



Princetonlaan 6
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T +31 30 256 42 56
F +31 30 256 44 75
info-BenO@tno.nl

TNO-rapport

TNO-034-UT-2009-01286/C

Rapportage Ruimtelijke Ordening Geothermie (F3)

Datum	18 juni 2009
Auteur(s)	Harmen Mijnlieff, Jan-Diederik van Wees
Opdrachtgever	Ministerie van Economische Zaken
Projectnummer	034.20776/01.03
Rubricering rapport	Confidentieel
Titel	Rapportage Ruimtelijke Ordening Geothermie (F3)
Samenvatting	
Rapporttekst	Confidentieel
Bijlagen	
Aantal pagina's	24 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	-

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke 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 onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

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

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Samenvatting en conclusies	4
3	Enkel doublet.....	6
3.1	Dimensionering invloedsgebied van het doublet.	6
3.2	Gevoeligheid voor ondergrondse heterogeniteiten.....	8
3.3	Heterogeniteiten	10
4	Ruimtelijke ordening meerdere doubletten	15
4.1	Willekeurige positionering van de doubletten.....	15
4.2	Geoptimaliseerde rangschikking van doubletten; het verkavelingmodel.....	15
4.3	Opwarming van het koude geïnjecteerde water in de ondergrond.	20
5	Synthese.....	22
6	Referenties	23
7	Ondertekening	24

1 Inleiding

TNO heeft in opdracht van het ministerie van Economische Zaken onderzoek verricht naar de vraag of het wenselijk is ruimtelijke ordening voor geothermische doubletten te regisseren om tot een optimaal geothermisch rendement te komen.

In relatie tot de opsporing en winning van aardwarmte worden ruimtelijke ordeningsaspecten steeds belangrijker. In het bijzonder in het Westland wordt de overheid momenteel geconfronteerd met een visie die stelt dat, wanneer in dat gebied op centraal niveau regie wordt gevoerd en vergunninggebieden in relatie tot elkaar uitgegeven worden, er meer en effectiever aardwarmte gewonnen kan worden dan wanneer ondernemers onafhankelijk van elkaar vergunningen aanvragen en verkrijgen.

2 Samenvatting en conclusies

Uit de modelberekeningen kan geconcludeerd worden dat ruimtelijke ordening gewenst is om optimaal gebruik te maken van de aardwarmte. Essentiële aspecten die bepalen hoe de verkaveling er uit zal zien zijn:

- de opbouw van de ondergrond,
- levensduur van het doublet en
- al dan niet gewenste interferentie of maximalisering van de winbaarheid van aardwarmte.

Modelstudies met een homogene aquifer laten zien dat doubletten elkaar beïnvloeden als zij dichtbij elkaar staan. De beïnvloeding kan zowel een positief als negatief effect hebben op de totale winbaarheid van aardwarmte. Dit is afhankelijk van de positie van de doubletten ten opzichte van elkaar. Twee voorbeelden zijn uitgewerkt: de dambord-putconfiguratie en de tramrails-putconfiguratie, waarbij de dambord-putconfiguratie het hoogste rendement haalt.

Uit de modelstudies blijkt dat de grootte en vorm van het beïnvloedingsgebied sterk afhankelijk zijn van de opbouw van de ondergrond. Als uitgegaan wordt van een homogeen aquifer, dan wordt het beïnvloedingsgebied (bepaald als daar waar meer dan 1°C temperatuursdaling of meer dan ca. 1 bar drukdaling plaatsvindt) goed benaderd met de zogenaamde “Franse Methode” (voor de definitie van de “Franse Methode” zie § 3.1). De optimale ondergrondse afstand tussen de putten en dus de grootte van het beïnvloedingsgebied wordt bepaald door de opbouw en de eigenschappen van de aquifer. Als er rekening gehouden wordt met heterogeniteiten in de aquifer, dan wordt de definitie van het beïnvloedingsgebied aanzienlijk complexer. Bij modellen met heterogeniteiten past de “Franse methode” minder goed om het beïnvloedingsgebied te bepalen.

Als de aquifer niet homogeen is zal beïnvloeding van de doubletten onderling een nog grotere rol gaan spelen. Bij een dambord-of tramrailsconfiguratie van meerdere doubletten kunnen heterogeniteiten leiden tot kortsluiting door instroming van koud water van een ander doublet. Deze kortsluiting is vooral te verwachten als de heterogeniteiten loodrecht op de verbindinglijn tussen producer en injector van individuele doubletten zijn georiënteerd.

De manier waarop de ruimtelijke ordening te implementeren is, is afhankelijk van het na te streven doel:

- Minimalisering van interferentie van doubletten door ze relatief ver uit elkaar te plaatsen met als gevolg een relatief laag rendement,
- Zo hoog mogelijk rendement door gebruik te maken van de positieve effecten van interferentie tussen doubletten. Dit kan alleen gebeuren als er optimale afstemming is in de bedrijfsvoering van de individuele doubletten.

Deze doelen kunnen per regio verschillen.

Het is niet aan te raden op voorhand een verkaveling vast te leggen. Dit omdat de ondergrond in grote mate de optimale positionering van doubletten dicteert en dus de aard van de verkaveling zal beïnvloeden. De ondergrond is nooit volledig bekend. Het is hoogstens mogelijk een model van de ondergrond maken op basis van het inzicht van

die ondergrond. Het inzicht in de ondergrond is continue aan verandering onderhevig. Nieuwe gegevens wijzigen de inzichten in de opbouw van de ondergrond en dus de modellen die daarvan zijn afgeleid. Daarnaast kunnen nieuwe ideeën, theorieën en technieken, de gegevens in een ander licht plaatsen waardoor een alternatief model van de ondergrond meer adequaat lijkt. Dit is goed te illustreren aan de hand van vele case studies uit de olie en gas industrie.

Doelmatige winning van aardwarmte, kan alleen uitgevoerd worden als alle relevante gegevens en methoden gebruikt zijn voor actuele beeldvorming en modellering van de ondergrond. Het is daarom belangrijk dat die gegevens op korte termijn na verkrijgen beschikbaar worden gesteld om het model van de ondergrond continue te kunnen actualiseren en de positionering van toekomstige doubletten te kunnen optimaliseren.

Voor beide bovengenoemde ruimtelijke ordeningstrategieën is - zoals hierboven vermeld - het niet opportuun om op voorhand de locaties van de alle productie- en injectieputten te definiëren, omdat met elk nieuw datapunt de kans groot is dat het model van de ondergrond wijzigt en dus de optimale locaties kunnen wijzigen.

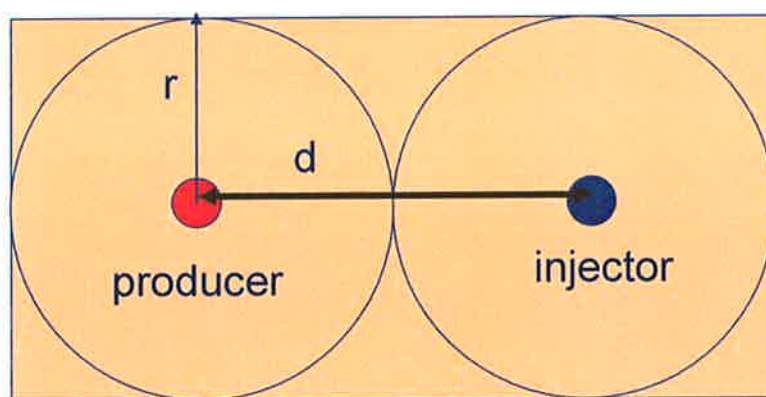
Een alternatief is om op basis van het beoogde doel: minimalisering van interferentie of zo hoog mogelijke rendement, een protocol op te stellen waaraan een toekomstig doublet moet voldoen om zoveel mogelijk het beoogde doel te verwezenlijken. Bijvoorbeeld, voor het doel “zo min mogelijk interferentie” is het plaatsen van het doublet parallel aan de heterogeniteiten één van de elementen van een dergelijk protocol.

Het protocol zou gepaard moeten gaan met een met regelmaat geactualiseerd (locaal) model van de ondergrond inclusief locaties van bestaande en geplande doubletten. Met behulp van reservoirmodellering kan bepaald worden of de gewenste nieuwe doubletlocatie aan het bereiken van het doel.

