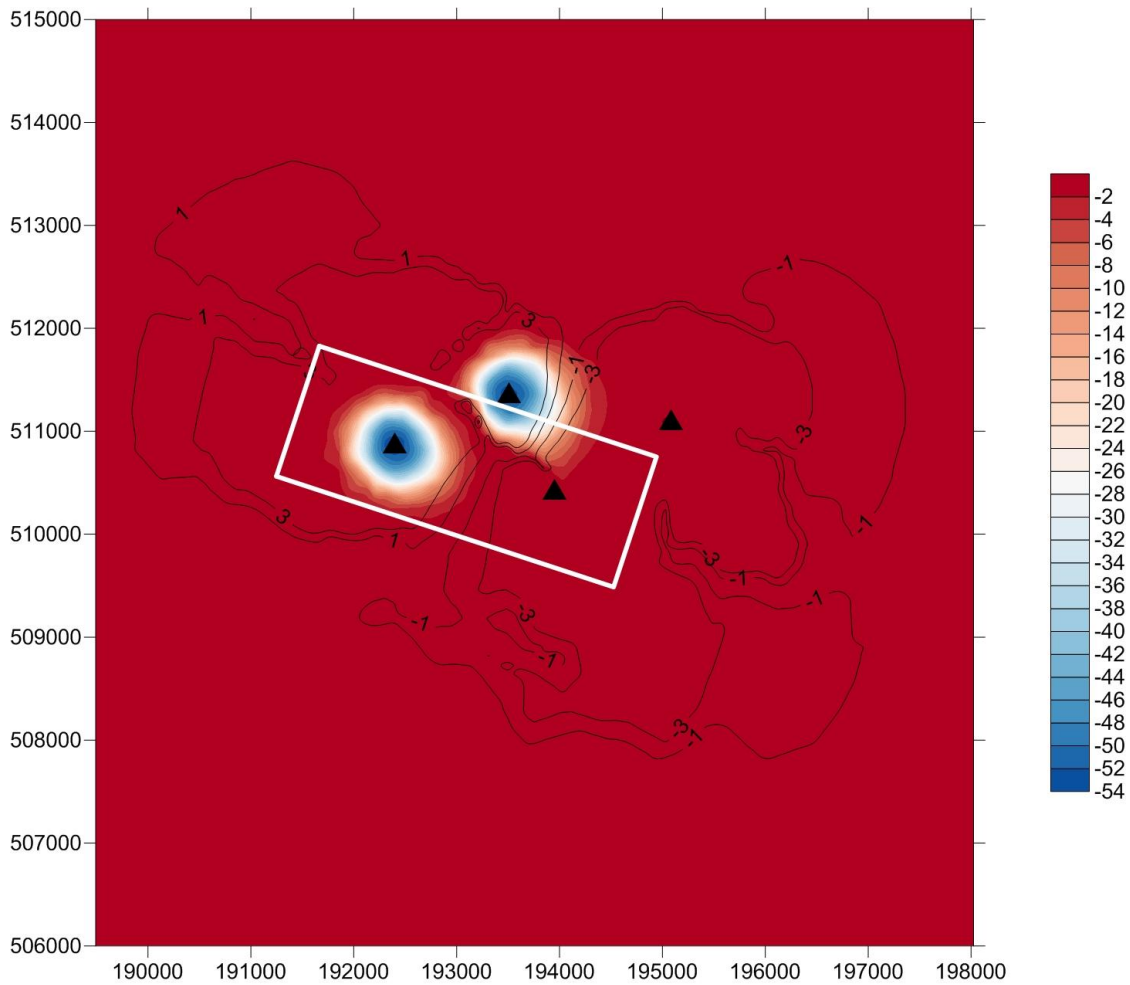
Hieronder is de situatie te zien na 30 jaar bij 20 graden injectie met reservoir temperatuur- en drukcontouren op top reservoirniveau.



Hieronder het temperatuurverloop in KKP-GT-01 na 30 jaar. Er treedt een lichte toename van temperatuur op omdat de productie put water uit een dieper deel van het reservoir zal aantrekken.

