

## TNO Bouw en Ondergrond

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-2009-02002/B**

Voorstel rapportage-vereisten geologische  
evaluatie aardwarmte project.

Datum	6 oktober 2009
Auteur(s)	Harmen Mijnlief, Arie Obdam, Alexander Kronimus, Jan-Diederik van Wees, Peter van Hooff
Opdrachtgever	
Projectnummer	034.20775/01.03
Rubricering rapport Titel Samenvatting Rapporttekst Bijlagen	Vertrouwelijk
Aantal pagina's	39 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	0

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.

© 2009 TNO

## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Geologische evaluatie.....</b>	<b>4</b>
2.1	Minimale vereisten rapportage geologische evaluatie ter onderbouwing van de aanvraag garantie regeling .....	4
<b>3</b>	<b>Handleiding DoubletCalc, het geothermisch vermogenberekeningsprogramma ....</b>	<b>9</b>
3.1	Inleiding.....	9
3.2	Schema geothermisch doubletsysteem .....	9
3.3	Invoerscherm .....	10
3.4	Berekeningsresultatenscherf .....	11
<b>4</b>	<b>Puttest .....</b>	<b>15</b>
4.1	Eisen Boring .....	15
4.2	Puttest .....	15
4.3	Interpretatie puttest .....	17
4.4	Beoordeling van de vaststellingsaanvraag .....	17
<b>5</b>	<b>Beschrijving methodiek bepaling Geothermisch vermogen-kansverdeling.....</b>	<b>19</b>
5.1	Inleiding.....	19
5.2	Opzet van het model .....	19
5.3	Massabalans.....	22
5.4	Energiebalans.....	27
5.5	Watereigenschappen .....	29
5.6	Oplossingsmethode.....	32
5.7	Berekende kenmerken van het geothermische doubletsysteem .....	32
5.8	Spreiding in Parameters .....	33
5.9	Beschouwingen.....	34
<b>6</b>	<b>Verklaring van gebruikte letters en symbolen .....</b>	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>39</b>

# 1 Inleiding

TNO heeft in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken een protocol opgesteld dat kan dienen als leidraad voor het opstellen van het geologisch evaluatiedocument dat een aanvraag voor deelname aan de aardwarmte garantiefaciliteit moet ondersteunen.

Naast dit rapport is door TNO een computerprogramma ontwikkeld dat het verwachte geothermisch vermogen van een beoogd doublet berekent. Dit programma, DoubletCalc genaamd, is beschikbaar op de door EZ geïnitieerde website [www.nlog.nl](http://www.nlog.nl) waar allerlei zaken (ondermeer data en referenties) betreffende de diepe ondergrond worden gepubliceerd.

In het tweede hoofdstuk van dit rapport worden de door TNO geadviseerde rapportagevereisten behandeld. Het derde hoofdstuk is de handleiding van het geothermisch vermogen berekeningsprogramma (DoubletCalc). Het vierde hoofdstuk omvat de voorwaarden voor de puttestdefinitie; een puttest zou uitgevoerd moeten worden om te bepalen of in de geboorde put het te behalen debiet of vermogen ook werkelijk valt te realiseren. Het vijfde hoofdstuk beschrijft de theoretische onderbouwing van het geothermisch vermogen berekeningsprogramma.

*Notities bij de vrijgave van het TNO advies “Voorstel rapportagevereisten geologische evaluatie aardwarmte project” aan EZ.*

*Dit rapport is een adviesrapport aan het Ministerie van Economische Zaken. Hoe en welke elementen uit dit rapport zullen worden gebruikt in de implementatie van de regels en procedures van de garantiefaciliteit valt buiten de competentie van TNO.*

## 2 Geologische evaluatie

De geologische evaluatie dient als onderbouwing van de parameters die gebruikt zijn om het aardwarmte potentieel van het geothemisch project te berekenen. Dit is in essentie het locatiespecifieke, geowetenschappelijke onderzoeksrapport dat gemaakt wordt voorafgaand aan het zetten van de boringen. De volgende onderdelen moeten in de geologische evaluatie duidelijk herkenbaar zijn (bijvoorbeeld als hoofdstuktitel, of als bijlage).

- A. Seismiek: kaart met de locatie van de gebruikte seismische survey's of seismische lijnen, beschrijving tijd-diepte conversie methodiek, illustratie van de interpretatie van top aquifer en bovenliggende belangrijke reflectoren (minimaal de geologische groepsgrenzen) en de ligging van eventuele breuken op minimaal twee representatieve seismische secties door het aangevraagde gebied.
- B. Contourkaart van de diepte ligging van de top van de aquifer met onder meer de ligging van breuken, de doellocatie van de boringen, de locatie van de installatie en de trajecten van de seismische lijnen die dienen ter illustratie van de opbouw van de ondergrond.
- C. Boringen: de namen en locatie van boringen die zijn gebruikt voor de evaluatie, welke gegevens van die boringen zijn gebruikt per boring. De gebruikte gegevens of afgeleide/geïnterpreteerde gegevens.
- D. Onderbouwing van de parameters genoemd bij § 2.1
- E. Schematische tekening van de te zetten boringen; met diameters, dieptes, materialen, verbuizing, diepte pomp, oppervlakte locatie en locatie doorprikpunt op aquiferniveau. Coördinaten van de locatie gegevens dienen opgegeven te worden in het coördinatenstelsel van de Rijksdriehoeksmeting (RD).

In de volgende paragrafen wordt dit nader uitgewerkt.

### 2.1 Minimale vereisten rapportage geologische evaluatie ter onderbouwing van de aanvraag garantie regeling

In essentie is de te overleggen geologische evaluatie een kopie van het locatie specifieke geowetenschappelijke onderzoeksrapport dat uitgevoerd wordt voordat een boring gezet gaat worden. Het geologische evaluatie rapport dient ter onderbouwing, illustratie, documentatie van de opgegeven essentiële parameters. Het geologisch evaluatierapport dient minimaal aan onderstaande vereisten te voldoen.

### 2.1.1 *Locale geologie*

De laagpakketten boven de aan te boren aquifer die in de onderhavige vergunning voorkomen worden beschreven. Dit dient om een gedegen tijd-diepte conversiemodel op te stellen voor de geïnterpreteerde seismiek. Daarnaast dient het als leidraad voor de identificatie van eventuele boorrisico's. De gegevens die gebruikt zijn om deze prognose van de aan te treffen laagpakketten op te stellen, waaronder putgegevens en seismiek, dienen opgesomd te worden. Bovendien dient de gelaagdheid van maaiveld tot en met de aquifer geïllustreerd te worden aan de hand van minimaal één geïnterpreteerde seismische sectie zodanig georiënteerd dat de beoogde doorprikpunten van de putten met de aquifer nagenoeg op de sectie liggen. In geval van het ontbreken van een seismische sectie die aan die eisen voldoet de dichtst bij gelegen, relevante seismische sectie.

### 2.1.2 *Diepte top aquifer – seismische interpretatie*

De diepte van top aquifer op de doellocaties van de putten wordt afgelezen van de top aquifer dieptekaart.

Minimaal vereist is een top aquifer-dieptekaart met daarop aangegeven:

1. eventueel aanwezige breuken die de aquifer doorsnijden;
2. doorprikpunten van bestaande putten met de gekarteerde aquifer, inclusief labels van putnaam en dieptewaarde;
3. de locatie van de beoogde doorprikpunten op top aquiferniveau en de oppervlakte locatie van de doubletputten. De coördinaten in RD, dienen ook in tabelvorm te worden opgegeven.
4. het traject van de seismische lijnen die als illustratie zijn gekozen.

In het rapport wordt opgenomen hoe de kaart is gemaakt en welke data er aan ten grondslag ligt. Dit betreft:

1. naam/code seismische survey(s) (evt. welk deel ervan) en de bedekkinggraad van /aantal geïnterpreteerde lijnen over het aangevraagde gebied. Dit alles in een opsomming en geïllustreerd op een kaart. De top aquiferkaart dient bij voorkeur gebaseerd te zijn op:
  - a. indien aanwezig relevante 3D-seismische bedekking van het vergunninggebied van de meest recente publiek beschikbare 3D-survey of
  - b. indien beschikbaar voor aanvrager een recentere processing van dezelfde 3D-survey of
  - c. zo mogelijk een recentere niet publieke 3D-seismische survey.
  - d. Indien geen 3D seismiek beschikbaar is dan worden alle relevante, publieke 2D-seismische lijnen gebruikt die het gebied kruisen en nabij het gebied liggen. Op zodanige wijze dat het gebied zo goed mogelijk bedekt en omsloten is met seismische lijnen. Eventueel worden deze aangevuld met lijnen uit niet-publieke bron.

Er dient minimaal één seismische lijn door het vergunninggebied te lopen. Relevant betekent ondermeer dat de beoogde aquiferdiepte plausibel uit de seismiek kan worden afgeleid.

2. Opsomming van de namen van gebruikte putten om de seismiek aan de laagpakketten te correleren en de kaart te kalibreren. Er dient hiervoor minimaal één relevante put gebruikt te zijn. Een relevante put is een put in het aangevraagde gebied. Indien deze niet voorhanden is dan is een relevante put die put die het dichtst bij ligt. Daarbij is een relevante put onder andere een put waar de aquifer is aangetroffen.
3. Methode en parameterbeschrijving van de tijd-diepte conversie, waarbij rekening is gehouden met de lokale geologische opbouw.

Onzekerheid in de diepte-contourkaart, in geval van 3D-seismische kartering, wordt gesteld op 10% van de verwachtingswaarde. Onzekerheid in de diepte kaart bij een 2D-seismische interpretatie is groter en dient, per geval, apart gedefinieerd te worden.

### 2.1.3 *Aquifer karakterisatie*

Voor de onderbouwing van de gebruikte aquifer-parameters en eventuele spreiding dient de gebruikte dataset opgesomd te worden.

#### 2.1.3.1 *Dikte*

Voor de aquifer-dikte wordt per data-punt (put), de bruto dikte en netto/bruto verhouding per individueel aquifer-pakket/sequentie aangegeven, waarbij de gebruikte methode wordt samengevat en waarbij de gebruikte putten worden opgesomd. Als de verwachte dikte en netto/bruto gebaseerd zijn op gekarteerde trends worden de trendkaarten bijgeleverd, met een beschrijving van de karteermethodiek (contour-algoritme en evt. geologische concepten).

#### 2.1.3.2 *Permeabiliteit*

Per aquiferpakket wordt uitgelegd hoe de doorlatendheid van de aquifer is bepaald, waarbij de gebruikte methode wordt samengevat en waarbij de gebruikte putten worden opgesomd.

Voor de bepaling van de permeabiliteit hebben puttest gegevens de voorkeur. De puttest dient over een relevante aquifersectie te zijn uitgevoerd en adequaat te zijn geïnterpreteerd. In het geval dat de transmissiviteit (dat is: permeabiliteit maal de netto dikte) is afgeleid uit stromingstest(en) dient een samenvatting van de puttest interpretatie worden bijgevoegd.

Als er geen of niet voldoende relevante puttesten voorhanden zijn dan moet de aquiferpermeabiliteit (van de netto aquiferdikte zie §2.1.3.1) bepaald worden uit logs en kernmetingen. Er zijn veel methoden om op basis van deze gegevens een inschatting te maken voor de gemiddelde aquifer permeabiliteit. De keuze van de methode is afhankelijk van het type aquifer en ook van de hoeveelheid beschikbare gegevens. Voor de garantiefondsrapportage zijn de hieronder beschreven stappen minimaal vereist. Indien, data en/of opbouw van de aquifer het gebruik van andere stappen en methoden opportuun maakt dienen die besproken en beargumenteerd te worden.

