

**TNO-rapport****TNO 2012 P10846****DoubletCalc 1.4 handleiding****Energie**Princetonlaan 6  
3584 CB Utrecht  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 42 56

F +31 88 866 44 75

[infodesk@tno.nl](mailto:infodesk@tno.nl)

Datum 14 augustus 2012

Auteur(s) H.F. Mijnlieff, A.N.M. Obdam, A. Kronimus, J.D.A.M. van Wees, P.  
van Hooff, M.P.D. Pluymaekers en J.G. Veldkamp

Exemplaarnummer

Oplage

Aantal pagina's 47 (incl. bijlagen)

Aantal bijlagen

Opdrachtgever

Projectnaam F Aardwarmte

Projectnummer 056.01556

Alle rechten voorbehouden.

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

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

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

© 2013 TNO

# Inhoudsopgave

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| <b>1</b>  | <b>Inleiding .....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>2</b>  | <b>Gebruikershandleiding DoubletCalc v1.4 .....</b>                          | <b>6</b>  |
| 2.1       | Installeren van het programma.....   | 6         |
| 2.2       | Invoerscherm.....  | 7         |
| 2.3       | Uitvoerscherm.....   | 10        |
| 2.4       | Foutmeldingen .....  | 14        |
| <b>3</b>  | <b>Opzet van het DoubletCalc model .....</b>                                 | <b>15</b> |
| 3.1       | Opmerkingen bij de modelaanpak.....  | 17        |
| 3.2       | Scheef doorboren van de aquifer .....  | 17        |
| <b>4</b>  | <b>Theoretische onderbouwing van het DoubleCalc model .....</b>              | <b>20</b> |
| <b>5</b>  | <b>Massabalans .....</b>   | <b>24</b> |
| 5.1       | Massadebiet .....  | 24        |
| 5.2       | Volumedebiet.....  | 24        |
| 5.3       | Impulsbalans.....  | 24        |
| 5.4       | Drukverloop door stroming in aquifer van of naar een put.....                | 25        |
| 5.5       | Drukverloop in een buis.....   | 26        |
| 5.6       | Drukverloop in de pomp .....   | 27        |
| 5.7       | Initiële hydrostatische druk bij productie- en injectieput.....              | 28        |
| <b>6</b>  | <b>Energiebalans .....</b>   | <b>29</b> |
| 6.1       | Geothermisch temperatuurprofiel .....  | 29        |
| 6.2       | Temperatuurverlies in de productieput.....                                   | 29        |
| 6.3       | Temperatuurverlies in de warmtewisselaar .....                               | 31        |
| <b>7</b>  | <b>Watereigenschappen.....</b>   | <b>32</b> |
| 7.1       | Dichtheid van water .....  | 32        |
| 7.2       | Viscositeit van water .....  | 32        |
| 7.3       | Warmtecapaciteit van water .....   | 32        |
| 7.4       | Zoutgehalte van water .....  | 33        |
| 7.5       | Skin ten gevolge van het scheef doorboorde aquifer .....                     | 33        |
| <b>8</b>  | <b>Oplossingsmethode .....</b>   | <b>36</b> |
| <b>9</b>  | <b>Berekende kenmerken van het geothermische doubletsysteem .....</b>        | <b>37</b> |
| 9.1       | Geothermisch vermogen .....  | 37        |
| 9.2       | Benodigd vermogen voor de pomp .....   | 37        |
| 9.3       | Coefficient of performance (COP) .....                                       | 37        |
| <b>10</b> | <b>Parameterspreiding.....</b>   | <b>38</b> |
| <b>11</b> | <b>Beschouwingen .....</b>   | <b>39</b> |
| 11.1      | Vermogenswinst door dichtheidsverschil tussen productie- en injectieput..... | 39        |
| 11.2      | Verschil tussen geproduceerde en geïnjecteerde debiet.....                   | 39        |
| 11.3      | Viscositeit van het geïnjecteerde water.....                                 | 40        |

|           |                            |           |
|-----------|----------------------------|-----------|
| <b>12</b> | <b>Referenties .....</b>   | <b>41</b> |
| <b>13</b> | <b>Ondertekening .....</b> | <b>42</b> |



