

Princetonlaan 6  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T 030 256 42 56  
F 030 256 44 75  
[info@nitg.tno.nl](mailto:info@nitg.tno.nl)

**TNO-rapport 2006-U-R0016/B**

Nader onderzoek naar mogelijkheden van  
aardwarmtewinning voor de vleestomaatkwekerij van Fa  
A&G van den Bosch BV te Bleiswijk

Datum	26 Januari 2006
Auteur(s)	Dr. J. Ramaekers Drs. K. Geel Drs. A. Lokhorst Ir. H.J. Simmelink
Exemplaarnummer	<copy no>
Oplage	<no.of copies>
Aantal pagina's	49
Aantal bijlagen	8
Opdrachtgever	The Greenery B.V./Fa. A&G van den Bosch BV
Projectnaam	Greenery Geothermie
Projectnummer	005.45069

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoekopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belang-hebbenden is toegestaan.

# Inhoudsopgave

<b>Samenvatting</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Inleiding</b> .....	<b>6</b>
<b>2 Principe van aardwarmte winning</b> .....	<b>7</b>
2.1 Het proces van winning .....	7
2.2 Het puttendoublet.....	9
2.3 De aardwarmtecentrale .....	9
2.4 Vermogen/warmteproductie .....	10
<b>3 Geologisch model</b> .....	<b>11</b>
3.1 Inleiding.....	11
3.2 Regionale Geologie.....	12
3.3 Geologisch model Bleiswijk en omstreken.....	15
3.3.1 Werkwijze.....	15
3.3.2 Seismiek.....	15
3.3.3 Structurele geologie .....	16
3.3.4 Bepaling van de locatie van de aardwarmteputten.....	16
3.3.5 Stratigrafie / Sedimentologie .....	19
<b>4 Petrofysica</b> .....	<b>23</b>
4.1 Putselectie en beschikbare data.....	23
4.2 Petrofysische evaluatie - porositeit en permeabiliteit .....	25
4.3 Temperatuurdata .....	29
4.4 Samenvatting .....	30
<b>5 Risicoanalyse van warmteproductie, levensduur en benodigd pompvermogen van een geothermisch doublet</b> .....	<b>32</b>
5.1 Inleiding en aannames .....	32
5.2 Risico analyse- de principes .....	33
5.2.1 Invoer.....	33
5.2.2 Uitkomsten.....	35
5.3 Resultaten .....	37
5.3.1 Definitie van scenario's .....	37
5.3.2 Scenario A .....	39
5.3.3 Scenario's B en C .....	39
5.3.4 Scenario D .....	41
5.3.5 Scenario E en F .....	41
<b>6 Technische risico's</b> .....	<b>43</b>
6.1 Geochemisch gedrag van formatiewater onder exploitatiecondities.....	43
6.2 Klei .....	43
6.3 Oliesporen.....	44
6.4 Geomechanische risico's .....	44
6.5 Interferentie met andere toepassingen. ....	45
<b>7 Conclusies en aanbevelingen</b> .....	<b>46</b>
7.1 Conclusies.....	46
7.2 Aanbevelingen .....	47

<b>8</b>	<b>Ondertekening</b> .....	<b>48</b>
	<b>Referenties</b> .....	<b>49</b>

## Samenvatting

De Firma A&G van den Bosch BV in Bleiswijk is op zoek naar besparende en duurzame energiebronnen voor haar de verwarming van haar kas. Het winnen van aardwarmte uit de ondergrond mogelijk een bijdrage kan leveren om dit doel te realiseren. Winning van aardwarmte kan worden uitgevoerd door de onttrekking van zout formatiewater met een hoge temperatuur dat zich op grote diepte in watervoerende lagen bevindt. Hiervoor wordt het formatiewater door middel van een productieput opgepompt, door een warmtewisselaar geleid en vervolgens met een verlaagde temperatuur door middel van een injectieput weer in dezelfde formatie geïnjecteerd. De twee putten vormen dan een zgn. doublet. Het gevraagde vermogen van de kas bedraagt 5-10 MW. Na een eerste voorstudie (Lokhorst, 2005) die de potentie in kaart bracht op basis van direct beschikbare regionale data, heeft TNO nader onderzoek naar de mogelijkheden uitgevoerd. Onderzocht is of de geïdentificeerde watervoerende lagen in de diepe ondergrond daadwerkelijk geschikt zijn om aan de gevraagde warmte leverantie, waarbij grote hoeveelheden water opgepompt en weer geïnjecteerd moeten worden, te voldoen. Dit is gedaan door alle relevante en publiek beschikbare geologische gegevens (afkomstig uit put data, uit 3D seismiek en uit literatuur), onder en in de directe omgeving van Bleiswijk te analyseren, te interpreteren in de geologische context en te integreren in een 3D geologisch model. Dit leverde kennis op over de dikte en diepteligging van de lagen, en eigenschappen zoals porositeit en permeabiliteit. Op basis van deze gegevens inclusief hun onzekerheidsmarges is de potentiële warmteproductie, de levensduur en het benodigde pompvermogen van een geothermisch doublet geschat.

De voor aardwarmtewinning beoogde watervoerende lagen, de Berkel Zandsteen en de Rijswijk Zandsteen zijn niet afzonderlijk te herkennen in de 3D seismiek. De exacte ligging van de Berkel zandsteen is dan ook niet vastgesteld. Wel is de diepteligging van de top en de basis van de zandige eenheid, waartoe beide zandsteenlagen behoren vastgesteld met behulp van seismiek. Voor een optimaal rendement van de aardwarmtewinning dienen de lagen zo diep mogelijk aangeboord te worden, zodat het geothermische doublet gebruik maakt van water met een zo hoog mogelijke temperatuur. Er wordt voorgesteld om twee schuine boortrajecten in zuidwestelijke richting te boren, waarbij moet worden voorkomen dat door een ten zuid westen van de beoogde locatie gelegen breuk wordt geboord. Hiertoe moeten de watervoerende lagen verticaal worden aangeboord, op ongeveer 500 a 600 m ten noorden van de breuk . In het huidige voorstel liggen injector en producer 2000 m uit elkaar en is de lengte van beide boringen ongeveer 2300 m. Door interpolatie van data uit omliggende boringen is een inschatting gemaakt van de te verwachten diktes. Uit het meest realistische geologische model is de dikte van de Berkel zandsteen op de locaties van de injectie en productie put tussen 30 en 40 m. Het meest pessimistische model geeft een minimale dikte van 10 m, het optimistische model geeft diktes van meer dan 75 m. Het is onwaarschijnlijk dat er geen Berkel Zandsteen zit onder de beoogde locatie. Het gemiddelde geologische model van de dikte van de Rijswijk Zandsteen geeft waarden van 30 a 35 m. De verschillende interpolatie routines geven relatief weinig spreiding in dikte voor deze watervoerende laag. Uit de petrofysische evaluatie volgt dat de Rijswijk zandsteen een gemiddelde porositeit heeft van 0.18, de gemiddelde porositeit van de Berkel Zandsteen is hoger, 0.21. Voor beide is de standaard deviatie 0.03. De absolute variatie binnen de zandsteenlagen is groter. Gemiddeld genomen is ook de permeabiliteit van de Rijswijk Zandsteen kleiner is dan die van de Berkel Zandsteen. Voor een temperatuurschatting in de watervoerende lagen is op basis van gecorrigeerde

“bottom hole” temperaturen een lineaire temperatuur diepte relatie afgeleid. Het zoutgehalte van het formatiewater van de Berkel en Rijswijk Zandsteen is 68 ppk (68.000 ppm), afgeleid uit weerstandslogs.

Op basis van analytische berekeningen, is inzicht verkregen in de mogelijke performance van het geothermische doublet. Hierbij is de werkelijkheid sterk vereenvoudigd door een aantal aannames te doen. Door de onzekerheidsmarges van de dikte, porositeit van de Berkel en Rijswijk Zandsteen en de diepteligging van de lagen te gebruiken is inzicht verkregen in de waarschijnlijkheidsverdeling van de uitkomsten. Wanneer de meest waarschijnlijke/realistische invoerverdeling wordt gebruikt, waarbij wordt gerekend met een debiet van 100 m<sup>3</sup>/u, is, uitgaand van een gemiddeld risico (kans van 50%) de warmteproductie 4.4 MW, de levensduur 75 jaar en de coëfficiënt of performance (COP) 76. Bij een minimum risico is de levensduur ruim 35 jaar en de (COP) bijna 9. Hierbij is de dikte van de Berkel Zandsteen minimaal 10 m. Dit wil zeggen dat, als de Berkel Zandsteen aanwezig is, de kans zeer groot is dat een doublet rendabel is. Bij een hoger debiet neemt de warmteproductie lineair toe, maar is, uitgaand van een minimum risico de COP te laag. Bij een meer gemiddeld risico profiel echter is ook de COP nog goed (COP 33 bij 200 m<sup>3</sup>/u). Ook wanneer de minimumdikte van de Berkel Zandsteen op 0 m wordt gezet is er nog steeds sprake van een acceptabele performance van het doublet. In het onwaarschijnlijk geachte scenario, waarbij wordt aangenomen dat de Berkel geheel afwezig is, voldoet een doublet alleen onder de meest gunstige condities van de Rijswijk zandsteen. In dit scenario is de kans hierop echter gering. Dit wil zeggen dat, in het geval er geen Berkel Zandsteen wordt aangeboord, de kans gering is dat een doublet rendabel is. Zoals eerder vermeld is de kans dat de Berkel Zandsteen niet aanwezig is klein. De mogelijkheid is echter niet geheel uit te sluiten.

Technische risico's die mogelijk een rol kunnen spelen bij de winning van aardwarmte zijn neerslag van mineralen die kan leiden tot putverstopping, verstopping van het reservoir door zwellen van mogelijk aanwezige klei en of samenklonteren van kleideeltjes in suspensie en geomechanische formatieschade (bij toepassen van een hoog debiet en/of hoge druk). Het risico is sterk afhankelijk van de samenstelling van het formatie water en de mineralogische samenstelling van het sediment in de watervoerende lagen. De werkelijke omvang van deze risico's zijn dan ook eerst na het testen van de eerste boring goed in te schatten.

# 1 Inleiding

Vanwege de stijgende energiekosten van het verwarmen van haar vleestomaat kas door middel van aardgas is De Firma A&G van den Bosch BV, Petuniaweg te Bleiswijk op zoek naar alternatieve en duurzame energiebronnen. In een overleg is door TNO aangegeven dat het winnen van aardwarmte uit de ondergrond mogelijk een bijdrage kan leveren. Het gevraagde vermogen van de kas bedraagt 5-10 MW. Een eerste, door TNO uitgevoerde voorstudie (Lokhorst, 2005) heeft geleid tot het inzicht dat, voor de winning van aardwarmte benodigde, watervoerende lagen in de ondergrond onder Bleiswijk voorkomen op een diepte vanaf ca. 1600 m beneden maaiveld. De quick-scan studie is uitgevoerd op grond van direct beschikbare, regionale gegevens.

De eigenschappen van de watervoerende lagen (ligging, dikte, porositeit) kunnen binnen korte afstand veranderen en zijn soms moeilijk voorspelbaar. Daar komt bij dat de gegevens, waaruit deze eigenschappen moeten worden afgeleid, slechts beperkt aanwezig zijn. Waar veranderingen binnen enkele honderden meters kunnen plaats vinden, zijn de aanwezige gegevens vaak niet meer dan speldenprikken op onderling veel grotere afstand (meerdere kilometers). Ten slotte hebben de oliemaatschappijen in het algemeen boringen geplaatst op hoog gelegen structuren, welke nogal eens kunnen samenvallen met breukzones. Analyse van de gegevens, afkomstig uit boringen in deze zones, zijn niet altijd representatief voor de overige delen van watervoerende lagen.

Voor het optimaliseren van de kennis omtrent de ligging, dikte en porositeit en permeabiliteit van de watervoerende lagen is het daarom nodig om alle relevante geologische gegevens te beoordelen, te interpreteren en te integreren in een geologisch model.

In dit onderzoek is nagegaan, in hoeverre de in de quick-scan aangetroffen watervoerende lagen binnen de Rijnland groep (Rijswijk en Berkel Zandsteen laagpakketten) ook daadwerkelijk geschikt zijn om aan de gevraagde warmte leverantie, waarbij grote hoeveelheden water opgepompt en weer geïnjecteerd moeten worden, te voldoen. Dit is gedaan door alle relevante en publiek beschikbare geologische gegevens (afkomstig uit put data, uit 3D seismiek en uit literatuur), onder en in de directe omgeving van Bleiswijk te analyseren, te interpreteren in de geologische context en te integreren in een 3D geologisch model.

Het onderzoek had mede tot doel een inzicht te geven in de geologische onzekerheden die aanwezig zijn. Deze onzekerheden zijn vertaald in een statistische risicoanalyse van een nog te ontwerpen inrichting voor de winning van aardwarmte (een geothermisch doublet, zie hoofdstuk 2). Hierbij is de mogelijke warmteproductie, de levensduur en het benodigde pompvermogen beoordeeld.

In dit rapport wordt allereerst het principe van aardwarmtewinning kort beschreven (hoofdstuk 2), waarna in hoofdstuk 3 het geologische model dat is gemaakt wordt gepresenteerd en toegelicht. Dit wordt gevolgd door een beschrijving van de resultaten uit de petrofysische analyse in hoofdstuk 4 en de risicoanalyse in hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 ten slotte wordt kort ingegaan op de technische risico's die mogelijk zouden kunnen optreden bij aardwarmtewinning, waarbij grote hoeveelheden water moeten worden verpompt, alvorens wordt afgesloten met de conclusies en aanbevelingen van het onderzoek.

## 2 Principe van aardwarmte winning

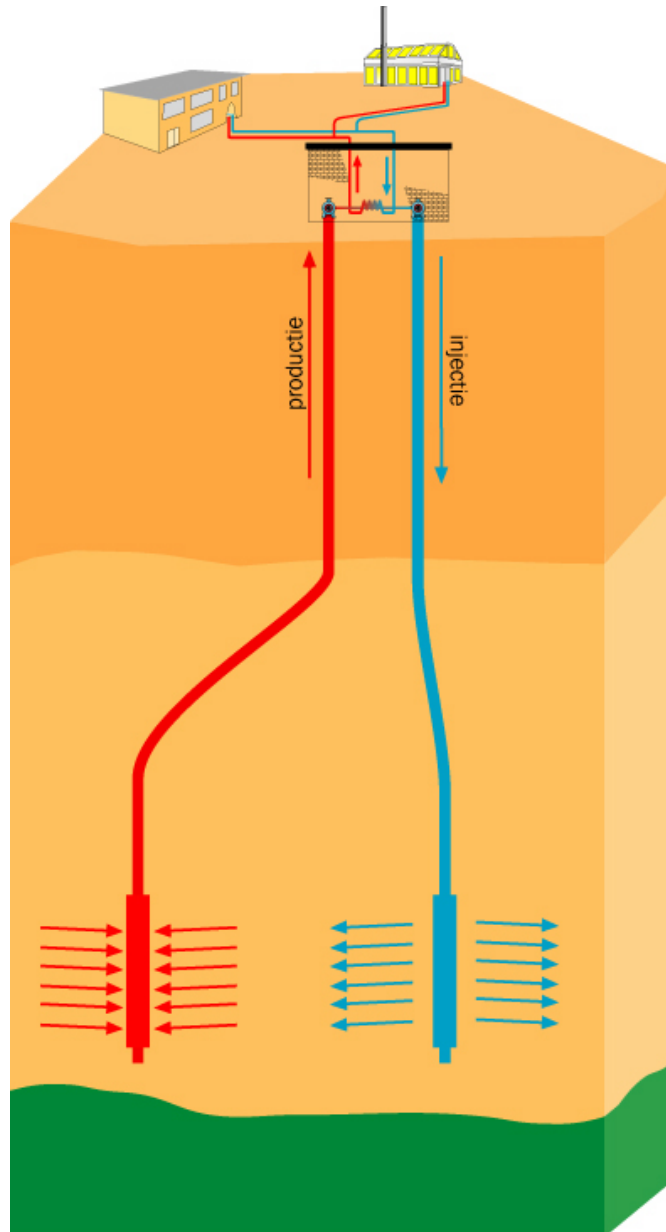
De winning van aardwarmte kan worden uitgevoerd door de onttrekking van zout formatiewater met een hoge temperatuur dat zich op grote diepte in watervoerende lagen bevindt. Hiervoor wordt het formatiewater door middel van een geboorde productieput opgepompt, door een warmtewisselaar geleid en vervolgens met een verlaagde temperatuur door middel van een injectieput weer in dezelfde formatie geïnjecteerd. De twee putten vormen dan een zgn. doublet. De onttrokken warmte van de diepe geologische formatie wordt dan “aardwarmte” genoemd

De temperatuur in de aardkorst neemt toe met de diepte, in de Nederlandse bodem ongeveer 30° Celsius per kilometer. Rekening houdend met een gemiddelde jaartemperatuur aan de grond van ongeveer 10 - 15°, betekent dit dat de temperatuur op drie kilometer diepte tot meer dan 100° Celsius kan oplopen.

Als bron dient het warme water dat opgeslagen ligt in watervoerende lagen die in de ondergrond voorkomen. Deze watervoerende lagen, ook wel aquifers genoemd, zijn in nagenoeg de gehele ondergrond van Nederland aanwezig. Echter, bij de winning van aardwarmte zijn grote hoeveelheden warm water nodig, als het gaat om verwarming van huizen of bijvoorbeeld kassen. Voor een economisch rendabele aardwarmte installatie is het daarom noodzakelijk dat de watervoerende lagen voldoende doorstroming hebben om voldoende waterdebiet (ong. 100-200 m<sup>3</sup>/u) te kunnen oppompen en injecteren. De doorstroming van een watervoerende laag zoals zandsteen of kalksteen, is afhankelijk van de doorlatendheid (permeabiliteit) en de dikte van de laag. Daar komt nog bij dat de doorlatendheid en dikte in een zeker evenwicht met elkaar moeten zijn om voldoende doorstroming te krijgen. Om die reden zijn niet alle aanwezige watervoerende lagen geschikt voor het winnen van aardwarmte. De meest geschikte lagen voor het winnen van geothermische energie in Nederland zijn de diep gelegen aquifers in de verschillende soorten zandsteen in Noord-Nederland, Zuid-Holland en Noord-Brabant. In deze reservoirgesteenten wordt is op een groot aantal plekken behalve water eveneens olie en/of gas aangetroffen. De olie- en gasmaatschappijen in Nederland beschikken dan ook over ruime kennis van deze gesteenten.

### 2.1 Het proces van winning

Het principe van de aardwarmtewinning wordt weergegeven in figuur 2.1. Het warme water wordt via een productie put omhoog gepompt uit de aquifer, doorloopt vervolgens een warmtewisselaar en wordt na het afstaan van de warmte via een injectieput weer teruggepompt.



Figuur 2.1 – Het principe van aardwarmtewinning

Het terugpompen van het afgekoelde water is noodzakelijk omdat het geproduceerde formatie water in het algemeen een hoog zout gehalte heeft en om die reden lozing aan het oppervlak niet wordt toegestaan. Bovendien wordt door de injectie de druk in de aquifer op peil gehouden.

Het opnieuw terugvoeren van het gewonnen water heeft ook een aantal nadelen. In de eerste plaats moet pomp capaciteit worden ingezet om het water terug te pompen. Het injectie proces zelf verloopt ook niet zonder risico. Vooral weinig verkitte zandsteen reservoirs die rijk zijn aan kleimineralen, zijn soms gevoelig voor verstopping tengevolge van de migratie van fijne deeltjes en verstopping door in het formatiewater zwevende deeltjes. Verstopping van een injectieput, vermindert de doorlatendheid. Dit heeft weer tot gevolg dat de benodigde druk om het water te injecteren verhoogd moet worden waardoor de elektriciteitskosten van de injectiepomp toenemen en de rentabiliteit van de geothermische installatie afneemt.



## 2.2 Het puttendoublet

De productie- en injectieput vormen samen een zogeheten puttendoublet. Meestal worden zij vanuit één locatie schuin geboord, waardoor de boorgat lengte enkele honderden meters langer wordt. De ondergrondse afstand tussen de productieput en de injectieput is meestal zo groot dat het koudere water uit de injectieput de productieput niet eerder bereikt dan enkele tientallen jaren. Het tijdstip waarop het koudefront de productieput bereikt, heet de doorbraaktijd. Deze doorbraaktijd is afhankelijk van de geproduceerde hoeveelheid water, de onderlinge afstand op einddiepte tussen productie- en injectieput, de porositeit en de dikte van de aquifer. Vanaf dit tijdstip arriveert nog niet volledig opgewarmd injectiewater in de productieput en neemt de temperatuur van het gewonnen warme water geleidelijk af. De exploitatie kan dan nog worden voortgezet totdat de productietemperatuur een kritische ondergrens bereikt heeft. In de praktijk bedraagt de afstand tussen de putten tussen de 1000 en 2000 meter.

## 2.3 De aardwarmtecentrale

Bij de aanleg van een doublet komt eerst de keuze en aanleg van de boorlocatie en benodigde infrastructuur aan bod, gevolgd door de constructie van een boorplatform waarop de boorinstallatie kan worden geplaatst. Voor deze tijdelijke boorlocatie is ongeveer 100 x 100 m. ruimte nodig. Het permanente ruimtebeslag is echter beperkt tot de putlocatie van niet meer dan 10x10 m. en een gebouw waarin de warmtewisselaar en pieklastketel worden ondergebracht. De pieklastketel is noodzakelijk voor de extra vraag op koude dagen. Aardwarmte verzorgt de basislast van het warmtenet.

Daarna start het boren van twee gedeveerde putten. De putten worden verbuisd (een zgn. casing) om instorten van de boorgatwand te voorkomen. Tussen buizen en gesteente wordt een cementslurry geïnjecteerd die uithardt. Om te voorkomen dat tijdens de productie zanddeeltjes worden meegepompt wordt de put op reservoir niveau voorzien van een filter en zonodig een gravel pack. Dit verhoogt eveneens de stabiliteit van het boorgat. In de buis wordt een productiebuis neergelaten. Deze kan aan de binnenzijde voorzien zijn van een kunststof coating om corrosie te voorkomen.

Vervolgens wordt een elektrische onderwaterpomp neergelaten in de productieput, die ongeveer 3 tot 5 jaar mee gaat. Zo nodig wordt een speciale leiding aangebracht die corrosiewerend materiaal op de putwanden kan spuiten.

Het bovengrondse gedeelte omvat een serie componenten die worden ondergebracht in een bovengrondse behuizing. De belangrijkste hiervan zijn:

- variabele frequentieregelaar ten behoeve van de elektrische onderwaterpomp die de afregeling van het putdebiet mogelijk maakt
- warmtewisselaars waarmee de warmte van het geothermische circuit wordt overgebracht op het warmtedistributienetwerk
- pompen voor de circulatie in het distributienetwerk
- zo nodig filters voor de verwijdering van zand, fijne deeltjes en eventuele corrosiedeeltjes om verstopping in de injectieput tegen te gaan
- een injectiepomp en doseerinstallatie voor corrosiewerende vloeistof- (optioneel)

Soms worden in de aardwarmtecentrale ook een warmtekrachtinstallatie, buffers, een warmtepomp en/of pieklastketel opgesteld.

## 2.4 Vermogen/warmteproductie

Het thermische vermogen ( $W_{th}$ ) of warmteproductie van een doublet is het product van het waterdebiet ( $q$ ), de warmtecapaciteit van het formatiewater (het product van soortelijke warmte ( $c_v$ ) en dichtheid ( $\rho$ ) en de afkoeling van het geothermische water ( $\Delta T$ ):

$$W_{th} = q \times \rho \times c_v \times \Delta T$$

(met  $W_{th}$  in kW,  $q$  in m<sup>3</sup>/s,  $\rho$  in kg/m<sup>3</sup>,  $c_v$  in J/kgK en  $\Delta T$  in °C).

Een voorbeeld:

Bij een debiet van 200 m<sup>3</sup>/uur, een warmtecapaciteit van 4.452.106 J/m<sup>3</sup>K en een uitkoeling van 80 °C naar 40 °C is de warmteproductie 10 MW<sub>th</sub>.