Bepaling gemiddelde aquiferpermeabiliteit in een put op basis van logs en kernmetingen.

1. Standaard petrofysische evaluatie van ‘porositeitslogs’, bijvoorbeeld de sonic en density logs, resulterend in een porositeitslog of profiel van de aquifer in het boorgat. Het verdient de voorkeur om bij de bepaling van de porositeit rekening te houden met “in-situ correcties”.

2. Selectie van een aantoonbaar representatieve dataset kernplugmetingen (porositeit en permeabiliteit). Bij voorkeur metingen uit put en aquifer waar ook de porositeitslog is berekend. Als die niet voorhanden is dan een dataset waarvan beargumenteerd kan worden dat die representatief is voor de betreffende aquifer op die locatie. De kerndata moet tegen elkaar uitgezet worden in een semi-logaritmische grafiek,  $\log(k)$  op de y-as versus porositeit op de x-as. Op deze punten wolk ( $\log(k)$ , porositeit) dient een lineaire regressie uitgevoerd te worden.
3. Met behulp van de formule van de regressielijn moet elk punt op de porositeitslog (berekend bij punt 1) omgerekend worden naar een permeabiliteitswaarde.
4. Voor de bepaling van de gemiddelde aquiferpermeabiliteit zijn meerdere middelingmethoden mogelijk (aritmetisch, geometrisch, harmonisch of combinaties daarvan. Referentie bijvoorbeeld: a course in The Fundamentals of Core Analysis, 1973, Core Laboratories). Keuze van de middelingmethode is afhankelijk van de aard en opbouw van het reservoir. Voor eerste orde inschatting van gemiddelde reservoirpermeabiliteit voor de garantiefaciliteitsaanvraag wordt het aritmetisch gemiddelde afdoende geacht.

Op basis van de verzamelde gemiddelde aquiferpermeabiliteitswaarden wordt een permeabiliteitskaart gemaakt ( $\log(k_{res})$  interpolatie minimaal inverse distance weigthed (IDW)). De permeabiliteit op de doellocatie van het doublet kan afgelezen worden van de kaart. De spreiding in permeabiliteit kan afgeleid worden uit de spreiding van de gemiddelde permeabiliteit uit de diverse relevante putten.

De locatie en waarde van de datapunten dienen weergegeven te worden op een kaart en in een tabel (put, top en basis aquifer interval, porositeit, gemiddelde permeabiliteit, transmissiviteit).

Er wordt aangetoond dat alle relevante putten in en rond het gebied gebruikt worden. Minimaal vereist is dat er één put gebruikt wordt om een indicatie te geven van de aquifer-parameters. Deze put dient representatief te zijn voor de te verwachten aquifer-karakteristieken. Voorts dienen de permeabiliteitsbepalingen uit porositeitslogs worden onderbouwd met de gebruikte methodiek en met de opgave van de gebruikte parameters en dienen de verzamelde en gebruikte relevante kernmetingen worden geïllustreerd in grafiekvorm met de gebruikte correlatiefunctie. Tevens dient beargumenteerd te worden waarom de gebruikte dataset relevant geacht wordt.

#### 2.1.4 *Formatiewater karakterisatie*

Voor de berekeningen is het nodig het zoutgehalte, de temperatuur, de viscositeit en de dichtheid van het formatiewater te weten onder de te verwachten druk en temperatuur condities. Temperatuur en zoutgehalte zijn de twee essentiële parameters om de andere uit af te leiden.

#### 2.1.4.1 *Zoutgehalte*

Het verwachte zoutgehalte van het formatiewater wordt afgeleid / onderbouwd met metingen aan watermonsters of uit weerstandsmetingen uit bestaande relevante putten uit, respectievelijk over de onderhavige aquifer.

Op basis van dit verwachte zoutgehalte, de diepte en temperatuur wordt de viscositeit en dichtheid van het te produceren en injecteren water berekend.

Minimaal vereist is één put of één referentie die inzicht geeft in het zoutgehalte van de aan te boren aquifer op de doellocatie.

#### 2.1.4.2 *Temperatuur*

Data en methodiek die gebruikt is om de aquifer-temperatuur of de geothermische gradiënt te bepalen moet worden opgesomd, geïllustreerd worden in een grafiek en respectievelijk beschreven worden. Bij voorkeur dienen gestabiliseerde aquifer temperatuursmetingen gebruikt te worden.

Als er geen data ten grondslag ligt aan de temperatuursopgave dan wordt minimaal een referentie of een onderbouwing van de opgegeven waarde of gradiënt gegeven. Spreiding in temperatuur wordt bepaald door de minimale en maximale dieptewaarde bij de spreiding in top aquifer (zie §2.1.2) te vermenigvuldigen met de geothermische gradiënt.

Als injectietemperatuur wordt bedoeld de uitgangstemperatuur van de warmtewisselaar.



## 3 Handleiding DoubletCalc, het geothermisch vermogenberekeningsprogramma

### 3.1 Inleiding

Om een eenduidig criterium te hebben voor deelname van het ingediende project aan de garantiefaciliteit is besloten het geothermisch vermogen centraal te stellen in de aanvraag en beoordeling. Om alle ingediende projecten te kunnen behandelen in een eenduidig referentie kader is een procedure opgesteld hoe het verwachte geothermisch vermogen te berekenen. Deze procedure is geïmplementeerd in een computerprogramma genaamd DoubletCalc(©TNO). DoubletCalc is beschikbaar via de website [www.nlog.nl/nl/home/geothermy.html](http://www.nlog.nl/nl/home/geothermy.html)<sup>1</sup>. De theoretische onderbouwing van de procedure is beschreven in hoofdstuk vijf van dit rapport.

In DOUBLET-CALC wordt met het SI eenhedenstelsel gewerkt. Voor enkele invoerparameters wordt hiervan afgeweken, nl bij de buismaten en boordiameter van de putten.

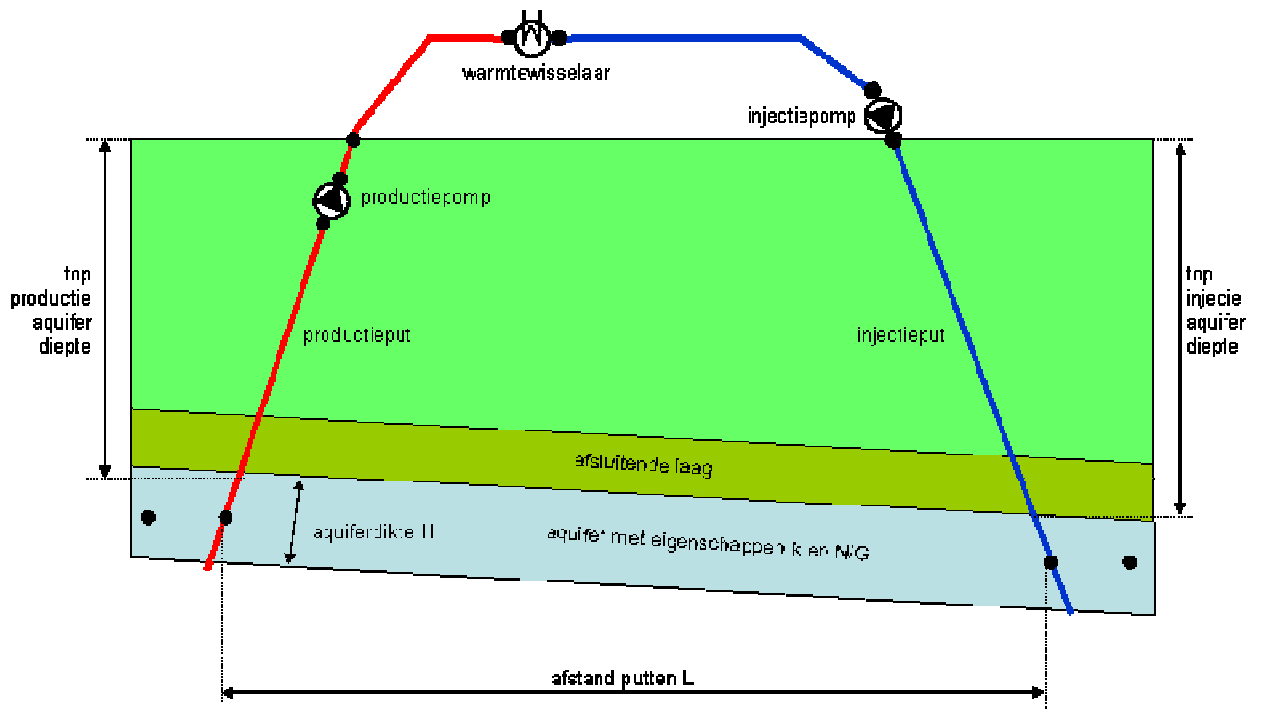
DoubletCalc stelt de gebruiker in staat op eenvoudige wijze een geothermisch vermogenkansverdeling te berekenen op basis van selectie relevante parameters. Daarnaast levert het programma een aantal andere grafieken op die gebruikt kunnen worden als indicatie bij het evalueren van het te verwachten rendement en de specificaties van de installatie.

### 3.2 Schema geothermisch doubletsysteem

De onderstaande figuur geeft schematisch de belangrijkste elementen van een geothermisch doubletsysteem en de parameters gebruikt in de berekeningen.

---

<sup>1</sup> Het programma is te gebruiken door de file "doubletcalc.zip" te downloaden en lokaal op een computer te installeren. Om het programma te gebruiken is het noodzakelijk een actieve internetverbinding te hebben openstaan. Tevens is het nodig om minimaal Java runtime environment 1.6 update 14 (jre1.6 update 14) te hebben geïnstalleerd.



Figuur 3.1: Overzicht van een geothermisch doublet met bijbehorende begrippen

### 3.3 Invoerscherm

Om het verwachte geothermisch vermogen te berekenen is een selectie van geologische en niet-geologische invoerparameters nodig. Deze zijn in onderstaande figuur 3.2 opgenomen. Het geologische evaluatie rapport (beschreven in Hoofdstuk 2) geeft de onderbouwing van de geologische parameters. In het invoerscherm is een referentie scenario ingevuld. Deze kunnen/moeten gewijzigd worden.

Als alle parameters zijn ingevuld dan kan het scenario worden opgeslagen door op de “**save file**” knop te klikken. Standaard Windows procedures gelden om de file op te slaan. Let wel dat de file naam de extensie .xml heeft! Als een eerder scenario opnieuw geladen moet worden dan dient de “**open file**” knop aangeklikt te worden. Vervolgens kan via standaard Windows functionaliteit de bestandslocatie gevonden worden en de file geladen worden.

Om de berekening uit te voeren dient op de “**calculate!**” knop, links boven in het scherm, geklikt te worden. Het programma gaat dan op stochastische manier de geothermisch vermogen distributie berekenen. Het aantal simulaties staat standaard op 1000. Dit kan gewijzigd worden in het invoerveld “**Number of simulation runs**”.

Als de optionele velden voor aquifertemperatuur en druk worden ingevuld krijgen deze waarden prioriteit boven de waarden berekend op basis van de gradiënten.