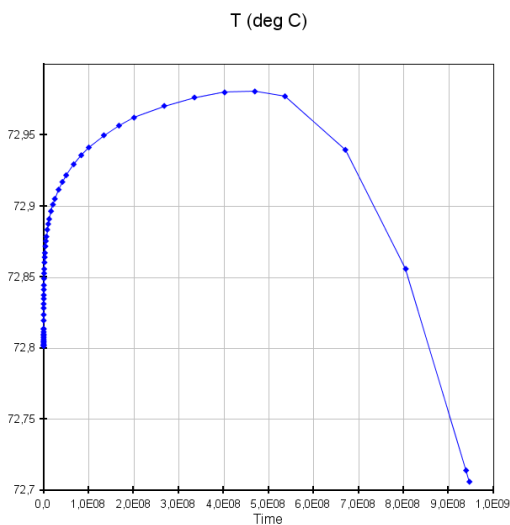


Hieronder is het scenario te vinden waarbij de putten van een tweede doublet toegevoegd zijn, waarbij het tweede doublet aan de rand van het winningsgebied gepositioneerd is.



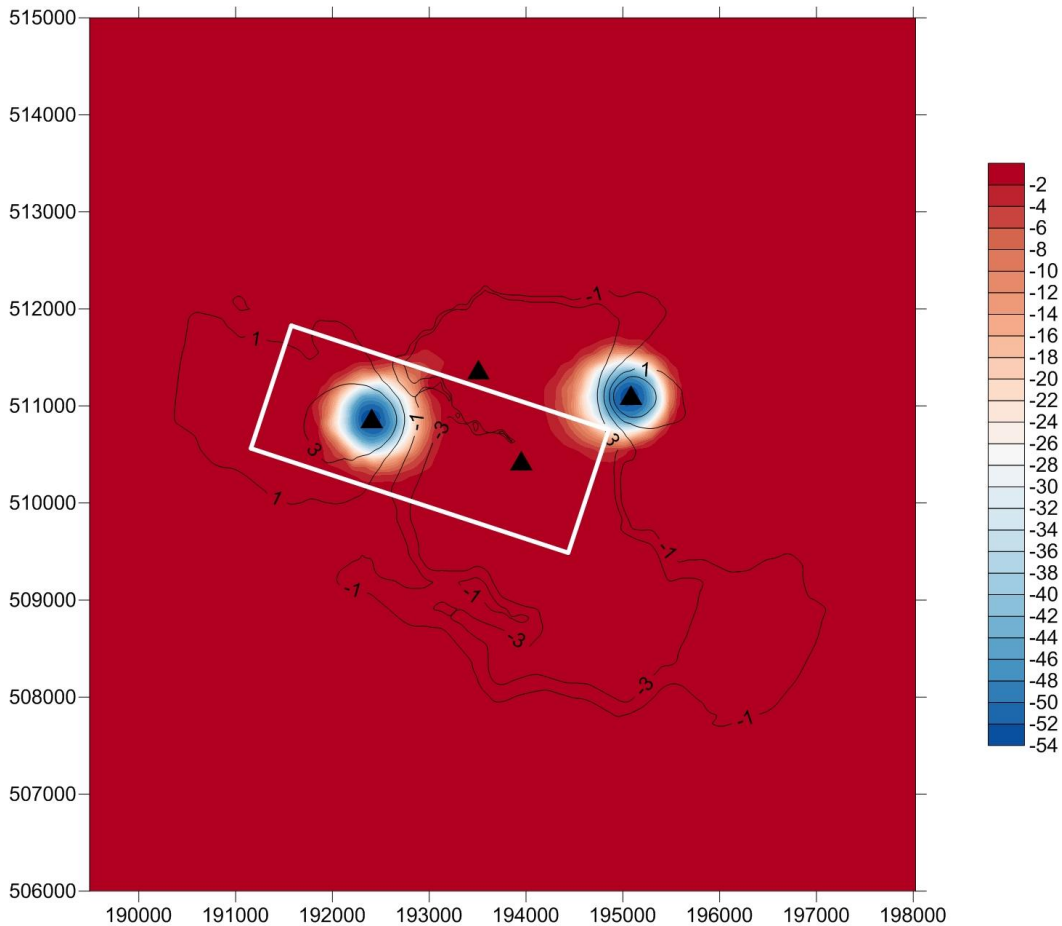
In onderstaande figuur is het temperatuurverloop in KKP-GT-01 weergegeven. Er vindt in deze situatie een duidelijke thermische doorbraak plaats binnen 15 jaar na productie. Het effect van de temperatuurdoorbraak is overigens nog beperkt.