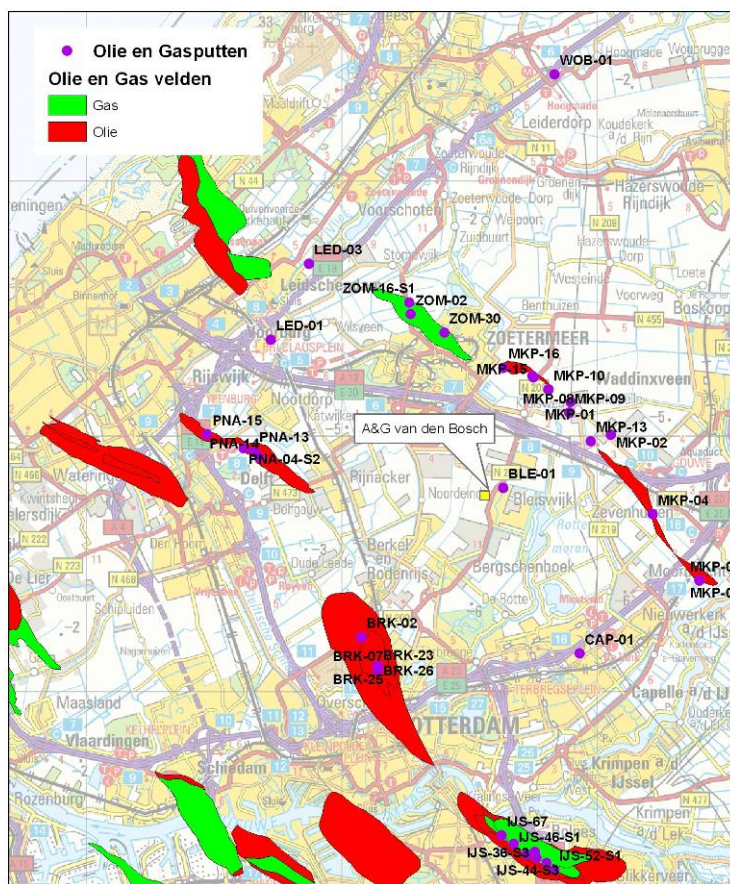
Het thermische vermogen van een doublet is niet alleen afhankelijk van de opgeslagen hoeveelheid warmte in de aquifer en het debiet van het geproduceerde water maar vooral ook van het verschil tussen aanvoer- en retourtemperatuur. Hoe groter het verschil tussen productie- en injectietemperatuur, hoe hoger de warmteopbrengst. Een van de belangrijkste voordelen van het gebruik van aardwarmte is de leveringszekerheid. Aardwarmte is namelijk niet afhankelijk van schommelingen in de weersgesteldheid. Daarnaast is de winning van aardwarmte technische gezien een betrouwbare bewezen techniek is, waarbij vooral gebruik gemaakt wordt van de ervaringen uit de olie- en gasindustrie.

### 3 Geologisch model

#### 3.1 Inleiding

De geologie van de diepe ondergrond van Bleiswijk en omstreken is in grote lijnen bekend door de landelijke kartering van de diepe ondergrond die in de afgelopen decennia door TNO-NITG en haar voorlopers (RGD) is uitgevoerd. Bleiswijk valt onder kaartblad VII: Noordwijk-Rotterdam (TNO-NITG, 2002). Deze kartering is gebaseerd op 2D en 3D seismiek en op een groot aantal boringen die in Zuid-Holland door de NAM zijn gezet. Het betreft hier allemaal olie- en gasboringen. In Bleiswijk zelf is de put Bleiswijk-1 in 1960 geboord, maar deze komt niet zo heel diep.

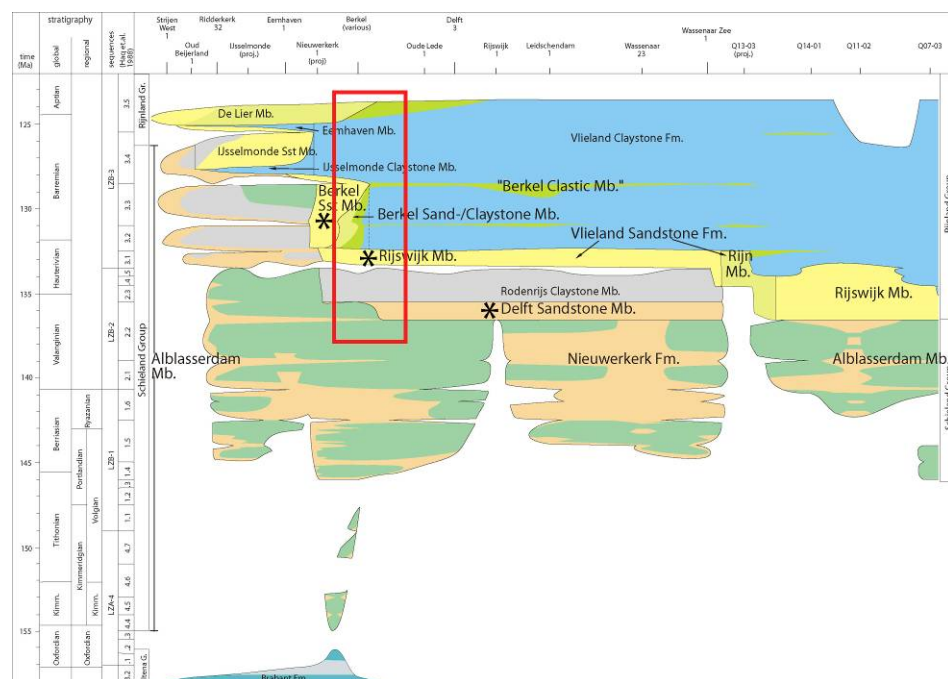
De dichtstbijzijnde boring die wel reikt tot in de te onderzoeken watervoerende lagen, ligt ca. 4 km ver weg. Een inventarisatie van het voorkomen van geothermisch interessante gesteentepakketten onder Bleiswijk komt dan ook neer op interpolatie van gegevens uit de wijde omtrek, sterk gesteund door regionale geologische kennis. Bijlage 1 geeft een lijst van boringen die voor dit onderdeel van het project zijn gebruikt (Figuur 3.1).



Figuur 3.1 – Locatie van de boringen, gebruikt in het geologisch onderzoek

Figuur 3.2 laat een gestileerde stratigrafische kolom zien zoals die op de ondergrond van Bleiswijk van toepassing is. Zoals in de quick-scan studie (Lokhorst, 2005) al vastgesteld werd, zijn de voor aardwarmte interessante watervoerende lagen het Berkel Zandsteen Laagpakket en het Rijswijk Zandsteen Laagpakket, afgezet tijdens het Vroege Krijt ( zo'n 135-100 Miljoen jaar geleden) . Een mogelijke derde kandidaat is de Delft Zandsteen die tijdens het Laat Jura werd afgezet ( ongeveer 150-135 Miljoen jaar geleden). Een eerste schatting van de diktes van eerstgenoemde formaties leverde 25-30 m voor de Rijswijk Zandsteen en 50-70 m voor de Berkel Zandsteen, maar dan ten zuiden van de locatie.

De rest van dit hoofdstuk bestaat uit een bespreking van de regionale geologie van Bleiswijk en omstreken. Op basis van deze regionale geologie én de informatie uit omliggende putten wordt vervolgens een geologisch model van de diepe ondergrond van Bleiswijk besproken.



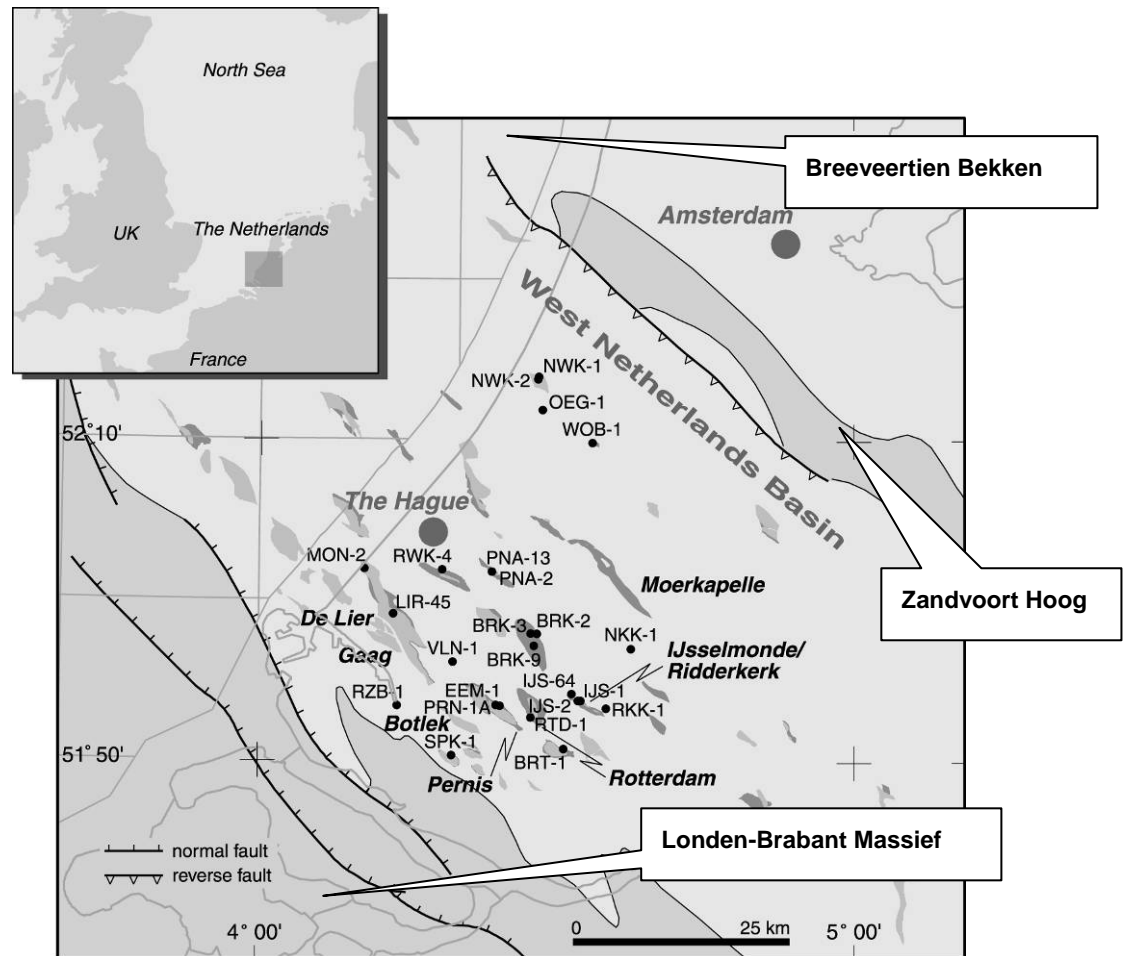
Figuur 3.2 – Schematische stratigrafische kolom van de ondergrond van Bleiswijk. De voor aardwarmte interessante gesteentepakketten zijn met een asterisk aangegeven. Het rode kader geeft de te verwachten stratigrafie onder Bleiswijk aan.

### 3.2 Regionale Geologie

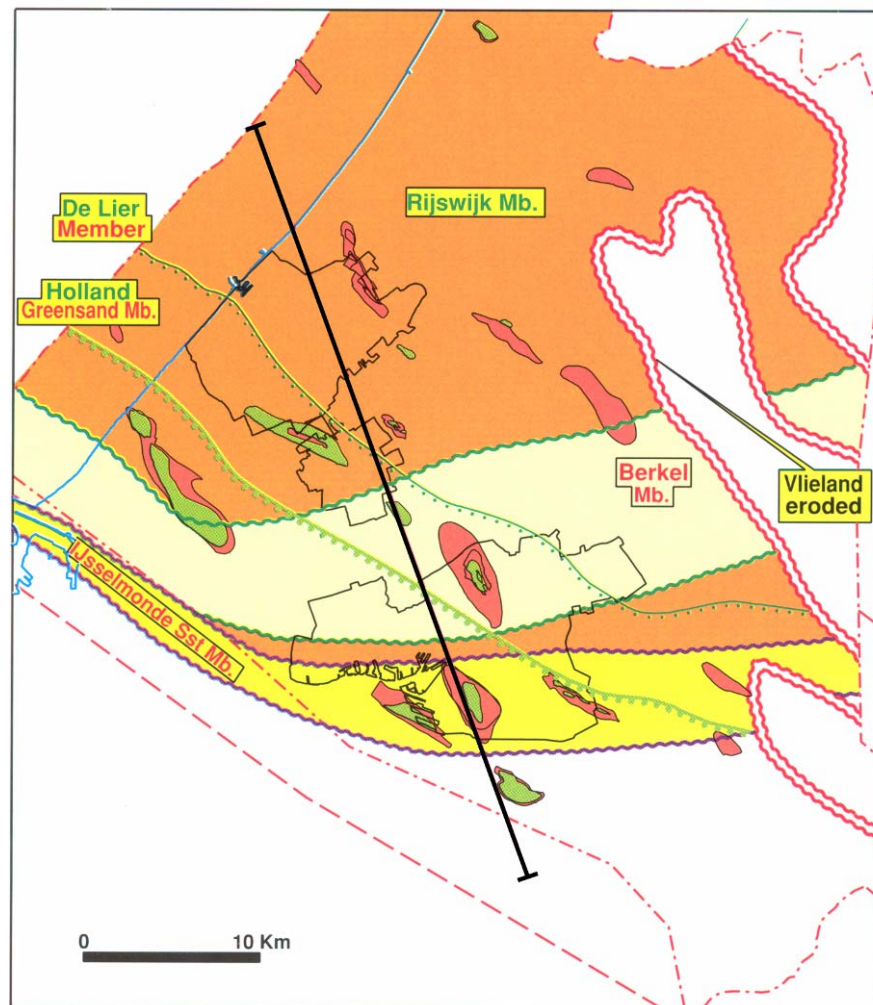
Ten tijde van het Laat Jura en Vroeg Krijt bestond Nederland uit een aantal sedimentatiebekkens, die van elkaar gescheiden waren door topografisch hooggelegen gebieden. Eén van die bekkens, het NW-ZO georiënteerde West-Nederland Bekken grenst in het zuiden aan het Londen-Brabant Massief (Fig. 3.3). De scheiding met het noordelijker gelegen Bree-Veertien Bekken wordt gevormd door het Zandvoort Hoog. In het zuidoosten grenst het West-Nederland Bekken aan de Roerslenk. Hoewel het bekken al aanwezig was tijdens de Trias (Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993), werd het pas een actief sedimentair bekken na een periode van grote (rek-)

breukbewegingen tijdens de Midden Jura. Deze periode van actieve breukbewegingen ging door tot in het Vroeg Krijt (Bodenhausen & Ott, 1981; Van Wijhe, 1987).

Thermale opwelling van het gebied resulteerde in het scheefstellen van de breukblokken en viel samen met een scherpe eustatische zeespiegeldaling (Ziegler, 1982). Erosie van de blootgestelde formaties op de kruinen van de breukblokken en afzetting van fluviatiele sedimenten vond plaats tijdens de Late Jura. Hierdoor werd een gedeeltelijk discordante grens gevormd tussen de Jura en Krijt afzettingen in het West Nederland Bekken (Den Hartog Jager, 1996).



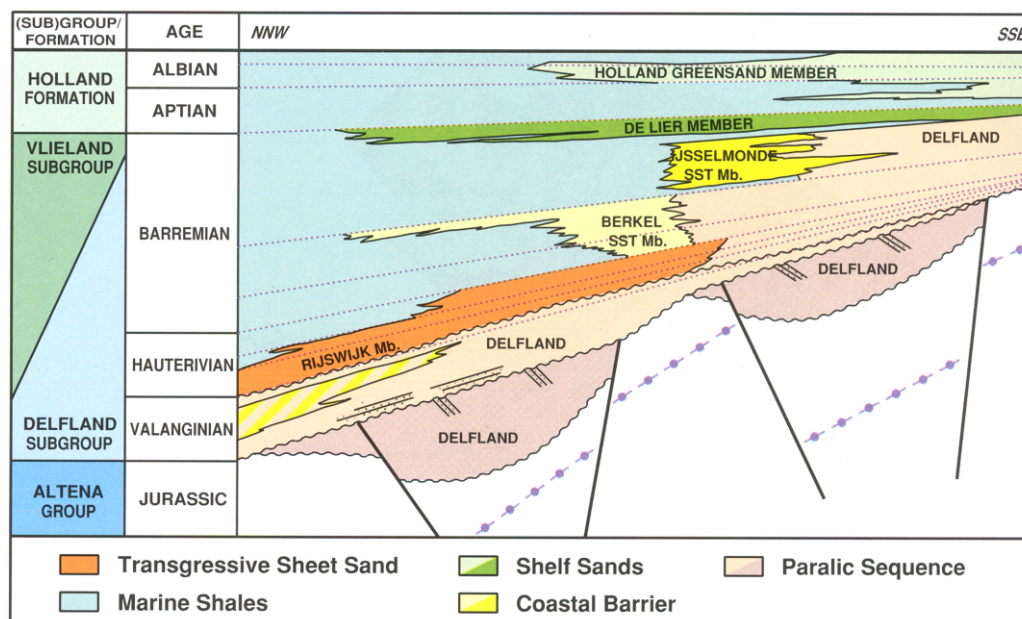
Figuur 3.3. Paleogeografie van West Nederland tijdens het Vroeg Krijt. Lichtgrijze gebieden waren laag, donkergrijze gebieden hooggelegen. Het Moerkapelle veld en enkele andere olie- en gas velden staan aangegeven.



Figuur 3.4 – Verspreiding van de belangrijkste reservoirs van het Onder Krijt in Zuid-Holland. De zwarte lijn geeft de locatie van de profiellijn van Figuur 3.5 aan (naar Racero-Baene & Drake, 1996).

Hierna zette een daling van het gebied in. Een stapsgewijs binnendringen van de zee vanuit het noorden zette een serie transgressieve (dwz tijdens een stijgende zeespiegel afgezette) zanden en kustbarrières af (Fig.3.4 en 3.5). Deze zanden vormen de voornaamste oliereservoirs van het West Nederland Bekken (Racero-Baene & Drake, 1996). Een voortgaande transgressie resulteerde uiteindelijk in vol mariene omstandigheden wat tot afzetting leidde van een dik pakket mariene kleien, gevolgd door een dik kalkpakket, de Ommelanden Chalk.

Het bekken werd weer opgeheven tijdens twee belangrijke fases van opheffing: de Sub-Hercynische en Laramide fases van de Alpiene plooiingsfase tijdens het Laat-Krijt en Tertiair (Van Wijhe, 1987; Gras & Geluk, 1999). Deze periode wordt geassocieerd met reactivatie (hernieuwde werking en omkering van normale breuken, en deformatie als gevolg van zijschuivingen). Deze tektonische omkering is verantwoordelijk voor de vorming van de structuren, waarin de meeste olie en gas accumulaties, die zijn aangetroffen in het West Nederlands Bekken, zijn ingesloten (Racero-Baene & Drake, 1996).



Figuur 3.5 – Stratigrafisch profiel van de Boven Jura en Onder Krijt in het West Nederland Bekken. Voor de locatie van de profiellijn zie Fig. 3.4 (Racero-Baene & Drake, 1996).

### 3.3 Geologisch model Bleiswijk en omstreken

#### 3.3.1 Werkwijze

Het bouwen van een statisch 3D reservoirmodel van Bleiswijk en omgeving is gebeurd met behulp van het softwarepakket Petrel (versie 2004). Voor de invoer zijn gegevens gebruikt van een flink aantal putten rondom Bleiswijk, voornamelijk van de Moerkapelle, Zoetermeer, Berkel en Pijnakker velden (zie Bijlage 1). Ook is een seismische interpretatie van dit gebied gebruikt. De geologische interpretatie van de belangrijkste stratigrafische intervallen, de Rijswijk, Berkel, en Delft Zandsteen, steelt voornamelijk op het herkennen van logpatronen in de gamma-ray, SP, sonic, en neutron-density logs. Gedeeltelijk is de bestaande TNO-interpretatie van de putgegevens overgenomen, maar de stratigrafie van een gedeelte van de putten is in de huidige studie ook herzien. Voorts is de relevante literatuur over de sedimentologie en stratigrafie over dit gebied bestudeerd (Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993; DeVault & Jeremiah, 2002; Den Hartog Jager, 1996; Racero-Baena & Drake, 1996; Alberts et al, 2003).

#### 3.3.2 Seismiek

Voor de kartering van de Onder-Krijt zanden is 3D seismiek uit 1989 van de NAM gebruikt. Het gebied met seismische 3D data is samengesteld uit 2 delen, een seismische dataset van goede kwaliteit in het noorden en een seismische dataset van mindere kwaliteit in het zuiden. De laatste dataset betreft de regio van Bleiswijk. Bijlage 2 laat een ZW-NO lijn uit deze dataset zien over de put Bleiswijk (BLE-01) in de richting van put Moerkapelle-10. Vanwege de matige kwaliteit van de seismische data kunnen de Rijswijk en Berkel zanden helaas niet als aparte zandlagen onderscheiden worden. Daarom zijn de top en de basis van de gehele zandige laag

geïnterpreteerd. Dit betreft de Berkel Zandsteen, het Berkel Zand-Kleisteel laagpakket en de Rijswijk zandsteen.

De omzetting van de seismische tijden naar dieptes is gedaan met een bestaand regionaal snelheidsmodel.

### 3.3.3 *Structurele geologie*

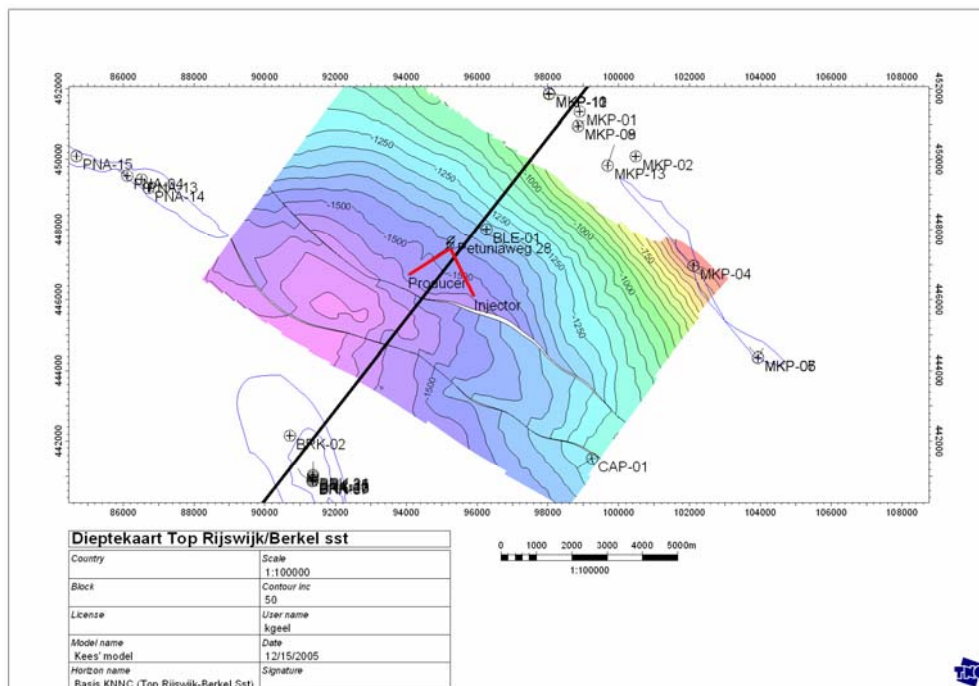
Zoals uit het paragraaf 3.2 al duidelijk werd, is de structurele geologie van het gebied redelijk goed bekend. Ongeveer 4 km ten noordoosten van Bleiswijk ligt het Moerkapelle olieveld. Dit is een ca 700 m diep liggende, langgerekte NW-ZO lopende structuur in de Rijswijk Zandsteen. Vanaf het Moerkapelle veld duikt de Rijswijk Zandsteen naar het zuidwesten met een steeds vlakker wordende hellingshoek (Fig. 3.6, 3.7). Ongeveer 1600 m ten zuidwesten van Petuniaweg 28 bevindt zich een breuk, die een lokale horst ( een hoger gelegen structuur) begrenst. Ten zuidwesten van deze horst wordt de structuur geleidelijk aan weer ondieper, tot aan het Berkel veld, ook weer een ondiepe olie accumulatie.

### 3.3.4 *Bepaling van de locatie van de aardwarmteputten*

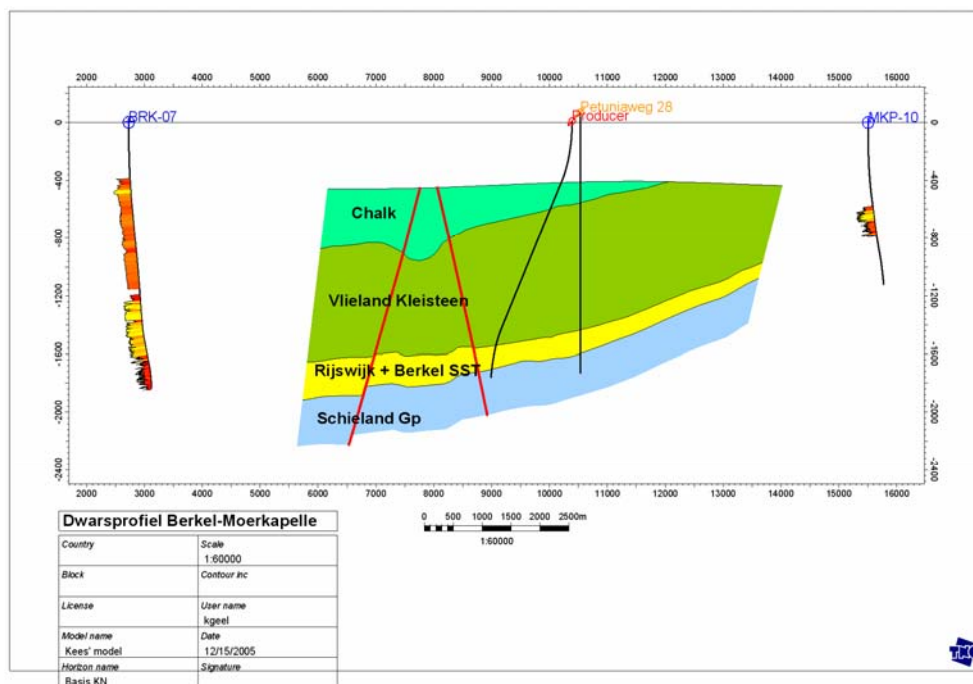
Wanneer we naar Fig. 3.6 en 3.7 kijken, is het duidelijk dat het diepst gelegen voorkomen van de Rijswijk en/of Berkel Zandsteen ten zuidwesten van de Petuniaweg ligt. Om een zo hoog mogelijk rendement te krijgen, moet de watertemperatuur zo hoog mogelijk zijn, en de winningsdiepte dus zo groot mogelijk. Aan de andere kant is het over het algemeen niet verstandig om door een breuk (-zone) heen te boren als het niet absoluut noodzakelijk is. Het advies is om zo'n 500-600 m weg te blijven van de randbreuk van de horst.