3 Enkel doublet

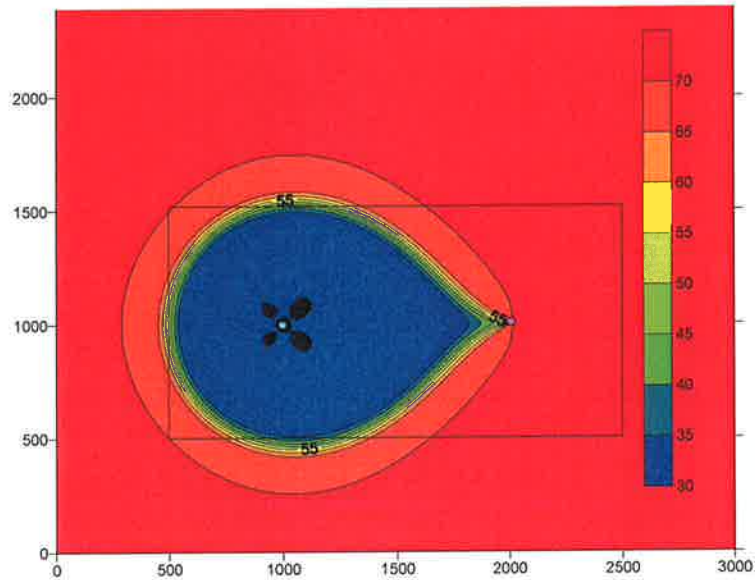
3.1 Dimensionering invloedsgebied van het doublet.

Een geothermisch doublet bestaat uit een injectieput en productieput. Via de productieput wordt warmte gewonnen. Afgekoeld productiewater wordt weer geïnjecteerd op reservoir niveau. Op het niveau van het reservoir is de putafstand (d in Figuur 1) tussen de injectieput en productieput groot genoeg om thermische kortsluiting binnen de economische levensduur te voorkomen. Volgens de zogenaamde “Franse methode” wordt het beïnvloedsgebied van een doublet gedefinieerd door een rechthoek die 2 cirkels omvat met een straal die gelijk is aan de halve afstand tussen de putten op reservoirniveau (zie Figuur 1).

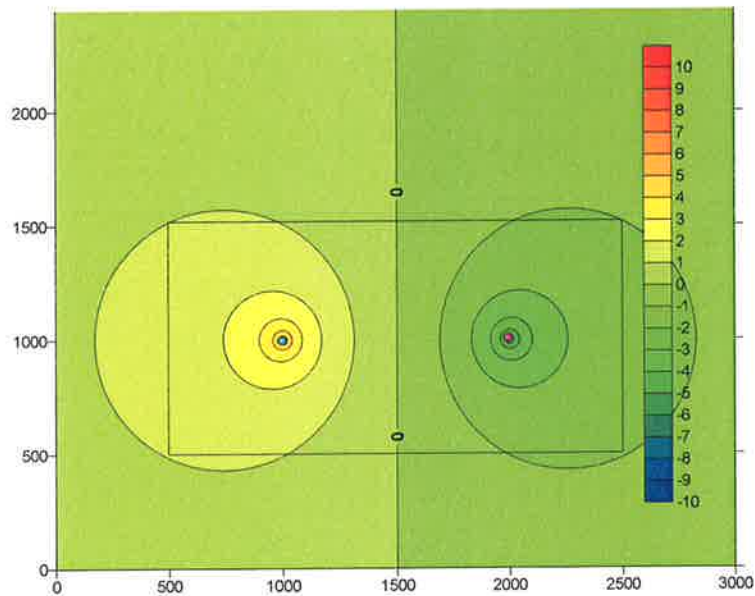


Figuur 1: Plaatsing van injectie- en productieput op reservoirniveau.

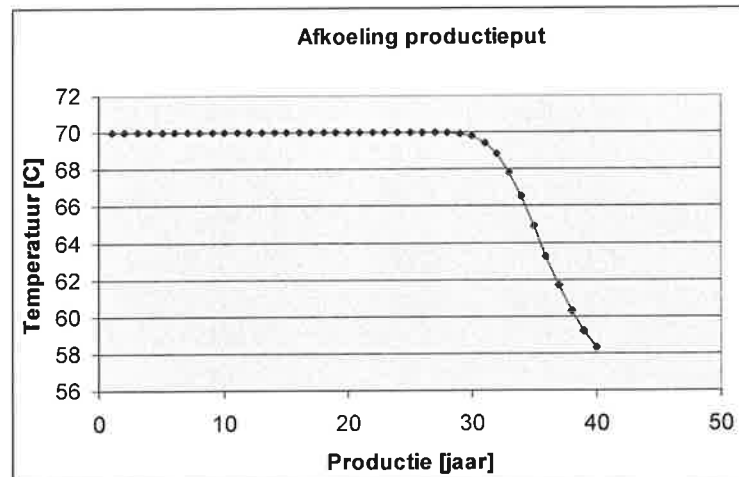
Onder aanname van homogene reservoirkarakteristieken leveren numerieke berekeningen en analyse volgens de ‘Franse Methode’ vergelijkbare resultaten voor de definitie van het beïnvloedsgebied (zie Figuur 2). Het geometrische patroon van het afkoelingsfront heeft een druppelvorm. Deze is typisch voor een geothermisch doublet en verandert niet van vorm bij een andere putafstand aan het einde van de levensduur. Figuur 3 laat zien dat de drukbeïnvloeding verder buiten het “Franse Methode gebied” treedt, maar dat, dat - in de meeste gevallen - een waarde tussen 0 en 1 bar betreft. Figuur 4 toont het verloop van de temperatuur van het productiewater met de tijd. Opmerkelijk is de snelle daling van de temperatuur als het koudefront de productieput eenmaal heeft bereikt.



Figuur 2: Numerieke berekening van het temperatuurverloop op het moment van thermische kortsluiting, die ontstaat zodra koud injectiewater de productieput bereikt na 35 jaar productie. De rechthoek (conform Franse methode) definieert, bij benadering, de grenzen van koudefront goed. Locatie injector (1000,1000), blauwe stip, producer (2000,1000) roze stip. Schaal in °C



Figuur 3: Numerieke berekening van het drukverschil op het moment van thermische kortsluiting, die ontstaat als koud injectiewater de productieput bereikt na 35 jaar productie. Schaal in bar.



Figuur 4: Afkoeling van de productiewatertemperatuur in het numerieke model.

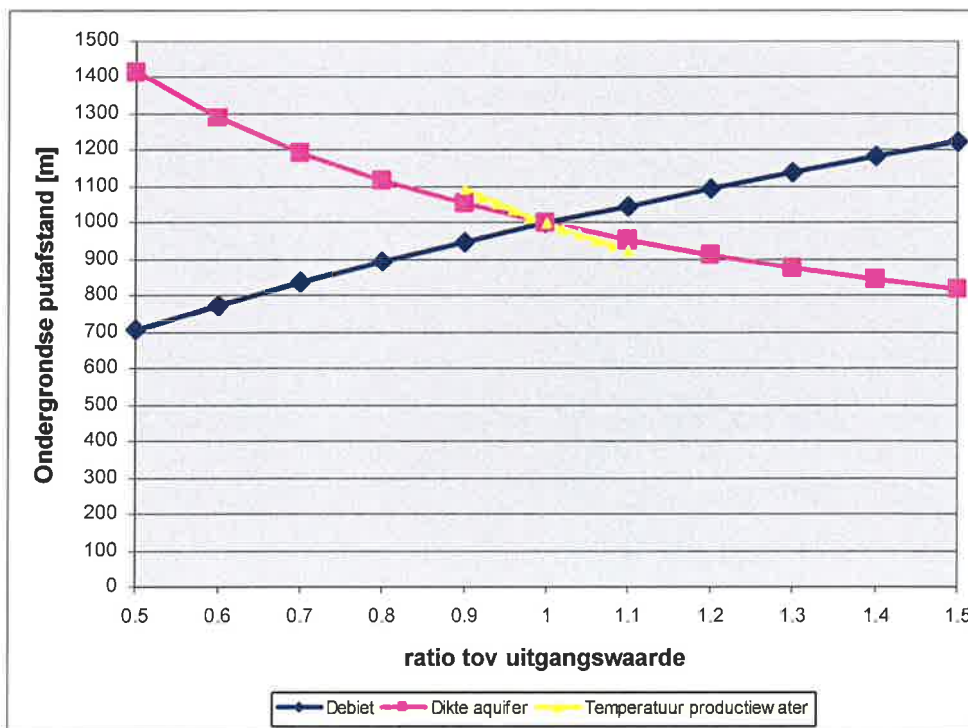
Voor de situatie van een homogeen reservoir en een opgegeven verschil in temperatuur tussen injectieput en productieput kan het technisch rendement van een geothermisch doublet worden berekend door de geproduceerde warmte te delen door beschikbare warmte van de aquifer in het beïnvloedingsgebied (bij temperatuurverschil $T_{\text{prod}} - T_{\text{inj}}$). Bij een geaccepteerde afkoeling van het productiewater van 3 °C is het rendement 53%. Als de geaccepteerde afkoeling van het productiewater rond de 10 °C ligt neemt het rendement toe tot ca 65%.

