



Princetonlaan 6  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht

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

T +31 30 256 42 56  
F +31 30 256 44 75  
[info-BenO@tno.nl](mailto: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

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Samenvatting en conclusies .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Enkel doublet.....</b>	<b>6</b>
3.1	Dimensionering invloedsgebied van het doublet. ....	6
3.2	Gevoeligheid voor ondergrondse heterogeniteiten.....	8
3.3	Heterogeniteiten .....	10
<b>4</b>	<b>Ruimtelijke ordening meerdere doubletten .....</b>	<b>15</b>
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
<b>5</b>	<b>Synthese.....</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>23</b>
<b>7</b>	<b>Ondertekening .....</b>	<b>24</b>

# 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.

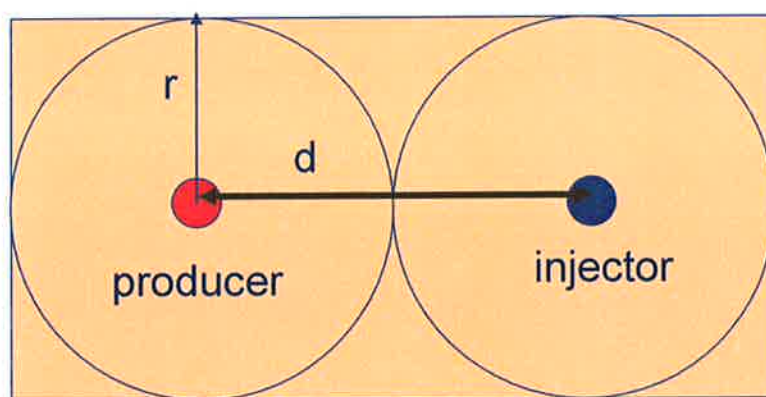
Een alternatief is om op basis van het beoogde doel: minimalisering van interferentie of zo hoog mogelijke rendement, een protocol op te stellen waaraan een toekomstig doublet moet voldoen om zoveel mogelijk het beoogde doel te verwezenlijken. Bijvoorbeeld, voor het doel “zo min mogelijk interferentie”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

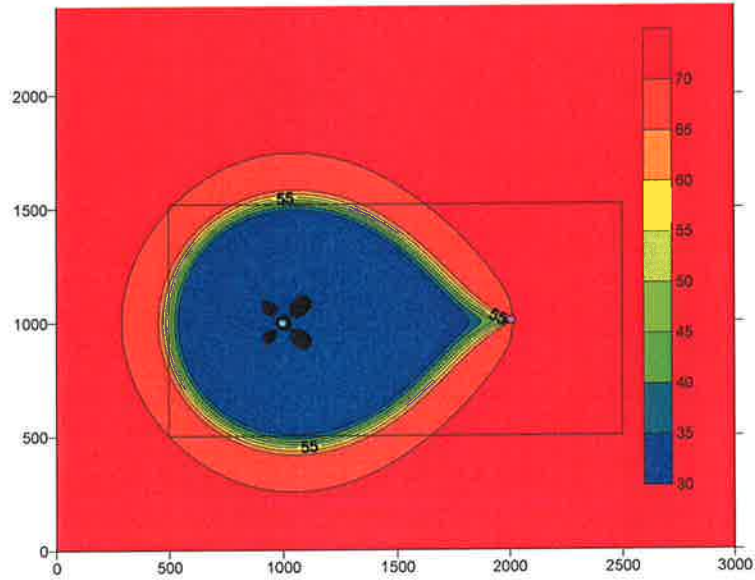
#### 3.1 Dimensionering invloedsgebied van het doublet.

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).