Een verdere randvoorwaarde voor het boortraject van de beide putten wordt gevormd door de geometrie van eerdergenoemde breuk. Hij helt richting Bleiswijk (zie Fig. 6), waardoor het laatste, onderste stuk van de boring bijna verticaal geboord moet worden, anders wordt alsnog de breuk geraakt. De hier schuine voorgestelde boringen hebben een step-out van bijna 1500 m, en een totale lengte van ruim 2300 m (gemeten langs het boorgat; =1750 m verticaal, t.o.v. zeeniveau). In het huidige voorstel liggen injector en producer ongeveer 2000 m uit elkaar. Figuur 3.8 en 3.9 geven een 3-dimensionaal beeld van de voorgestelde putten. De boorprognoses en deviatietabellen zijn opgenomen als Bijlage 3.

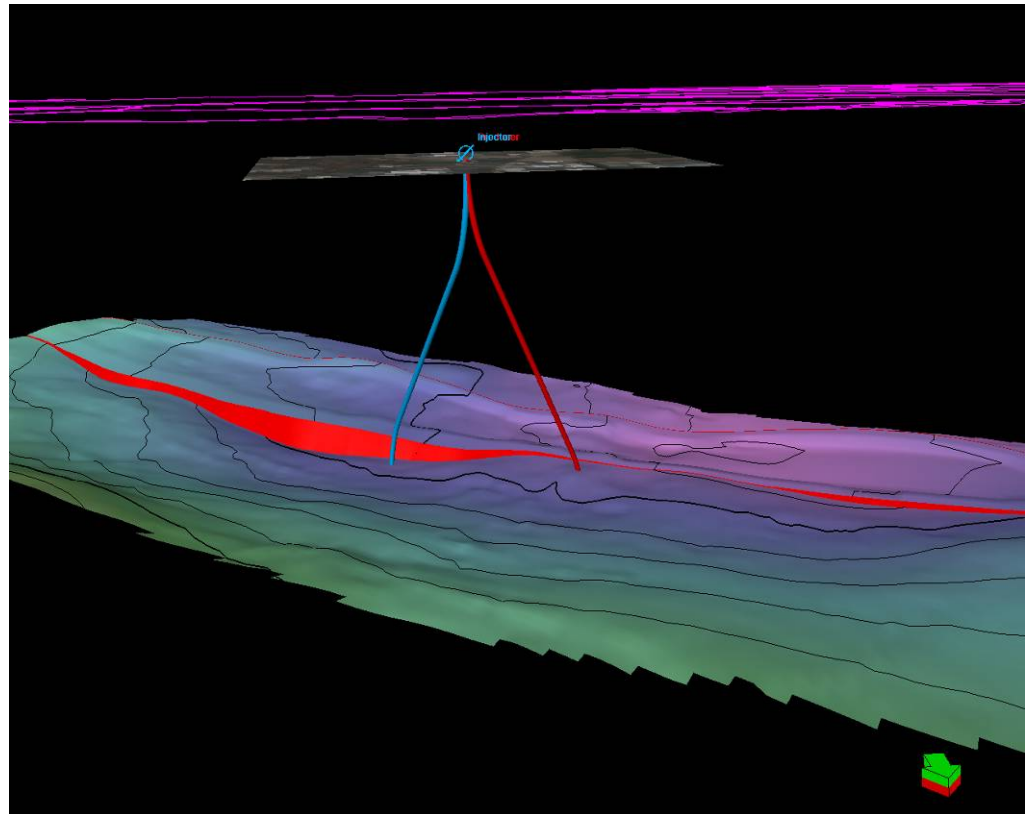




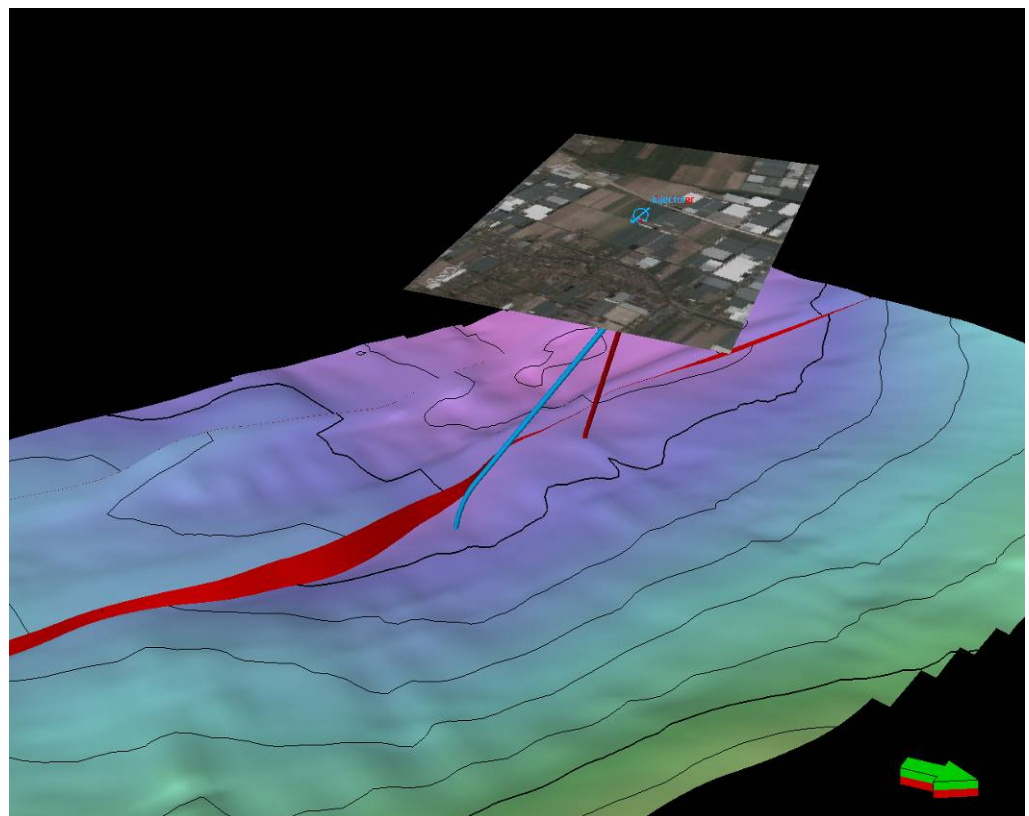
Figuur 3.6 – Dieptekaart van de top van de Rijswijk/Berkel Zandsteen, gebaseerd op interpretatie van 3D seismiek. De zwarte lijn geeft de dwarsdoorsnede van Fig. 3.7 aan.



Figuur 3.6 □ Noordoost – zuidwest lopende dwarsdoorsnede over het Moerkapelle veld, Bleiswijk, en het Berkel veld, gebaseerd op interpretatie van 3D seismiek. Aangegeven staan de Berkel-7 en Moerkapelle-10 putten (met Gamma-ray log), en het voorgestelde –gedevieerde- boortraject voor een producer of injector. Ook is een verticale put onder Petuniaweg aangegeven. Het profiel is 3x overhoogd.



Figuur 3.8 – 3Dmodel van de voorgestelde boortrajecten. Het oppervlak is de top Rijswijk/Berkel Zandsteen. Kijkrichting is naar het zuiden.



Figuur 3.9 – Als Fig. 3.8. Kijkrichting is naar het westen.

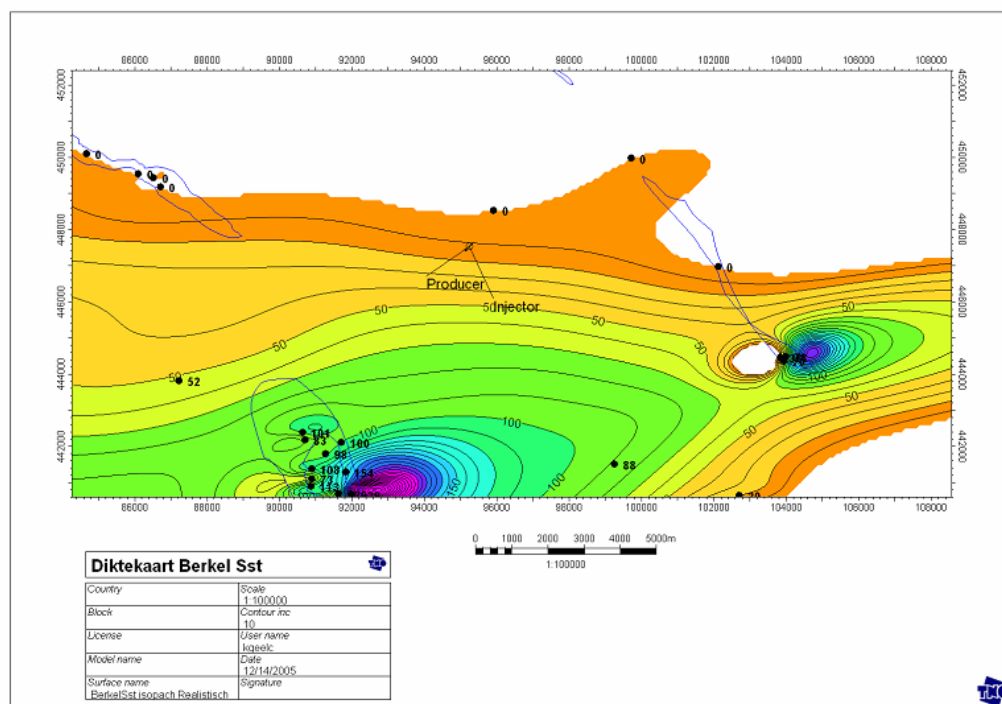
### 3.3.5 Stratigrafie / Sedimentologie

De watervoerende lagen waar deze geothermische studie betrekking op heeft behoren tot de Rijnland Groep (Fig. 3.2 en 3.5), en zijn van Valanginië tot Barremien ouderdom (Onderkrijt, ca 130-140 miljoen jaar oud).

De Berkel en Rijswijk Zandsteen maken deel uit van een serie opeenvolgende kustbarrière systemen, die stapsgewijs steeds verder landinwaarts komen te liggen (Fig.3.4), zgn. transgressieve barrière systemen (Donselaar, 1996). De barrière zanden zelf hebben, met uitzondering van de Rijswijk Zandsteen, maar een beperkte verbreiding (zie Fig. 3.5 en 3.5).

#### Berkel Zandsteen

De Berkel Zandsteen is bestaat uit een langwerpig zandsteenlichaam van 60 x 10 km (Fig. 3.4). Ten noorden van Berkel zijn tijdsequivalente sedimenten volledig marien ontwikkeld; ten zuiden van Berkel zijn het voornamelijk kustvlakteafzettingen, bestaande uit kleien, fluviatiele zandlichamen, en hier en daar koollagen. Bleiswijk ligt volgens Fig. 3.4 min of meer op de noordelijke grens van de Berkel Zandsteen. De precieze grens is echter moeilijk te trekken; op seismiek is, zoals al gezegd het uitwigen niet te zien, en er zijn te weinig boringen om deze grens nauwkeurig te kunnen vastpenen. Figuur 3.10 laat de in de putten gemeten diktes van de Berkel Zandsteen zien, samen met TNO's meest realistische schatting (vergelijk Fig. 3.4).



Figuur 3.10 – Diktekaart van de Berkel Zandsteen met realistische interpolatie parameters.

Bijlage 4A t/m 4D laten mogelijke dikteverdelingen van de Berkel Zandsteen zien op basis van dezelfde metingen, maar met een andere interpolatiemethode en/of andere geologische input. In Bijlage 4A is het 'convergente gridding' algoritme gebruikt; hier zit verder geen geologische kennis in. De contourkaart van Bijlage 4B is gemaakt door een paraboloïde te fitten aan de data, met daarbij een anisotropiefactor van 2.2 in de richting 80°, dus oost. Op deze manier komt de – verwachte- lineaire vorm van de kustbarrière er duidelijker uit. Bijlage 4C is een variatie van Bijlage 4B; hierbij is een

extra meting van 0 m in de buurt van Bleiswijk gepostuleerd. Dit kan beschouwd worden als een realistisch scenario. Deze kaart is dan ook zichtbaar als figuur 3.10. Bijlage 4D ten slotte laat een pessimistisch scenario zien, waarbij de Berkel Zandsteen dikte recht onder Bleiswijk op 0 wordt gesteld.

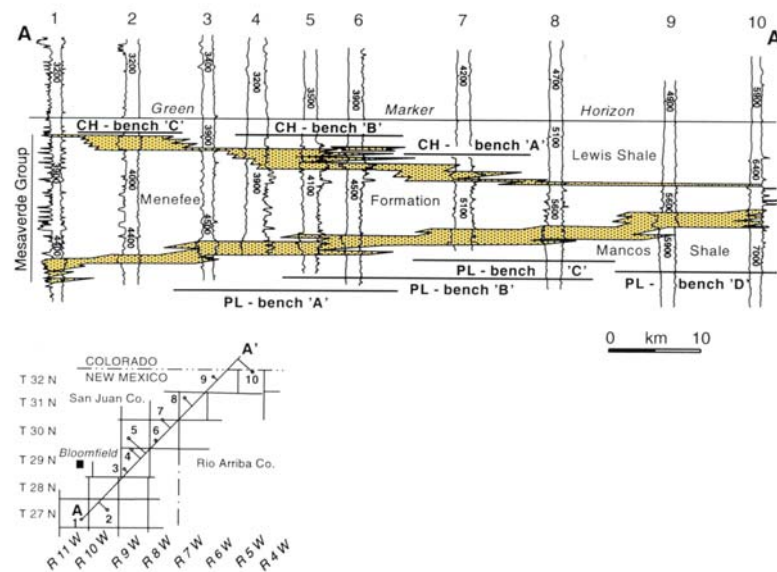
Voor de dikte van de Berkel zandsteen zoals die in de twee voorgestelde putten (zie sectie 3.3.4) aangetroffen gaat worden, maakt de interpolatie methode en de plaatsing van de nulgrens nogal wat uit. Volgens de ‘objectieve’ methode (Bijlage 4A), zal de Berkel dikte 86, resp. 102 m bedragen. Het qua geologie realistisch scenario van Bijlage 4B levert 45, resp. 55 m op. Het derde, nog realistisch scenario (Bijlage 4C) levert diktes van 32 en 45 m op en het pessimistische scenario (Bijlage 4D) levert altijd nog diktes van 12 en 25 m op. Tabel 3.1 laat deze waardes nog eens goed zien. Deze resultaten zijn gebruikt in de dikteverdeling tijdens de risicoanalyse berekeningen ( hoofdstuk 5).

Tabel 3.1 Verwachte diktes van de Berkel zandsteen in de twee Bleiswijk putten bij verschillende geologische scenario's

Naam	data	Berkel sst dikte in put 1	Berkel sst dikte in put 2
‘Schijnbaar objectief’	Alleen gemeten data	86	102
‘Optimistisch’	Alleen gemeten data+ geol. voorkennis	45	55
‘Realistisch’	Gemeten data + geol. voorkennis een extra 0 m punt	32	45
‘Pessimistisch’	Gemeten data + geol. voorkennis een extra 0 m punt	12	25

### Rijswijk zandsteen

Over het dikteverloop van de Rijswijk Zandsteen is in principe minder onzekerheid dan dat van de Berkel Zandsteen, aangezien de Rijswijk Zandsteen een veel groter verspreidingsgebied heeft (zie Fig. 3.4). Ook is de diktevariatie veel minder dan bij de Berkel Zandsteen. Niettemin treden ook hier dikteverschillen op. In het naburige Zoetermeer olieveld bijvoorbeeld, is de Rijswijk Zandsteen volledig afwezig in het oostelijke gedeelte van het veld. Dit kan gemakkelijk verklaard worden uit het feit dat de Rijswijk Zandsteen is afgezet als een transgressief kustbarrière systeem, dus met een rijzende zeespiegel. Dit soort afzettingen bestaat vaak uit plaatselijk dikke zandsteenlagen (‘benches’) van zo'n 20-50 m die met elkaar verbonden worden door dunnere zandsteenlagen. Een goed gedocumenteerd voorbeeld is de Cliff House Sandstone (Fig.3.11), die in New Mexico (USA) is ontsloten (Donselaar, 1996).



Figuur 3.11 – Profiel door de Cliff House Sandstone(CH) in New Mexico loodrecht op de toenmalige kustlijn. De zeer onregelmatige dikteverdeling is typisch voor een transgressieve barrière sequentie (naar Donselaar, 1996).

Bijlage 5 laat een correlatiediagram zien tussen een aantal putten die in de buurt van Bleiswijk liggen. Hierop is voor iedere put de zand/klei verdeling aangegeven, die is afgeleid uit boorgatmetingen (logs). Het is duidelijk dat er diktevariaties in de Rijswijk Zandsteen zitten, en dat er niet altijd sprake is van één Rijswijk Zandsteen, maar dat hij uit een aantal verschillende zandsteenlagen kan bestaan (vgl. Fig. 3.11).

Rekening houdend met deze interpretatie, zijn er een aantal contourkaarten gemaakt voor de dikte van de Rijswijk Zandsteen, steeds met een ander contouralgoritme. Bijlage 6 laat een representatief voorbeeld zien. Tabel 3.2 somt de verschillende algoritmes met de uitkomsten voor de diktes in de twee putten op. Behalve de ‘minimum curvature’ methode, die het nul-meter-gebied bij Zoetermeer tot in Bleiswijk doortrekt, leveren de andere interpolatie algoritmes een tamelijk consistent beeld op; een gemiddelde Rijswijk Zandsteen dikte van zo’n 30-35 m. Ook deze resultaten zijn gebruikt in de dikteverdeling tijdens de risicoanalyse berekeningen ( hoofdstuk 5).

Tabel 3.1 Verwachte diktes van de Rijswijk Zandsteen in de twee Bleiswijk putten bij verschillende contouring algoritmes

Interpolatie algoritme	Rijswijk sst dikte in put 1	Rijswijk sst dikte in put 2
Convergent gridding	38	38
Closest Point Smoothed	35	27
Bilinear Fit met anisotropie	54	35
Moving Average met anisotropie	32	32
Isochore	38	38
Moving Average	37	37
Minimum Curvature	0	7

#### Berkel Zand-Kleisteel

In een klein deel van Zuid-Holland ligt tussen de Rijswijk Zandsteen en de Berkel Zandsteen een kleirijk pakket, de zgn. Berkel Zand-Kleisteel. In het Berkel olieveld, evenals in de boring Capelle-01, is de Berkel Zand-Kleisteel zeer zandig ontwikkeld en zou het pakket een goede watervoerende laag zijn. Zoals in Fig.3.2 al op te maken is, is dit laagpakket echter nóg minder wijd verspreid dan de Berkel Zandsteen. Mocht de Berkel Zand-Kleisteel in Bleiswijk überhaupt al aanwezig zijn, dan is de verwachting dat hij zó fijnkorrelig is, dat de permeabiliteit zeer laag zal zijn. Om deze reden is dit laagpakket hier verder niet meegenomen.

#### Delft Zandsteen

Aan het begin van de onderhavige studie leek de Delft Zandsteen een goede kandidaat te zijn, maar een blik op het correlatieprofiel (Bijlage 5) laat zien dat de Delft Zandsteen voornamelijk ten westen van Bleiswijk goed ontwikkeld is (Leidschendam-1 en Zoetermeer-2). Ten oosten zijn er wel zandsteenlichamen aangeboord, maar dit zijn zeer lokaal voorkomende zanden. Het betreft zandstenen van de Nieuwerkerk Formatie, die als riviergeulopvullingen voorkomen. Dit zijn, behalve uitzonderingen als de Delft Zandsteen, uitermate smalle gesteentegordels (in de orde van enkele honderden meters breed). Deze rivieren stroomden globaal van zuidoost naar noordwest. Aangezien de voorgestelde putconfiguratie vrijwel haaks staat op de vroegere rivierstroomrichting, is de kans zeer groot dat de twee putten verschillende zandsteenlagen aanboren, en dat ze dus geen verbinding met elkaar hebben. Om bovengenoemde redenen zijn de Delft Zandsteen en laterale equivalenten dus verder buiten beschouwing gelaten.

## 4 Petrofysica

Relevante reservoir-eigenschappen zoals het kleigehalte, de porositeit en de permeabiliteit, kunnen niet rechtstreeks in boorgaten worden gemeten. Bij een petrofysische evaluatie berekent men reservoir (gesteente)-eigenschappen uit boorgatmetingen (logs) en kernpluganalyses.

Het kleigehalte wordt vaak bepaald op basis van de gamma ray log. De porositeit wordt berekend op basis van boorgatmetingen zoals de density-log en de neutron-log. Als ijking gebruikt men de porositeit die direct aan zogenaamde plugs van getrokken boorkernen uit de betreffende reservoir-formatie gemeten wordt. Om vergelijking met de boorgatmeting, die immers onder reservoircondities plaatsvindt, mogelijk te maken dienen de in het laboratorium gemeten plug-porositeiten gecorrigeerd te worden naar reservoircondities. Naast de porositeit meet men bij kernpluganalyses ook de permeabiliteit. Uit de porositeit- en permeabiliteitsmetingen aan de kernplugs wordt een zgn. poro-perm-relatie afgeleid. Deze poro-perm-relatie wordt gebruikt om de reservoirporositeit, die is afgeleid uit de porositeitslogs, te vertalen naar een reservoirpermeabiliteit.

In het kader van dit onderzoek zijn petrofysische evaluaties van een aantal boringen in de directe omgeving van Bleiswijk uitgevoerd. In deze boringen zijn de watervoerende trajecten van de Berkel Zandsteen, de Delfland Zandsteen, de IJsselmonde Zandsteen en de Rijswijk Zandsteen onderzocht. Achtereenvolgens komen de putselectie en de beschikbare data, de resultaten van de petrofysische evaluatie (kleigehalte, reservoirporositeit en permeabiliteit) en de afgeleide reservoirtemperatuur-functie voor de regio Bleiswijk aan de orde.

### 4.1 Putselectie en beschikbare data

Voor de studie is een aantal putten geselecteerd waarvan de data benodigd zijn voor een adequate beschrijving van de eigenschappen van de watervoerende lagen. In het te onderzoeken gebied, (de directe omgeving van Bleiswijk) zijn weinig recente boringen beschikbaar. Bij een petrofysische evaluatie is het van belang welke logs (boorgatmetingen) er beschikbaar zijn, en of er gebruik gemaakt kan worden van kernanalyses. Vele boringen zijn van voor 1980 en zijn zeer summier gelogd. Vanwege de beperkt beschikbare data, zijn alle boringen met beschikbare digitale data gebruikt die in de (verre) omgeving van de beoogde locatie in Bleiswijk liggen. Van een aantal boringen waarin logs gemeten zijn, beschikken we vaak niet over de digitale versie van deze metingen, maar alleen over de analoge versie. Van deze boringen is er een selectie gemaakt om het beperkte reservoirtraject digitaal beschikbaar te krijgen. Voor deze boringen is, zover beschikbaar, de gamma ray-, de sonic-, de neutron- en de densitylog, over het van belang geachte traject gedigitiseerd.

De 28 geselecteerde en gebruikte putten staan vermeld in tabel 4.1, zie figuur 4.1. Van deze boringen is een beperkte petrofysische evaluatie gemaakt: een kleigehaltecurve (VCL), een porositeitscurve (PIGN), en een permeabiliteitscurve (Kint). Voor een beperkt aantal boringen met digitale weerstandslogs is ook een saturatiecurve (SUWI) geproduceerd (van belang voor een koolwaterstof interpretatie, maar in dit onderzoek minder relevant). Er zijn voor het verkrijgen van gemiddelden reservoirsommities

uitgevoerd voor de Berkel Zandsteen (BZ), de IJsselmonde Zandsteen (IJZ) en de Rijswijk Zandsteen (RZ).