**Doublet Calculator 1.2**

Number of simulation runs: 1000    Calculate    Open Scenario    Save Scenario    Exit Program

file:

### Data Input

**A) Aquifer properties**

aquifer permeability (mD):  
 minimum: 450    median: 500    maximum: 650

gross aquifer thickness (m):  
 minimum: 50    median: 70    maximum: 85

net to gross ratio (%):  
 minimum: 99.98    median: 99.99    maximum: 100

top injection aquifer depth (m):  
 minimum: 1350.0    median: 1500    maximum: 1650.0

top production aquifer depth (m):  
 minimum: 1350.0    median: 1500    maximum: 1650.0

aquifer water salinity (ppm)  
 salinity: 70000

top production aquifer temperature (°C)  
 temperature:    (optional)

aquifer pressure injection / production (bar)  
 injection:    production:    (both optional)

**B) Doublet and well properties**

skin production / injection well:  
 production: 2.0    injection: 0.5

well outer diameter (inch)/ distance production-injection well (m):  
 diameter: 8.5    distance: 1700    (at aquifer level)

lateral well deviation at aquifer level (m):  
 production: 1500    injection: 1350

tubing roughness (milli-inch) / tubing inner diameter (inch)  
 roughness: 1.38    diameter: 7.0

minimal/desired doublet performance (MW):  
 minimum: 3.5    desired: 5

surface temperature / injection temperature (°C):  
 surface: 10.0    injection: 30

geothermal gradient (°C/m)  
 gradient: 0.031

**C) Pump properties**

pump efficiency (0 < x < 1) / prod. pump depth (m)  
 efficiency: 0.75    pump depth: 300

max. pump capacity (m³/h)/ max. pressure difference (bar):  
 capacity: 160    difference: 40.64

Figuur 3.2: Invoerscherm DoubletCalc.

### 3.4 Berekeningsresultatenschermb

**result table**

probabilistic graphs: pump flow    energy    COP    fingerprinting: fingerprint    export CSV file: probabilistic    base case details

### Input Properties

	min	median	max
gross aquifer thickness (m)	50.0	70.0	85.0
net to gross ratio	0.9998	0.9999	1.0
aquifer permeability (mD)	450.0	500.0	650.0
press. top injection aquifer (bar)		0.0	
press. top production aquifer (bar)		0.0	
aquifer salinity (ppm)		70000	
depth production top aquifer (m)	1350.0	1500.0	1650.0
depth injection top aquifer (m)	1350.0	1500.0	1650.0
geothermal gradient (°C/m)		0.031	
tubing diameter (inch)		7.0	
outer well diameter (inch)		8.5	
roughness (milli-inch)		1.38	
well distance at aquifer level (m)		1700.0	
pump depth (m)		300.0	
pump efficiency		0.75	
skin production well		2.0	
skin injection well		0.5	
maximum pressure difference (bar)		40.64	
surface temperature (°C)		10.0	
injection temperature (°C)		30.0	
number of simulation runs		1000	
lateral production well deviation (m)		1500	
lateral injection well deviation (m)		1350	

### Calculated Properties (Output)

Monte Carlo cases (stochastic inputs)	P10	P50	P90
aquifer kH net (Dm)	29.7	35.6	42.09
mass flow (kg/s)	41.56	47.79	53.81
pump volume flow (m³/h)	145	166	187
required pump power (kW)	218	250	282
retrieved geothermal energy (MW)	4.01	4.84	5.71
COP (kW/kW)	17.6	19.4	21.3

base case (median value inputs)	
aquifer kH net (Dm)	35.0
mass flow (kg/s)	47.13
pump volume flow (m³/h)	164
required pump power (kW)	247
retrieved geothermal energy (MW)	4.8
COP (kW/kW)	19.5

Figuur 3.3: Berekeningsresultaten DoubletCalc.

Als eerste zal na de berekening een scherm zoals in figuur 3.3 opkomen. Hierin staat in de linker kolom, “Input Properties” de invoerparameters vermeld.

In de rechterkolom “Output Properties” staan de berekende waarden met evt spreiding vermeld in termen van: minimaal, P90 – verwacht, P50 – maximaal, P10.

Daarnaast zijn de resultaten voor de “base case” gepresenteerd in dit scherm. Dit is het scenario waarbij alleen met de mediane waarden is gerekend zonder stochastiek.

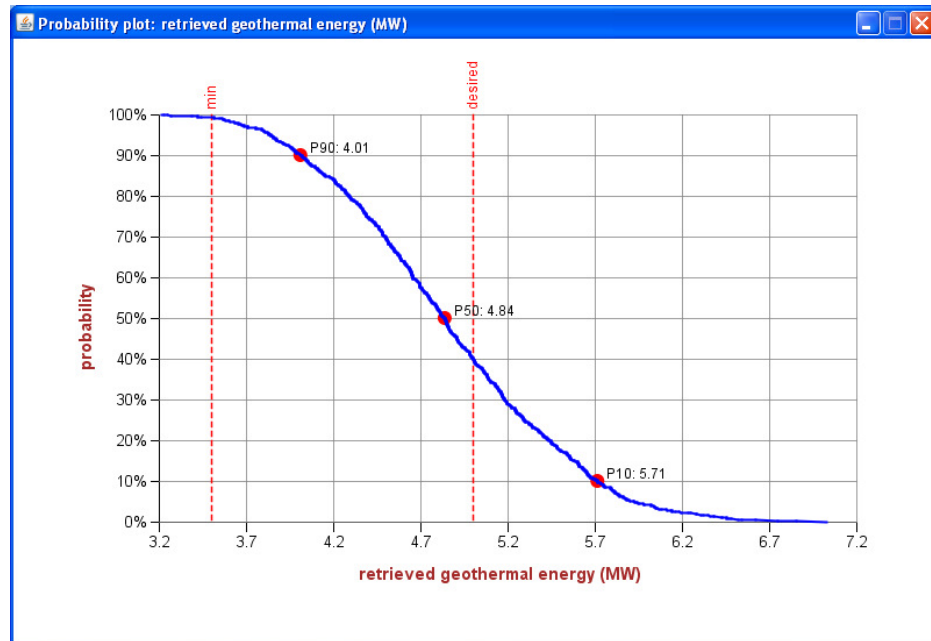
Boven aan dit scherm staan een zestal knoppen. De eerste drie genereren een waarschijnlijkheidsgrafiek voor respectievelijk:

1. het debiet (figuur 3.5),
2. het geothermisch vermogen (figuur 3.4) en
3. de Coëfficiënt of Performance (figuur 3.6), behorend bij het opgegeven scenario.

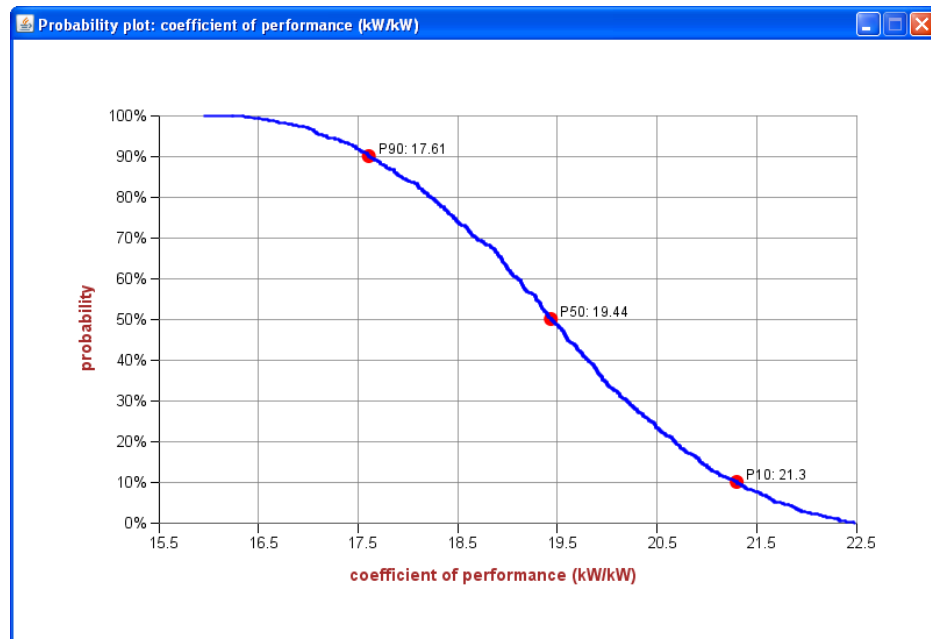
De knop “**fingerprint**” (figuur 3.7), start een berekening met de verwachtingswaarde van de scenarioparameters zoals opgegeven in het invoerscherm op één na. Het pompvermogen (max. pressure difference in het invoerscherm) wordt gevarieerd, in honderd stappen, van 10% tot 120% van het ingevoerde pompvermogen. Dit resulteert in variatie in opgelegd drukverschil, geothermisch vermogen, debiet en COP. Met deze grafiek wordt een indicatie gegeven van het geothermisch vermogen, debiet en de COP onder het gegeven scenario bij verschillende pompdrukken.

De routine onder knop “**export CSV**” genereert een “comma separated file” van de reeksen uit hierboven genoemde drie waarschijnlijkheidsgrafieken. Standaard Windows functionaliteit wordt gebruikt om de file op de gewenste locatie te bewaren.

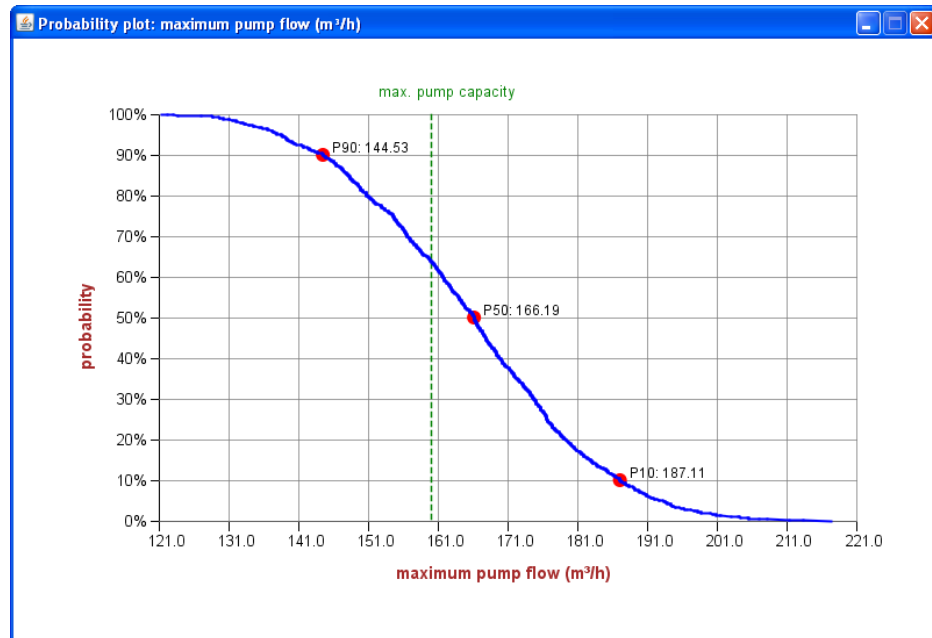
De routine onder de knop “**base case details**” geeft een “comma separated file” waarin de berekeningsresultaten voor de base case (het scenario waarbij alleen met de mediane waarden is gerekend zonder stochastiek) per berekeningspunt (zie hoofdstuk 5) zijn opgeslagen.