3.2 Gevoeligheid voor ondergrondse heterogeniteiten

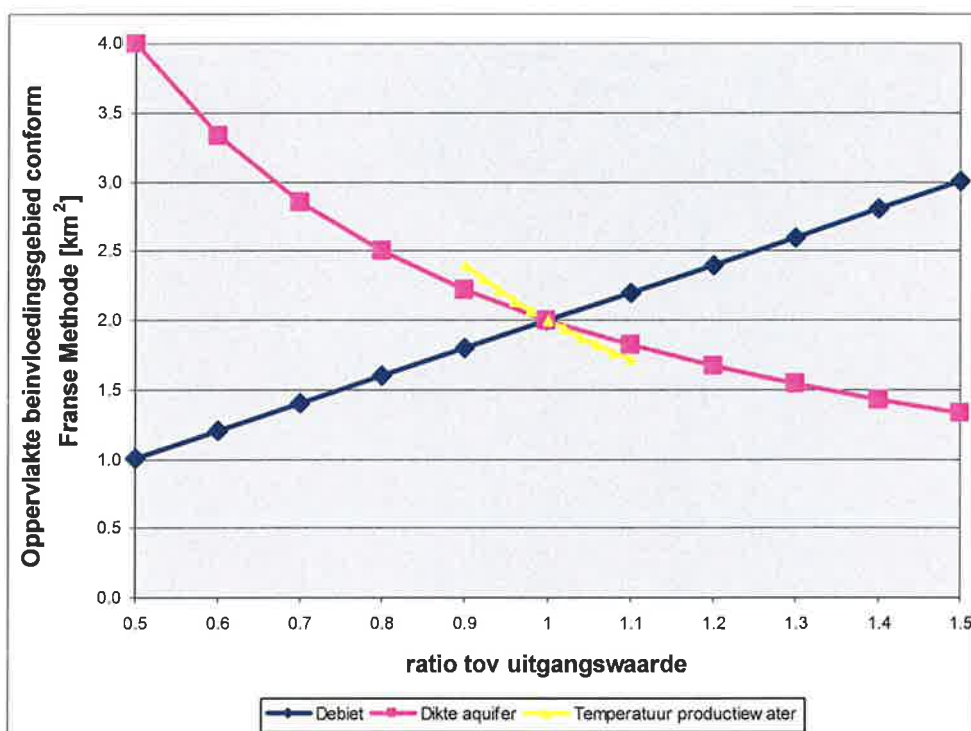
De oppervlakte van het beïnvloedingsgebied van de temperatuur is een functie van de ondergrondse putafstand. Bij toepassing van de “Franse methode” bestaat het beïnvloedingsgebied uit een rechthoek met een lange zijde die twee maal de putafstand bedraagt en een korte zijde van één maal de putafstand.

Resultaten van de analyse om de invloed van de opbouw van de ondergrond op de ondergrondse putafstand en dus de grootte van het beïnvloedingsgebied te evalueren zijn in Figuren 5 en 6 geïllustreerd. Voor een vaststaande economische levensduur van 35 jaar en een vaststaand vermogen van 7,7 MW is één van de aquiferparameters (dikte, debiet of temperatuur) gevarieerd. Gevolg van deze variatie op de ondergrondse putafstand of grootte van beïnvloedingsgebied is weergegeven in een van de curves voor respectievelijk dikte, debiet en temperatuur. Uitgangswaarden van deze parameters bij waarde “1” op de x-as “ratio tov uitgangswaarde” in de grafieken van figuur vijf en zes zijn: dikte 70m, debiet 200 m³/uur en temperatuur 70 °C.

De variatie in ondergrondse eigenschappen, dikte, temperatuur, debiet en technische randvoorwaarden hebben grote effecten op de putafstand die vereist is om de gewenste levensduur te halen. Voor het rendement van warmtewinning maakt de grootte van de putafstand niet uit, die blijft ingeval van een homogeen reservoir in de orde van 50%.

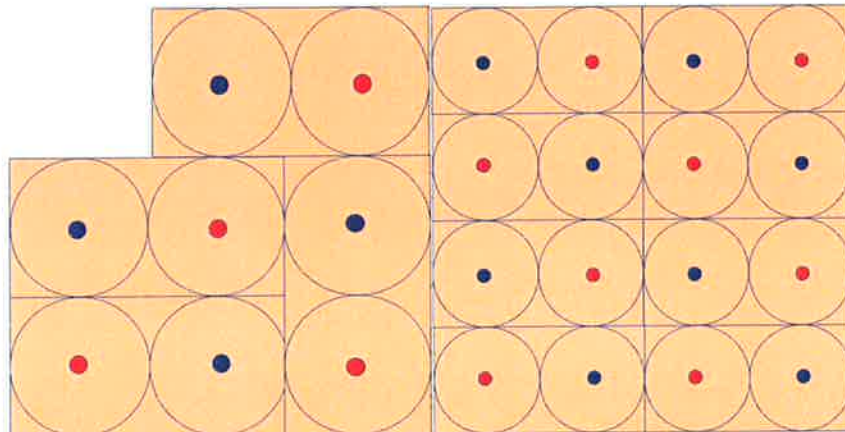


Figuur 5: Ondergrondse putafstand als functie van relatieve variatie tov van uitgangswaardes: debiet - donkerblauw, dikte aquifer - paars, temperatuur productiewater - geel.



Figuur 6: Dezelfde analyse als in Figuur 5 maar dan de oppervlakte van het beïnvloedingsgebied conform de "Franse Methode" als functie van relatieve variatie tov van uitgangswaardes: debiet - donker blauw, dikte aquifer - paars, temperatuur productiewater - geel.

Grote putafstanden, geassocieerd met (mogelijk onnodig) lange levensduur geven (onnodig) grote rechthoeken voor individuele doubletten. Dit kan de doelmatigheid en efficiëntie van geothermie in de weg staan. Dit wordt gedemonstreerd aan de hand van een voorbeeld (Figuur 7) uitgaande van een levensduur van 70 jaar. De putafstand is dan ca 1500m. Als gevolg hiervan zal in de eerstkomende periode (eerste 35 jaar) veel minder aardwarmte geput worden dan theoretisch mogelijk is bij een putafstand van 1000 m behorende bij een levensduur van 35 jaar. In het 70 jaar scenario wordt in de eerste periode van 35 jaar maar 50% van de technische beschikbare warmte gewonnen.



Figuur 7: Doublet rangschikking op basis van een levensduur van 70 jaar met 4 doubletten (links) en 35 jaar met 8 doubletten (rechts).

3.3 Heterogeniteiten

Voorgaande evaluaties zijn uitgevoerd uitgaande van een homogeen aquifer. Zelfs op de schaal van het beïnvloedingsgebied van een doublet is de verwachting van homogeniteit erg optimistisch. Bijvoorbeeld, bij het reeds gerealiseerde doublet van Van der Bosch (Bleiswijk) is gebleken dat het reservoir over een afstand van ca 1800 meter significant in dikte verandert.