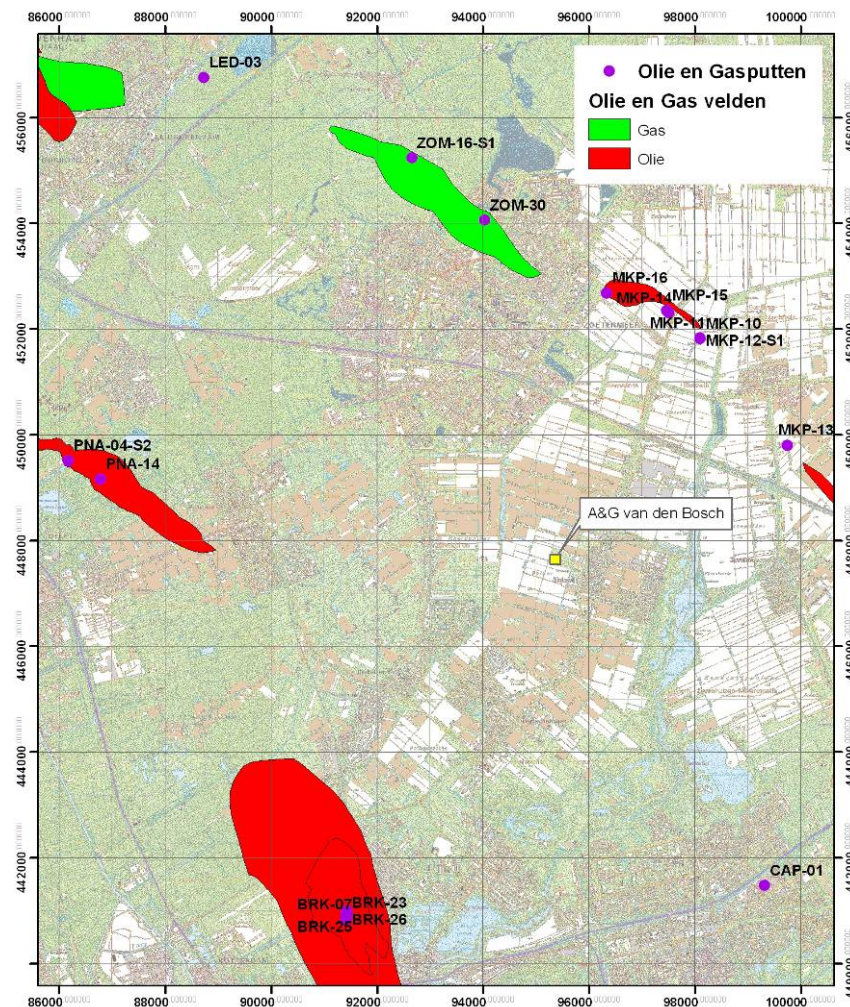
Tabel 4.1 Geselecteerde putten (\* diepte gecorrigeerd voor de deviatie in de boring)

Boring	Put-ID	Totale Diente	Evaluatie	Reservoir-sommatie
		[ vert. diepte tov NAP*]		
BRK-07	1142	1867.16	VCL PIGN SUWI	BZ RZ
BRK-16-S1	3744	1284.01	VCL PIGN SUWI	BZ
BRK-21-S1	3733	1296.53	VCL PIGN SUWI	BZ
BRK-23	2739	1294.26	VCL PIGN SUWI	BZ
BRK-25	3742	1302.49	VCL PIGN SUWI	BZ
BRK-26	3866	1237.88	VCL PIGN SUWI	BZ
CAP-01	2571	3620.60	VCL PIGN	BZ RZ
IJS-12-S2	2750	1053.96	VCL PIGN SUWI	IJZ
IJS-30-S1	3745	1079.85	VCL PIGN SUWI	IJZ
IJS-36-S2	2688	1068.83	VCL PIGN SUWI	IJZ
IJS-36-S3	2727	1551.82	VCL PIGN SUWI	IJZ
IJS-44-S3	2721	1074.45	VCL PIGN SUWI	IJZ
IJS-46-S1	2751	1071.35	VCL PIGN SUWI	IJZ
IJS-52-S1	2608	1102.85	VCL PIGN SUWI	IJZ
IJS-67	2766	1348.84	VCL PIGN SUWI	IJZ
LED-03	1494	1168.65	VCL PIGN SUWI	RZ
MKP-10	1625	1120.78	VCL PIGN	RZ
MKP-11	1626	989.29	VCL PIGN	RZ
MKP-12-S1	2716	891.60	VCL PIGN	RZ
MKP-13	1628	1101.50	VCL PIGN	RZ
MKP-14	2493	2688.49	VCL PIGN	RZ
MKP-15	2447	1051.81	VCL PIGN	RZ
MKP-16	2450	1468.07	VCL PIGN	RZ
PNA-04-S2	2717	1883.32	VCL PIGN	RZ
PNA-14	2577	1856.29	VCL PIGN	RZ
PNA-15	3951	1896.04	VCL PIGN SUWI	RZ
ZOM-16-S1	2736	1202.87	VCL PIGN	RZ
ZOM-30	2321	1279.98	VCL PIGN	RZ

In de meeste boringen was voor de beoogde zandsteentrajecten na de extra digitisatie een goede set logs beschikbaar. Naast de gamma ray log waren de density log en de neutron log beschikbaar als porositeitslogs. In een tweetal boringen was alleen de densitylog als porositeitslog beschikbaar.

Er zijn in het geheel geen kernanalyses beschikbaar in de voor de evaluatie geselecteerde boringen, ter ijkning van de resultaten. Er zijn wel kernanalyses in een tweetal andere boringen, die in de directe omgeving liggen, beschikbaar. Het betreft de boring Berkel-3 (BRK-03) voor de Berkel Zandsteen, en de boring Pijnacker-2 (PNA-02) voor de Rijswijk Zandsteen. In deze twee boringen zijn er echter geen porositeitslogs beschikbaar.

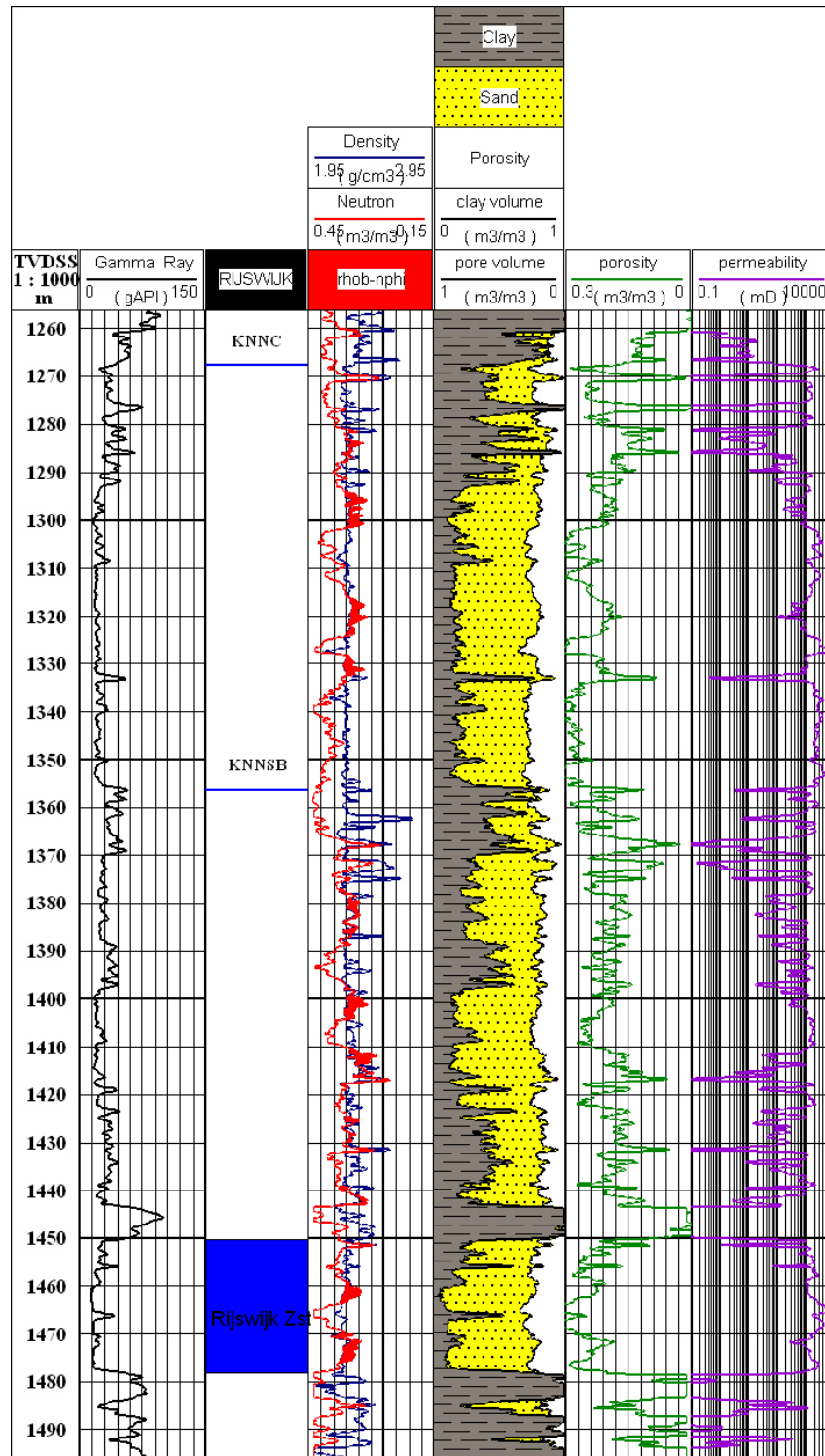




Figuur 4.1 – Locatie van de boringen, gebruikt in de petrofysische analyse

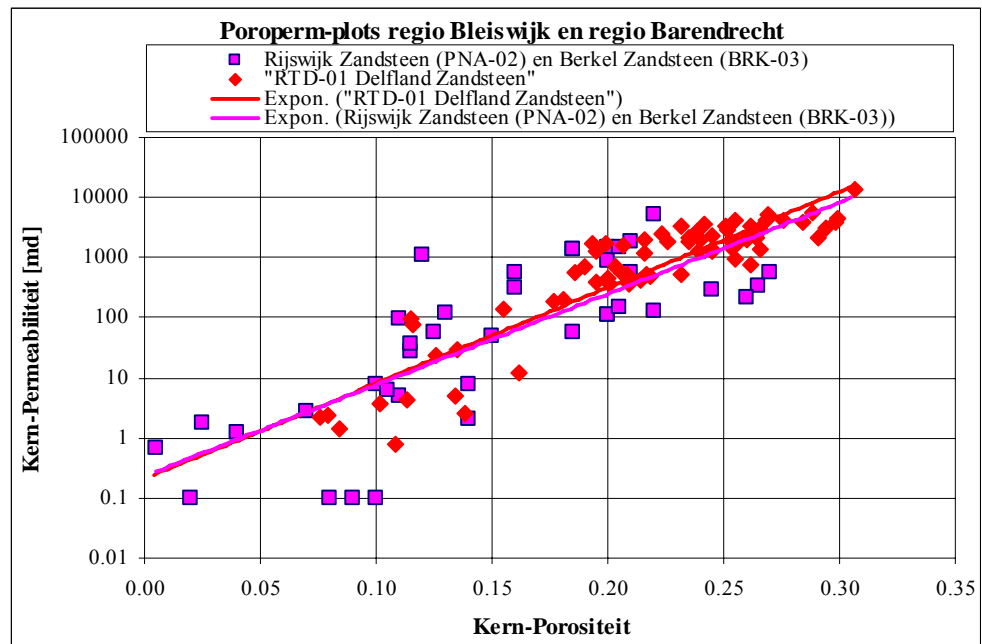
## 4.2 Petrofysische evaluatie - porositeit en permeabiliteit

Uit de density- en neutronlogs zijn porositeitscurves (PIGN) afgeleid voor de zandstentrajecten in de geselecteerde boringen. Hierbij zijn eerst per boring de constanten, die benodigd zijn in de toegepaste empirische formules, bepaald. Daarnaast zijn op een soortgelijke wijze ook het kleigehalte (VCL) (en deels de saturatie (SUWI)) empirisch bepaald uit andere logs. Dit resulteert in een continu porositeit- en kleigehalte-verloop over het diepte interval, waarmee ook een indruk ontstaat over de gevarieerdheid (heterogeniteit) van de Zandsteen. In figuur 4.2 wordt een voorbeeld gegeven van de porositeit- en kleigehaltevariatie over het interval van bovenkant Berkel Zandsteen (1267 m) tot onderkant Rijswijk Zandsteen (1480m) in de put CAP-01, een dergelijk 4 km ten zuidoosten van Bleiswijk.



Figuur 4.2 – Resultaat van de petrofysische evaluatie voor boring CAP-01. De gebruikte logs staan links. De resulterende porositeit log staat in groen weergegeven: hoe meer de curve links ligt, des te hoger is de porositeit. De porositeit staat gecombineerd met de zand-klei verdeling ook in de middelste geel/grijs/witte grafiek. Het witte deel (fractie) is de porositeit, het gele deel is zandsteen en het grijze deel is kleisteen. De afgeleide permeabiliteit staat in de paarse curve, rechts.

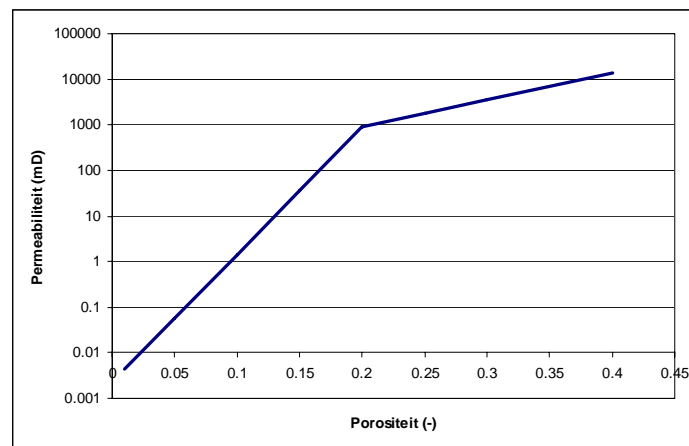
Voor de berekening van de permeabiliteit uit de logporositeit wordt de poro-perm-relatie van beschikbare kerndata gebruikt. Zoals eerder vermeld zijn er echter slechts zeer beperkt kernanalyses beschikbaar in de Bleiswijk regio. Uit analyse van deze data en van data uit de boring Rotterdam-01, die zijn gebruikt in een eerdere studie (Ramaekers, 2003), blijkt echter dat de poro-perm-relaties van beide datasets sterk overeenkomen. In figuur 4.3 worden de poro-permdata voor de Bleiswijk regio (Rijswijk Zandsteen in PNA-02 en Berkel Zandsteen in BRK-03) en de regio Barendrecht (RTD-01, Delfland Zandsteen) in een plaatje weergegeven. Het blijkt dat de kleinste regressie-lijnen van beide datasets min of meer samenvallen. Wel vertonen de Rijswijk Zandsteen (en Berkel Zandsteen) data in de regio Bleiswijk een grotere spreiding dan de Delfland Zandsteen data in Barendrecht (RTD-01).



Figuur 4.3 – Poro-perm relaties van de beschikbare kerndata in de twee boringen in de Bleiswijk regio (voornamelijk Rijswijk Zandsteen), samen met poro-perm-data in de boring RTD-01 voor de Delfland Zandsteen (regio Barendrecht).

Het min of meer samenvallen van de poro-perm-regressielijnen, leidt tot het gebruik van de, in de eerdere studie reeds afgeleide, poro-perm-relatie voor alle beschouwde zandstenen in de regio Bleiswijk, nl. de Berkel Zandsteen, de IJsselmonde Zandsteen, en de Rijswijk Zandsteen. Wanneer voor de permeabiliteit een logaritmische schaal worden genomen is poro-perm-relatie semi-lineair, met een knik bij een porositeit van 20% (figuur 4.4), waardoor de permeabiliteit voor hogere porositeit niet wordt overschat en bij lagere waarden niet wordt onderschat. De curve kan als volgt worden uitgedrukt:

	Phie ≤ 20%	Phie > 20%
Khor [mD]	$10^{\{(0.28 * \text{phie}) - 2.65\}}$	$10^{\{(0.06 * \text{phie}) + 1.75\}}$



Figuur 4.4 –De in deze studie gebruikte semi-log-lineaire poro-perm relatie.

Met behulp van deze relatie zijn de porositeit-logs omgerekend naar permeabiliteit. De permeabiliteit staat afgebeeld in figuur 4.2 in de rechter (paarse) curve. Ook deze curve maakt duidelijk dat binnen de zandsteenpakketten veel variatie in permeabiliteit aanwezig is.

Na de log evaluatie zijn per boring gemiddeldes van de porositeit, permeabiliteit en de netto/bruto (Net/Gross= n/g) zandsteenverhouding bepaald voor de zandsteen trajecten. Voor de Rijswijk en Berkel Zandsteen zijn deze weergegeven in de tabellen 4.2 en 4.3.

Tabel 4.2 Gemiddelde parameterwaardes voor de Berkel Zandsteen per boring

Reservoirsommatie	Top	Bottom	Gross	Net	n/g	Porositeit	Klei gehalte	permeabiliteit
Borehole	m,tvdnap	m,tvdnap	[m]	[m]				[mD]
BERKEL-07	1235.24	1472.00	255.15	218.93	0.858	0.194	0.172	402.1
BERKEL-16-S1 [*]	1187.82	1269.96	79.42	66.54	0.838	0.202	0.140	543.4
BERKEL-21-S1 [*]	1202.02	1277.11	78.08	64.26	0.823	0.241	0.177	1445.9
BERKEL-23 [*]	1196.16	1284.02	82.08	74.82	0.912	0.210	0.153	709.4
BERKEL-25 [*]	1203.79	1292.75	88.98	74.12	0.833	0.201	0.150	513.0
BERKEL-26 [*]	1203.57	1239.09	21.74	18.72	0.861	0.175	0.229	156.7
CAPELLE-01	1267.67	1356.17	88.35	76.27	0.863	0.244	0.238	1346.5

[\*] Berkel Zandsteen traject niet volledig (doorboord/gelogd)

Tabel 4.3 Gemiddelde parameterwaarden voor de Rijswijk Zandsteen per boring

Reservoirsommatie	Top	Bottom	Gross	Net	n/g	Poro siteit	Klei gehalte	permeabiliteit
Borehole	m,tvdnap	m,tvdnap	[m]	[m]				[mD]
BERKEL-07	1542.18	1607.18	76.59	52.40	0.684	0.172	0.239	122.8
CAPELLE-01	1450.17	1478.17	27.96	26.57	0.950	0.251	0.171	1602.2
LEIDSCHENDAM-03 [*]	1151.67	1166.65	13.13	11.34	0.863	0.197	0.127	424.8
MOERKAPELLE-10	605.85	616.85	12.43	10.04	0.808	0.235	0.237	1137.2
MOERKAPELLE-11	738.91	754.13	12.93	4.03	0.312	0.168	0.362	115.7
MOERKAPELLE-12-S1	737.56	767.78	27.85	21.47	0.771	0.214	0.235	471.9
MOERKAPELLE-13	803.65	808.06	5.79	geen data	geen data	geen data	geen data	geen data
MOERKAPELLE-14	751.51	774.11	21.66	geen data	geen data	geen data	geen data	geen data
MOERKAPELLE-15	858.84	873.49	12.13	10.00	0.824	0.168	0.198	91.9
MOERKAPELLE-16	829.42	853.33	22.50	13.26	0.589	0.165	0.219	72.4
PIJNACKER-04-S2	1776.65	1852.94	66.75	52.68	0.789	0.143	0.166	23.8
PIJNACKER-14	1748.27	1769.44	21.29	12.12	0.569	0.150	0.181	39.0
PIJNACKER-15	1776.49	1841.53	61.01	45.49	0.746	0.156	0.166	53.2
ZOETERMEER-16-S1	1148.95	1185.71	32.94	29.16	0.885	0.167	0.173	95.4
ZOETERMEER-30	1020.53	1043.66	26.94	geen data	geen data	geen data	geen data	geen data

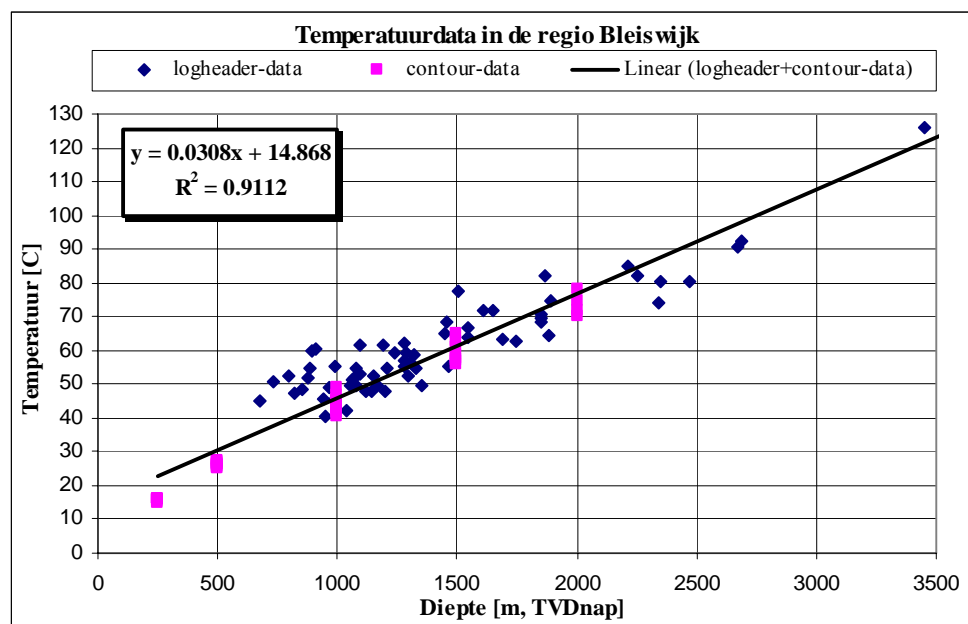
[\*] Rijswijk Zandsteen traject niet volledig doorboord/gelogd)

### 4.3 Temperatuurdata

Voor de toepassing van aardwarmtewinning is het van groot belang te weten welke temperatuur het op te pompen formatiewater heeft, omdat dit mede de potentiële warmteproductie bepaalt. De temperatuurgradiënt (temperatuurverloop in de diepte) is vanwege de geologische variatie in ruimte en tijd niet overal gelijk. Daarom volstaat het niet om een algemeen geldende gradiënt van ong. 3 ° per 100 m aan te houden, maar moeten de temperatuur worden afgeleid uit data uit de directe omgeving. Hiertoe zijn de temperatuurdata uit de beschikbare boringen geanalyseerd en gecombineerd met een eerder uitgevoerde temperatuurinterpretatie.

In een groot aantal boringen zijn voor verschillende dieptes Bottom Hole Temperatuur (BHT) beschikbaar, gemeten tijdens boorgatmetingen. Hieruit is voor een bepaalde diepte een evenwichtstemperatuur  $T_{\text{corr}}$  af te leiden. Voor een aantal putten in de regio Bleiswijk zijn er geïnterpreteerde ‘contour’ data beschikbaar op diepten 500, 1000 en 1500m (Ramaekers, 1991).

Figuur 4.5 toont de gecorrigeerde temperatuur data uit logs van alle boringen, samen met de beschikbare geïnterpreteerde data.



Figuur 4.5 –Temperatuur afkomstig uit verschillende bronnen uitgezet tegen de diepte, met een kleinste kwadraten-regressielijn.

De kleinste-kwadraten-lijn van al deze temperatuurdata samen levert een lineaire temperatuurfunctie  $T = 0.0308 \cdot D + 14.9$  op, met T in °C en de diepte D in meters [m, TVD-NAP]

Reservoirdiepte D =	1000m	1100m	1200m	1300m	1400m	1500m	1600m	1700m
Temperatuur °C								
$T = 0.0308 \cdot D + 14.868$	45.7	48.7	51.8	54.9	58.0	61.1	64.1	67.2

#### 4.4 Samenvatting

Samenvattend zijn de volgende gegevens afgeleid voor de Regio Bleiswijk:

De grosso-modo gemiddelden voor de Berkel Zandsteen bedragen:

- De bruto zandsteendikte  $99 \pm 73\text{m}$
- De netto-zandsteendikte  $85 \pm 62\text{m}$
- De netto-bruto-verhouding  $0.86 \pm 0.03$
- De porositeit  $0.21 \pm 0.03$
- Het kleigehalte  $0.18 \pm 0.04$
- De permeabiliteit  $731 \pm 485 \text{ mD}$

Voor de Rijswijk Zandsteen zijn de volgende gemiddelden te geven:

- De bruto-zandsteendikte  $32 \pm 23\text{m}$
- De netto-zandsteendikte  $25 \pm 19\text{m}$
- De netto-bruto-verhouding  $0.73 \pm 0.17\text{m}$
- De porositeit  $0.18 \pm 0.03$

- Het kleigehalte  $0.21 \pm 0.06$
- De permeabiliteit  $354 \pm 506$  mD

Het zoutgehalte van het formatiewater van de Berkel en Rijswijk Zandsteen is 68 ppk (68.000 ppm), afgeleid uit weerstandslogs.