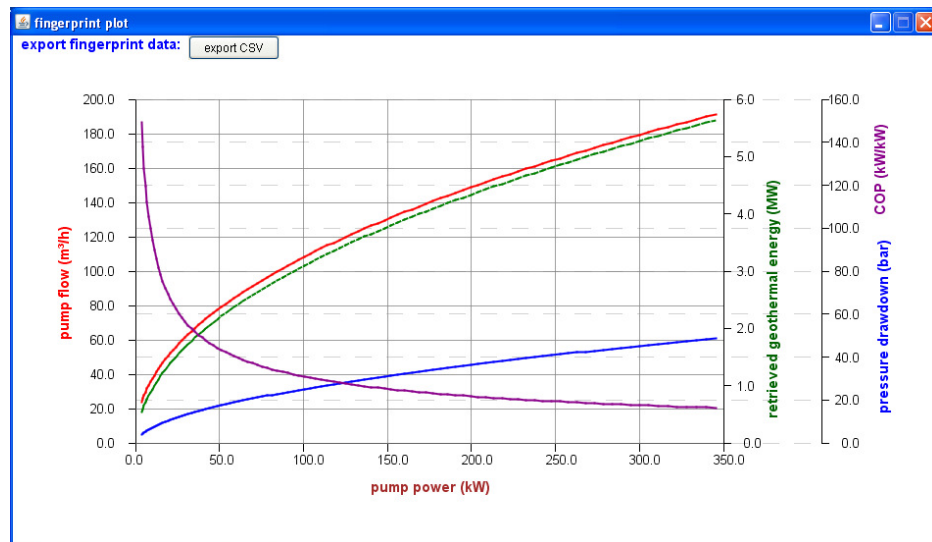
Figuur 3.4: Voorbeeld van een overschrijdingskansgrafiek van het Geothermisch vermogen. Het geothermisch vermogen uit de ondergrond is afgezet tegen waarschijnlijkheid dat deze waarde gehaald zal worden.



Figuur 3.5: Voorbeeld van een overschrijdingskansgrafiek van de Coëfficiënt of Performance van het onderhavige scenario. De COP is afgezet tegen de waarschijnlijkheid dat de COP waarde gehaald zal worden.



Figuur 3.6: Voorbeeld van een overschrijdingskansgrafiek van het te verwachten debiet.,



Figuur 3.7: Voorbeeld van een scenariografiek, waarbij het pompvermogen in stappen is verhoogd, resulterend in stijgende curven van opgelegd drukverschil, debiet, en geothermisch vermogen en een dalende COP curve.

## 4 Puttest

Zodra een doubletput is gezet moet overgegaan worden tot het testen van de put om te bepalen of het verwachte geothermisch vermogen ook daadwerkelijk gehaald kan worden. In onderstaande paragrafen wordt een reeks voorwaarden gepresenteerd waaraan de put en de puttest moeten voldoen om een adequate set meetgegevens op te leveren die gebruikt kunnen worden om het testresultaat te kunnen interpreteren en vervolgens te beoordelen en af te zetten tegen de verwachtingswaarde voordat de boring was geplaatst.

### 4.1 Eisen Boring

Er dient zorg gedragen te worden dat de aquifer bij het boren en het plaatsen van de benodigde installatie niet beschadigd raakt waardoor de doorlatendheid vermindert. Technisch gesproken, dient er voor een zo laag mogelijke skin gezorgd te worden (skin kan het gevolg zijn van verstopping van de put door geïnfilterde boorspoeling).

### 4.2 Puttest

Het interval dat getest wordt dient gecompleteerd te zijn over de beoogde aquifer. Dit dient eenduidig vastgesteld te kunnen worden aan de hand van boorgatmetingen zoals een Gamma-Ray of gesteentemonsters. De puttest dient zodanig te worden uitgevoerd dat uit de resultaten/mee-treksen de transmissiviteit (dat is: permeabiliteit maal de (netto) dikte), de skin en de productiviteitsindex betrouwbaar kunnen worden bepaald. Er dient voorkomen te worden dat het opgelegde drukverschil resulteert in permanente schade aan de aquifer door bijvoorbeeld 'fines migration'. Er is aangenomen dat er voorzieningen zijn getroffen om eventuele zandproductie tegen te gaan zoals het plaatsen van een filter.

Voor de test:

Er dient een 'clean-up' te worden gedaan waarbij er geen afname meer is in de meegeproduceerde boorspoeling/fines en/of het debiet bij gelijkblijvende opgelegde drukval niet meer toeneemt.

Test:

Er dient vervolgens zodanig getest te worden dat het opgelegde debiet, een constante  $Q$ , (als gevolg van een opgelegd drukverschil tussen put en aquifer) in stappen wordt verhoogd. Er dienen minimaal drie stappen (perioden), te worden uitgevoerd. Het opgelegde debiet bij één van de stappen dient het verwachte debiet te benaderen. Een volgende teststap dient uitgevoerd te worden bij de maximale pompcapaciteit mits de aquifer geen permanente schade oploopt. Tijdens de perioden met een stabiel debiet moeten het debiet, drukverloop en de temperatuur gemeten worden. De testperiode dient zo lang te duren dat de transmissiviteit, productiviteitsindex (PI) en skin betrouwbaar berekend kunnen worden. Dit kan bijvoorbeeld door te testen totdat bij opgelegd debiet de druk gaat dalen of de druk stabiel blijft. Tussen de stappen en na de laatste stap, wanneer er geen opgelegd debiet over put en aquifer is, dient het drukverloop ook gemeten te worden tot het moment dat de druk niet meer verandert.

Het toegepaste drukverschil is gebonden aan minimaal het vooraf opgegeven beoogde drukverschil op aquiferniveau en pompdiepte, voor zover dit binnen de geldende veiligheidsnormen past. Het vooraf opgegeven maximaal vermogen van de pomp dient te worden gebruikt om het vermogen van de geothermische putten te bepalen. De keuze welke van de twee putten dient te worden beschouwd als de injectieput en de productieput wordt bepaald door de configuratie die het meeste vermogen op zal leveren.

Voor de interpretatie en beoordeling van de puttest moeten de in de onderstaande tabel opgesomde gegevens gemeten en verstrekt worden inclusief onderbouwing en vermelding van gevolgde methode en programmatuur.

Parameter voor test interpretatie	Waarde	Dimensie
Top aquifer		m (langs boorgat)
Basis aquifer		m (langs boorgat)
Zoutgehalte formatiewater		ppm
Temperatuur formatiewater op aquiferniveau		°C
Schema verbuizing inclusief diameter boorgat bij productie-interval <sup>2</sup>		inch of m
Top productie-interval/filter		m (langs boorgat)
Basis productie-interval/filter		m (langs boorgat)
Filter diameter		inch of m
Filter permeability / weerstand		Darcy of bar
Locatie pomp		m (langs boorgat)
Locatie meetsonde voor druk		m (langs boorgat)
<b>Clean up gegevens</b>		
Pompdruk		bar
Debiet vs tijd		m <sup>3</sup> /uur
Indicatie hoeveelheid meegeproduceerde "fines"		Semi-kwantitatief
<b>Uitkomsten test interpretatie</b>		
Skin		-
H		m
kH		D·m (darcy-meter)
Productiviteits index (PI)		m <sup>3</sup> /uur/bar

Meetreeks Put Deviatie			
Diepte put langs boorgat	x	y	z

Meetreeksen Puttest		
Tijd	Druk (Bar)	Debiet (m <sup>3</sup> /uur)

<sup>2</sup> Deze niet-geologische parameters hebben invloed op het uiteindelijke vermogen dat uit de puttest(en) blijkt. Daarom dienen de boringen en puttesten zoveel als mogelijk de waardes zoals bij het aangaan van de overeenkomst met de garantiefaciliteit te realiseren. Indien feitelijk ongunstigere waardes worden toegepast, zal bij de berekening van het gerealiseerde vermogen (o.b.v. de puttesten) gerekend worden met de vooraf opgegeven parameters.



### 4.3 Interpretatie puttest

Uit de testresultaten moet door de aanvrager de skin en transmissiviteit worden bepaald. De uitkomsten van de puttesten (transmissiviteit, skin en temperatuur naast putgegevens dikte aquifer, diepte aquifer etc.) worden gebruikt om het gerealiseerde vermogen van het doublet te berekenen.

De gegevens uit de puttest (het verloop van het debiet, drukverloop, en temperatuurverloop) worden samen met de gegevens van de put- en pompspecificaties geïnterpreteerd middels een puttestanalyse. Minimaal dient de 'Hornerplot' evaluatie te zijn uitgevoerd en zondig evaluatie met type curve fitting. Uitkomsten van de puttestanalyse dienen tenminste de  $kH$  en de skin te zijn. Uit de  $kH$  kan de permeabiliteit bepaald worden met behulp van de aangetroffen aquiferdikte waarbij duidelijk moet zijn of de dikte van de gehele aquifer wordt genomen, of slechts de dikte van het gecompleteerde interval. Met de gegevens uit de put en test wordt het gerealiseerde vermogen van het doublet berekend in overeenstemming met de formules gegeven in Hoofdstuk 5. Dit kan met DoubletCalc uitgevoerd worden. De puttesten dienen uitgevoerd te worden conform de methode zoals beschreven in:

- G Bourdorot 1996. Welltesting. Interpretation methods. ISBN 2-7108-0738-6
- Kruseman, G.P. and de Ridder, N.A., 1994, Analysis and Evaluation of Pumping Test Data: International Institute for Land Reclamation and Improvement, The Netherlands, Publication 47, 377 p.
- J. Lee 1982, Well testing SPE textbook series. **ISBN-13:** 978-0895203175

Zie ook:

- Dake, L.P. 1978 Fundamentals of reservoir engineering. Developments in Petroleum Science 8, Elsevier.
- <http://www2.alterra.wur.nl/Internet/webdocs/ilri-publicaties/publicaties/Pub47/Pub47-h14.pdf>

Indien uit de puttest-analyse blijkt dat de skin groter dan nul is, wordt gesteld dat de stroming van water naar de put gehinderd wordt resulterend in een verlaagd debiet en dus verlaagd vermogen. Met behulp van de formules gegeven in Hoofdstuk 5, wordt het gemiste vermogen door bijvoorbeeld puschade berekend door het debiet te berekenen met skin ( $S$ ) gelijk aan nul, en met de skin die volgt uit de testanalyse.

### 4.4 Beoordeling van de vaststellingsaanvraag

De vooraf opgegeven niet-geologische parameters hebben invloed op het uiteindelijke vermogen dat uit te puttest(en) blijkt. Daarom dienen de boringen en puttesten (minimaal) overeenkomstig deze waarden uitgevoerd te worden. Indien feitelijk ongunstigere waarden worden toegepast, zal bij de berekening van het gerealiseerde vermogen (o.b.v. de puttesten) gerekend worden met de vooraf opgegeven parameters.

Indien het vermogen dat gerealiseerd is lager is dan het minimaal benodigde vermogen kan er aanspraak op de garantiefaciliteit gedaan worden. Er dient echter uitgesloten te worden dat het lagere vermogen aan 'niet-geologische' oorzaken te wijten is, te weten:

- Foutieve plaatsing productie/injectie interval of filter
- Afwijking van de bij aanmelding opgegeven niet-geologische parameters.

Ter eventuele second opinion dienen de meetreeksen (druk, temperatuur en debiet) van de test inclusief alle relevante parameters voor de interpretatie van de test (bijvoorbeeld locatie pomp en meetsonde, diameter verbuizing etc.) aangeleverd te worden aan beoordelaar.

Indien een hogere uitgangstemperatuur van de warmtewisselaar dan 35°C gepland is of wordt toegepast, zal gerekend worden met 35°C.

## 5 Beschrijving methodiek bepaling Geothermisch vermogen-kansverdeling

### 5.1 Inleiding

Het te verwachten geothermisch vermogen is te bepalen met behulp van het programma voor geothermische vermogensberekening “Doubletcalc” (zie Hoofdstuk 3). Dit hoofdstuk voorziet in een theoretische onderbouwing van dit programma door de gebruikte formules te presenteren en de berekeningsmethoden kort te beschrijven.

Bij de berekening van het geothermisch vermogen wordt rekening gehouden met o.a.

- Drukverlies door stroming in de aquifer naar de productieput en van de injectieput.
- Drukverlies rond productie- en/of injectieput tengevolge van een “skin”.
- Drukverlies in de productie- en injectieput tengevolge van wrijving door stroming.
- Drukverschil door zwaartekracht.
- Drukverschil tengevolge van de pomp in de productieput.
- Warmteverlies in de productie- en de injectieput tengevolge van warmteafgifte naar de omgeving.