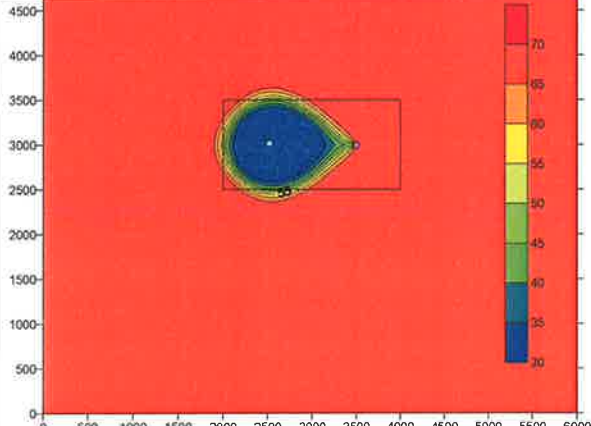
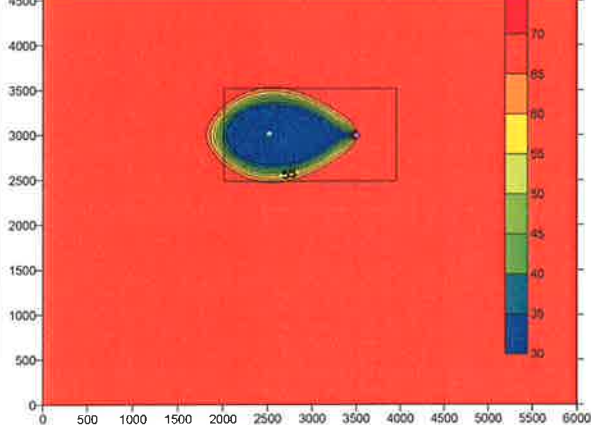
De ondergrond is niet homogeen. Bovendien is het bekend in zowel de olie en gas industrie als de waterwinningswereld, dat heterogeniteiten in de aquifer het stromingsgedrag en stromingspatroon van een vloeistof in belangrijke mate bepalen.

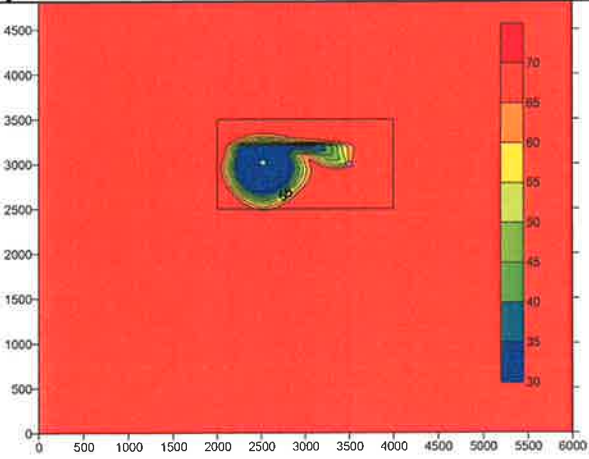
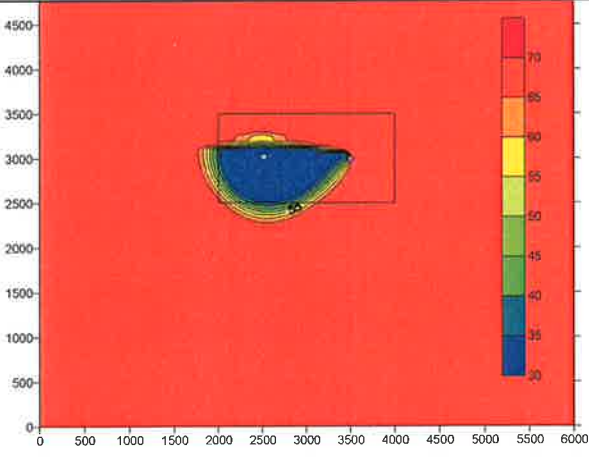
Voorbeelden van heterogeniteiten zijn:

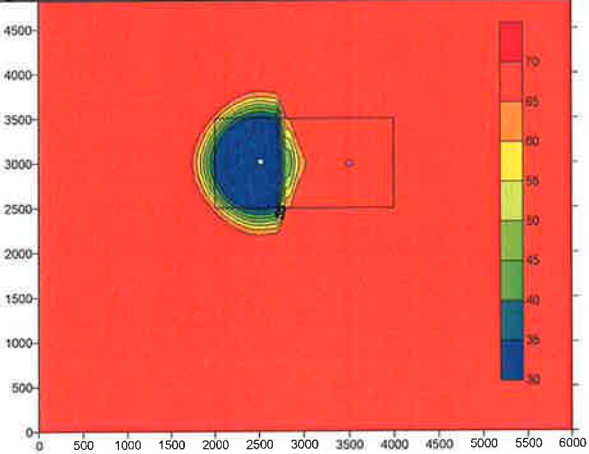
1. De permeabiliteit is anisotroop verdeeld in de horizontale dimensie. Dit kan bijvoorbeeld optreden als de aquifer is opgebouwd uit oude rivierafzettingen die over het algemeen een voorkeursoriëntatie hebben. In de richting loodrecht op de voorkeursrichting neemt de permeabiliteit af ten opzichte van parallel aan de voorkeursrichting. Als de richting van de relatieve hoge permeabiliteit overeenkomt met de verbindingslijn tussen injectie- en productieput dan treedt eerder kortsluiting op dan in een homogeen model. Omgekeerd, als de permeabiliteit langs de verbindingslijn juist lager is dan treedt later kortsluiting op
2. De permeabiliteit kan in lokale zones in de horizontale en verticale dimensie sterk verhoogd of verlaagd zijn. In het bijzonder kan dit het geval zijn in breukzones. Voor breuken met een sterk verhoogde permeabiliteit geldt dat deze, evenals de anisotropie bij punt 1, kunnen leiden tot versnelde

kortsluiting als de richting van de breuk overeenkomt met de verbindingslijn tussen injectieput en productieput.

In de onderstaande figuur 8 zijn situaties geïllustreerd van heterogeniteiten zoals beschreven bij punt 1 en 2 en het verwachte effect op het beïnvloedingsgebied.

Configuratie model	Temperatuurverdeling (°C) na 35 jaar productie
<p>Model 1. Beïnvloedingsgebied van standaard model met een homogene/isotrope aquifer. Uitgangsmodel ("base case") Figuur 2</p> <p>Rendement: 53%</p>	
<p>Model 2. Anisotrope verdeling van permeabiliteit in de horizontale dimensie ($permX/permY = 2$).</p> <p>De belangrijkste heterogeniteit gevormd wordt door een permeabiliteitcontrast tussen de richting parallel aan de as tussen de putten en daar loodrecht op. Stroming tussen de putten verloopt gemakkelijker dan in richting loodrecht daarop. Het gevolg is dat de koude doorbraak eerder komt en de winbaarheid en het beïnvloedingsgebied kleiner is t.o.v. de "base case"</p> <p>Rendement: ca 38%</p>	

Configuratie model	Temperatuurverdeling (°C) na 35 jaar productie
<p>Model 3. Permeabiliteitzone met een 10x hogere permeabiliteit op een afstand van 150m (breedte 100m) van de injectie en productieput en parallel aan de lijn tussen de injectie en productieput.</p> <p>De belangrijkste heterogeniteit een hoog permeabele zone (bv een open breukzone) ligt parallel aan de lijn tussen de injectie- en productieput. Het beïnvloedingsgebied verandert sterk van vorm. Doorbraak van het koudefront en dus de levensduur en het rendement is afhankelijk van hoe dicht de permeabele zone bij de putten ligt.</p> <p>Rendement: ca 25%</p>	
<p>Model 4. Permeabiliteitzone met een 10x lagere permeabiliteit op een afstand van 150m (breedte 100m) van de injectie en productieput en parallel aan de lijn tussen de injectie- en productieput. Bijvoorbeeld een afsluitende breukzone.</p> <p>Het beïnvloedingsgebied verandert significant van vorm. Doorbraak van het koudefront en dus de levensduur en het rendement is afhankelijk van hoe dicht de impermeabele zone bij de putten ligt.</p> <p>Rendement: ca 41%</p>	

Configuratie model	Temperatuurverdeling (°C) na 35 jaar productie
<p>Model 5. Een permeabiliteitzone (bv een afsluitende breuk), met een 10x lagere permeabiliteit op een afstand van 250m (breedte 100m) van de injector loodrecht op de lijn tussen de injectie- en productieput.</p> <p>Het beïnvloedingsgebied verandert significant van vorm. De heterogeniteit zorgt ervoor dat er amper communicatie is, zowel qua druk als stroming tussen de doubletputten. De druk aan de kant van de injectieput zal oplopen en aan de productieput verlagen. De “Coëfficiënt of Performance” van het doublet zal aanzienlijk teruglopen.</p> <p>Rendement: >65%</p>	