De temperatuur op reservoirdiepten van de Berkel en Rijswijk Zandsteen kan weergegeven worden met de functie:

$$T [^{\circ}\text{C}] = 0.0308 * D [\text{m, TVD-NAP}] + 14.868$$

## 5 Risicoanalyse van warmteproductie, levensduur en benodigd pompvermogen van een geothermisch doublet

### 5.1 Inleiding en aannames

De resultaten uit de petrofysische analyse en het geologische model zijn gebruikt om met behulp van eenvoudige analytische berekeningen een indicatie te geven van de dimensie van het te realiseren geothermisch doublet. De berekeningen geven indicaties van:

- de mogelijke warmteproductie (WP),
- de levensduur (LD) van het doublet,
- de optredende drukveranderingen (DP) aan zowel de productie- als de injectiekant, als gevolg van het oppompen, respectievelijk het injecteren van het water; inclusief drukveranderingen door de wrijving in de leidingen.
- het benodigde pompvermogen (PV) voor de productie- en injectie put
- de zogenaamde coefficient of performance (COP, de ratio van de opbrengst (WP) en benodigde pompvermogen (PV)).

Vanwege de onzekerheden (de bandbreedtes) in het geologische model en de petrofysische analyse zijn zogenaamde risicoanalyseberekeningen uitgevoerd met behulp van de software '@RISK'. Hiermee is niet 1 uitkomst voor bijvoorbeeld de te verwachten warmteproductie berekend, maar is de waarschijnlijkheid (de kansverdeling) van bovengenoemde uitkomsten (PV, LD, DP, PV en COP) berekend aan de hand van de onzekerheidsmarges van de invoergegevens, die volgen uit het geologisch onderzoek. Hierbij zijn verschillende invoer scenario's doorgerekend.

In Bijlage 7 wordt de theoretische onderbouwing van de berekeningen gegeven. Hieronder wordt een overzicht gegeven van de gebruikte aannames in de berekeningen.

- De berekeningen beschrijven een stationaire situatie (geen tijdsafhankelijkheid)
- De diktes, porositeit en permeabiliteit variëren niet in ruimtelijke zin en zijn constant voor de afzonderlijke watervoerende lagen (afgezien van de waarschijnlijkheidsverdeling).
- Diepte varieert niet in ruimtelijke zin, de top van de 2 zandsteenpakketten (seismisch bepaald) wordt aangehouden. De diepte van de productie put en de injectieput zijn gelijk en constant (afgezien van de waarschijnlijkheidsverdeling)
- De netto/bruto zandsteenverhouding van de Rijswijk Zandsteen is 0.73; De netto/bruto zandsteenverhouding van de Berkel Zandsteen is 0.86; Hierdoor is de netto zandsteendikte van de watervoerende lagen dus relatief lager.
- Afstand tussen de productie en injectie put 2000 m
- De berekeningen van drukval/druktoename aan de productie- en injectiekant zijn onafhankelijk uitgevoerd, er is dus geen sprake van een wederzijdse invloedssfeer.
- Diameter van de leidingen in de putten is 7 inch ( i.v.m. wrijvingsverliezen).
- Het drukverlies veroorzaakt in het bovengrondse systeem is niet meegenomen in de berekeningen.
- Het temperatuurverlies dat op kan treden in de leidingen ( afhankelijk van de isolatie van de putwand e.d.) is niet meegenomen in de berekeningen.
- De temperatuur van het ge-herinjecteerde water is 25 °C.



- De viscositeit van het water is afhankelijk van temperatuur, druk en saliniteit van het formatiewater.
- Eventuele zgn. skin effecten zijn verwaarloosd.
- Het pompendement is 0.6.

In dit hoofdstuk wordt allereerst ingegaan op de gebruikte waarschijnlijkheidsverdelingen van de invoergegevens en wordt de waarde van de uitkomsten toegelicht, waarna de resultaten van de verschillende scenario's worden besproken.

## 5.2 Risico analyse- de principes

Bij een risicoanalyse berekening wordt in een analytische formule (bijvoorbeeld het berekenen van de warmteproductie) een of meerdere invoer variabelen uitgedrukt in een waarschijnlijkheidsverdeling en wordt de berekening honderd- tot x-duizend maal uitgevoerd, waarbij telkens een trekking van de variabele(n) wordt gedaan uit de opgegeven verdeling(en). Dit wordt een MonteCarlo simulatie genoemd. Het resultaat is een verdeling van mogelijke uitkomsten, waarbij een indruk wordt verkregen wat de uitkomst kan zijn en wat de waarschijnlijkheid is dat een bepaalde uitkomst zich voordoet.

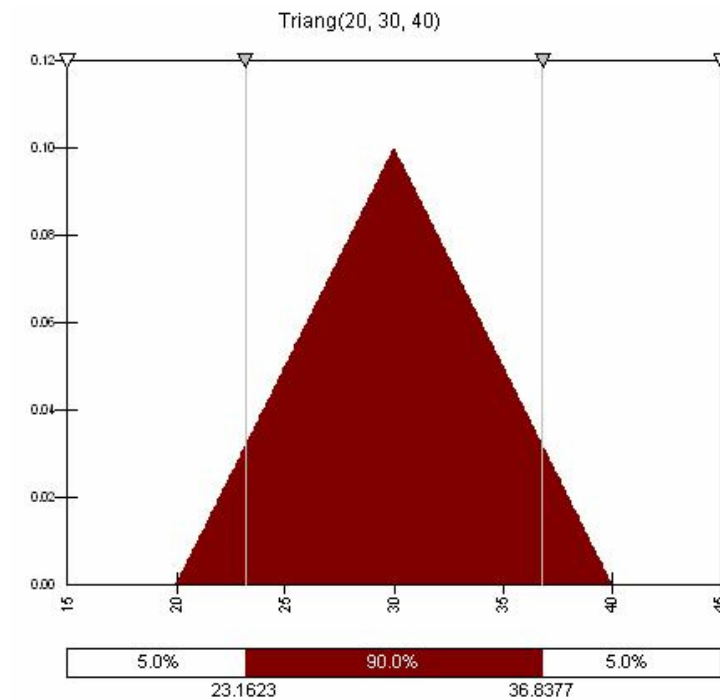
### 5.2.1 *Invoer*

In de berekeningen van de PV, LD, DP, PV en COP zijn de volgende invoergegevens als onzekere variabelen gebruikt:

- Dikte van de Rijswijk Zandsteen,
- Dikte van de Berkel Zandsteen,
- Porositeit van de Rijswijk Zandsteen,
- Porositeit van de Berkel Zandsteen
- Diepteligging van de watervoerende lagen

#### *Dikte en diepte*

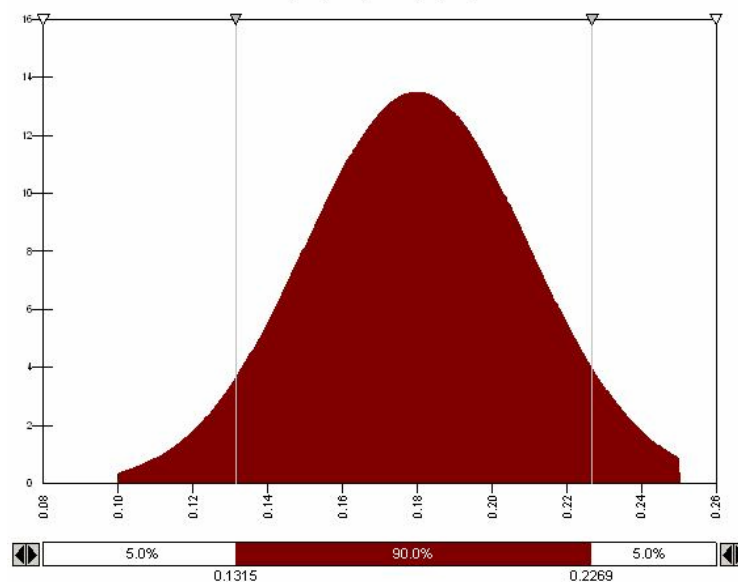
Voor de waarschijnlijkheidsverdeling van de dikte van de eenheden en de diepteligging is een driehoeksverdeling aangehouden, beschreven door een minimale waarde, een "meest waarschijnlijke waarde" en een maximum waarde (figuur 5.1). De respectievelijke waarden zijn middels de geologische interpretatie bepaald (hoofdstuk 3).



Figuur 5.1 –Voorbeeld van een toegepaste driehoeksverdeling voor de dikte van een laag.

### Porositeit

Voor de porositeit is een normale verdeling gebruikt ( figuur 5.2). Deze is gedefinieerd door een 'mean' en een standaard deviatie. Hiervoor zijn de gemiddelde waarden gebruikt die zijn afgeleid in het petrofysische onderzoek (hoofdstuk 4). Daarnaast zijn op grond van de geologische interpretaties absolute minima en maxima voor de porositeit opgegeven.

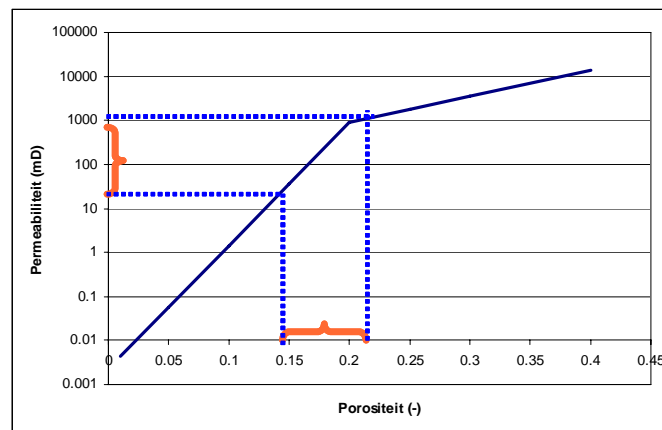


Figuur 5.2 –Voorbeeld van een toegepaste normale verdeling voor de porositeit van een laag, getrunceerd aan beide zijden.

De dikte en de porositeit van zowel het Rijswijk als Berkel pakket zijn onderling positief gecorreleerd, met een correlatie coëfficiënt van 0.7, een schatting gebaseerd op

de geologische interpretatie. Dit betekent in de simulatie dat een hoge porositeit waarde min of meer samengaat met een grote dikte, m.a.w. er worden geen situaties berekend waarbij de porositeit hoog is en tegelijk de dikte gering .

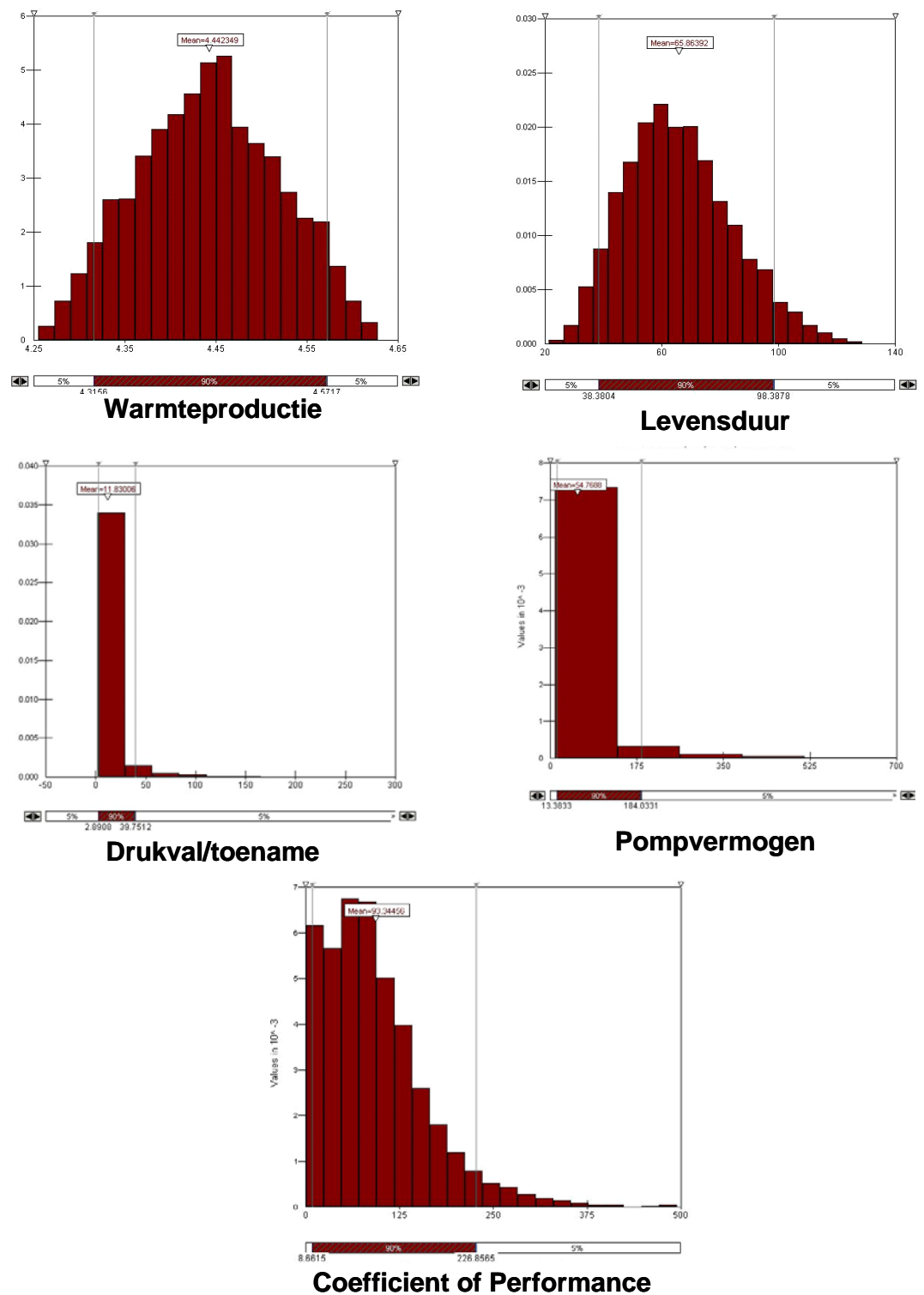
De permeabiliteit is in de berekeningen semi-lineair gecorreleerd aan de porositeit ( hoofdstuk 4) die zelf een normale verdeling kent. Hierdoor wordt ook voor de permeabiliteit van zowel het Rijswijk als Berkel pakket een waarschijnlijkheids verdeling toegepast in de risicoanalyses, zie figuur 5.3 . Eenzelfde geldt voor de temperatuur: deze is middels een lineaire relatie gekoppeld aan de diepte, waardoor ook voor de temperatuur een waarschijnlijkheids verdeling wordt toegepast in de risicoanalyses.



Figuur 5.3 –De definitie van de waarschijnlijkheids verdeling van de permeabiliteit volgt uit de opgegeven verdeling van de porositeit en de semi-lineaire poro-perm-relatie.

### 5.2.2 *Uitkomsten*

De vorm van de waarschijnlijkheidsverdeling van de verschillende uitkomsten is weergegeven in figuur 5.4. Deze vorm is voor alle scenario' s gelijk, alleen de waarden zijn verschillend. De vorm van de verdeling geeft een indruk van de spreiding van de uitkomsten ( hoe gevoelig is de uitkomst voor de variatie van de invoer). Te zien is dat de warmteproductie en de levensduur van het doublet ongeveer normaal verdeeld zijn, met een relatief brede spreiding, terwijl de drukverandering, het benodigde pompvermogen en de COP niet normaal zijn verdeeld. Hier is de spreiding in de kleine waarden gering, terwijl de spreiding in hoge waarden groot is.



Figuur 5.4 –De vorm van de verschillende waarschijnlijkheidsverdelingen van de uitkomsten van de risicoanalyse berekeningen.

Voor de interpretatie van de uitkomsten zijn voor de verschillende scenario's de 5% kans waarde, de 50% kans waarde en de 95% kanswaarde uit de grafieken gehaald en in tabellen weergegeven in paragraaf 5.3.

De 50 % kanswaarde wil zeggen dat in 50% van de gevallen de uitkomst hoger was en in 50% van de gevallen de uitkomst lager:

- Voor warmteproductie WP : Er is 50 % kans dat WP hoger is dan  $x$  MW is.
- Voor levensduur LD: Er is 50 % kans dat de levensduur langer is dan  $x$  jaar.
- Voor drukval: DP-producer: er is 50% kans dat de drukval van de producer lager is dan  $x$  bar.
- Voor pompvermogen PV-producer: Er is 50% kans dat het benodigde pompvermogen van de producer lager is dan  $x$  kW.
- Voor pompvermogen PV-injector: Er is 50% kans dat het benodigde pompvermogen van de injector lager is dan  $x$  kW.
- Voor coefficient of Performance COP: Er is 50 % kans dat de COP hoger is dan  $x$ .

Wanneer van deze uitkomst wordt uitgegaan bij het nemen van een beslissing is er evenveel kans dat enerzijds de WP, LD en COP wordt overschat en de DP/ PV wordt onderschat, dan dat de WP, LD en COP wordt onderschat, respectievelijk de DP/ PV wordt overschat.






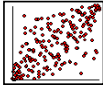
Wil men uitgaan van minimaal risico, dan kan worden uitgegaan van **P5** waardes, die aangeven dat er 95 % kans is dat er een gunstiger uitkomst is (hogere WP, LD en COP, resp. lagere DP en PV). De P95 waarden aan de andere kant geven een indruk van de meest gunstige resultaten die zouden kunnen optreden. De kans hierop is 5%.

## 5.3 Resultaten

### 5.3.1 Definitie van scenario's

In het startscenario (**A**) zijn de *meest waarschijnlijke* (= *realistische*) verdelingen van invoerparameters, afkomstig uit het geologische en petrofysische onderzoek, gebruikt. Deze invoer is samengevat in tabel 5.1. De diktes betreffen de netto zandsteendiktes, dus inclusief de netto/bruto zandsteenverhouding ratio. De diepte betreft de top van de zandsteenpakketten, aangezien de basis van het totale Rijswijk/Berkel pakket lager ligt (zie hoofdstuk 3). Dit is een conservatieve aanname. Het toegepaste debiet voor productie en injectie in Scenario A is **100 m<sup>3</sup>/u**.

Tabel 5.1 Invoergegevens van Scenario A

	soort PDF	minimum	most likely	maximum	opmerking
<b>Rijswijk</b>					
Dikte(m)	Driehoekverdeling 	20	30	40	
Porositeit(-)	Normale verdeling 	- s 0.15	gemiddelde 0.18	+ s 0.21	min 0.1, max 0.25
Permeabiliteit	Lineair gecorreleerd aan porositeit				
<b>Berkel</b>					
Dikte(m)	Driehoekverdeling 	10	35	70	opmerking
Porositeit(-)	Normale verdeling 	- s 0.18	gemiddelde 0.21	+ s 0.24	min 0.13, max 0.29
Permeabiliteit	Lineair gecorreleerd aan porositeit				
<b>Diepte</b>	Driehoekverdeling 	1450	1500	1550	
Temperatuur	Lineair gecorreleerd aan Diepte				
Dikte positief gecorreleerd met porositeit: correlatie coëfficiënt =0.7					

De alternatieve scenario's B t/m G zijn afgeleid van scenario A. De resultaten kunnen in die zin dan ook direct worden vergeleken met dit startscenario. In scenario's **B** en **C** is geanalyseerd wat de resultaten zijn wanneer, uitgaand van dezelfde invoergegevens van de ondergrond als in scenario A, er meer water wordt onttrokken, waardoor vanzelfsprekend de warmteproductie naar rato stijgt.

Het meest waarschijnlijke scenario A, gaat er, gebaseerd op het geologisch onderzoek, vanuit dat de dikte van de Berkel Zandsteen minimaal 10 m is; anders gezegd: het wordt onwaarschijnlijk/onrealistisch geacht dat er in het geheel geen Berkel zandsteen zal worden aangeboord. Toch is deze onwaarschijnlijke mogelijkheid, doorgerekend, en wel op verschillende manieren (scenario's D, E, F):

In scenario **D** is allereerst het minimum van de waarschijnlijkheidsverdeling van de Berkel Zandsteen op 0 m. gezet, i.p.v. 10m, waardoor de driehoekverdeling als het ware "naar links wordt getrokken". Er is in dit scenario D echter nog steeds sprake van een meest waarschijnlijke dikte van de Berkel Zandsteen van 35 m en maximum van 75m.

Om een indruk te krijgen van de performance van het doublet, in het geval er geen Berkel zandsteen wordt aangeboord zijn scenario's **E** en **F** doorgerekend. Hierbij wordt alleen uitgegaan van de aanwezigheid van Rijswijk Zandsteen, en worden dientengevolge alleen de onzekerheden van de Rijswijk Zandsteen dikte, de porositeit en de diepte meegenomen in de risicoberekening. We doen in deze scenario's in feite alsof we weten dat de Berkel Zandsteen er niet is. Statistisch gezien is dit niet rechtvaardig, maar het levert een indruk op van de "minimale situatie" die zou kunnen optreden. In scenario E is met een debiet van 100 m<sup>3</sup>/u, in scenario F met 50 m<sup>3</sup>/u gerekend.

In tabel 5.2 wordt voor de alternatieve scenario's nog eens samengevat wat de afwijking is t.o.v. scenario A.

Tabel 5.2 Overzicht van de alternatieve scenario's B-G met de afwijkende invoergegevens

Scenario	Afwijking t.o.v. scenario A
B	Debiet <b>150</b> m <sup>3</sup> /u, i.p.v. 100 m <sup>3</sup> /u
C	Debiet <b>200</b> m <sup>3</sup> /u, i.p.v. 100 m <sup>3</sup> /u
D	Minimum Dikte Berkel <b>0</b> m, i.p.v. 10 m. ; 100
E	Berkel totaal <b>afwezig</b> , 100 m <sup>3</sup> /u
F	Berkel totaal <b>afwezig</b> , 50 m <sup>3</sup> /u

### 5.3.2 Scenario A

In Scenario A, het meest waarschijnlijke scenario, wordt dus de vraag behandeld: Wat is de warmteproductie bij 100 m<sup>3</sup>/u, uitgaand van de meest waarschijnlijke diktes, porositeit, permeabiliteit en temperatuur, en is dit, gezien de drukval/toename en benodigd pompvermogen, haalbaar?

Het resultaat van de risicoanalyse berekeningen in scenario A is samengevat in onderstaande tabel 5.3:

Tabel 5.3 De resultaten van de risicoanalyse met Scenario A

	P50	P5	P95
<b>WP (MW)</b>	4.4	4.3	4.6
<b>LD (Jaar)</b>	65.9	38.4	98.4
<b>DP-prod (bar)</b>	11.8	39.8	2.9
<b>DP-inj (bar)</b>	18.3	70.6	1.3
<b>PV-prod (kW)</b>	54.8	184	13.4
<b>PV-inj (kW)</b>	84.6	326.7	6.1
<b>COP (-)</b>	93.3	8.7	226

De P5 resultaten (de kans is 95 % dat de werkelijkheid gunstiger is) van dit scenario geven aan dat er sprake is van een substantiële warmteproductie van ruim 4 MW (ten opzichte van de gevraagde 5-10 MW). Tevens is de levensduur voldoende lang en het benodigde pompvermogen is dusdanig dat de COP bijna 9 is. De P50 waarde van de WP is slechts marginaal groter, maar de COP is 76.5, m.a.w. er is 50 % kans dat de performance zeer goed zal zijn. Al met lijkt geeft dit meest waarschijnlijke scenario aan dat er een redelijk tot goede performance te verwachten is, afhankelijk of er van een gering risico, dan wel een groter risico wordt uitgegaan.

### 5.3.3 Scenario's B en C

In de onderstaande tabellen staan de resultaten van de scenario's B en C (debiet is 150 respectievelijk 200 m<sup>3</sup>/u) samengevat.