Voor de relevante eigenschappen van water, namelijk dichtheid, viscositeit en warmtecapaciteit, zijn correlaties gebruikt. De dichtheid is een functie van druk, temperatuur en zoutgehalte. De viscositeit en warmtecapaciteit zijn een functie van temperatuur en zoutgehalte.

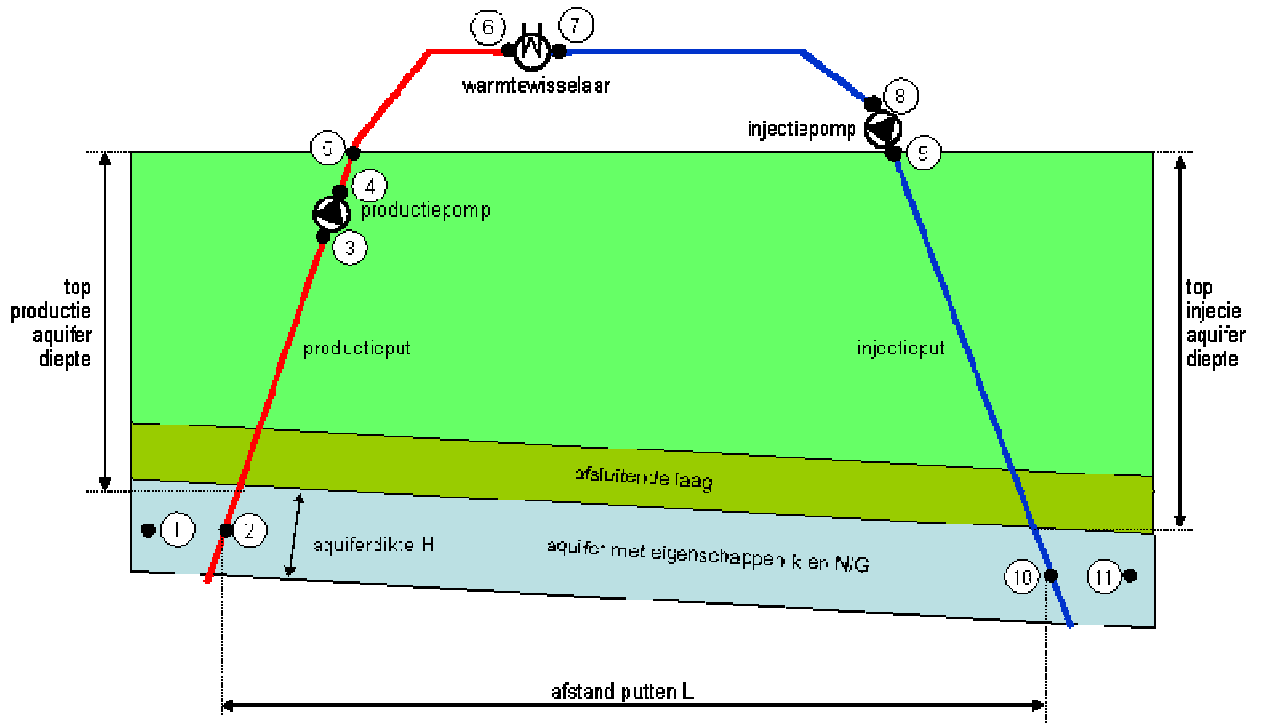
In de volgende paragrafen wordt een beschrijving gegeven van de rekenprocedure die in de software DoubletCalc is geïmplementeerd. De belangrijkste berekeningsresultaten zijn het gewonnen geothermisch vermogen en de Coëfficiënt of Performance (CoP).

### 5.2 Opzet van het model

Uitgangspunten voor de berekening van de geothermische energie bij gegeven aquifer, putten, pomp, en warmtewisselaar zijn:

- Massabalans: Het massadebiet (kg/s) is in het doubletsysteem vanaf de inname in de productieput tot en met de injectie in de aquifer constant.
- Impulsbalans (drukbalans): Deze geldt voor het gehele doubletsysteem en voor ieder van de systeemelementen. De som van de drukverschillen over alle elementen in het doubletsysteem is nul. De drukbalans bepaald het massadebiet bij gegeven pompdruk.
- Energiebalans: Deze geldt voor ieder van de systeemelementen. Er wordt rekening gehouden met warmteafgifte in productieput aan omgeving en temperatuursdaling in de warmtewisselaar.

Een schematisch overzicht van het doubletsysteem wordt nogmaals gegeven in Figuur 5.2. Hierin zijn nu de knooppunten gelokaliseerd die genoemd en gebruikt worden in tabellen 5.1 en 5.2 om de componenten in druk en energiebalans te beschrijven.



Figuur 5.1: Overzicht van een geothermisch doubletsysteem met referenties naar knooppunten gebruik in tabellen 5.1 en 5.2.

De drukbalans is als volgt opgebouwd:

Van knooppunt	Naar knooppunt	Element	Oorzaak drukverschil	Formules
1) Statische druk aquifer bij productieput	2) Bodem productie put	Aquifer	Viskeuze krachten	5.7
2) Bodem productieput	3) Ingang productiepom	Tubing/buis	Viskeuze krachten en zwaartekracht	5.9
3) Ingang productiepom	4) Uitgang productiepom	Pomp	Druk verhoging door pomp	5.13
4) Uitgang productiepom	5) Top productieput	Tubing/buis	Viskeuze krachten en zwaartekracht	5.4
5) Top productieput	6) Ingang warmtewisselaar	Buis	Viskeuze krachten en zwaartekracht. Verwaarloosd.	n.v.t.
6) Ingang warmtewisselaar	7) Uitgang warmtewisselaar	Warmte-wisselaar	Viskeuze krachten en zwaartekracht. Verwaarloosd.	n.v.t.
7) Uitgang warmtewisselaar	8) Ingang injectiepomp	Buis	Viskeuze krachten en zwaartekracht. Verwaarloosd.	n.v.t.
8) Ingang injectiepomp	9) Uitgang injectiepomp	Pomp	Wordt niet apart gemodelleerd (zie § 5.3.6)	n.v.t.

<b>Van knooppunt</b>	<b>Naar knooppunt</b>	<b>Element</b>	<b>Oorzaak drukverschil</b>	<b>Formules</b>
9) Uitgang injectiepomp	10) Top injectieput	Buis	Viskeuze krachten en zwaartekracht. Verwaarloosd.	n.v.t.
10) Top injectieput	11) Bodem injectieput	Tubing/buis	Viskeuze krachten en zwaartekracht	5.9
11) Bodem injectieput put	12) Statische druk aquifer bij injectieput	Aquifer	Viskeuze krachten	5.7

Tabel 5.1: Drukbalans

De energiebalans is als volgt opgebouwd:

<b>Van knooppunt</b>	<b>Naar knooppunt</b>	<b>Element</b>	<b>Oorzaak warmte-uitwisseling</b>	<b>Formules</b>
1) Midden aquifer bij productieput	2) Bodem productie put	Aquifer	Geen	n.v.t.
2) Bodem productieput	3) Ingang productiepomp	Tubing/buis	Warmte-uitwisseling met de omgeving	5.20
3) Ingang productiepomp	4) Uitgang productiepomp	Pomp	Warmte-uitwisseling met de omgeving. Verwaarloosd.	n.v.t.
4) Uitgang productiepomp	5) Top productieput	Tubing/buis	Warmte-uitwisseling met de omgeving	5.20
5) Top productieput	6) Ingang warmtewisselaar	Buis	Warmte-uitwisseling met de omgeving. Verwaarloosd.	n.v.t.
6) Ingang warmtewisselaar	7) Uitgang warmtewisselaar	Warmte-wisselaar	Warmteverlies aan warmtewisselaar	5.21
7) Uitgang warmtewisselaar	8) Ingang injectiepomp	Buis	Warmte-uitwisseling met de omgeving. Verwaarloosd.	n.v.t.
8) Ingang injectiepomp	9) Uitgang injectiepomp	Pomp	Wordt niet apart gemodelleerd (zie § 5.3.6)	n.v.t.
9) Uitgang injectiepomp	10) Top injectieput	Buis	Warmte-uitwisseling met de omgeving. Verwaarloosd.	n.v.t.
10) Top injectieput	11) Bodem injectieput	Tubing/buis	Warmte-uitwisseling met de omgeving	5.20
11) Bodem injectieput put	12) Midden aquifer bij injectieput	Aquifer	Opwarming water door warmte-uitwisseling met gesteente. Verwaarloosd (zie § 5.9.3).	n.v.t.

Tabel 5.2: Energiebalans

De in de bovenstaande tabellen genoemde formules worden in de volgende paragrafen behandeld. De verklaring van gebruikte letters en symbolen wordt aan het einde van dit hoofdstuk gegeven.

Aangezien het doubletsysteem een gesloten systeem is volgt uit de massabalans dat het massa debiet  $Q_m$  (kg/s) in alle elementen in het doubletsysteem gelijk is.

In het dynamische systeem is het zoutgehalte constant en gelijk aan het zoutgehalte van het aquiferwater. Voor de berekening van de hydrostatische druk wordt verondersteld dat het zoutgehalte lineair toeneemt met de diepte (zie § 5.5.4).

De drukbalans en de energiebalans worden simultaan opgelost bij gegeven pompdruk of gegeven massa debiet waaruit de druk en temperatuur op ieder knooppunt in het doubletsysteem volgen en respectievelijk het massa debiet of de pompdruk. Het geleverde geothermisch vermogen en het benodigde pomp vermogen is hier eenvoudig uit te berekenen.

De berekening van druk en temperatuur start bij gegeven druk en temperatuur van de aquifer bij de productieput. Vanaf hier worden, op basis van het berekende druk- en temperatuursverschil in ieder van de systeemelementen de druk en temperatuur op ieder volgend doubletknooppunt uitgerekend.

### 5.3 Massabalans

#### 5.3.1 Massa debiet

Zoals opgemerkt in de introductie van paragraaf 5.2 is het doubletsysteem een gesloten systeem. Hieruit volgt uit de massabalans dat het massa debiet  $Q_m$  (kg/s) in alle elementen in het doubletsysteem gelijk is:

$$Q_m = \text{constant} \dots\dots\dots(5.1)$$

#### 5.3.2 Volume debiet

Voor de berekening van de drukverliezen tengevolge van viskeuze krachten is de het volume debiet  $Q_v$  (m<sup>3</sup>/s) nodig, welke volgt uit:

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho} \dots\dots\dots(5.2)$$

Hierbij is de waterdichtheid  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) een functie van druk, temperatuur en zoutgehalte. Druk en temperatuur zijn verschillend op iedere locatie in het doubletsysteem.

### 5.3.3 Impulsbalans

De impulsbalans (drukbalans) wordt gegeven door:

$$\sum_{k=1}^{N-1} \Delta p_{k+1,k} + \Delta p_{1,N} = 0 \dots\dots\dots(5.3)$$

Waarbij  $N$  het aantal knooppunten  $k$  is in het doubletsysteem (zie figuur 5.1 en tabel 5.1) en

$$\Delta p_{k+1,k} = p_{k+1} - p_k \dots\dots\dots(5.4)$$

En in het bijzonder

$$\Delta p_{1,N} = p_{stat,p} - p_{stat,i} \dots\dots\dots(5.5)$$

$p_{stat,p}$  en  $p_{stat,i}$  zijn de initiële hydrostatische drukken bij respectievelijk de productie- en injectieput (zie § 5.3.7).