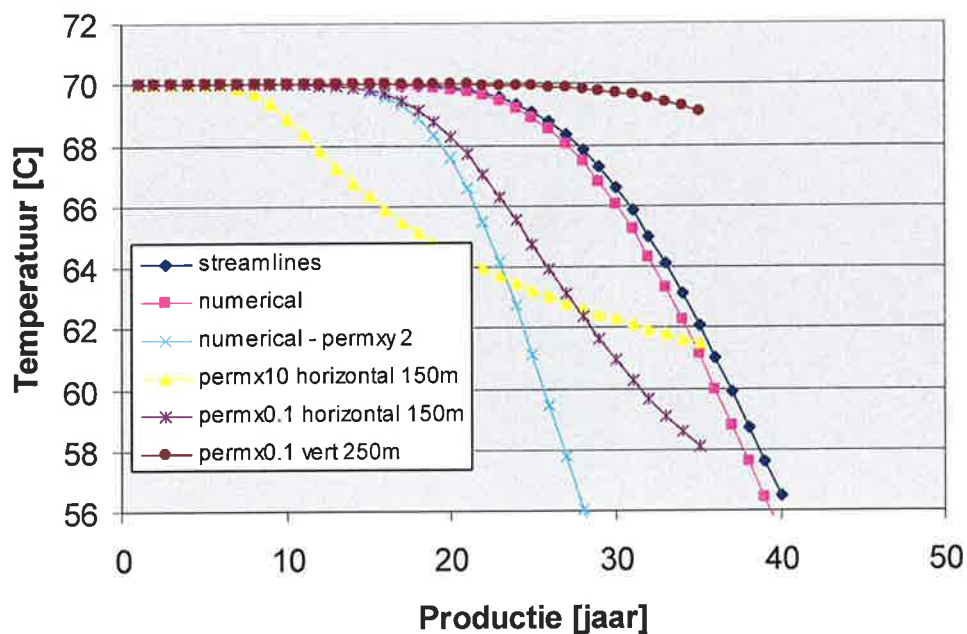
Figuur 8: Temperatuursverdeling van vijf verschillende modellen van de ondergrond na 35 jaar productie uit een enkel doublet.

De doorbraak van het koudefront in de productieput voor de bovenstaande scenario’s is in de onderstaande grafiek (Figuur 9) uitgezet. De vermindering van de levensduur en het rendement kan hieruit worden bepaald. Uitgangspunt is dat de levensduur wordt bepaald door het moment dat 3 graden of meer afkoeling optreedt in de productieput.

De verkorte levensduur geeft een vermindering van het rendement, die naar rato gelijk is aan de vermindering van de levensduur. De tabel bij het Figuur 9 geeft een samenvatting van de effecten van verkorte levensduur en verlaagd rendement.

De curves “streamlines” en “numerical” zijn de doorbraakcurves voor het homogene model 1 van twee verschillende berekeningsmethoden. Opvallend is dat hoge permeabiliteitszone bij een afstand van 150m van de verbindingslijn tussen injector en producer (model 3 gele curve) de kortsluiting zeer sterk vervroegt. Ook model 2 met de anisotrope permeabiliteits verdeling (licht blauwe curve) heeft een significant eerdere doorbraaktijd. Hetzelfde geldt voor het model 5 met een afsluitende breuk parallel aan de verbindingslijn tussen de doubletputten (donkerpaarse lijn).

Afkoeling productieput



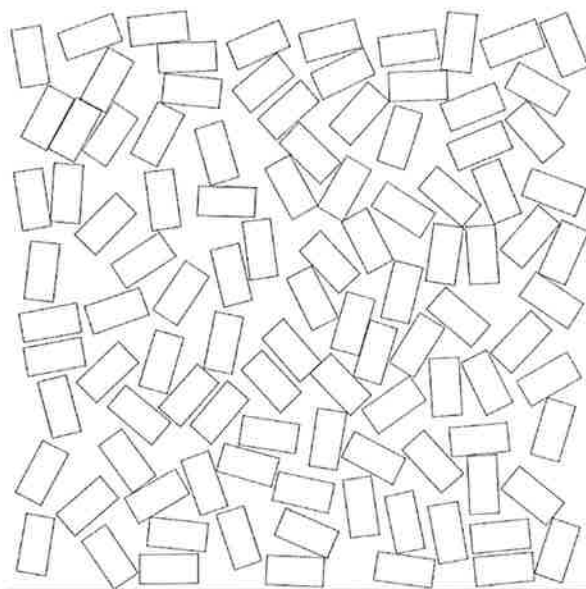
Figuur 9: Afkoeling van productie-temperatuur in het numerieke model voor heterogeniteiten.

Model	Rendement (%)	Levensduur (jaar)
model 1: Streamlines methode (donker blauw)	53	35
model 1: Numerical methode (roze)		
model 2: Numerical – permxy2 (lichtblauw)	38	25
model 3: Permx10 horizontal 150m (geel),	25	17
model 4: Permx0.1 horizontal 150m (paars)	41	27
model 5: Permx0.1 verticaal 250m (bruin)	77	51

4 Ruimtelijke ordening meerdere doubletten

4.1 Willekeurige positionering van de doubletten

Als uitgifte van opsporing- of winningvergunningen voor aardwarmte willekeurig geschiedt uitgaande van een homogeen reservoir en vermijding van overlappende vergunning gebieden dan zal de efficiëntie van de aardwarmtewinning significant afnemen. Per doublet is het rendement 53%. In geval van optimale verkaveling van beïnvloedingsgebieden van 1 x 2 km, passen 200 doubletten in een gebied ter grootte van 400km² (fig. 10). Onder de aanname dat er geen beïnvloeding van de doubletten plaatsvindt, is het bulk rendement ook 53%. Bij een scenario van willekeurig gepositioneerde beïnvloedingsgebieden kunnen er maar 104 doubletten geplaatst worden. Het bulk rendement zal dan in de orde van 27% zijn.



Figuur 10: Honderdvier willekeurig georiënteerde doubletten in een gebied van 20x20km.

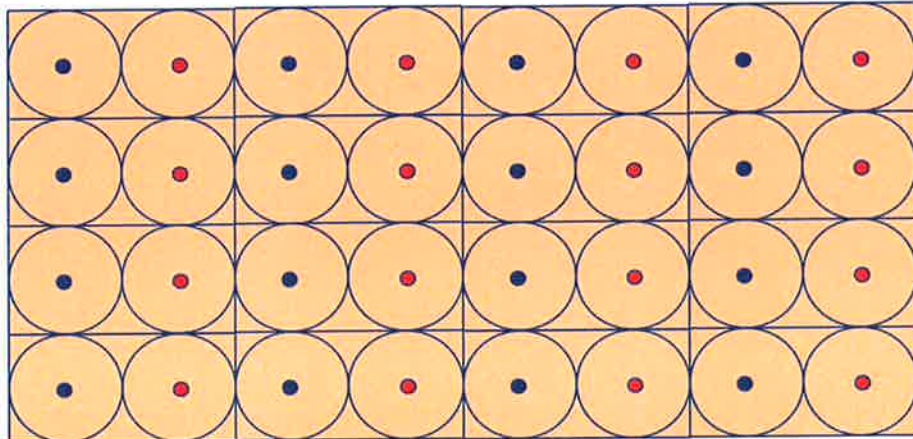
4.2 Geoptimaliseerde rangschikking van doubletten; het verkavelingmodel.

Voor een optimaal rendement wordt uitgegaan van een plaatsing van de beïnvloedingsgebieden van de doubletten in een vast patroon, zodanig dat de gebieden zo goed mogelijk aansluiten.

Op het eerste gezicht lijkt het vanzelfsprekend dat het bulk technisch rendement van strak gerangschikte doubletten gelijk is aan het technisch rendement van een enkel doublet. Echter, door drukbeïnvloeding verlopen de stroomlijnen, paden, van het water en daarmee het verloop van thermische kortsluiting niet zoals bij een enkel doublet. Dit wordt gedemonstreerd met twee configuraties van verkaveling van de beïnvloedingsgebieden conform de “Franse methode”. Uitgangspunt in de simulatie is ondermeer, dat het reservoir homogeen is en dat de doubletten een *identiek* productie- en injectiegedrag hebben.