Tabel 5.4 De resultaten van de risicoanalyse met Scenario B

#### Scenario B

	P50	P5	P95
<b>WP (MW)</b>	6.7	6.5	6.9
<b>LD (Jaar)</b>	44	25.7	65.6

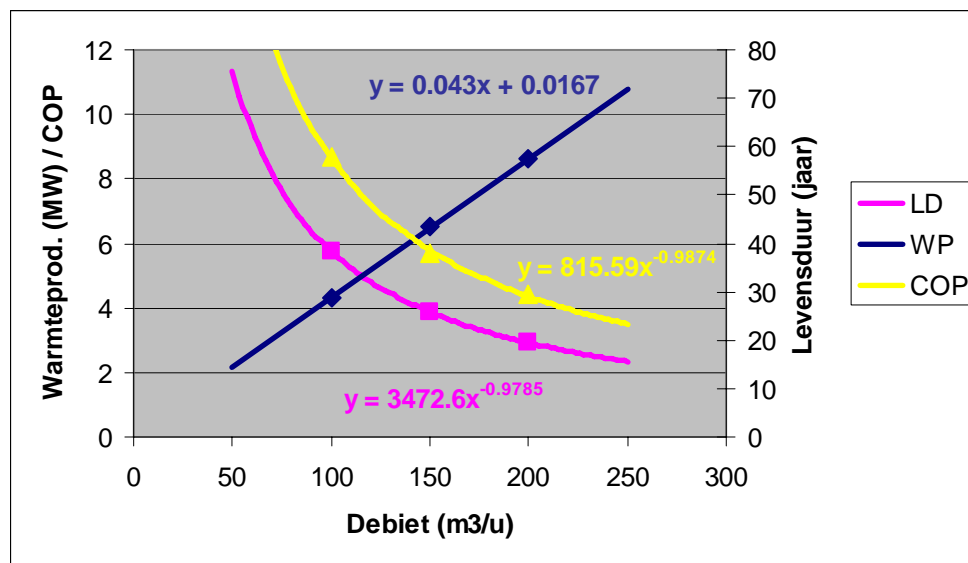
<b>DP-prod (bar)</b>	18.3	59.9	5
<b>DP-inj (bar)</b>	29.7	108.9	4.5
<b>PV-prod (kW)</b>	126.9	416.3	34.7
<b>PV-inj (kW)</b>	206.2	756.4	31.3
<b>COP (-)</b>	48	5.7	101

Tabel 5.5 De resultaten van de risicoanalyse met Scenario C

*Scenario C*

	<b>P50</b>	<b>P5</b>	<b>P95</b>
<b>WP (MW)</b>	8.9	8.6	9.1
<b>LD (Jaar)</b>	32.8	19.5	49.2
<b>DP-prod (bar)</b>	25.8	78.1	7.3
<b>DP-inj (bar)</b>	42.6	142	7.9
<b>PV-prod (kW)</b>	238.7	722.7	67.8
<b>PV-inj (kW)</b>	396.9	1314	73.2
<b>COP (-)</b>	31.7	4.4	63.1

Aangezien de onzekere ondergrondvariabelen in de scenario's A, B en C niet veranderen, is het mogelijk de resultaten onderling te vergelijken. In figuur 5.5 zijn de P5 waarden van de warmteproductie, de levensduur en de COP uitgezet tegen het debiet en zijn tevens de regressie lijnen afgebeeld. De warmteproductie heeft zoals verwacht een lineaire relatie met het debiet, de LD en COP kunnen worden uitgedrukt in een zgn. powerfunctie van het debiet. Hiermee is te bepalen wat de WP de LD en de COP is bij een bepaald debiet. Let wel, de grafiek geeft 'slechts' de P5 kans, dus er is 95% kans dat de resultaten beter zijn. De regressielijnen van de P50 waarden hebben de zelfde vorm, maar hogere absolute waarden. In de P5 uitkomsten (dus een minimaal risico) is bij toepassing van hoge debieten de levensduur nog steeds acceptabel, echter de COP wordt onacceptabel laag in dit risicoprofiel. Tevens wordt de te gebruiken injectiedruk bij hogere debieten technisch onhaalbaar geacht. Wanneer de 50% kans uitkomsten worden bekeken is ook bij 200 m3/u nog een uitstekende performance (COP 31.7), terwijl de warmteproductie bijna 9 MW is.





Figuur 5.5 –P5 waarden van de warmteproductie, levensduur en COP, uitgezet als functie van het debiet. Hierbij is uitgegaan van de meest waarschijnlijke verdeling van de ondergrond variabelen.

#### 5.3.4 Scenario D

De resultaten van Scenario D staan in onderstaande tabel 5.6, tussen haakjes staan in de P5 kolom de resultaten van scenario A, voor een directe vergelijking. Duidelijk is dat de verwachte levensduur enkele jaren lager is en dat de COP ook enigszins lager is door het hogere pompvermogen. Toch mogen de P5 uitkomsten nog steeds acceptabel genoemd worden. De P50 uitkomsten zijn ook marginaal lager t.o.v. van scenario A; ze kunnen dus net als scenario A als goed bestempeld worden. Dit komt doordat in de waarschijnlijkheidsverdeling van de dikte van de Berkel Zandsteen slechts de “negatieve” kant enigszins slechter is geworden, t.o.v. scenario A, de meest waarschijnlijke en maximum waarden zijn gelijk gebleven.

Tabel 5.6 De resultaten van de risicoanalyse met Scenario D

#### Scenario D

	<b>P50</b>	<b>P5</b>	<b>P95</b>
<b>WP (MW)</b>	4.4	4.3 (4.3)	4.6
<b>LD (Jaar)</b>	62.6	32.9 (38.4)	97.2
<b>DP-prod (bar)</b>	14.3	45.9 (39.8)	3
<b>DP-inj (bar)</b>	23	82.5 (70.6)	1.4
<b>PV-prod (kW)</b>	66.3	212 (184)	13.7
<b>PV-inj (kW)</b>	106.6	382 (326)	6.7
<b>COP (-)</b>	88.5	7.5 (8.7)	219

#### 5.3.5 Scenario E en F

In de onwaarschijnlijk geachte scenario's waarin de Berkel Zandsteen in het geheel ontbreekt, wordt in feite alleen water uit de Rijswijk Zandsteen geproduceerd en weer geïnjecteerd.

De resultaten laten zien dat in deze scenario's bij P5 kansen de levensduur nog wel acceptabel is, maar dat onrealistische drukveranderingen optreden in de putten, dit is technisch onmogelijk. Dit is ook het geval, uitgaande van een P50 kans. Het hanteren van een geringer debiet van 50 m<sup>3</sup>/u geeft ook te grote drukveranderingen, die ook niet haalbaar zijn. Alleen in de meest optimistische gevallen zijn de drukveranderingen gering en is daardoor ook de COP acceptabel, maar de kans hierop is slechts 5 %.

Tabel 5.7 De resultaten van de risicoanalyse met Scenario E

#### Scenario E

	<b>P50</b>	<b>P5</b>	<b>P95</b>
<b>WP (MW)</b>	4.4	4.3	4.6
<b>LD (Jaar)</b>	26.2	15.2	38.4
<b>DP-prod (bar)</b>	193.5	876	6.2
<b>DP-inj (bar)</b>	362.6	1668	7.6
<b>PV-prod (kW)</b>	895	4059	28.8

<b>PV-inj (kW)</b>	1678	7725	35.4
<b>COP (-)</b>	21	0.4	68.8

Tabel 5.8 De resultaten van de risicoanalyse met Scenario F

*Scenario F*

	<b>P50</b>	<b>P5</b>	<b>P95</b>
<b>WP (MW)</b>	2.2	2.2	2.3
<b>LD (Jaar)</b>	52.3	31	77.6
<b>DP-prod (bar)</b>	94.8	409	2.9
<b>DP-inj (bar)</b>	176.2	777	1.8
<b>PV-prod (kW)</b>	219.5	949.1	6.6
<b>PV-inj (kW)</b>	407.8	1798.6	4.1
<b>COP (-)</b>	57.1	0.8	206

## 6 Technische risico's

In deze paragraaf wordt een aantal van de mogelijke technische risico's die bij de winning van aardwarmte in de ondergrond van Bleiswijk een rol zouden kunnen spelen, kort aangegeven. De werkelijke omvang van deze risico's zijn eerst na het testen van de eerste boring goed in te schatten.

### 6.1 Geochemisch gedrag van formatiewater onder exploitatiecondities

Ten gevolge van de afnemende temperatuur en druk kunnen chemische evenwichten in het formatiewater veranderen. Als gevolg van deze veranderingen kan neerslag van mineralen ontstaan die aanleiding kan geven tot putverstopping. Analyse van de samenstelling van het water uit de aquifer en een simulatie van de chemische processen die plaatsvinden tijdens het productie- en injectietraject kunnen samen inzicht geven in de chemische reacties die plaats kunnen vinden. De Rijswijk Zandsteen bestaat voornamelijk uit zanden met plaatselijke inschakelingen bestaande uit grofkorrelig materiaal, maar ook klei- en silthoudende lagen. In de Rijswijk Zandsteen is geen sprake van calciëtafzettingen (Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993). Hierdoor lijkt het onwaarschijnlijk dat het formatiewater oververzadigd is voor calciëtafzetting, wat gunstig is voor de productie van het water en de kans op scaling, dat is de neerslag van calciëtafzetting, gering is.

Van een beperkt aantal boringen in de omgeving is de chemische samenstelling van het formatiewater bekend. Hieruit blijkt dat de samenstelling van het water wel oververzadigd is voor bariëtafzetting en kwarts. Geochemische modellering gebaseerd op deze samenstelling kan meer uitsluitsel geven over de mogelijke vorming van neerslag.

Er kunnen pas definitieve uitspraken worden gedaan na analyse van formatiewater uit de boring. Mocht de samenstelling van het water dusdanig zijn dat chemische reacties en neerslagvorming mogelijk zijn, dan kan dit doorgaans goed worden verholpen. Gelet op de ervaringen in zowel Duitsland als in Frankrijk is het heel goed mogelijk om door middel van filteren en het toevoegen van hulpstoffen de gevolgen te minimaliseren dan wel te vermijden.

### 6.2 Klei

Naast de neerslag van mineralen kunnen er ook problemen ontstaan met de aanwezige kleideeltjes in de formatie en in suspensie. De mogelijk aanwezige klei in de formatie kan gaan zwellen door de injectie van water. Als remedie voor het tegengaan van scaling wordt bijvoorbeeld ionenwisseling toegepast, dat is het vervangen van één tweewaardig calcium-ion voor twee éénwaardige natrium ionen. Dit kan leiden tot het zwellen van de aanwezige kleien. Hierdoor kan de permeabiliteit afnemen en kan de put uiteindelijk dichtslaan.

Een tweede probleem kan veroorzaakt worden door het samenklonteren van kleideeltjes in suspensie. Deze samenklonteringen kunnen in de poriën van het reservoir gaan zitten en daarmee het reservoir verstoppen.

In de Rijswijk Zandsteen zijn plaatselijk kleilagen met ligniet aanwezig, vooral aan de basis van het laagpakket (Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993). Gezien de aanwezigheid van klei kan dus niet worden uitgesloten dat deze processen op zullen treden. Op dit moment zijn er echter te weinig gegevens om hier kwantitatieve uitspraken over te doen.

### **6.3 Oliesporen**

De Rijswijk Zandsteen in Zuid-Holland is tevens het gesteente waarin in deze regio olie- en gasvoorkomens worden aangetroffen. Olie en gas verzamelen zich in zgn. 'traps' die gekenmerkt worden door een anticlinaal en/of een breukstructuur. Een dergelijke structuur wordt onder Bleiswijk niet aangetroffen. Wel is het mogelijk dat in de formatie oliesporen aanwezig zijn achtergebleven als gevolg van migratieprocessen van de olie door de Rijswijk Zandsteen.

### **6.4 Geomechanische risico's**

Zowel bij de productie als bij de injectie zijn er geomechanische processen, die de performance van een geothermisch doublet nadelig kunnen beïnvloeden, vooral bij hoge productiesnelheden en hoge drukken. Deze situaties zouden zich kunnen voordoen bij het minimum scenario, waarbij om een redelijke productie te krijgen er relatief hoge drukken moeten worden toegepast en er relatief hoge stromingssnelheden in de nabijheid van de putten zullen ontstaan.

Put- en formatieschade ontstaan vooral dan, wanneer er gesteentematrix met onder andere fijnekorrelige deeltjes in het spel zijn. In hoeverre deze problemen daadwerkelijk een rol zullen spelen is dan ook afhankelijk van de mineralogische samenstelling van de aquifer. In de afzettingen van de Rijswijk zandsteen komen kleiige inschakelingen voor. Daarom moet de aanwezigheid van fijne deeltjes niet worden uitgesloten. De Berkel zandsteen is vergeleken met de Rijswijk relatief schoner.

Andere oorzaken, die mogelijke verstopping kunnen veroorzaken zijn ondermeer:

- De in de vorige paragraaf vermelde chemische interactie tussen geïnjecteerde- en formatievloeistoffen. Deze kunnen leiden tot vorming van een overmatige hoeveelheid neerslag van silicaten en carbonaten die het reservoir kunnen verstopen. Gezien de te verwachten chemische samenstelling lijkt dit in Bleiswijk minder waarschijnlijk.
- Ingesloten gas(-belletjes) in geïnjecteerd geothermaal water, zijn aantoonbaar betrokken bij de vorming van formatieschade.
- Vervuiling met zuurstof en de hieruit voorkomende oxidatie en corrosie is één van de belangrijkste oorzaken van formatieschade, wanneer de kunstmatig onder druk gehouden faciliteiten aan het oppervlak lekken en er toevoer van zuurstof ontstaat. Daarbij ontstaan ijzerhydroxiden, die neerslaan in de formatie en deze kunnen verstopen.

## **6.5 Interferentie met andere toepassingen.**

In de omgeving van Bleiswijk is op een aantal plaatsen olie en gaswinning aanwezig. Gelet op de afstand tussen de aardwarmte winninglocaties en deze winningactiviteiten ligt onderlinge beïnvloeding niet voor de hand. Een uitspraak hierover is echter pas dan mogelijk wanneer op grond van simulatie studies een inzicht is verkregen van de op termijn te verwachten temperatuur en drukveranderingen in de ondergrond.

## 7 Conclusies en aanbevelingen

### 7.1 Conclusies

Uit het uitgevoerde onderzoek zijn de volgende conclusies te trekken:

- De voor aardwarmtewinning beoogde watervoerende lagen, de Berkel Zandsteen en de Rijswijk Zandsteen zijn niet afzonderlijk te herkennen in de 3D seismiek. Dit heeft tot gevolg dat de exacte ligging van de Berkel zandsteen niet is vastgesteld. Wel is de diepteligging van de top en de basis van de zandige eenheid, waartoe beide Zandsteenlagen behoren vastgesteld met behulp van seismiek. De zandige eenheid “duikt” in zuidwestelijke richting met een steeds vlakker wordende hellingshoek (Fig. 3.6, 3.7). Ongeveer 1600 m ten zuidwesten van de beoogde oppervlakte locatie bevindt zich een breuk, die een lokale horst (een hoger gelegen structuur) begrenst.
- Voor een optimaal rendement van de aardwarmtewinning dienen de lagen zo diep mogelijk aangeboord te worden, zodat het geothermische doublet gebruik maakt van water met een zo hoog mogelijke temperatuur. Er wordt voorgesteld om twee schuine boortrajecten in zuidwestelijke richting te boren, waarbij moet worden voorkomen dat door de breuk wordt geboord. Hiertoe moeten de watervoerende lagen verticaal worden aangeboord, op zo’n 500 a 600 m ten noorden van de breuk. In het huidige voorstel liggen injector en producer ongeveer 2000 m uit elkaar en is de lengte van beide boringen ongeveer 2300 m.
- Met behulp van de data uit de omliggende boringen en met inachtneming van de regionale geologische/sedimentologische kennis is door interpolatie van deze data een inschatting te maken van de te verwachten diktes. Op grond van het meest realistische geologische model is de dikte van de Berkel zandsteen op de locaties van de injectie en productie put tussen 30 en 40 m. Het meest pessimistische model geeft een minimale dikte van 10 m, het optimistische model geeft diktes van meer dan 75 m. Het is onwaarschijnlijk dat er op de beoogde diepte van de boringen geen Berkel Zandsteen wordt aangetroffen. Het gemiddelde geologische model van de dikte van de Rijswijk Zandsteen geeft waarden van 30 a 35 m. De verschillende interpolatie routines geven relatief weinig spreiding voor deze watervoerende laag.
- Uit de petrofysische evaluatie volgt dat de Rijswijk zandsteen een gemiddelde porositeit heeft van 0.18, de gemiddelde porositeit van de Berkel Zandsteen is hoger, 0.21. Voor beide is de standaard deviatie 0.03. De absolute variatie binnen de zandsteenlagen is groter. Het is valide om een bekende semi-lineaire relatie te gebruiken om uit de permeabiliteit de porositeit af te leiden. Dit betekent dat gemiddeld genomen de permeabiliteit van de Rijswijk Zandsteen kleiner is dan die van de Berkel Zandsteen. Voor een temperatuurschatting in de watervoerende lagen is op basis van gecorrigeerde “bottom hole” temperaturen een lineaire temperatuur diepte relatie afgeleid. Het zoutgehalte van het formatiewater van de Berkel en Rijswijk Zandsteen is 68 ppk (68.000 ppm), afgeleid uit weerstandlogs.
- Op basis van analytische berekeningen, is inzicht verkregen in de mogelijke performance van het geothermische doublet. Hierbij is de werkelijkheid sterk vereenvoudigd door een aantal aannames te doen. Door de onzekerheidsmarges van de dikte, porositeit van de Berkel en Rijswijk Zandsteen en de diepteligging van de lagen te gebruiken is inzicht verkregen

in de waarschijnlijkheidsverdeling van de uitkomsten. De invoergegevens zijn afgeleid uit het geologisch onderzoek. Wanneer de meest waarschijnlijke/realistische invoerverdeling wordt gebruikt is, uitgaand van een gemiddeld risico (kans van 50%) de levensduur 4.4 MW, de levensduur 75 jaar en de COP 76. Bij een minimum risico is de levensduur ruim 35 jaar en de coëfficiënt of performance (COP) bijna 9. Hierbij is de dikte van de Berkel Zandsteen minimaal 10 m. Dit wil zeggen dat, als de Berkel Zandsteen aanwezig is, de kans zeer groot is dat een doublet rendabel is. Bij hogere debieten, neemt de warmteproductie lineair toe, maar is, uitgaand van een minimum risico de COP te laag. Bij een meer gemiddeld risico profiel echter is ook de COP nog goed (COP 33 bij 200 m<sup>3</sup>/u). Ook wanneer de minimumdikte van de Berkel Zandsteen op 0 m wordt gezet is er nog steeds sprake van een acceptabele performance van het doublet.

- In het onwaarschijnlijk geachte scenario, waarbij wordt aangenomen dat de Berkel geheel afwezig is, voldoet een doublet alleen onder de meest gunstige condities van de Rijswijk zandsteen. In dit onwaarschijnlijke scenario is de kans hierop echter gering. Dit wil zeggen dat, in het geval er geen Berkel Zandsteen wordt aangeboord, de kans gering is dat een doublet rendabel is. Zoals eerder vermeld is de kans dat de Berkel Zandsteen niet aanwezig is klein. De mogelijkheid is echter niet geheel uit te sluiten.
- Technische risico's die mogelijk een rol kunnen spelen bij de winning van aardwarmte zijn neerslag van mineralen die kan leiden tot putverstopping, verstopping van het reservoir door zwellen van mogelijk aanwezige klei en of samenklonteren van kleideeltjes in suspensie en geomechanische formatieschade (bij toepassen van hoge debieten en/of drukken). Het risico is sterk afhankelijk van de samenstelling van het formatie water en de mineralogische samenstelling van het sediment in de watervoerende lagen. De werkelijke omvang van deze risico's zijn dan ook eerst na het testen van de eerste boring goed in te schatten.

## 7.2 Aanbevelingen

De berekeningen van de warmteproductie, levensduur en pompvermogen zijn uitgevoerd middels analytische berekeningen, waarin een groot aantal invoergegevens een constante waarde hebben en de ondergrond sterk is gesimplificeerd. Door gebruik te maken van numerieke modellering wordt de ruimtelijke geometrie van de ondergrond verdisconteerd in de berekeningen (dikte en diepte variatie, locatie van de breuk). Ook kan de eigenschappen van de watervoerende lagen (porositeit en permeabiliteit) ruimtelijk worden gevarieerd. Hierdoor wordt dientengevolge de onzekerheid, voortkomend uit de gebruikte methodiek verkleint en kunnen de geologische onzekerheden beter worden getoetst.

De beschreven technische risico's kunnen door middel van geochemische modellering en nader literatuur onderzoek in meer detail worden bestudeerd. Hierdoor kan op voorhand beter ingespeeld worden op de eventuele problemen die tijdens een daadwerkelijke realisatie van een doublet voor kunnen komen.

## 8 Ondertekening

Utrecht, 26 januari 2006

TNO Bouw en Ondergrond

Groepsleider: Drs. H.J.M. Pagnier

Auteur: Ir. H.J. Simmelink



## Referenties

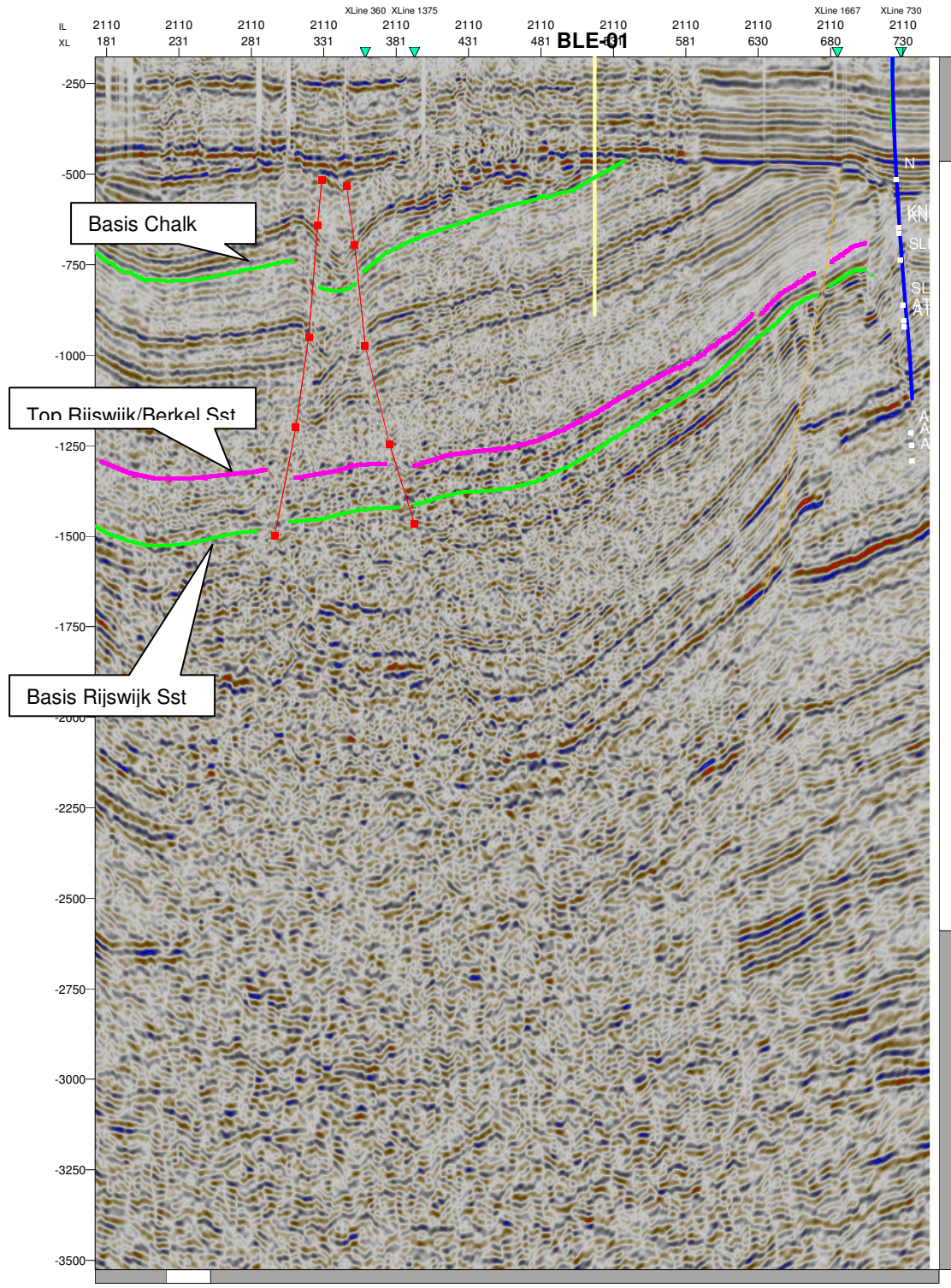
- Alberts, L.J.H., Geel, C.R., and Klasen, J.J., 2003, Reservoir characterisation using process-response simulations: the Lower Cretaceous Rijn Field, West Netherlands Basin. *Netherlands Journal of Geosciences / Geologie en Mijnbouw* 82: 313-324.
- Van Adrichem Boogaert, H.A. & Kouwe, W.F.P., 1993. Stratigraphic nomenclature of The Netherlands; revision and update by RGD and NOGPA. *Mededelingen Rijks Geologische Dienst* 50 (Haarlem).
- Bodenhausen, J.W.A. & Ott, W.F., 1981. Habitat of the Rijswijk Oil Province, onshore, The Netherlands. In: Illing, L.V. & Hobson, G.D. (eds.): *Petroleum Geology of the Continental Shelf of North-West Europe*. Heyden (London), p. 301-309.
- Den Hartog Jager, D. G., 1996, Fluvio-marine sequences in the Lower Cretaceous of the West Netherlands Basin: correlation and seismic expression, in H. E. Rondeel, D. A. J. Batjes, and W. H. Nieuwenhuijs, eds., *Geology of gas and oil under the Netherlands*: Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, p. 229–241.
- DeVault, B., and J. Jeremiah, 2002, Tectonostratigraphy of the Nieuwerkerk Formation (Delfland subgroup), West Netherlands Basin. *AAPG Bulletin*, v. 86, p. 1679-1707.
- Donselaar, M.E., 1996, Barrier island coasts and relative sea level rise: preservation potential, facies architecture and sequence analysis. PhD Thesis, Delft University of Technology, 223 p.
- Gras, R. & Geluk, M.C., 1999. Late Cretaceous-Early Tertiary sedimentation and tectonic inversion in the southern Netherlands. *Geologie en Mijnbouw* 78: 1-19.
- Lokhorst, A. 2005. Quick-scan van het voorkomen van aquifers voor het winnen van aardwarmte onder Bleiswijk. TNO rapport NITG-05-137-B-1010.
- Racero-Baena, A., and S. J. Drake, 1996, Structural style and reservoir development in the West Netherlands oil province, in H. E. Rondeel, D. A. J. Batjes, and W. H. Nieuwenhuijs, *Geology of gas and oil under the Netherlands*: Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, p. 211–228.
- Ramaekers, J.J.F., 2003. Case studie: Vergunningsaanvraag Barendrecht-Carnisselande Petrofysica TNO-NITG Afd. DOC Sectie Adviezen Mijnbouw. In: TNO rapport NITG 03-214-C (confidentieel)
- Ramaekers, J.J.F., 1991 The Netherlands; In: Hurtig, E., Cermak, V., Haenel, R. and Zui, V. (Eds), *Geothermal Atlas of Europe*. Geoforschungszentrum Potsdam, Publ. 1, Hermann Haack Verlagsgesellschaft, Gotha: 81-83
- Van Wijhe, D.H., 1987. Structural evolution of inverted basins in the Dutch offshore. In: Ziegler, P.A. (ed.): *Compressional Intra-Plate Deformations in the Alpine Foreland*. *Tectonophysics* 137: 171-219.
- Ziegler, P.A., 1982. *Geological atlas of Western and Central Europe*. Elsevier (Amsterdam): 130 p.