Substitutie van 5.5 in 5.3 geeft

$$p_{stat,p} + \sum_{k=1}^{N-1} \Delta p_{k+1,k} - p_{stat,i} = 0 \dots\dots\dots(5.6)$$

In de volgende paragrafen worden ieder van de elementen uit bovenstaande vergelijking besproken. Zoals in tabel 5.1 aangegeven worden drukverliezen in bovengrondse pijpen en de warmtewisselaar verwaarloosd.

### 5.3.4 Drukverloop door stroming in aquifer van of naar een put

Het drukverloop in de productieput en druktoename in de injectieput voor een doublet is (ref. A. Verruijt 1970, formule 6.5 en Dake 1978) is:

$$\Delta p_{w,aq} = p_w - p_{aq} = Q_v \frac{\mu}{2\pi k H R_{ntg}} \left( \ln \left( \frac{L}{r_{out,w}} \right) + S \right) \dots\dots\dots(5.7)$$

Waarbij

- $p_w$  = druk in de put bij aquifer (bottom hole pressure)
- $p_{aq}$  = initiële hydrostatische druk in de aquifer ter hoogte van de put
- $Q_v$  =  $Q_m / \rho$  = debiet, positief voor stroming van put naar aquifer
- $\mu$  = water viscositeit (functie van temperatuur en zoutgehalte)
- $k$  = permeabiliteit van de aquifer
- $H$  = hoogte van de aquifer
- $R_{ntg}$  = netto/bruto verhouding (net-to-gross ratio)
- $L$  = afstand tussen productie- en injectieput
- $r_{out,w}$  = buitenstraal van de put (filter)
- $S$  = skin

Deze formule geldt voor stationaire stroming naar verticale putfilters en voor homogene aquifereigenschappen.

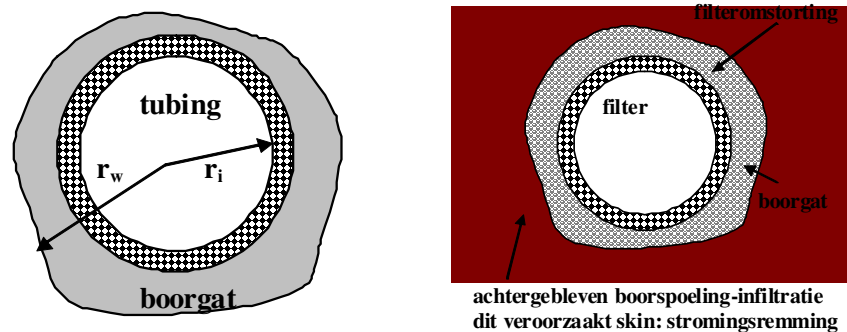
Voor de berekening van  $\rho$  en  $\mu$  wordt voor de productieput de oorspronkelijke druk en temperatuur in de aquifer bij de productieput gebruikt. Voor de injectieput wordt de druk onder in de put en de uitgangstemperatuur van de warmtewisselaar gebruikt. Het zoutgehalte is constant, zoals besproken in § 5.5.4.

De rechterkant van vergelijking is afhankelijk van druk en temperatuur omdat  $\rho$  afhankelijk is van temperatuur en druk en  $\mu$  van temperatuur.

De eerste term in vergelijking 5.7 geeft het drukverlies tengevolge van de stroming in de aquifer met homogene eigenschappen. Echter, de directe omgeving rond de put heeft vaak eigenschappen die afwijken van die in de rest van de aquifer ten gevolge van de boring en/of speciale behandeling van de put. Dit effect wordt het skin effect genoemd. Het skin effect reflecteert het verschil in drukval rond de put tussen de huidige situatie (na boren etc.), en zoals de drukval zou zijn in de oorspronkelijke (homogene) aquifer

De oorzaak is meestal achtergebleven boorspoeling. Maar ook verstopping door fines (zeer fijnkorrelige componenten uit de aquifer bv. klei) kan in de loop van de waterproductie en injectie daar aan bijdragen. Extra behandeling van de put (stimulatie) heeft als doel de drukval rond de put te verlagen.

Figuur 5.2 geeft schematisch de situatie rond de putmond met de boorgatbuiten- en binnendiameter, de tubingdiameter en in bruin gearceerd de door boorspoeling geïnfiltreerde zone.



Figuur 5.2: Schets van het boorgat met verbuizing, aquifer en infiltratie van boorspoeling in de aquifer.

Het verschil in drukval wordt gerepresenteerd door de tweede term in vergelijking 5.7:

$$\Delta p_{skin} = Q_v \frac{\mu}{2\pi kH} S \dots\dots\dots (5.8a)$$

S, 'de skin' is een dimensieloos getal. Een positieve skin geeft een extra drukverlies, een negatieve skin, bijvoorbeeld na specifieke behandeling (stimulering) van de put, geeft juist een drukverlaging.



### 5.3.5 Drukverloop in een buis

Buizen zijn te vinden op verschillende plaatsen in het doubletsysteem. Omdat de bovengrondse buizen relatief kort zijn en een grote diameter hebben wordt weerstand in deze buizen niet meegenomen (zie tabel 5.1). De drukverschillen in de tubing in de productie- en de injectieput zijn belangrijk voor de drukbalans.

Bij stroming in een buis zijn de drie factoren die een drukverschil tot gevolg hebben:

1. Zwaartekracht
2. Wrijvingsweerstand / viskeuze krachten
3. Inertiale (versnellings) krachten

De laatste twee factoren zijn het gevolg van stroming. Echter, aangezien water nauwelijks compressibel is zijn de inertiale krachten in het onderhavige geval te verwaarlozen. Het drukverloop in een buis wordt dan gegeven door de Darcy Weissbach of Fanning vergelijking (Beggs & Brill, 1985)

$$\frac{dp}{dl} = -\frac{f\rho v^2}{2D_{in}} - g\rho \frac{dz}{dl} \dots\dots\dots(5.8b)$$

De eerste term is het gevolg van viskeuze krachten, de tweede van de zwaartekracht.

Waarbij

- $l$  = lengte (afstand) langs de buis
- $z$  = hoogte van de buis
- $D_{in}$  = binnendiameter van de buis
- $g$  = zwaartekrachtversnelling (9.80665 m/s<sup>2</sup>)
- $\rho$  = dichtheid van de vloeistof
- $f$  = frictiegetal
- $v$  = de doorsnede-gemiddelde stroomsnelheid:

$$v = \frac{4Q_v}{\pi D_{in}^2} \dots\dots\dots(5.9)$$

Bij niet laminaire stroming ( $R_e > 5000$ , zie hieronder voor definitie van  $R_e$ ), wat gezien het hoogte van het debiet in en de binnendiameter van de buizen (in casu de tubings van de putten) van het doubletsysteem het geval is, is een adequate benadering voor  $f$  (Beggs, 1985, pg 99):

$$f = \left[ 1.14 - 2 \log \left( \frac{\varepsilon}{D_{in}} + \frac{21.25}{R_e^{0.9}} \right) \right]^{-2} \dots\dots\dots(5.10)$$

Waarbij

$\varepsilon$  = ruwheid van de binnenkant van de buis  
 $\varepsilon/D_{in}$  = relatieve ruwheid van de binnenkant van de buis  
 $R_e$  = Reijndolsgetal, voor stroming in buizen:

$$R_e = \frac{\rho v D_{in}}{\mu} \dots\dots\dots(5.11)$$

De ruwheid van buizen kan bijvoorbeeld worden ontleend aan de publicatie van Farshad en Rieke, 2006.

### 5.3.6 Drukverloop in de pomp

Het drukverloop in de pomp is een externe variabele welke gespecificeerd wordt door de gebruiker.

$$\Delta p_{pomp} = constant \dots\dots\dots(5.12)$$

Op dit moment wordt er geen rekening gehouden met een afhankelijkheid van  $\Delta p_{pomp}$  van het debiet  $Q_v$  door de pomp.

Vanwege het drukverloop in de productieput is er altijd een pomp nodig in de productieput omdat er anders op enig punt, gerekend vanaf de aquifer, onderdruk zou ontstaan. Het gebruik van een injectiepomp is niet strikt noodzakelijk. Echter, om pomptechnische redenen kan het efficiënter zijn om in plaats van alleen een productieput ook een injectiepomp te gebruiken.

In het model wordt de eventuele injectiepomp niet apart gemodelleerd. Dit geeft een te verwaarlozen verschil op de dichtheid van het water in het traject van uitgang productieput tot ingang injectiepomp. De druk door de gebruiker gespecificeerde druk van de productieput is in het geval van gebruik van een injectiepomp de som van de drukken van productie- en injectiepomp. De pompefficiëntie is de effectieve efficiëntie van productie- plus injectiepomp.

### 5.3.7 Initiële hydrostatische druk bij productieput en injectieput

De initiële statische druk volgt uit vergelijking 5.9 waarbij  $v=0$  en  $dz/dl = 1$ :

$$\frac{dp}{dz} = -g\rho \dots\dots\dots(5.13)$$

Waarbij als randvoorwaarde geldt dat  $p = p_{atmosferisch} = 1 \text{ bar}$  aan de oppervlakte.

De waterdichtheid  $\rho$  is een functie van druk, temperatuur en zoutgehalte.

De temperatuur op enig punt in de put is het geothermische temperatuurprofiel, zie § 5.4.1. De saliniteit op enig punt in de put is het statische saliniteitsprofiel zoals beschreven in § 5.5.4.

Met temperatuur en saliniteit gegeven wordt 5.9 een vergelijking impliciet in alleen druk. Deze vergelijking wordt numeriek opgelost voor de hydrostatische drukken  $p_{stat,p}$  en  $p_{stat,i}$  bij respectievelijk de productie- en injectieput.

## 5.4 Energiebalans

De energiebalans wordt opgelost voor ieder systeemelement afzonderlijk op basis van de druk en temperatuur aan ingang van ieder systeemelement. Hieruit volgt dan de temperatuur aan de uitgang van het systeemelement.

Er vindt op slechts twee elementen in het systeem warmte-uitwisseling plaats:

- Productieput
- Warmtewisselaar

Startpunt voor de berekening is de geothermische temperatuur aan de productieput, welke wordt berekend uit het geothermische temperatuurprofiel (zie § 5.4.1).

Het temperatuurverlies in productieput en warmtewisselaar wordt behandeld in § 5.4.2 en § 5.4.3.

### 5.4.1 Geothermisch temperatuurprofiel

Voor de berekening van de initiële aquifertemperatuur en de warmteverliezen in de productieput is de initiële geothermische temperatuurprofiel  $T_{gt}$  nodig. Deze volgt uit:

$$T_{gt} = T_{gt}(d) = T_{opp} + \lambda d \quad \dots\dots\dots(5.14)$$

Waarbij

- $D$  = diepte (positief naar beneden)
- $T_{opp} = T_{gt}(d=0)$   
= jaarlijks gemiddelde temperatuur aan de aardoppervlakte.  
In Nederland is deze 10.5 °C.
- $\lambda$  = geothermische gradiënt.  
In Nederland is deze gemiddeld 0.031 °C/m.