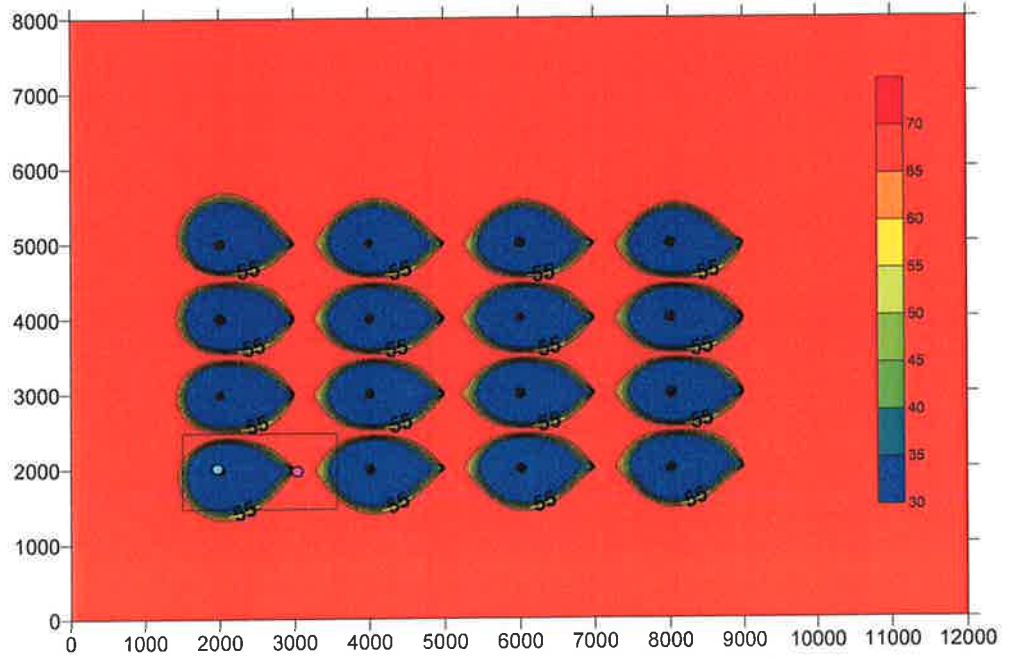
1) Tramrails patroon

In een de "tramrails" configuratie zijn 16 doubletten geplaatst in een patroon zoals geïllustreerd figuur 11a. Dit patroon is bijvoorbeeld opportuun om productielocaties in de warmste delen van het reservoir te positioneren bijvoorbeeld in de diepe delen van een plooi/welving de zgn. synclines en de injectieputten juist op het hoger gelegen delen de zgn. anticlines.

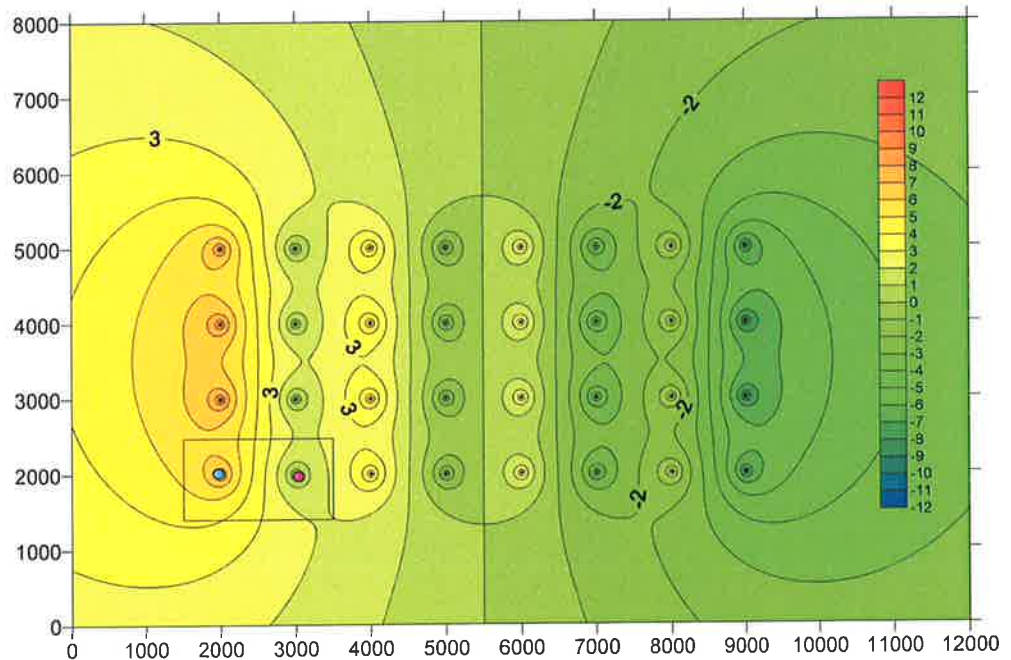


Figuur 11a: Configuratie van aansluitende rechthoekige beïnvloedingsgebieden.
Productieput = rode stip; Injectieput = blauwe stip.

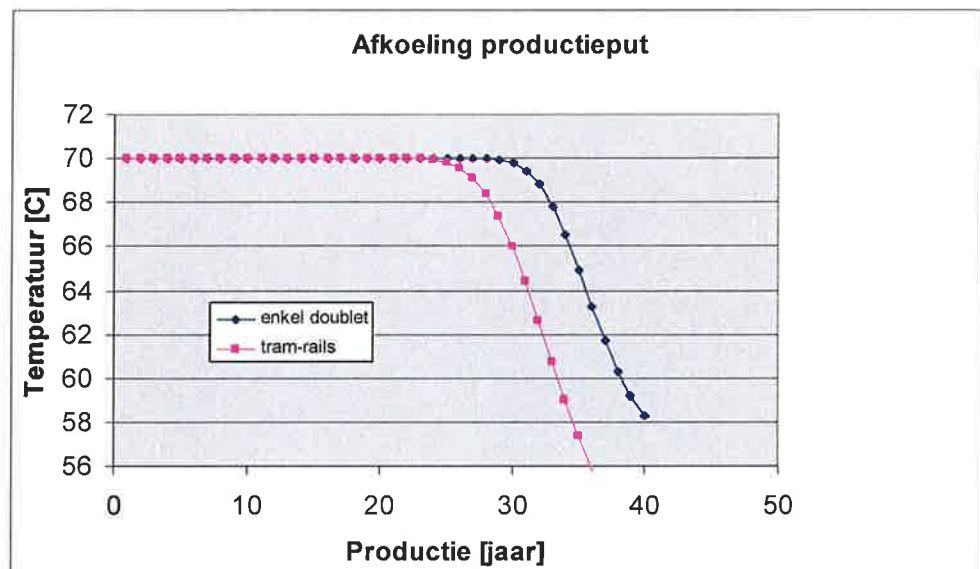
Uit de modelstudie volgt dat de thermische uitnutting wordt gekenmerkt door een afgeplat druppelpatroon (fig. 11b), wat een versnelling oplevert van de thermische kortsluiting. Het drukpatroon (fig. 11c) wordt gekenmerkt door drukken die voor de putten iets lager zijn (ca 13 bar) dan in een enkel doublet (12 bar). De afkoeling in de productieput blijkt eerder, na ca 28 jaar, op te treden in plaats van de 35 jaar voor een enkel doublet (fig. 11d). Deze 15% verkorte levensduur is significant en leidt tevens tot een ca 15% lager rendement. Het bulk rendement zal in de orde van 40% zijn.



Figuur 11b: Temperatuur verdeling na 35 jaar bij putten tram-rails configuratie (Fig. 11a). Merk de afgeplatte druppelvorm (vgl Fig. 2) op als gevolg van druk beïnvloeding.



Figuur 11c: Drukeffect bij putten in tram-rails configuratie (fig 11a). De verhoogde drukken worden veroorzaakt door clustering van injectieputten en productieputten.