**BIJLAGE 1**  
**Lijst van gebruikte boringen**

WellName	X-Coord	Y-Coord	KB
CAP-01	99250	441507	3.77
LED-01	87180	453807	0.00
LED-03	88667	456781	1.11
MKP-01	98895	451350	0.00
MKP-02	100484	450086	-1.89
MKP-04	102113	446962	-1.50
MKP-05	103933	444366	-1.82
MKP-06	103936	444369	-1.82
MKP-07	103936	444369	1.82
MKP-08	98854	450944	0.27
MKP-09	98849	450943	0.35
MKP-10	98032	451845	0.53
MKP-11	98034	451849	0.58
MKP-12	98038	451858	2.40
MKP-13	99685	449826	2.38
MKP-14	97450	452330	1.90
MKP-15	97404	452374	2.57
MKP-16	96269	452703	2.40
PNA-04	86111	449538	2.53
PNA-13	86517	449433	0.00
PNA-14	86711	449186	2.31
PNA-15	84681	450095	2.23
ZOM-2	92646	454798	0.79
ZOM-16	92594	455259	-0.20
ZOM-30	93968	454082	2.68
BRK-02	90710	442155	0.58
BRK-07	91347	440858	1.96
BRK-23	91361	440892	2.83
BRK-26	91361	440897	4.42
BRK-25	91363	440977	2.82
BRK-21	91364	441027	1.90
BRK-16	91362	440942	2.07
BLE-01	96265	447999	0.00
IJS-67	96204	434390	10.18
IJS-52-ST1	98269	433038	2.86
IJS-46-ST1	96669	434060	1.68
IJS-44-ST3	97559	433500	2.11
IJS-36ST3	97496	433732	3.78
IJS-36ST2	97496	433732	3.78
IJS-30	97179	433651	3.50
IJS-12ST2	97966	433304	1.22
WOB-1	98277	464193	0.00
MON-2	71823	449953	0.00

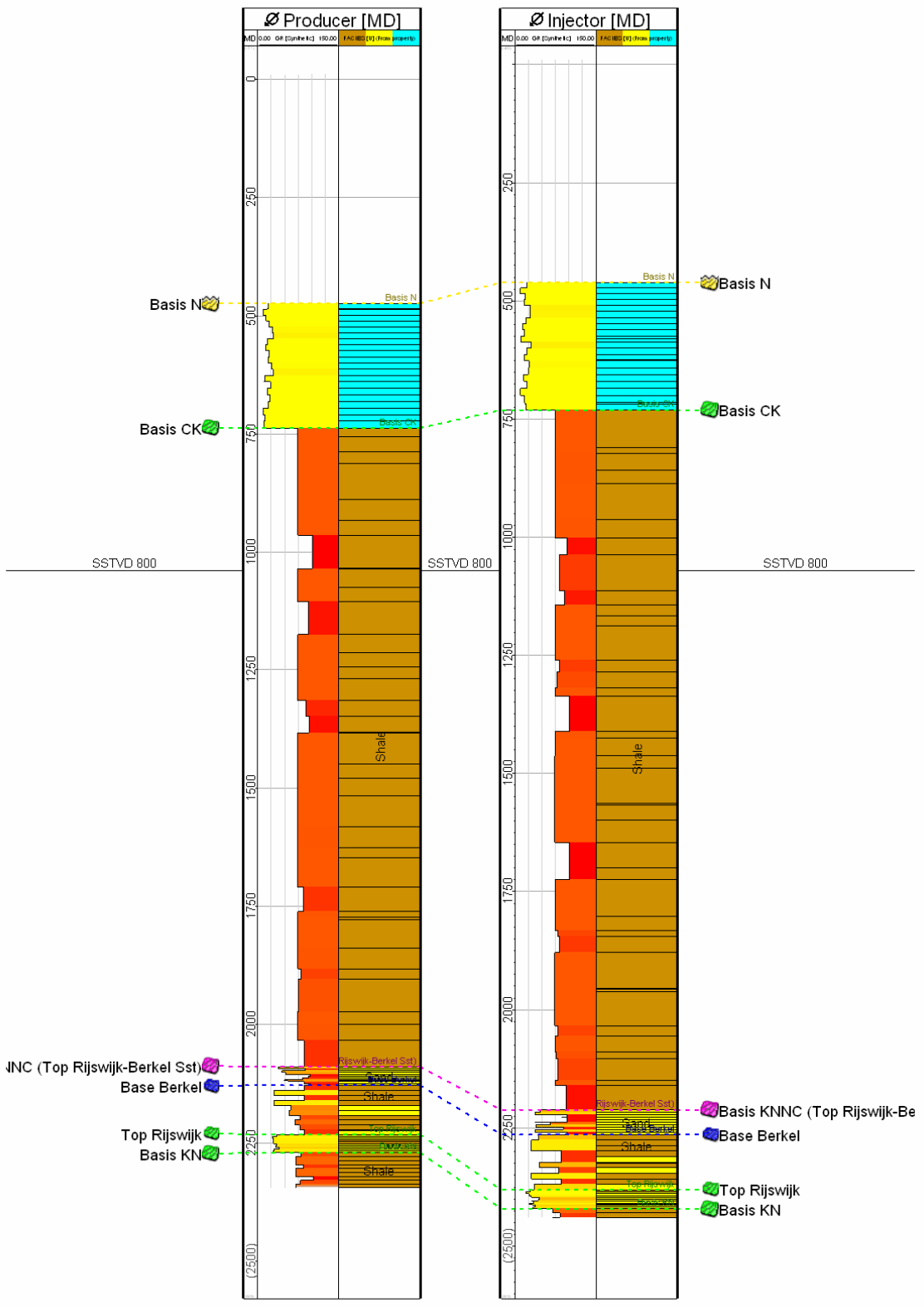
**BIJLAGE 2**  
**Seismisch profiel NE-SW over Bleiswijk**

3D seismische lijn over put BLE-01. De top van de zandige laag is aangegeven in roze, de basis van de laag in groen. Breuken zijn aangegeven in rood. De lichtgroene interpretatie bovenin de sectie is de basis van de Krijt kalk Groep. De verticale schaal is in milliseconden; de lengte van de gehele sectie is ongeveer 11 km.



### **BIJLAGE 3**

**Boorprognose en deviatietabellen van de voorgestelde productie en injectieput**



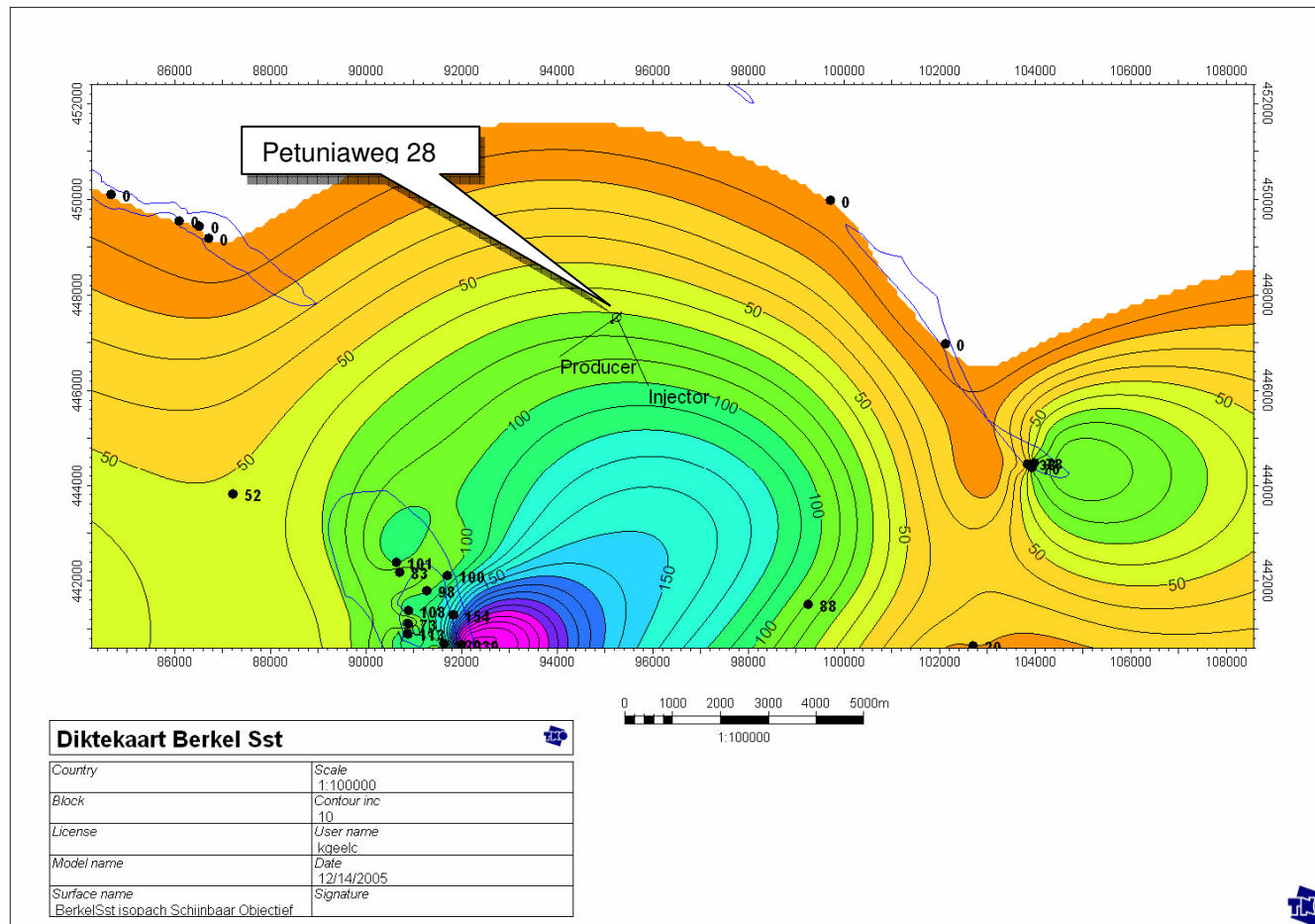
	coördinaten ( RD stelsel)			producer						
	X (m)	Y (m)	ZAH (m)	incl °	azimuth°	dx (m)	dy	ZTVD (m)	calc dls	
1	95246.08	447532.56	-9.83	1.62	275.6	0	0	-9.83	0	
2	95245.53	447532.5	4.48	2.86	256.49	-0.55	-0.06	4.46	3	
3	95244.69	447532.23	18.79	4.23	249.26	-1.39	-0.33	18.75	3	
4	95243.56	447531.75	33.1	5.62	245.58	-2.52	-0.81	33	3	
5	95242.14	447531.07	47.41	7.03	243.37	-3.94	-1.49	47.23	3	
6	95240.43	447530.18	61.72	8.45	241.89	-5.65	-2.38	61.41	3	
7	95238.43	447529.09	76.03	9.87	240.84	-7.65	-3.47	75.53	3	
8	95236.15	447527.79	90.34	11.29	240.04	-9.94	-4.77	89.6	3	
9	95233.57	447526.29	104.65	12.72	239.43	-12.51	-6.27	103.6	3	
10	95230.72	447524.59	118.96	14.15	238.94	-15.36	-7.98	117.51	3	
11	95227.58	447522.68	133.27	15.57	238.53	-18.5	-9.88	131.35	3	
12	95224.17	447520.58	147.58	17	238.19	-21.92	-11.99	145.08	3	
13	95220.47	447518.27	161.89	18.43	237.91	-25.61	-14.29	158.71	3	
14	95216.5	447515.77	176.2	19.86	237.66	-29.58	-16.79	172.23	3	
15	95212.26	447513.07	190.51	21.29	237.44	-33.82	-19.49	185.63	3	
16	95207.75	447510.18	204.82	22.72	237.25	-38.34	-22.39	198.89	3	
17	95202.96	447507.09	219.13	24.15	237.08	-43.12	-25.47	212.02	3	
18	95197.92	447503.82	233.44	25.58	236.93	-48.16	-28.75	225.01	3	
19	95192.61	447500.35	247.75	27.01	236.8	-53.47	-32.21	237.84	3	
20	95187.05	447496.7	262.06	28.44	236.68	-59.04	-35.86	250.51	3	
21	95181.23	447492.87	276.37	29.87	236.56	-64.86	-39.7	263	3	
22	95175.15	447488.85	290.68	31.3	236.46	-70.93	-43.71	275.32	3	
23	95168.83	447484.65	304.99	32.73	236.37	-77.25	-47.91	287.46	3	
24	95162.27	447480.28	319.3	34.16	236.28	-83.81	-52.28	299.4	3	
25	95155.47	447475.74	333.61	35.59	236.2	-90.61	-56.83	311.14	3	
26	95148.43	447471.02	347.92	37.02	236.12	-97.65	-61.55	322.67	3	
27	95141.17	447466.13	362.23	38.45	236.05	-104.92	-66.43	333.99	3	
28	95133.67	447461.08	376.54	39.88	235.98	-112.41	-71.48	345.08	3	
29	95125.96	447455.87	390.85	41.31	235.92	-120.12	-76.7	355.95	3	
30	95118.03	447450.5	405.16	42.74	235.86	-128.05	-82.07	366.58	3	
31	95109.88	447444.97	419.47	44.17	235.81	-136.2	-87.6	376.97	3	
32	95101.53	447439.29	433.78	45.6	235.75	-144.55	-93.27	387.11	3	
33	95092.98	447433.46	448.09	47.03	235.7	-153.1	-99.1	396.99	3	
34	95001.68	447371.19	599.13	47.03	235.7	-244.4	-161.4	499.95	0	
35	94179.95	446810.69	1958.54	47.03	235.7	-1066.1	-721.9	1426.55	0	
36	94171.42	446804.83	1972.85	45.64	235.26	-1074.7	-727.7	1436.43	3	
37	94163.14	446799.04	1987.15	44.24	234.79	-1082.9	-733.5	1446.55	3	
38	94155.11	446793.32	2001.46	42.85	234.3	-1091	-739.2	1456.92	3	
39	94147.34	446787.68	2015.76	41.47	233.78	-1098.7	-744.9	1467.52	3	
40	94139.83	446782.13	2030.07	40.08	233.23	-1106.3	-750.4	1478.36	3	
41	94132.59	446776.66	2044.37	38.7	232.66	-1113.5	-755.9	1489.41	3	
42	94125.61	446771.28	2058.68	37.32	232.04	-1120.5	-761.3	1500.68	3	
43	94118.91	446765.99	2072.98	35.94	231.39	-1127.2	-766.6	1512.16	3	
44	94112.49	446760.8	2087.29	34.57	230.69	-1133.6	-771.8	1523.84	3	
45	94106.35	446755.71	2101.59	33.2	229.93	-1139.7	-776.9	1535.72	3	
46	94100.5	446750.71	2115.9	31.84	229.13	-1145.6	-781.9	1547.78	3	
47	94094.94	446745.83	2130.2	30.48	228.26	-1151.1	-786.7	1560.02	3	
48	94089.67	446741.05	2144.51	29.13	227.31	-1156.4	-791.5	1572.43	3	
49	94084.7	446736.39	2158.81	27.79	226.29	-1161.4	-796.2	1585.01	3	
50	94080.04	446731.84	2173.12	26.45	225.16	-1166.1	-800.7	1597.74	3	
51	94075.67	446727.4	2187.42	25.12	223.93	-1170.4	-805.2	1610.62	3	
52	94071.61	446723.09	2201.73	23.81	222.57	-1174.5	-809.5	1623.64	3	
53	94067.86	446718.9	2216.03	22.51	221.06	-1178.2	-813.7	1636.79	3	
54	94064.42	446714.83	2230.34	21.22	219.38	-1181.7	-817.7	1650.07	3	
55	94061.29	446710.9	2244.64	19.95	217.49	-1184.8	-821.7	1663.46	3	
56	94058.47	446707.09	2258.95	18.71	215.36	-1187.6	-825.5	1676.96	3	
57	94055.98	446703.41	2273.25	17.49	212.94	-1190.1	-829.2	1690.56	3	
58	94053.8	446699.87	2287.56	16.31	210.18	-1192.3	-832.7	1704.24	3	
59	94051.94	446696.47	2301.86	15.16	207.01	-1194.1	-836.1	1718.01	3	
60	94050.4	446693.2	2316.17	14.07	203.34	-1195.7	-839.4	1731.86	3	
61	94049.18	446690.08	2330.47	13.05	199.09	-1196.9	-842.5	1745.76	3	
62	94048.29	446687.1	2344.78	12.1	194.15	-1197.8	-845.5	1759.72	3	



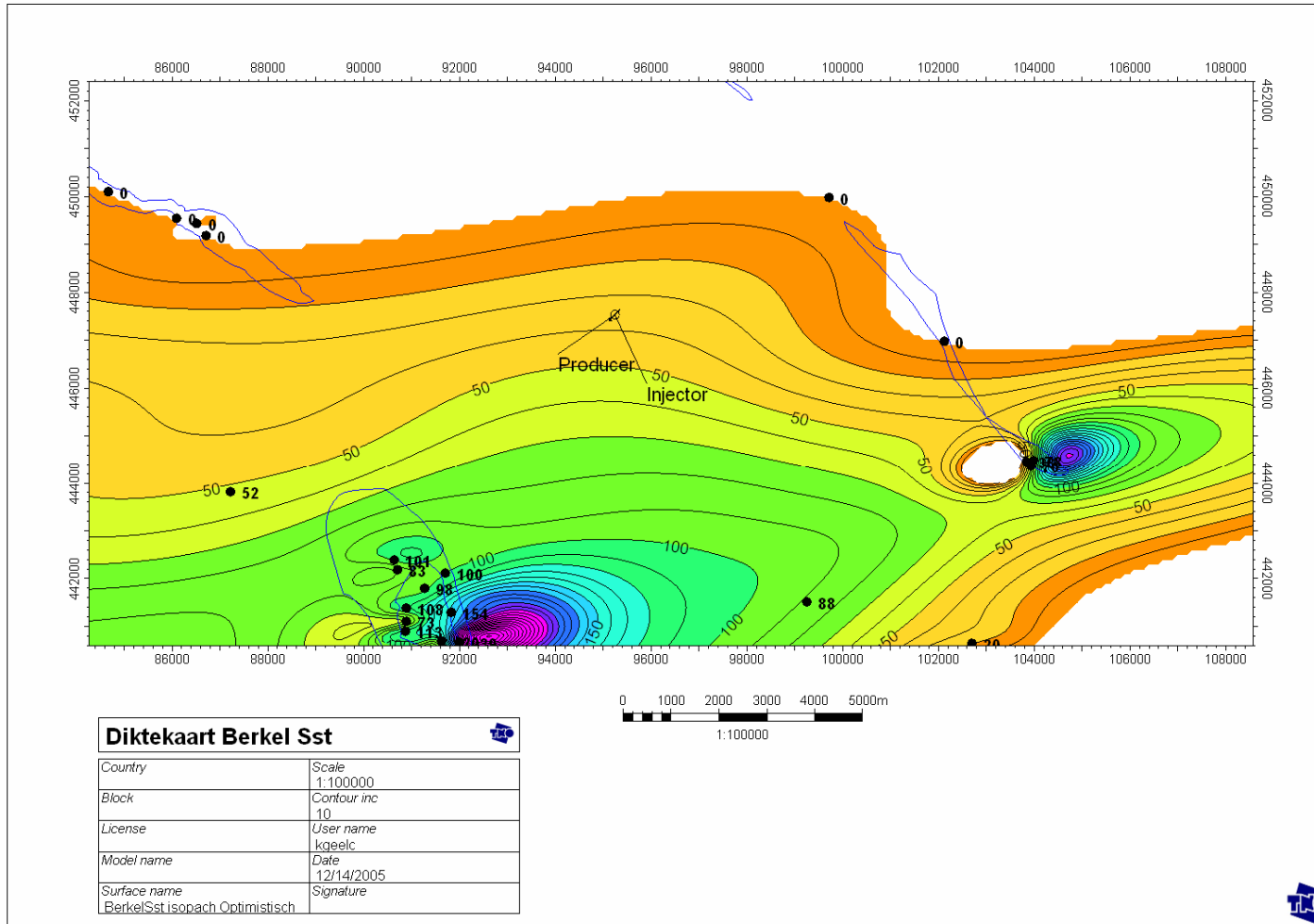
	coördinaten ( RD stelsel)		injector							
	X (m)	Y (m)	ZAH (m)	incl °	azimuth°	dx (m)	dy	ZTVD (m)	calc dls	
1	95246.08	447532.56	-9.83	1.62	275.6	0	0	-9.83	0	
2	95245.76	447532.44	4.47	1.5	221.29	-0.33	-0.12	4.47	3	
3	95245.59	447532	18.78	2.44	188.56	-0.49	-0.56	18.76	3	
4	95245.58	447531.24	33.08	3.71	175.92	-0.51	-1.33	33.05	3	
5	95245.72	447530.16	47.38	5.06	169.86	-0.36	-2.41	47.31	3	
6	95246.02	447528.75	61.69	6.45	166.37	-0.06	-3.81	61.54	3	
7	95246.48	447527.03	75.99	7.85	164.12	0.39	-5.53	75.73	3	
8	95247.09	447524.99	90.3	9.27	162.55	1.01	-7.57	89.88	3	
9	95247.86	447522.64	104.6	10.68	161.39	1.78	-9.93	103.97	3	
10	95248.78	447519.97	118.91	12.1	160.51	2.7	-12.6	117.99	3	
11	95249.86	447516.98	133.21	13.52	159.8	3.78	-15.58	131.94	3	
12	95251.09	447513.69	147.52	14.95	159.23	5.01	-18.88	145.8	3	
13	95252.48	447510.08	161.82	16.37	158.75	6.39	-22.48	159.58	3	
14	95254.01	447506.17	176.13	17.8	158.35	7.93	-26.39	173.25	3	
15	95255.7	447501.96	190.43	19.22	158.01	9.62	-30.61	186.81	3	
16	95257.54	447497.44	204.74	20.65	157.71	11.46	-35.13	200.26	3	
17	95259.53	447492.62	219.04	22.08	157.45	13.45	-39.94	213.58	3	
18	95261.66	447487.51	233.35	23.51	157.22	15.58	-45.06	226.77	3	
19	95263.95	447482.1	247.65	24.93	157.01	17.86	-50.46	239.82	3	
20	95266.37	447476.41	261.96	26.36	156.83	20.29	-56.16	252.71	3	
21	95268.95	447470.42	276.26	27.79	156.66	22.86	-62.14	265.45	3	
22	95271.66	447464.16	290.57	29.22	156.51	25.58	-68.41	278.02	3	
23	95274.51	447457.62	304.87	30.65	156.37	28.43	-74.95	290.41	3	
24	95277.5	447450.8	319.18	32.08	156.24	31.42	-81.77	302.63	3	
25	95280.63	447443.71	333.48	33.51	156.13	34.55	-88.85	314.65	3	
26	95283.89	447436.36	347.79	34.94	156.02	37.81	-96.21	326.48	3	
27	95287.29	447428.74	362.09	36.37	155.92	41.21	-103.8	338.11	3	
28	95290.82	447420.87	376.4	37.79	155.82	44.73	-111.7	349.52	3	
29	95294.47	447412.75	390.7	39.22	155.73	48.39	-119.8	360.71	3	
30	95298.25	447404.38	405.01	40.65	155.65	52.17	-128.2	371.68	3	
31	95302.16	447395.77	419.31	42.08	155.57	56.07	-136.8	382.41	3	
32	95306.18	447386.93	433.62	43.51	155.49	60.1	-145.6	392.91	3	
33	95310.33	447377.85	447.92	44.94	155.42	64.24	-154.7	403.16	3	
34	95314.59	447368.55	462.22	46.37	155.35	68.5	-164	413.16	3	
35	95318.96	447359.03	476.53	47.8	155.29	72.88	-173.5	422.9	3	
36	95323.44	447349.3	490.83	49.23	155.23	77.36	-183.3	432.37	3	
37	95328.04	447339.36	505.14	50.66	155.17	81.95	-193.2	441.58	3	
38	95377.95	447231.48	658.83	50.66	155.17	131.87	-301.1	539.01	0	
39	95827.21	446260.56	2042.09	50.66	155.17	581.12	-1272	1415.87	0	
40	95831.77	446250.71	2056.27	49.24	155.07	585.69	-1282	1424.99	3	
41	95836.26	446241.07	2070.45	47.83	154.97	590.18	-1291	1434.38	3	
42	95840.67	446231.66	2084.64	46.41	154.86	594.59	-1301	1444.03	3	
43	95844.99	446222.48	2098.82	45	154.74	598.91	-1310	1453.93	3	
44	95849.22	446213.53	2113	43.58	154.62	603.14	-1319	1464.09	3	
45	95853.37	446204.81	2127.18	42.17	154.49	607.29	-1328	1474.48	3	
46	95857.42	446196.34	2141.36	40.75	154.36	611.34	-1336	1485.11	3	
47	95861.38	446188.12	2155.55	39.34	154.22	615.3	-1344	1495.96	3	
48	95865.24	446180.16	2169.73	37.92	154.07	619.16	-1352	1507.04	3	
49	95869	446172.45	2183.91	36.51	153.91	622.92	-1360	1518.34	3	
50	95872.66	446165	2198.09	35.09	153.74	626.58	-1368	1529.84	3	
51	95876.22	446157.83	2212.27	33.68	153.55	630.13	-1375	1541.54	3	
52	95879.67	446150.92	2226.46	32.26	153.35	633.58	-1382	1553.44	3	
53	95883.01	446144.3	2240.64	30.85	153.14	636.92	-1388	1565.53	3	
54	95886.24	446137.95	2254.82	29.43	152.91	640.15	-1395	1577.79	3	
55	95889.35	446131.89	2269	28.02	152.65	643.27	-1401	1590.23	3	
56	95892.36	446126.11	2283.18	26.61	152.38	646.27	-1406	1602.83	3	
57	95895.24	446120.63	2297.37	25.2	152.07	649.16	-1412	1615.58	3	
58	95898.01	446115.45	2311.55	23.79	151.73	651.93	-1417	1628.49	3	
59	95900.66	446110.56	2325.73	22.38	151.34	654.58	-1422	1641.53	3	
60	95903.19	446105.97	2339.91	20.97	150.91	657.11	-1427	1654.71	3	
61	95905.59	446101.69	2354.09	19.56	150.42	659.51	-1431	1668.02	3	
62	95907.88	446097.72	2368.28	18.15	149.86	661.79	-1435	1681.44	3	
63	95910.03	446094.05	2382.46	16.75	149.21	663.95	-1439	1694.97	3	
64	95912.06	446090.69	2396.64	15.35	148.44	665.98	-1442	1708.6	3	
65	95913.96	446087.65	2410.82	13.95	147.52	667.88	-1445	1722.32	3	
66	95915.73	446084.93	2425	12.55	146.4	669.65	-1448	1736.12	3	
67	95917.37	446082.52	2439.19	11.16	145.01	671.29	-1450	1750	3	