De initiële aquifertemperatuur bij de productieput is dan:

$$T_{aquifer} = T_{opp} + \lambda(d_{top,p} + 0.5H) \quad \dots\dots\dots(5.15)$$

Met

- $d_{top,p}$  = diepte top aquifer bij productieput
- $H$  = aquifer dikte

#### 5.4.2 *Temperatuurverlies in de productieput*

Tijdens de opvoer van het water in de productieput verliest het warme formatiewater warmte aan de relatief koudere omgeving waar het doorheen stroomt. Dit warmteverlies per lengte-eenheid volgt uit (zie Garcia-Gutierrez, et.al):

$$q_{w,put} = \frac{4\pi k_{t,g} (T_c - T_{gt})}{\ln\left(\frac{4\alpha_{t,g} t}{\sigma r_c^2}\right)} \dots\dots\dots(5.16)$$

Waarbij

- $q_{w,put}$  = warmteverlies per lengte-eenheid (W/m)
- $T_c$  = temperatuur van de casing, welke gelijk wordt verondersteld aan die van het water in de put.
- $t$  = tijd sinds aanvang van de warmtestroom
- $k_{t,g}$  = thermische conductiviteit van het gesteente rond de put
- $r_c$  = straal van de casing
- $\sigma$  =  $e^\gamma = 1.781072$ , met Euler's constant  $\gamma = 0.577216$
- $\alpha_{t,g}$  = thermische diffusiecoëfficiënt van het aquifergesteente:

$$\alpha_{t,g} = \frac{k_{t,g}}{\rho_g c_{p,g}} \dots\dots\dots(5.17)$$

met

- $c_{p,g}$  = warmtecapaciteit van het gesteente rond de put
- $\rho_g$  = dichtheid van het gesteente rond de put

In de berekening wordt, op basis van empirische gegevens  $k_{t,g} = 3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  en  $\alpha_{t,g} = 1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  genomen.

De berekening voor temperatuurverlies wordt uitgevoerd voor het tijdstip 1 jaar na start van de warmwaterwinning.

Uit de energiebalans volgt dat het warmteverlies naar de omgeving is gelijk aan de warmteafgifte van het water:

$$q_{w,put} = Q_m c_p \frac{dT_{put}}{dl} \dots\dots\dots(5.18)$$

Hierbij is

- $T_{put}$  = de temperatuur van het water in de put.
- $l$  = lengte (afstand) langs de put.
- $c_p$  = warmtecapaciteit van water (zie § 5.5.3).

Herschrijven van 5.17 geeft

$$\frac{dT_{put}}{dl} = \frac{q_{w,put}}{Q_m c_p} \dots\dots\dots(5.19)$$

Voor een typisch doublet is het temperatuurverlies in de productieput 1-3 °C. Aangezien het temperatuursverschil in de warmtewisselaar ongeveer 25-40 °C is geeft dit dus een verlies van geothermisch vermogen van 3-10%.

In de injectieput zal het water in eerste instantie afkoelen en vervolgens weer opwarmen. Dit totale effect is kleiner dan 1 °C . Het enige effect is op de viscositeit van het geïnjecteerde water.

#### 5.4.3 *Temperatuursverlies in de warmtewisselaar*

Het temperatuursverlies in de warmtewisselaar is:

$$\Delta T_{ww} = T_{ww,in} - T_{ww,uit} \dots\dots\dots(5.20)$$

$T_{ww,in}$ , de temperatuur bij de ingang van de warmtewisselaar, is gelijk aan de temperatuur aan de top van de productieput, welke wordt berekend zoals beschreven in § 5.4.2.

$T_{ww,uit}$ , de temperatuur bij de uitgang van de warmtewisselaar, is een externe variabele welke wordt gespecificeerd door de gebruiker:

$$T_{ww,uit} = constant \dots\dots\dots(5.21)$$

### 5.5 **Watereigenschappen**

Voor de berekeningen van de watereigenschappen viscositeit en dichtheid worden de correlaties gebruikt beschreven in de volgende paragrafen.

In dit document zijn alle vergelijkingen in SI eenheden. Echter, de onderstaande correlaties zijn gegeven in de eenheden zoals gebruikt in de respectievelijke referenties om vergelijking met de referentie eenvoudig te houden.

### 5.5.1 Dichtheid van water

De dichtheid van water als functie van druk  $p$ , saliniteit  $s$  en temperatuur  $T$  wordt berekend met behulp van de volgende formuleset van Batzle & Wang, 1992:

$$\rho_{fw} = 1 + 10^{-6} (-80T - 3.3T^2 + 0.00175T^3 + 489p - 2Tp + 0.16T^2p - 1.3 \cdot 10^{-5}T^3p - 0.333p^2 - 0.002Tp^2) \dots\dots\dots(5.22)$$

$$\rho = \rho_{fw} + s\{0.688 + 0.44s + 10^{-6}[300p - 2400ps + T(80 + 3T - 3300s - 13p + 47ps)]\} \dots\dots\dots(5.23)$$

Hierbij is

- $\rho_{fw}$  = dichtheid van zoet water ( $\text{g/cm}^3$ )
- $\rho$  = dichtheid van zout water ( $\text{g/cm}^3$ )
- $p$  = druk (MPa)
- $s$  = zoutgehalte (saliniteit) van het water (kg/kg)
- $T$  = temperatuur ( $^{\circ}\text{C}$ )

### 5.5.2 Viscositeit van water

Voor de berekening van de waterviscositeit wordt gebruik gemaakt van de correlatie van Batzle & Wang (1992):

$$\mu = 0.1 + 0.333s + (1.65 + 91.9s^3) \exp(-[0.42(s^{0.8} - 17)^2 + 0.045]T^{0.8}) \dots\dots\dots(5.24)$$

Hierbij is

- $\mu$  = viscositeit van water (cP)
- $s$  = zoutgehalte (saliniteit) van het water (kg/kg)
- $T$  = temperatuur ( $^{\circ}\text{C}$ )

### 5.5.3 Warmtecapaciteit van water

De warmtecapaciteit  $c_p$  van water is afhankelijk van temperatuur, saliniteit en druk. De warmtecapaciteit van zout formatiewater wordt benaderd door polynomen te gebruiken uit L.Grunberg, 1970. Ondanks het feit dat dit een gedateerde referentie is wordt die betrouwbaar geacht temeer omdat er in een aantal recentere publicaties (Feistel & Marion, 2008) Grunberg als betrouwbaar bron voor de  $C_p$  wordt genoemd.

$$\begin{aligned}
 c_p = & \left( +5.328 - 9.760 \cdot 10^{-2} s + 4.040 \cdot 10^{-4} s^2 \right) \\
 & + \left( -6.913 \cdot 10^{-3} + 7.351 \cdot 10^{-4} s - 3.150 \cdot 10^{-6} s^2 \right) T \\
 & + \left( +9.600 \cdot 10^{-6} - 1.927 \cdot 10^{-6} s + 8.230 \cdot 10^{-9} s^2 \right) T^2 \dots\dots\dots(5.25) \\
 & + \left( +2.500 \cdot 10^{-9} + 1.666 \cdot 10^{-9} s - 7.125 \cdot 10^{-12} s^2 \right) T^3
 \end{aligned}$$

Hierbij is

- $c_p$  = warmtecapaciteit van water (kJ/(kg·K))
- $s$  = zoutgehalte (saliniteit) van het water (g/kg)
- $T$  = temperatuur (K)

Merk op dat in Grunberg de zesde coëfficiënt fout vermeldt staat ( $+3.15 \cdot 10^{-6}$  i.p.v.  $-3.15 \cdot 10^{-6}$ ).

### 5.5.4 Zoutgehalte (saliniteit) van het water

Voor het zoutgehalte van het water gelden twee regimes:  
 Statisch: initieel statisch evenwicht in de ondergrond  
 Dynamisch: gedurende de productie in het doubletsysteem

Het zoutgehalte  $s$  (saliniteit) van het water in initieel statisch evenwicht als functie van diepte  $d$  volgt uit

$$s(d) = s_{aq} \frac{d}{d_{top,p} + 0.5H} \dots\dots\dots(5.26)$$

- $s_{aq}$  = saliniteit van het aquiferwater
- $d_{top,p}$  = diepte top productie aquifer
- $H$  = aquifer dikte

Tijdens de productie wordt het aquifer water rondgepompt en is het zoutgehalte overal in het doubletsysteem constant en gelijk aan het initiële zoutgehalte van het aquiferwater:

$$s = s_{aq} \dots\dots\dots(5.27)$$

## 5.6 Oplossingsmethode

De drukbalans  $f_{db}$  (vergelijking 5.6) is bij alle andere gegeven parameters een functie van behalve pompdruk en massa debiet:

$$f_{db} = p_{stat,p} + \sum_{k=1}^{N-1} \Delta p_{k+1,k} - p_{stat,i} = f_{db}(\Delta p_{pomp}, Q_m) = 0 \quad \dots\dots\dots(5.28)$$

Bij gegeven pompdruk wordt  $Q_m$  opgelost uit de drukbalans middels de veelgebruikte secant numerieke methode.

De drukbalans wordt opgebouwd segment voor segment beginnend bij  $p_{stat,p}$ , de statische aquiferdruk bij de productieput. Zie volgorde van de knooppunten in Figuur 5.2.

Druk en temperatuur zijn bekend in de aquifer bij de productieput (knooppunt 1). Vanaf hier worden de druk en temperatuur verschillen berekend voor ieder successievelijk doubletelement (zie figuur 5.2 en tabellen 5.1 en 5.2), bij gegeven pompdruk en  $Q_m$ . Het drukverschil en temperatuurverschil over een doubletelement kunnen expliciet berekend worden voor ieder doubletelement, met uitzondering van de putten, indien de druk en temperatuur bij de ingang van het doubletelement bekend zijn.

Voor de berekening van het druk- en temperatuurverschil over een put wordt de put onderverdeeld in een aantal segmenten (lengte 10m). Voor ieder segment worden 5.9 en 5.19 simultaan opgelost middel secant methode, bij gegeven druk en temperatuur aan de ingang van het putsegment. Dit levert de druk en temperatuur aan het einde van het putsegment op. Op deze manier worden opeenvolgend alle segmenten berekend.

Het resultaat is de druk, temperatuur, massadebiet, en volumedebiet op ieder knooppunt in het doublet.

## 5.7 Berekenende kenmerken van het geothermische doubletsysteem

In DoubletCalc worden drie kenmerken in een waarschijnlijkheidsgrafiek gepresenteerd (zie § 5.8):

- Debiet bij (de ingang van) de warmtewisselaar
- Geothermisch vermogen,
- Coëfficiënt Of Performance (COP).

In onderstaande paragrafen worden de formules gegeven voor deze grootheden.



### 5.7.1 Geothermisch vermogen

Als het massa debiet, bij gegeven pompdruk, is berekend wordt het vermogen afgegeven aan de warmtewisselaar gegeven door:

$$P_{ww} = Q_m c_p \Delta T_{ww} \dots\dots\dots(5.29)$$

De warmtecapaciteit van water  $c_p$  kan berekend worden aangezien druk, temperatuur, en zoutgehalte bij de ingang van de warmtewisselaar bekend zijn.

### 5.7.2 Vermogen nodig voor de pomp

Het netto vermogen  $P_{pomp,netto}$  dat de pomp moet leveren is:

$$P_{pomp,netto} = Q_v \Delta p_{pomp} = \frac{Q_m}{\rho} \Delta p_{pomp} \dots\dots\dots(5.30)$$

En het brutovermogen is

$$P_{pomp,bruto} = P_{pomp,netto} / \eta \dots\dots\dots(5.31)$$

Hierbij is  $\eta$  de pompefficiëntie. Zie voor situatie met zowel productie- als injectiepomp § 5.3.6.