# 1 Inleiding

DoubletCalc v1.4 is een door TNO beschikbaar gesteld programma waarmee een indicatief geothermisch vermogen van een toekomstig aardwarmte-doulet berekend kan worden. Berekeningen met DoubletCalc vormen de basis voor de bepaling van de overschrijdingkansgrafiek van het indicatief geothermisch vermogen in dat opgegeven moet worden in de Regeling SEI 'Risico's dekken voor aardwarmte'. De software is te downloaden op [www.nlog.nl](http://www.nlog.nl) onder Aardwarmte. Dit document dient als handleiding en theoretische onderbouwing van de software.

DoubletCalc v1.4 is de opvolger van DoubletCalc v1.3 dat gebruikt diende te worden bij de aanvraag voor deelname aan de eerste en tweede openstellingen van de SEI regeling 'Risico's dekken voor Aardwarmte'. Het onderliggende rapport is grotendeels overgenomen uit de Bijlage B 'Aanvraagformulier Subsidieregeling energie en innovatie Risico's dekken voor Aardwarmte' of het ondersteunende document op [www.nlog.nl](http://www.nlog.nl), 'Voorstel rapportage-vereisten geologische evaluatie aardwarmte'(rapport TNO-034-UT-2009-02002/B).

De belangrijkste verandering ten opzichte van v1.3 is de mogelijkheid om de verbuizing van de productie- en injectieput in meer detail in te voeren. Daarnaast kan nu ook een spreiding in de verwachte saliniteit van het water worden opgegeven.

In dit document wordt allereerst het gebruik van de software uitgelegd. Daarna volgt een beschrijving van de modellering van het doulet. Tot slot volgt de theoretische onderbouwing, inclusief de formules die geïmplementeerd zijn in de software.

## 2 Gebruikershandleiding DoubletCalc v1.4

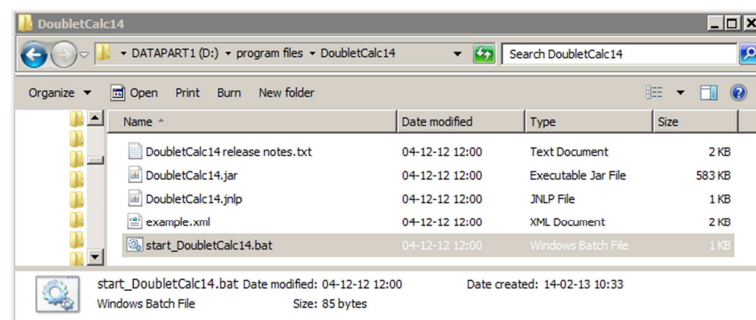
### 2.1 Installeren van het programma

Het programma is te vinden op de website [www.nlog.nl](http://www.nlog.nl) onder Aardwarmte. Het is verpakt in een zip-file. Om het programma te gebruiken dient de zip-file te worden gedownload en op de computer te worden bewaard. Vervolgens dienen de gezippte bestanden te worden uitgepakt. De locatie waar de bestanden op de computer worden geplaatst is zelf in te stellen. In principe zal er (bijvoorbeeld) een directory DoubletCalc14 worden aangemaakt waarin de volgende files staan:

1. de handleiding 'TNO 2012 R10846 Handleiding DoubletCalc14.pdf'
2. de release notes 'DoubletCalc14 release notes.txt'
3. de programmabestanden genaamd 'DoubletCalc14.jar' en 'DoubletCalc14.jnlp'.
4. voorbeeldfile van een DoubletCalc scenario 'example.xml'
5. de batch file 'start\_DoubletCalc14.bat' om het programma te starten

#### 2.1.1 Installatie op een Windows computer

JavaFX 1.3.1 SDK dient geïnstalleerd te zijn. Om DoubletCalc op te starten: dubbelklik op start\_DoubletCalc14.bat in de filebrowser. Het kan eventueel nodig zijn om in de batch file vòòr 'javafx' het pad naar javafx.exe toe te voegen, zoals bijvoorbeeld "c:\Program Files (x86)\JavaFX\javafx-sdk1.3\bin\javafx.exe" (inclusief dubbele quotes).