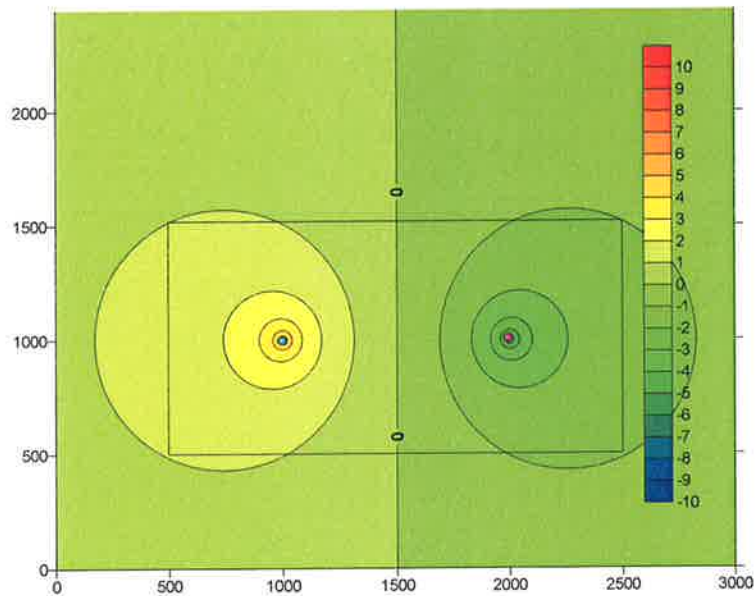


Figuur 1: Plaatsing van injectie- en productieput op reservoirniveau.

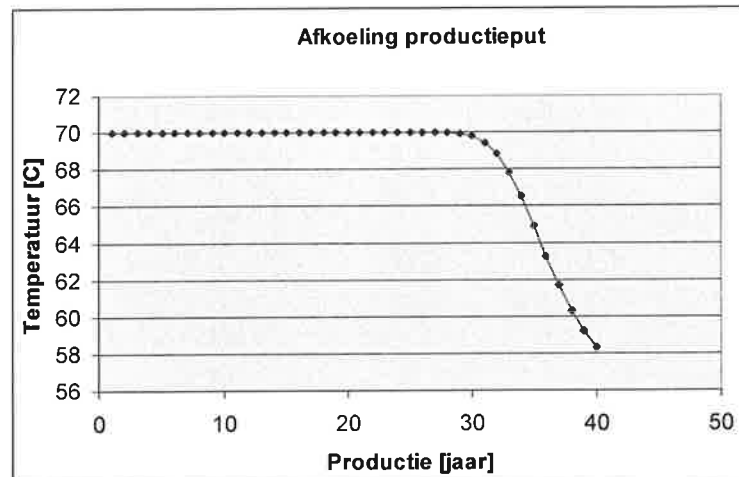
Onder aanname van homogene reservoirkarakteristieken leveren numerieke berekeningen en analyse volgens de ‘Franse Methode’ vergelijkbare resultaten voor de definitie van het beïnvloedsgebied (zie Figuur 2). Het geometrische patroon van het afkoelingsfront heeft een druppelvorm. Deze is typisch voor een 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.

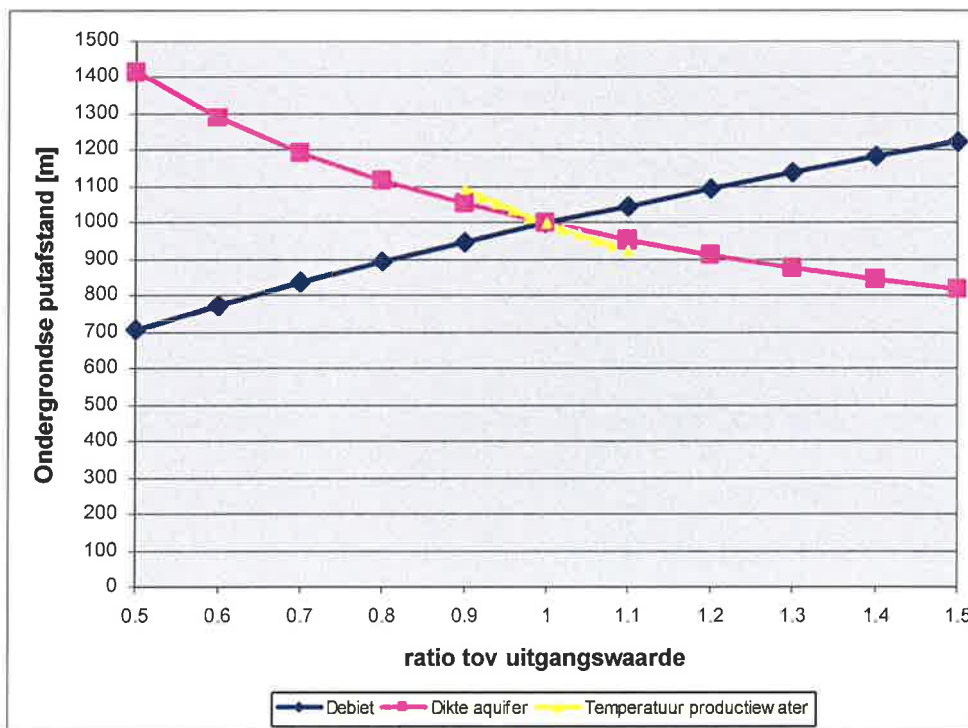
Voor de situatie van een homogeen reservoir en een opgegeven verschil in temperatuur tussen injectieput en productieput kan het technisch rendement van een geothermisch doublet worden berekend door de geproduceerde warmte te delen door beschikbare warmte van de aquifer in het beïnvloedingsgebied (bij 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