Temperatuurverloop in KKP-GT-01 na 30 jaar

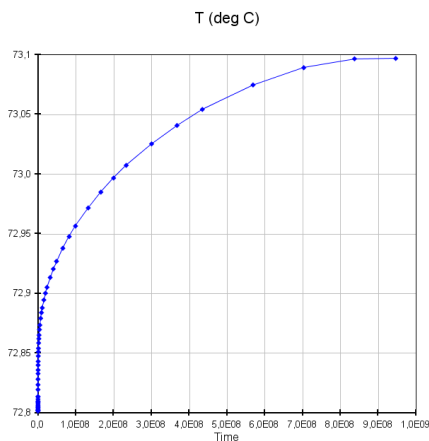


In deze modelsituatie veroorzaakt de tweede injectieput nabij KKP-GT-02 een extra injectiedruk van 3 bar in KKP-GT-02 ten opzichte van de situatie zonder een tweede doublet. De tweede put heeft dus een negatief effect op de druk. De tweede productieput nabij KKP-GT-01 veroorzaakt een extra drukdaling van 0-1 bar in KKP-GT-01. De tweede put heeft een negatief effect op de druk. Netto levert een tweede doublet op de rand van het winningsgebied een negatief drukverschil van 2-3 bar op. Bij de ontwikkeling van het geothermische gebied Koekoekspolder is het dus van groot belang de doubletten op een juiste wijze te positioneren.

Vervolgens is een scenario ontwikkeld waarbij de putten van een 2<sup>de</sup> doublet toegevoegd zijn, alleen nu zijn de productie- en injectieput omgewisseld ten opzichte van het eerder bedachte scenario.



In onderstaande figuur is te zien dat in deze putconfiguratie een tweede doublet geen negatief effect heeft op de productietemperatuur in KKP-GT-01. Er vindt geen thermische doorbraak plaats binnen 30 jaar.

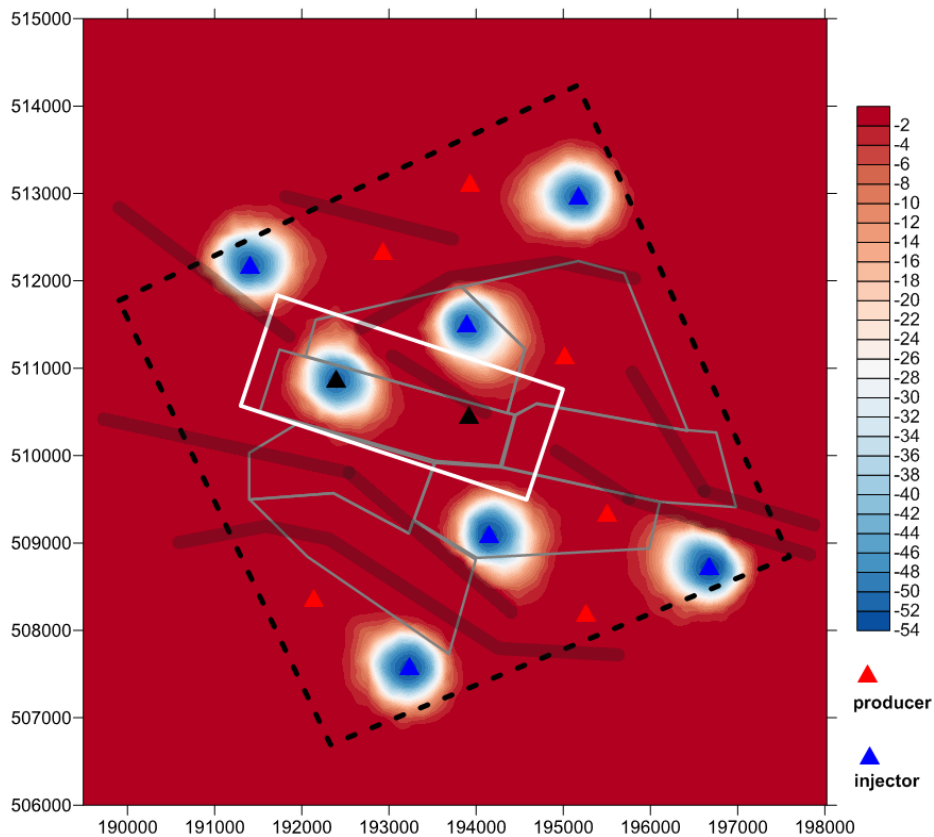


De tweede injectieput nabij KKP-GT-02 veroorzaakt een drukafname van **3 bar** in KKP-GT-02. De tweede put heeft een positief effect op de druk.