### 5.7.3 Coëfficiënt of Performance

Coëfficiënt of Performance (COP) is gedefinieerd als warmtevermogen van het gewonnen water gedeeld door de som van vermogen nodig voor winning van warm water en voor injectie van het afgekoelde water. De formule is dus:

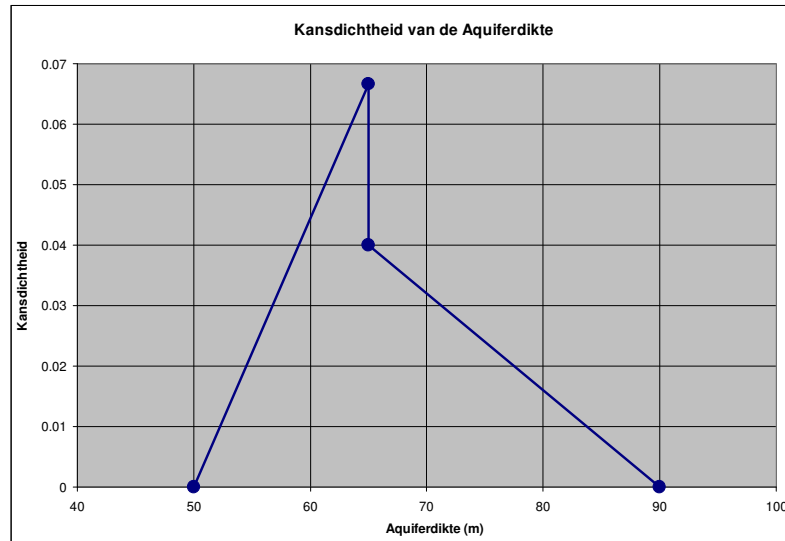
$$COP = \frac{P_{ww}}{P_{pomp,bruto}} \dots\dots\dots(5.32)$$

## 5.8 Spreiding in Parameters

Van vijf invoerparameters moet een spreiding worden opgegeven (zie Hoofdstuk 3), namelijk:

- Bruto dikte en netto/bruto verhouding van de aquifer.  
De spreiding van deze parameters kan afgeleid worden uit de waarden van deze parameters in de gebruikte putten.
- Permeabiliteit van de aquifer.  
De spreiding in permeabiliteit kan afgeleid worden uit de waarden van de gemiddelde permeabiliteit in de gebruikte putten.
- Diepte top aquifer bij productieput en bij injectieput.  
De spreiding wordt bepaald door, in geval de top aquiferkaart gebaseerd is op 3D-seismische survey, plus of min 10% van de kaartwaarde.

Deze vijf stochastische parameters zijn niet van elkaar afhankelijk. Daarom is het mogelijk, om gebruikmakend van de invoerparameters en hun eventuele spreiding, een kansverdeling van het te verwachten geothermisch vermogen op te stellen met behulp van stochastische simulatie (Monte Carlo). Voor de stochastische parameters wordt de kansverdeling als een dubbele driehoek gemodelleerd (zie Figuur 5.4).



Figuur 5.4: Voorbeeld van een dubbele driehoek kansverdeling. Minimum, mediaan en maximum (de door de gebruiker opgegeven waarden) zijn in dit geval 50m, 65m en 90m. Het resulterende gemiddelde is 66.7m.

## 5.9 Beschouwingen

### 5.9.1 Vermogenswinst door dichtheidverschil tussen productie- en injectieput

De temperatuur van het water in de injectieput is enkele tientallen graden Celsius lager dan die in de productieput. Het water is immers afgekoeld in de warmtewisselaar. Dit heeft tot gevolg dat de dichtheid van het water in de injectieput groter is dan die in de productieput. Uit vergelijking 5.9 valt af te leiden dat dit een verschil in de hydrostatische druk  $\Delta p_h$  tussen de twee putten oplevert van ongeveer:

$$\Delta p_h = p_{h,i} - p_{h,p} = g(\bar{\rho}_i - \bar{\rho}_p)\Delta h \dots\dots\dots(5.33)$$

Waarbij

- $p_{h,i}$ ,  $p_{h,p}$  = hydrostatische druk in respectievelijk injectie- en productieput.
- $\bar{\rho}_i$ ,  $\bar{\rho}_p$  = gemiddelde dichtheid in respectievelijk injectie- en productieput.
- $\Delta h$  = gemiddelde diepte (van top tot bodem) van injectie- en productieput.

Dit levert een extra vermogenswinst  $P_h$  op van

$$P_h = \Delta p_h Q_v \dots\dots\dots(5.34)$$

Voor een typisch doublet is het drukverschil ongeveer 1-2 bar. Dus, bij een typische  $Q_v$  van  $150 \text{ m}^3/\text{h}$  levert dit een vermogen van 4-8kW. In praktijk betekent dit, dat bij gegeven pompdruk, het debiet groter zal zijn dan zonder dit dichtheidsverschil.

Deze vermogenswinst wordt door het programma berekend.

#### 5.9.2 *Verskil tussen geproduceerde en geïnjecteerde debiet*

Een van de uitgangspunten van de berekening is dat de gemiddelde druk in de aquifer constant blijft gedurende de productie. Dit is het geval als het volume van het geproduceerde water hetzelfde is als het volume van het geïnjecteerde water. Dit is echter niet het geval.

De temperatuur van het water dat in de aquifer wordt geïnjecteerd is ongeveer gelijk aan de temperatuur van het water aan de uitgang van warmtewisselaar. De temperatuur van het geproduceerde water is gelijk aan de statische geothermische temperatuur. De temperatuur van het geïnjecteerde water is dus veel lager dan die van het geproduceerde water en bijgevolg is de dichtheid van het geïnjecteerde water groter dan die van het geproduceerde water. Aangezien het massa debiet is in het hele systeem hetzelfde is (zie § 5.3.2) is, is het volume van het geproduceerde water groter dan het volume van het geïnjecteerde water. Dit zal leiden tot een afname van de gemiddelde druk in de aquifer.

Het total effect is echter verwaarloosbaar omdat:

- Het dichtheidsverschil veroorzaakt door het temperatuurverschil slechts ongeveer 1% is.
- Het geïnjecteerde water wordt opgewarmd door het gesteente, welke de statische geothermische temperatuur heeft, en slechts een gedeelte (20-40%) van het geïnjecteerde water op de blijft op de lagere injectietemperatuur.

Om deze reden wordt dit effect niet meegenomen.

### 5.9.3 *Viscositeit van het geïnjecteerde water*

De temperatuur van het water dat in de aquifer wordt geïnjecteerd is ongeveer gelijk aan de temperatuur van het water aan de uitgang van warmtewisselaar. Deze lage temperatuur heeft een groot effect op de viscositeit van het geïnjecteerde water. Ter illustratie, bij een productietemperatuur van 60 °C heeft het geproduceerde water een viscositeit van 0.63 cP terwijl het geïnjecteerde water bij een temperatuur van 30 °C een viscositeit heeft van 0.94 cP. Deze toename van 50% heeft tot gevolg dat de drukval van injectiesput naar aquifer ook 50% groter is dan die bij de productieput. De keuze van de temperatuur voor het geïnjecteerde water voor de berekening van de viscositeit is dus belangrijk.

Er zijn twee elkaar tegenwerkende effecten:

- Het injectiewater warmt snel op zoals beschreven in de § 5.9.2. Dit vermindert de drukval van injectieput naar aquifer.
- Het gesteente dicht rond de put zal na verloop van tijd de temperatuur van het geïnjecteerde water aannemen en de meeste drukval zal plaatsvinden rond de put ( $\Delta p \approx \ln(r)$ , waarbij  $r$  de afstand tot de put).

Dit rechtvaardigt de gekozen benadering om als temperatuur voor het geïnjecteerde water voor de berekening van de viscositeit de temperatuur aan de bodem van de injectieput te gebruiken.

## 6 Verklaring van gebruikte letters en symbolen

Genoemde eenheden zijn SI<sup>3</sup>.

### Nederlands

$c_p$	warmtecapaciteit (J/(kg·K))
$CoP$	Coefficient of Performance
$d$	diepte, positief naar beneden gemeten vanaf NAP (m)
$d_{top}$	diepte top aquifer (m)
$D$	diameter van tubing/buis (m)
$f$	frictiegetal
$g$	zwaartekrachtversnelling 9.80665 m/s <sup>2</sup>
$H$	aquifer dikte (m) (is dit dikte (loodrecht op bedding) of hoogte (z richting))
$k$	permeabiliteit (m <sup>2</sup> )
$k_t$	thermische conductiviteit (W/(m·K))
$l$	lengte langs tubing/buis (m)
$L$	afstand productieput – injectieput op aquiferniveau (m)
$p$	druk (Pa)
$P$	vermogen (W)
$q_w$	warmte-uitwisseling put-omgeving (W/m)
$Q_v$	(volume) debiet (m <sup>3</sup> /s)
$Q_m$	massa debiet (kg/s)
$r$	straal van tubing/buis (m)
$Re$	Reynoldsgetal
$R_{ng}$	netto/bruto verhouding (net-to-gross ratio)
$s$	saliniteit, zoutgehalte van water (gewichtsfractie)
$S$	skin van put
$t$	tijd (s)
$T$	temperatuur(K)
$v$	gemiddelde watersnelheid in een buis (m/s)
$z$	hoogte, positief naar boven, gemeten vanaf NAP (m)

### Grieks

$\alpha_t$	thermische diffusiviteit (m <sup>2</sup> /s)
$\Delta$	verschil
$\varepsilon$	ruwheid van de tubing/buis (m)
$\lambda$	geothermische gradiënt (K/m)
$\mu$	viscositeit water (Pa·s)
$\eta$	pompefficiëntie
$\rho$	dichtheid (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{fw}$	dichtheid zoet (fresh) water (kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma$	$e^\gamma = 1.781072$ , met Euler's constant $\gamma = 0.577216$

<sup>3</sup> Bij de invoer van de parameters door de gebruiker worden “praktische” eenheden gebruikt (bijvoorbeeld mDarcy). Deze worden steeds vermeld in het invoerscherm.

## Subscripts

<i>aq</i>	aquifer
<i>db</i>	drukbalans
<i>c</i>	casing
<i>g</i>	gesteente
<i>gt</i>	geothermisch
<i>h</i>	hydrostatisch
<i>i</i>	injectieput
<i>in</i>	binnen- (inner-)diameter of straal
<i>k</i>	knooppuntnummer
<i>out</i>	buiten- (outer-)diameter of straal
<i>opp</i>	oppervlakte
<i>p</i>	productieput
<i>stat</i>	statisch (druk temperatuur)
<i>top</i>	top aquifer
<i>w</i>	well
<i>ww</i>	warmtewisselaar

## 7 Referenties

- Adams, J. J. and S. Bachu (2002): Equations of state for basin geofluids: algorithm review and intercomparison for brines, *Geofluids*, Volume 2 Issue 4, Pages 257 - 271 23 Nov 2002
- Batzle, M. and Wang, Z (1992): Seismic properties of pore fluids. *Geophysics*, Vol 57, No 11, p. 1396-1408.
- Beggs, H.D. (1985): *Gas Production Operations*. OGCI Publications, Tulsa.
- Beggs, H.D. & Brill, J.P. (1973): A study of two-phase flow in inclined pipes. *Journal of Petroleum Technology*, May 1973, pp. 607-617
- Dake, L.P. (1978): *Fundamentals of reservoir engineering*, Elsevier, *Developments in Petroleum Science* 8,
- Farshad, F.F. and Rieke, H.H. (2006): Surface-Roughness Design Values for Modern Pipes, *SPE Drilling & Completion*, Volume 21, Number 3, September 2006, pp. 212-215
- Feistel, R. and Marion, G.M. (2008): A Gibbs–Pitzer function for high-salinity seawater thermodynamics. *Progress in Oceanography* 74 (2007) 515–539
- Garcia-Gutierrez, A., Espinosa-Paredes, G. & Hernandez-Ramirez, I. (2001): Study on the flow production characteristics of deep geothermal wells. *Geothermics* 31 (2002): 141-167
- Grunberg, L., 1970. Properties of sea water concentrates. In: *Third International Symposium on Fresh Water from the Sea*, vol. 1, pp. 31–39.
- Heidinger, P., et al. (2006), HDR economic modelling: HDRec software, *Geothermics*, 35, 683-710.
- Verruijt, A. (1970): *Theory of Groundwater Flow*. Macmillan, 1970.