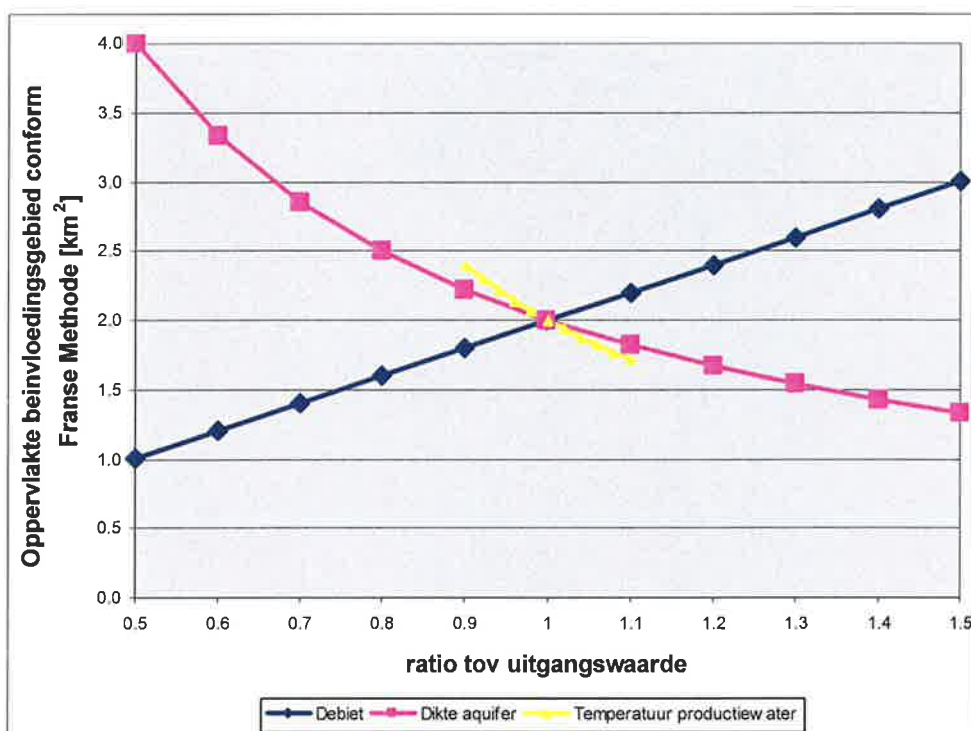
De oppervlakte van het beïnvloedingsgebied van de temperatuur is een functie van de ondergrondse putafstand. Bij toepassing van de “Franse methode” bestaat het beïnvloedingsgebied uit een rechthoek met een lange zijde die twee maal de putafstand bedraagt en een korte zijde van één maal de putafstand.

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 m<sup>3</sup>/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%.

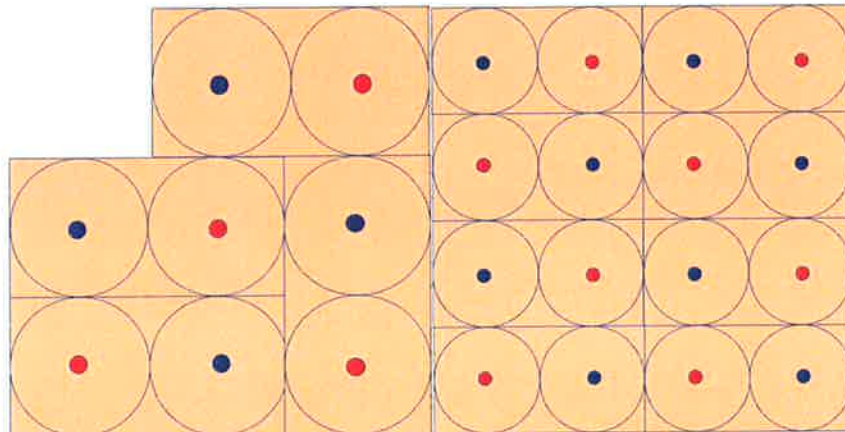


Figuur 5: Ondergrondse putafstand als functie van relatieve variatie tov van uitgangswaardes: debiet - donkerblauw, dikte aquifer - paars, temperatuur productiewater - geel.



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