De tweede productieput nabij KKP-GT-01 veroorzaakt een extra drukdaling van **2-3 bar** in KKP-GT-01 ten opzichte van het max scenario. De tweede put heeft een negatief effect op de druk.

Netto levert een tweede doublet bijna geen drukverschil op. Op basis van bovenstaande berekeningen is het mogelijk een

doorkijk te maken naar de positionering van meerdere doubletten in het tuinbouwgebied Koekoekspolder. Een mogelijke optimale benutting van het aardwarmtereservoir is te zien in onderstaande figuur.



### Conclusies/aanbevelingen

- Minstens zeven doubletten zijn mogelijk binnen de huidige opsporingsvergunning, zonder dat deze elkaar thermisch negatief beïnvloeden.
- Er zal in beperkte mate thermische overlap plaatsvinden.
- Hydraulische beïnvloeding vindt altijd plaats, maar beperkt zich tot een paar bar. Een slimme putconfiguratie kan negatieve hydraulische beïnvloeding voorkomen.
- De toepassing van een winningsvergunning met een vaste grootte beperkt het maximaal aantal doubletten – en dus de warmtebenutting – binnen de huidige opsporingsvergunning Koekoekspolder.
- In een optimale situatie is het mogelijk dat warmtebenutting van een doublet uit het winningsvergunninggebied van een ander doublet (zonder dat deze negatief beïnvloed wordt) kan ontstaan.
- Er zou voor Koekoekspolder, en ook andere tuinbouwgebieden met meerdere doubletten, gekozen kunnen worden voor een enkele grote (joint venture) winningsvergunning voor alle doubletten, zoals in de olie- en gasindustrie veelvuldig gebeurd.
- De precieze putlocaties voor toekomstige doubletten dienen te zijner tijd bepaald te worden met de op dat moment beschikbare en nieuw vergaarde data.

## 8) Conclusies

Tijdens de uitvoering van de boring in het tuinbouwgebied Koekoekspolder is door middel van logging veel waardevolle informatie verzameld met betrekking tot de eigenschappen van de diepere bodemlagen. Deze loggingdata zijn geanalyseerd en vergeleken met de vooraf voorspelde geologische aannames. Daarnaast zijn de loggingdata gekoppeld aan de feitelijke performance van het geothermische doublet, zowel met de resultaten van de welltests als ook met de data van een jaar productie van het geothermische doublet. Hierdoor was het mogelijk om de modelmatige berekening te koppelen aan daadwerkelijke productiegegevens. Als gevolg hiervan is de doorlooptijd van dit, door de Kas als Energiebron ondersteunde, project langer geworden dan vooraf voorzien.

De volgende conclusies kunnen getrokken worden:

- Tijdens de boring van de beide putten hebben er boorgat logging/metingen plaatsgevonden aan de geologische lagen. De logging activiteiten zijn succesvol uitgevoerd en hebben veel kwantitatieve informatie opgeleverd over de opbouw van de geologie en de fysische eigenschappen van een aantal belangrijke lagen. Daarmee is de kennis van de ondergrond vergroot en is een vertaalslag gemaakt om te bepalen in welke mate de ondergrond geschikt is voor 'Hoge Temperatuur Opslag' en 'Diepe Geothermie' (twee technieken om de bodem te gebruiken voor energiedoeleinden in de tuinbouw).
- Er is met verschillende typen meetapparatuur gemeten: Density (RHOZ), Neutron (TNPH), Gamma Ray (GR), Photo Electric Factor (PEFZ), Caliper (HCAL) en Combinable Magnetic Resonance (TCMR, CMFF). Op basis van het karakter van het signaal en de Density-correctie (DHRA) log zijn deze logs betrouwbaar bevonden. De Combinable Magnetic Resonance data moest verder bewerkt worden om deze bruikbaar te maken voor analyse.
- Direct na de aanleg van het geothermische doublet is op iedere put een welltest uitgevoerd met een ESP-pomp. Dit heeft waardevolle informatie opgeleverd over de daadwerkelijke productiekarakteristiek van het geothermische doublet. Deze data zijn gekoppeld aan de data van de logging om een betrouwbare interpretatie te krijgen van de mogelijkheden voor het gehele Slochteren reservoir onder het tuinbouwgebied Koekoekspolder. Daaruit blijkt overigens dat de eigenschappen van het reservoir minder goed zijn dan vooraf voorspeld, echter voldoende om ca. 4,9 MW aan warmte per doublet te produceren. Hiervoor is echter een beduidend hogere opgelegde pompdruk nodig. Dit vraagt om meer elektrisch vermogen en heeft tot gevolg dat het aardwarmtesysteem een lagere COP (coefficient of performance) heeft dan verwacht. Deze ligt nu tussen de 9 en 15 afhankelijk van het debiet.
- Gedurende één jaar is de performance van het geothermische doublet in Koekoekspolder gevolgd. Met name in de eerste maanden na ingebruikname trad er een geleidelijke verbetering van de injectiviteit op. Begin 2013 lieten productiviteit en injectiviteit een vergelijkbaar beeld zien. Dit beeld kwam overeen met de berekeningen die gemaakt zijn met de loggingsdata en het vervolgens opgestelde model van het Slochteren reservoir.
- De meting van het de laag Het Zand van Brussel heeft laten zien dat deze laag gebruikt kan worden voor Hoge Temperatuur Opslag. Daarbij bleek dat de debieten die in deze laag gerealiseerd kunnen worden nog te beperkt zijn. Met als gevolg dat een dubbel doublet geplaatst moet worden om de overcapaciteit van het geothermische doublet volledig te kunnen opslaan (en vervolgens te onttrekken). De warmtekosten voor warmte uit deze HTO ligt rond de 40 cent per aardgasequivalent. Op dit moment is dat geen interessante kostprijs, aangezien de vergelijkbare warmte uit aardgas 30% goedkoper is.
- Door de logging is een goed beeld verkregen met betrekking tot de afkoeling rond 1 doublet gedurende een periode van 30 jaar. Ook is een beeld gevormd van de drukcontouren in relatie met aanwezige breuken. Wanneer deze invloedssferen als uitgangspunt worden genomen voor het winningsgebied dan is per doublet in het gebied Koekoekspolder een oppervlakte nodig van ongeveer 4,5 km<sup>2</sup>.

- Wanneer nieuwe doubletten te dicht bij eerder aangelegde doubletten worden aangelegd kan nadelige beïnvloeding ontstaan. In een voorbeeld berekening is te zien dat bij een slechte keuze van meerdere doubletten reeds binnen een periode van 15 jaar de temperatuurdoorbraak kan plaatsvinden en het productiewater kouder zal worden.
- Bij een goede situering van vervolgdouletten zijn in het tuinbouwgebied Koekoekspolder een 7-tal doubletten te realiseren. Een slimme positionering van productie- en injectieputten kan tot gevolg hebben dat er geen nadelige drukveranderingen waargenomen worden. In sommige gevallen kan een juiste positionering zelfs positieve effecten hebben op de benodigde injectiedrukken.

Concluderend kan gesteld worden dat door het uitvoeren van een uitgebreid loggingsprogramma, in combinatie met het verzamelen van test- en productiedata, het mogelijk is gebleken om een goede berekening te maken van de geologische eigenschappen van bodemlagen. Daarnaast was het mogelijk om een uitgebreid reservoirmodel op te stellen en een onderbouwd plan aan te leveren voor de verdere ontwikkeling van aardwarmte op gebiedsniveau. Dit is relevant wanneer in een gebied meerdere doubletten geplaatst moeten/kunnen worden en een voor de tuinbouw optimale benutting/exploitatie van het reservoir nagestreefd wordt. In veel geconcentreerde tuinbouwgebieden in Nederland zal al snel ondergrondse 'concurrentie' ontstaan om de warmte die in diepe grondlagen is opgeslagen (zeker bij toenemende gasprijzen). Door een goed loggingsprogramma, een gedegen reservoirmodel en goede afspraken op gebiedsniveau is uiteindelijk 'het geheel meer dan de som der delen'.



Opbouw van een zandsteen formatie, meten is weten!