Figuur 1 Locatie van DoubletCalc bestanden gezien in een filebrowser. Het opstartbestand heet start\_DoubletCalc14.bat

Als DoubletCalc niet opstart, kan onderstaand nagegaan worden:

1. Is JavaFX 1.3.1 SDK geïnstalleerd. Deze software kan [hier](#) gedownload worden.
2. Verwijst javafx in de opstart batch file naar de file javafx.exe die hoort bij JavaFX 1.3.1 SDK
3. Is de goede versie van Java geïnstalleerd (versie 7 update 5). Deze informatie kan geverifieerd worden op de website <http://www.java.com/en/download/installed.jsp>. Java kan gedownload worden van <http://www.java.com/en/download/manual.jsp>
4. Het Java cache geheugen kan leeggemaakt worden: [http://www.java.com/nl/download/help/plugin\\_cache.xml](http://www.java.com/nl/download/help/plugin_cache.xml)

### 2.1.2 *Installatie op een Apple computer*

Volg dezelfde instructies als voor windows computers maar verander zonnig enkele regels in de file DoubletCalc14.jnlp:

1. Verander in regel 2 de locatie waar 'codebase' naar verwijst. Deze regel ziet er in principe als volgt uit  
`<jnlp spec="1.0+" codebase="." href="DoubletCalc14.jnlp">`  
Achter de tekst 'codebase=' zou het volledige pad naar DoubletCalc ingevuld moeten worden, bijvoorbeeld als DoubletCalc in de folder c:\software\DoubletCalc is geïnstalleerd:  
`<jnlp spec="1.0+" codebase="c:/software/DoubletCalc/" href="DoubletCalc14.jnlp">`
2. (Nogmaals) het Java cache geheugen leegmaken:  
[http://www.java.com/nl/download/help/plugin\\_cache.xml](http://www.java.com/nl/download/help/plugin_cache.xml)