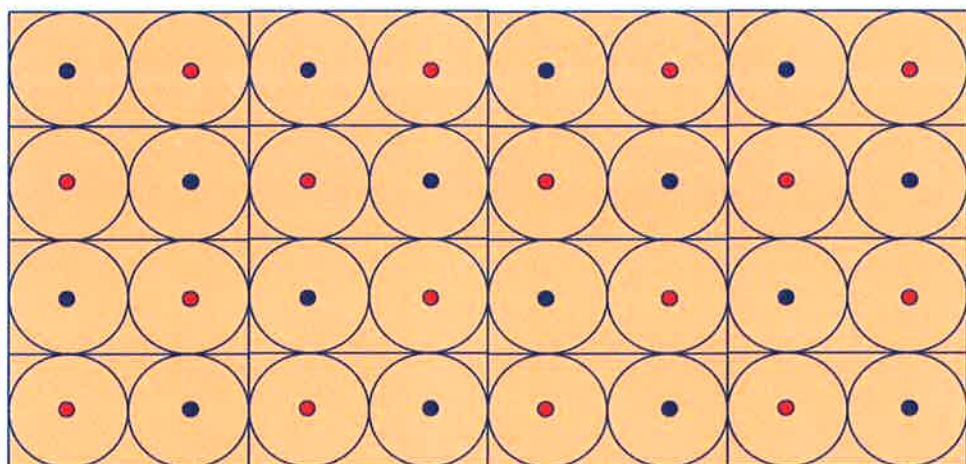


Figuur 11d: Afkoeling van productie-temperatuur in het numerieke model voor de tram-rails patroon vergeleken met een configuratie van een enkel doublet.

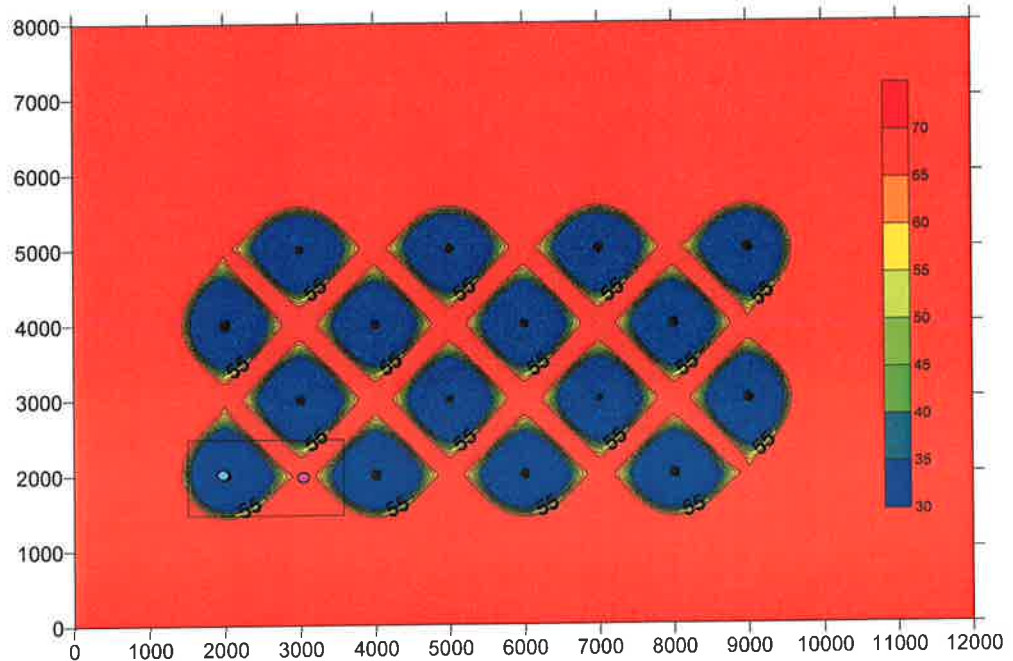
2) Dambordpatroon

In de dambordconfiguratie zijn 16 doubletten geplaatst in een patroon waarbij de injectie- en productieputten elkaar afwisselen zoals geïllustreerd in Figuur 12a. Deze configuratie komt overeen met de zogenaamde five-spot configuratie uit de olie en gas industrie voor optimale drainage van olievelden. Hierin worden doubletten om en om geplaatst zodanig dat iedere injectieput wordt omringd door vier productieputten.

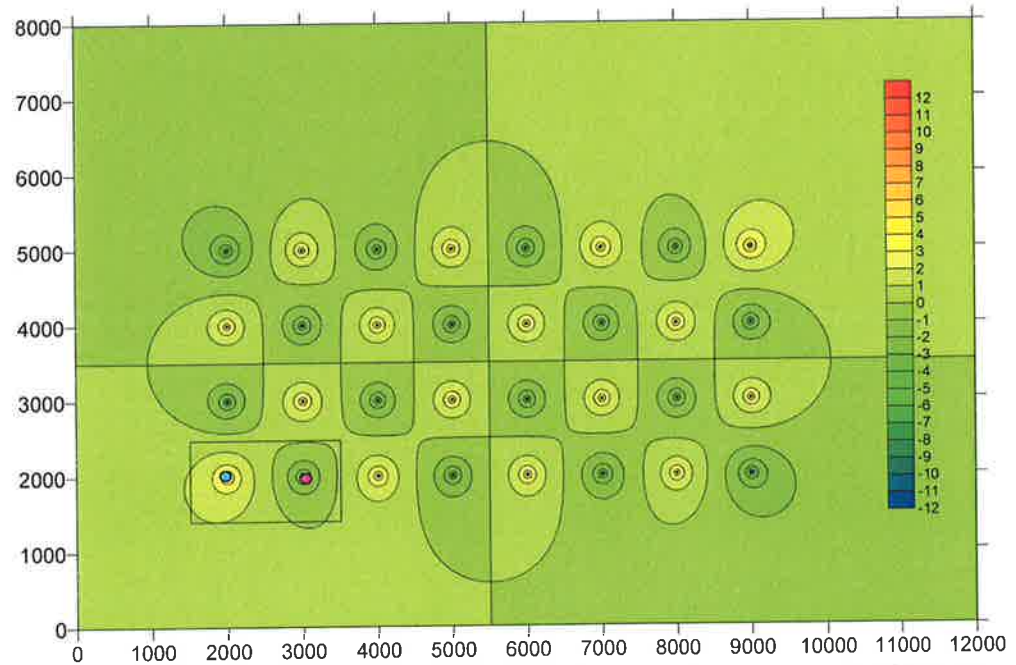
Door onderlinge drukbeïnvloeding wordt de thermische uitnutting gekenmerkt door een ruitvorming patroon (Fig. 12b), wat ten goede komt aan een vertraging van de thermische kortsluiting. Het druk patroon (Fig. 12c) wordt gekenmerkt door drukken die voor de putten iets lager zijn (ca 11 bar) dan in een enkel doublet (12 bar). De afkoeling in de productieput blijkt significant later, na ca 40 jaar (Fig. 12d), op te treden in plaats van de 35 jaar voor een enkel doublet. Deze 15% verlengde levensduur is significant en leidt tevens tot een ca 15% hoger rendement. Het bulk rendement zal in de orde van 65% zijn.



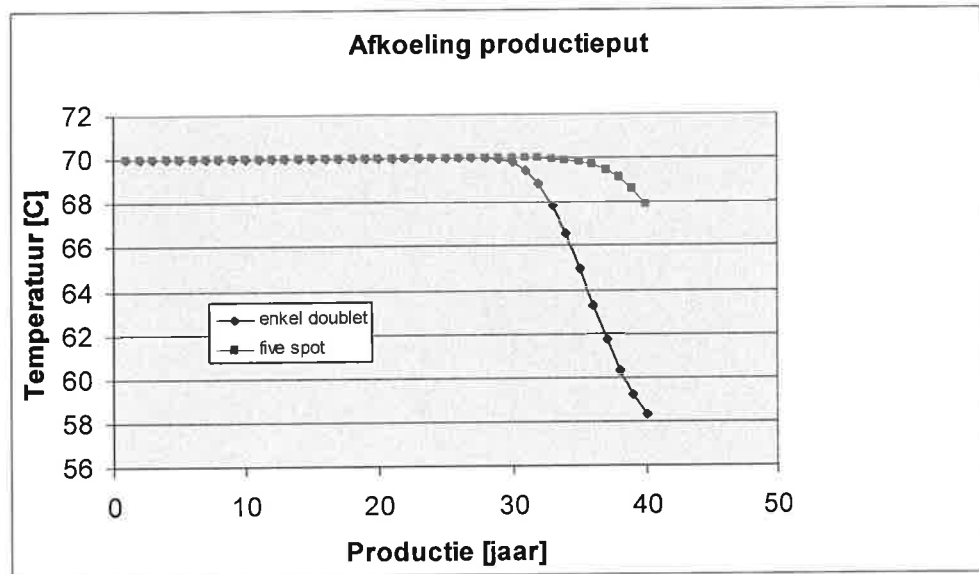
Figuur 12a: Dambord configuratie van aansluitende rechthoekige beïnvloedingsgebieden. De doubletten zijn om en om geplaatst om maximale productie en maximaal rendement te verkrijgen met minimale druk, conform de zogenaamde dambord configuratie



Figuur 12b: Temperatuur effect na 35 jaar in de Dambord configuratie (schaal in °C). De doubletten zijn om en om geplaatst volgens een dambord configuratie resulterend in maximale productie en maximaal rendement met minimale drukverschillen. Linksonder is een rechthoek conform de Franse methode en de injectie- en productie put geprojecteerd.