**BIJLAGE 4**  
**Dikte kaarten van de Berkel Zandsteen**

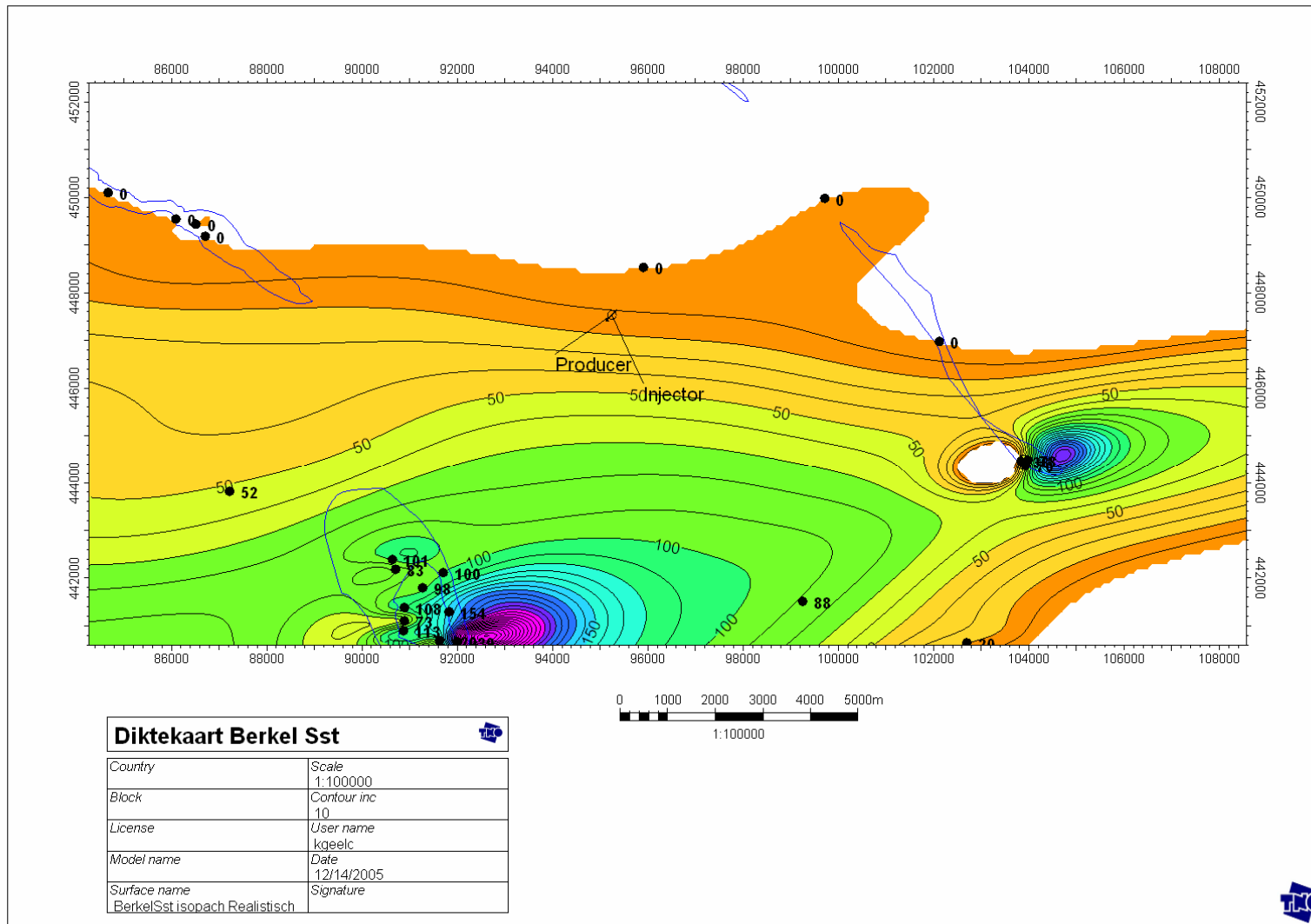
## Bijlage 4A – Diktekaart van de Berkel Zandsteen, ‘onrealistisch’



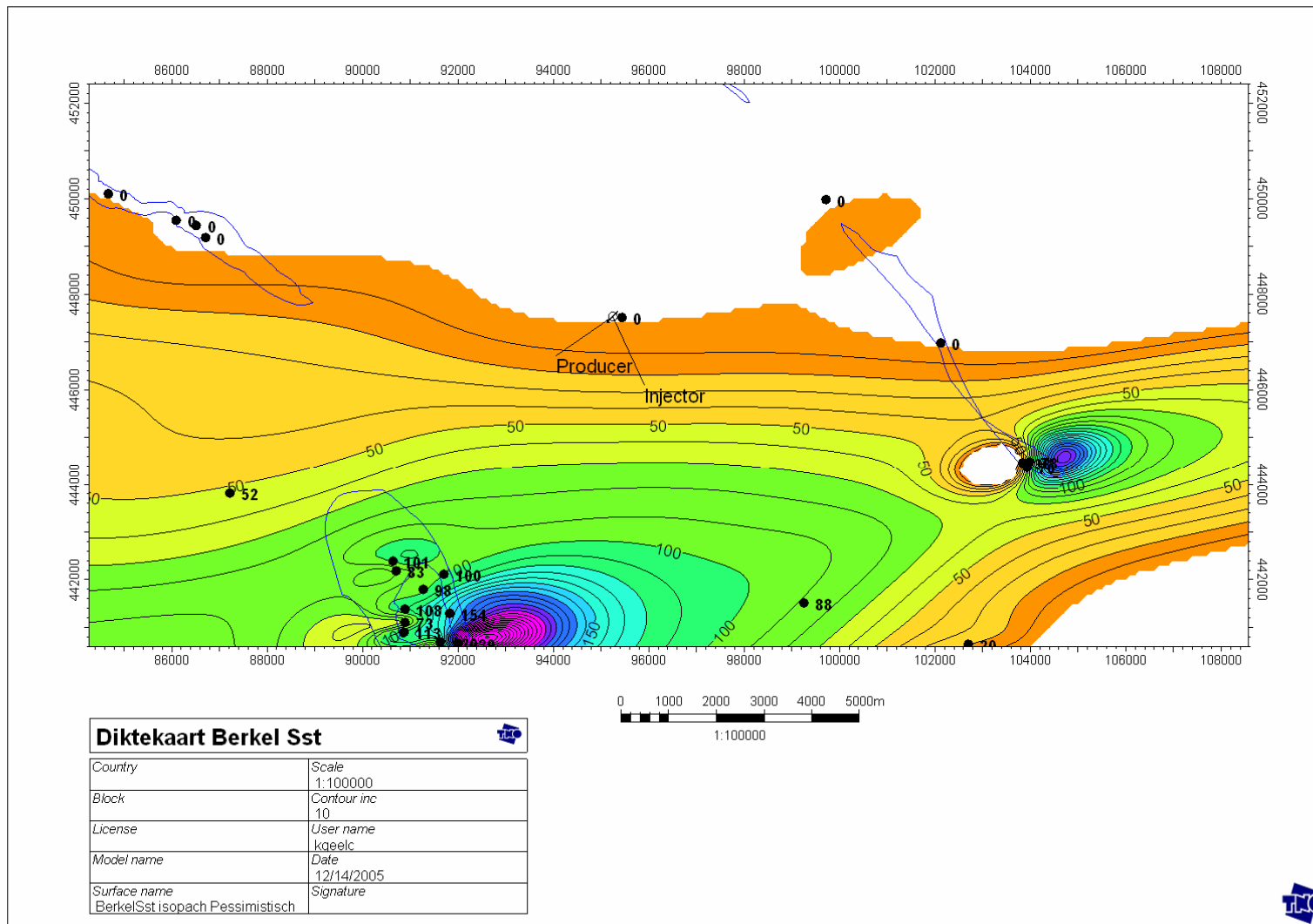
## Bijlage 4B – Diktekaart van de Berkel Zandsteen, 'optimistisch'



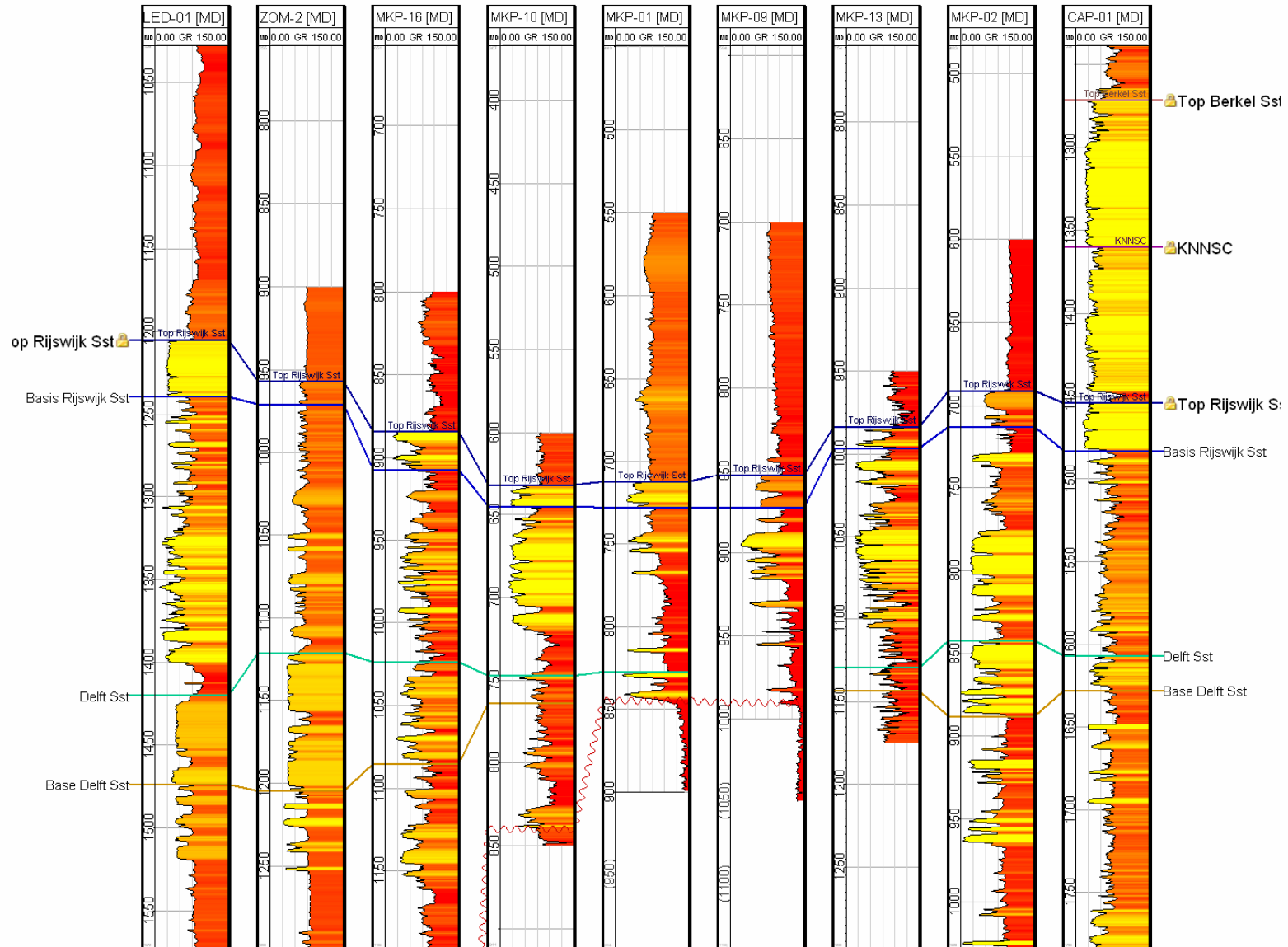
## Bijlage 4C – Diktekaart van de Berkel Zandsteen, 'realistisch'



## Bijlage 4D – Diktekaart van de Berkel Zandsteen, ‘pessimistisch’

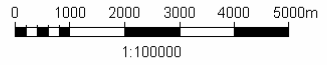
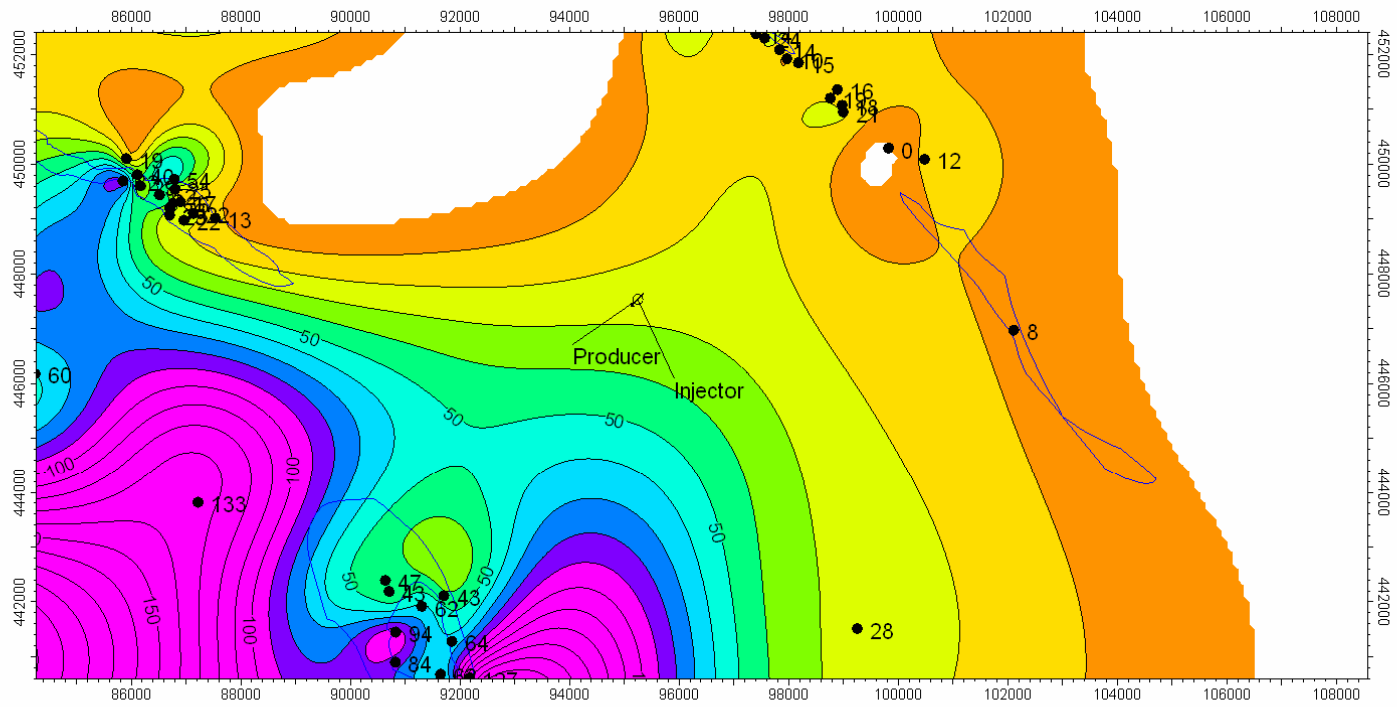


**BIJLAGE 5**  
**putcorrelatieprofiel Leidschendam-Moerkapelle-Capelle**





**BIJLAGE 6**  
**Diktekaart van de Rijswijk Zandsteen**



<b>Diktekaart Rijswijk Sst</b>	
Country	Scale
Block	1:100000
License	Contour inc
Model name	10
Surface name	User name
Rijswijk Sst Convergent	kgeelc
	Date
	12/14/2005
	Signature



## **BIJLAGE 7**

**Theoretische onderbouwing van berekeningen, gebruikt in de risicoanalyse**

## **Bijlage 8**

## Warmte productie

De warmteproductie ( $W_{th}$ ) van een geothermisch doublet is het product van het waterdebiet ( $q$ ), de warmtecapaciteit van het formatiewater (het product van soortelijke warmte ( $c_w$ ) en dichtheid ( $\rho_w$ ) en de afkoeling van het geothermische water ( $\Delta T$ ).

$$\text{warmteproductie } W_{th} = q \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot \Delta T \quad (1)$$

(met  $W_{th}$  in kW,  $q$  in m<sup>3</sup>/s,  $\rho_w$  in kg/m<sup>3</sup>,  $c_w$  in J/kgK en  $\Delta T$  in °C).

De warmteproductie is berekend voor een afkoelingstraject van de temperatuur van het opgepompte water naar 25 °C, zonder doorbraak van (afgekoeld) water met een lagere temperatuur naar de productieput.

## Levensduur

Uitgaande van uitsluitend drukgradiënten tengevolge van injectie en onttrekking volgt voor de doorbraaktijd  $t_f$  van het grondwater (Muskat, 1937):

$$t_f = \frac{\pi h \phi}{3q} d^2 \quad (2)$$

De doorbraaktijd is niet afhankelijk van de permeabiliteit. Het thermisch front blijft achter bij het grondwaterdeeltjes. Het thermische front  $t_h$  wordt bepaald door porositeit en warmtecapaciteit van de vloeistof en matrix volgens Uffink (1984):

$$t_h = \frac{\phi \rho_w c_w + (1 - \phi) \rho_r c_r}{\phi \rho_w c_w} t_f \quad (3)$$

met:

- q : putproductie (m<sup>3</sup>/s)
- d : afstand tussen productieput en injectieput (m)
- h : netto dikte reservoir (m)
- $\phi$  : porositeit reservoir (-)
- $\rho_w$  : dichtheid grondwater (kg/m<sup>3</sup>)
- $c_w$  : soortelijke warmte grondwater (J/kg.°C)
- $\rho_r$  : dichtheid gesteente (kg/m<sup>3</sup>)
- $c_r$  : soortelijke warmte gesteente (J/kg.°C)
- $\rho_f$  : dichtheid formatie matrix (J/m<sup>3</sup>.°C)
- $c_f$  : soortelijke warmte grondwater (J/kg.°C)

Bij een aangenomen porositeit van 0,2 en een vier maal hogere warmtecapaciteit van water ten opzichte van de gesteentematrix bedraagt de vertragingfactor globaal een factor 2:

$$\frac{t_h}{t_f} = \frac{\phi \rho_w c_w + (1 - \phi) \rho_r c_r}{\phi \rho_w c_w} \quad (4)$$

Het thermisch front beweegt dus met de helft van de snelheid van het grondwaterdeeltjes front.

Echter, aangezien het niet gewenst is het geïnjecteerde water opnieuw op te pompen dient vergelijking (2) aangehouden te worden voor de bepaling van de levensduur van het doublet (uitgaand van een

vaste onderlinge afstand (in dit onderzoek 2000 m). In dit onderzoek is gerekend met deze conservatieve aanname.

### Drukopbouw en-afname, pompverliezen en pompvermogen

Het benodigde pompvermogen volgt uit het drukverlies  $\Delta p$  die opgebouwd is uit een drietal componenten:  $\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3$ . Deze componenten zijn drukverlies in het reservoir  $\Delta p_1$ , rondom de put  $\Delta p_2$  en in de stijgbuis van de put  $\Delta p_3$ . Daarnaast is het benodigde pompvermogen  $P$  afhankelijk van het debiet  $q$  en het rendement van de pomp  $\eta_{pomp}$  (aangenomen waarde 0.6):

$$P = \frac{q \cdot (\Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3)}{\eta_{pomp}} \quad (5)$$

met:

$$\Delta p_1 = \left( \frac{q \cdot \mu}{2\pi k h} \right) \ln \frac{d}{r_w} \quad (6)$$

$$\Delta p_2 = \frac{q \cdot \mu}{2\pi k h} \frac{k - k_v}{k_v} \ln \frac{r_v}{r_w} \text{ of } \dots \Delta p_2 = \frac{q \cdot \mu}{2\pi k h} S \quad (7)$$

$$\Delta p_3 = 2 f \rho v^2 \frac{L}{D} \quad (8)$$

met:

- P: pompdruk (bar)
- $k_v$ : permeabiliteit verstoorde zone ( $m^2$ )
- $r_v$ : straal verstoorde zone (m)
- f: Fanning frictie factor (-)
- $\rho$ : dichtheid ( $kg/m^3$ )
- v: snelheid in stijgbuis (m/s)
- L: lengte stijgbuis (m)
- D: diameter stijgbuis (m)
- S: skinfactor (-)

De skinfactor  $S$  kan variëren van  $-8$  tot  $+10$ . Een positieve skin ontstaat door een verslechterde doorlatendheid rondom de put (bijvoorbeeld door invasie van boorspoeling, etc). Door put-stimulatie kan een positieve skin worden gereduceerd en worden omgebogen in een negatieve skin wat de toestroming van formatiewater bevordert. De skinfactor is verwaarloosd in de uitgevoerde berekeningen. De Fanning-wrijvingsfactor is een functie van het Reynolds-getal en de relatieve wandruwheid (0,03) (Economides et al., 1994). De grootste drukval treedt op in het reservoir, terwijl het drukverlies door stroming in de stijgbuis relatief gering is.

Wegens het verschil in dichtheid tussen het geproduceerde en geïnjecteerde water zal in de injectieput een drukverschil optreden dat bijdraagt aan de injectie, dit wordt het thermosyphoneffect genoemd:

$$\Delta P = z \cdot g \cdot (\rho_{w-injectie} - \rho_{w-productie}) \quad (9)$$

Dit drukverschil is in mindering gebracht op de berekende drukopbouw in de injectieput. Hierdoor valt het pompvermogen ook lager uit.

## *Referenties*

Dake, L.P. (1978) Fundamentals of reservoir engineering, *Developments in Petroleum Science*, 8, Elsevier, Amsterdam

Economides, M.J., A.D. Hill, & C. Ehlig-Economides (1994) Petroleum Production Systems, Prentice Hall Petroleum Engineering Series, New Jersey

Muskat, M. (1937) The flow of homogeneous fluids through porous media, International Human Resources Development Corporation, Boston

Uffink, G.J.M. (1984) De afvlakking van temperatuurvariaties in het grondwater door warmte uitwisseling tussen het watervoerend pakket en de boven- en ondergelegen pakketten, Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening, RID mededeling '81-4