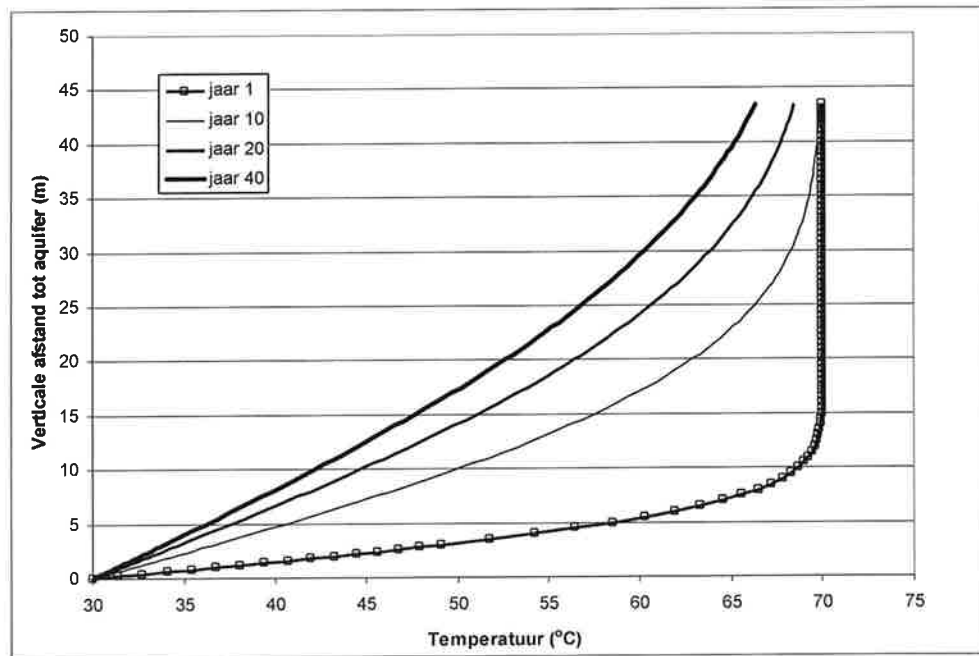
Figuur 12c: Drukeffect na 35 jaar in de dambord configuratie (schaal in bar). Linksonder is een rechthoek conform de Franse methode en de injectie- en productie put geprojecteerd.



Figuur 12d: Afkoeling van productietemperatuur in het numerieke model voor het dambord vergeleken met een configuratie van een enkel doublet. De productieput (van de curve in de grafiek) bevindt zich in het midden van de 16 doubletten op locatie 5000,4000. Aan de randen is het voordeel van het dambord iets minder significant.

4.3 Opwarming van het koude geïnjecteerde water in de ondergrond.

Bij productie van aardwarmte ontstaat er ook een verticale temperatuurgradiënt in de gesteenten boven en onder de aquifer. De gecreëerde temperatuurgradiënt samen met geleidend vermogen van het omliggende gesteente resulteert in een warmtestroom van relatief warm nevingesteente gesteente naar de afgekoelde aquifer. De hoeveelheid warmte die aan het nevingesteente wordt onttrokken door geleiding en ook de migratiesnelheid van het warmtefront is te berekenen. In de onderstaande grafiek (Figuur 13) is het effect van verticale geleiding op de temperatuur van het nevingesteente weergegeven in tijdstappen van 10 jaar. Afhankelijk van de gesteente-eigenschappen is het mogelijk dat er een significante hoeveelheid warmte aan de aquifer wordt toegevoegd. Op een in dit rapport gebruikte levensduur van 35 jaar kan het bulk rendement en levensduur met, naar schatting, 30% verhogen. Dit effect is nog niet in de modelberekeningen van bovenstaande paragrafen meegenomen. De uitkomsten kunnen dus als conservatieve waarden beschouwd worden.



Figuur 13: Afkoeling van het nevengeesteente ten gevolge van warmte productie uit een aquifer.

5 Synthese

Tot op heden zijn aanvragen voor geothermie gericht op benutting van aardwarmte met een enkel doublet. Om de grootte van het opsporingsvergunning gebied te bepalen wordt een feasibility/quickscan studie uitgevoerd. Deze studie vindt plaats aan de hand van een warmtevraag aan de oppervlakte. Uit de warmtevraag kan het gewenste thermische vermogen bepaald worden. Op basis van een (voorlopig) model van de ondergrond en bovengenoemde randvoorwaarden voor realisatie van de warmtevraag, wordt een optimale doubletconfiguratie bepaald en daarmee de grootte van het aan te vragen gebied.

Uit voorgaande hoofdstukken blijkt dat debiet en levensduur en daarmee het gebied dat binnen de invloedssfeer van het doublet valt, zowel qua druk als temperatuur, sterk afhankelijk zijn van:

- 1) De opbouw van de aquifer (primaire karakteristieken en heterogeniteiten) en
- 2) De interferentie met nabij gelegen doubletten.

Voorts blijkt dat het rendement sterk afhankelijk is van de opbouw van de ondergrond en de winningstrategie. Voor een enkel doublet in een homogeen reservoir is het rendement binnen de rechthoek van de “Franse Methode” ca 53% (“base case”). In alle modelstudies met een enkel doublet blijkt dat voor slechts één het rendement hoger kan zijn dan 53%. Voor dit model zijn productie- en injectieput niet met elkaar in communicatie. De COP van deze configuratie is ongunstig.

Ook in de modelstudies met meerdere doubletten is er slechts een die een hoger rendement heeft dan 53%. Als doubletten in een dambordpatroon worden geplaatst en de winning uit de verschillende doubletten op elkaar wordt afgestemd is het rendement in de orde van 65%.

Eén punt dat geadresseerd moet worden bij het aanvragen van een aardwarmtevergunning is welke optimalisatie strategie nagestreefd wordt:

1. Interferentie van doubletten zoveel mogelijk beperken met als gevolg een relatief laag rendement of,
2. Zo hoog mogelijk rendement waardoor interferentie noodzakelijk is om optimalisatie van de winning na te streven.

De keuze van strategie bepaald in grote mate de locatie en oriëntatie van het te zetten doublet en dus de grootte en oriëntatie van het aan te vragen gebied.

De ervaring leert dat het inzicht in de ondergrond continue aan verandering onderhevig is. Nieuwe gegevens wijzigen de inzichten in de opbouw van de ondergrond en dus de modellen die daarvan zijn afgeleid. Daarnaast kunnen nieuwe ideeën, theorieën en technieken, de gegevens in een ander licht plaatsen waardoor een alternatief model van de ondergrond meer adequaat lijkt.

Ongeacht de strategie die nagestreefd wordt is het model van de ondergrond bepalend voor de optimale doublet configuratie. Het model van de ondergrond is continue aan verandering onderhevig en dus is het op voorhand vastleggen van doubletlocaties niet wenselijk omdat er dan niet geleerd kan worden van nieuwe data en inzichten om warmtewinning te optimaliseren dan wel interferentie te minimaliseren.

6 Referenties

Van Wees et al. 2009 (in prep), Evaluatie van effecten van Ondergrondse Ruimtelijke Ordening voor geothermie.

7 Ondertekening

22 juni 2009

TNO Bouw en Ondergrond

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'B.M. Schroot', written over a horizontal line.

Drs. B.M. Schroot
Hoofdadvisgroep Economische Zaken