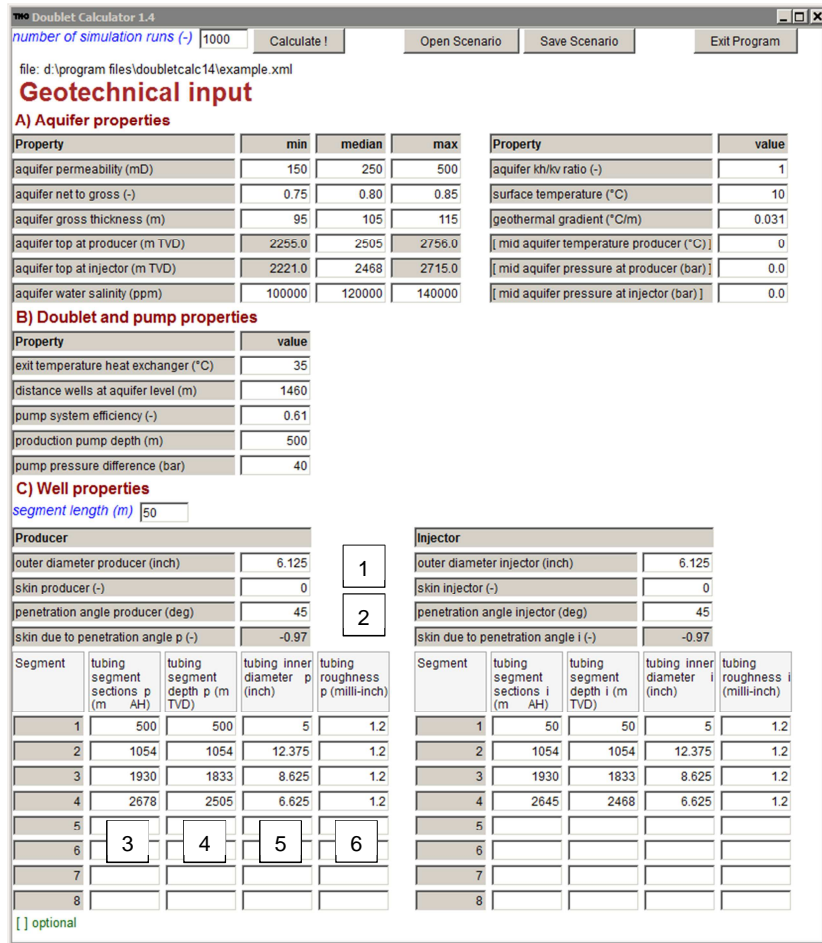
## 2.2 **Invoerscherm**

Na het installeren van Java verschijnt het invoerscherm van DoubletCalc 1.4 (Figuur 2). Het invoerscherm geeft de gebruiker de mogelijkheid de essentiële parameters in te voeren die nodig zijn om het indicatieve geothermische vermogen van het project te berekenen. De nadere toelichting voor deze parameters is te vinden in het TNO rapport 'Specificaties geologisch onderzoek voor geothermie-projecten'. Alleen de witte vakken worden verplicht ingevoerd. De waarden in de grijze vlakken worden berekend door de software. Het aantal simulaties en de segmentlengte (in blauw) kunnen desgewenst worden ingevuld. Er is voor gekozen om na het opstarten de invulvelden zoveel mogelijk leeg te laten, met uitzondering van waardes die voor Nederland weinig variëren, zoals de geothermische gradiënt en de oppervlaktetemperatuur. Dit is gedaan om te voorkomen dat gepresenteerde *default* waarden die niet representatief zijn voor een door te rekenen scenario ten onrechte in een scenario worden gebruikt. Nulwaardes van de optionele parameters (tussen []) worden genegeerd.

Het invoerscherm geeft de mogelijkheid om een bestaand scenario te openen ('open scenario'). In het 'Open scenario' scherm kan de XML-file van het gewenste scenario worden geopend (Figuur 3). De parameters van dit scenario worden vervolgens getoond in het invoerscherm.

Er kan ook meteen gestart worden met het invullen van eigen scenarioparameters. Als de parameters zijn ingevuld kan het nieuwe scenario worden bewaard ('save scenario'; Figuur 4).

***Let op! In vergelijking met DoubletCalc 1.3 zijn de invulvakken van Producer en Injector gewisseld! De parameters van de Producer staan in DoubletCalc 1.4 links of boven die van de Injector.***



Figuur 2 Invoerscherf DoubletCalc 1.4 (de cijfers verwijzen naar de tekst onder het Verbuingsschema op de volgende pagina)



Figuur 3 DoubletCalc Open Scenario scherm



Figuur 4 DoubletCalc Save Scenario scherm



### Verbuizingsschema

In DoubletCalc 1.4 moet het verbuizingsschema, inclusief de relevante eigenschappen van de buizen (binnendiameter en ruwheid), worden opgegeven tot tenminste de top van de aquifer. De Along Hole (AH) en True Vertical Depth (TVD) dieptes moeten ten opzichte van hetzelfde referentieniveau worden opgegeven. Met behulp van deze gegevens kan de weerstand worden berekend die het water ondervindt als het door de verbuizing stroomt. Figuur 2 geeft onder Well properties de essentiële putinvoerparamers voor DoubletCalc 1.4 weer:

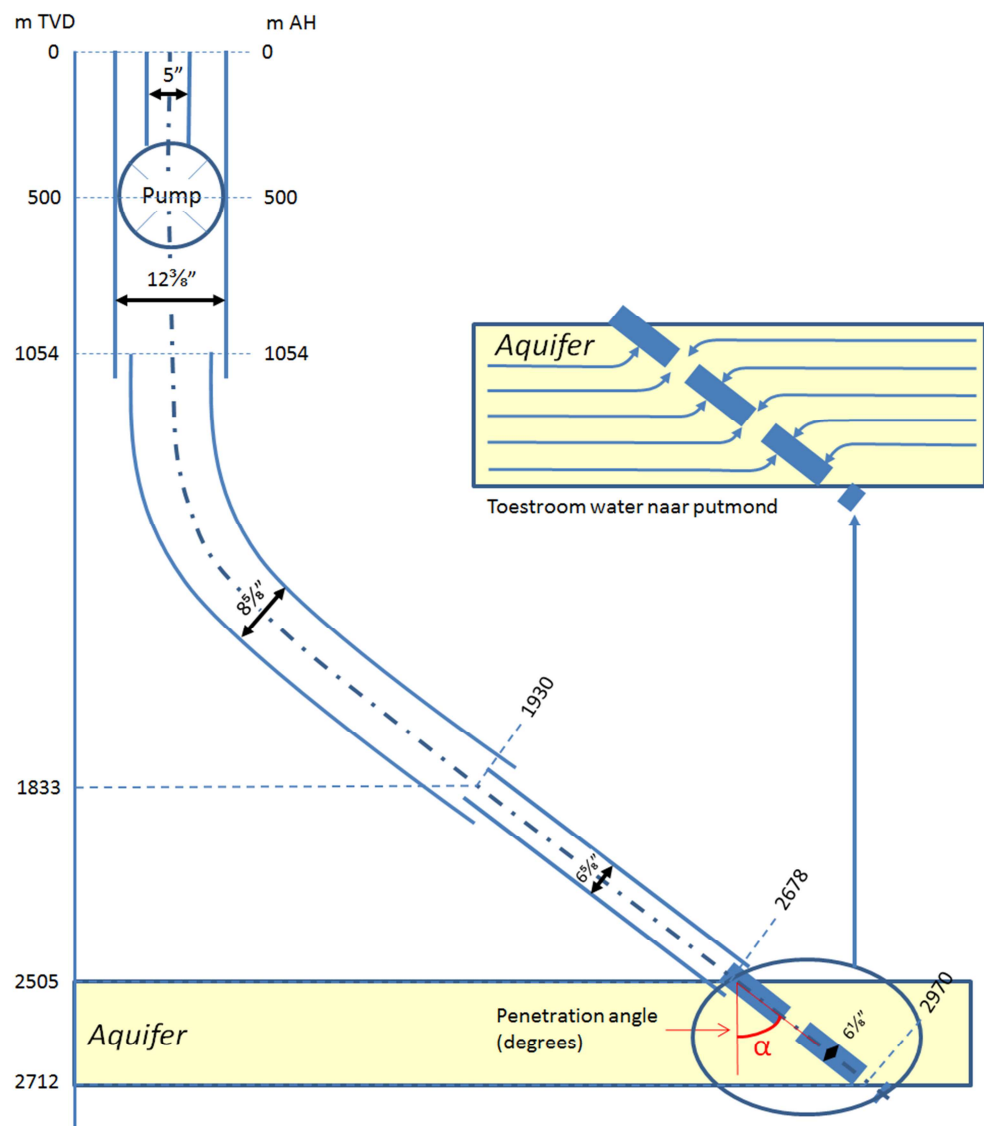
1. de buitendiameter van de producer en injector in de reservoirsectie (inch; deze bepaalt de grootte van het oppervlak waarlangs instroom kan plaatsvinden naar de productiebuis);
2. de inclinatie van het boorgat binnen de aquifer (in graden t.o.v. de verticaal).
3. de top en basis van de segmenten van de verbuizing in meters langs het boorgat (mAH);
4. de top en basis van de segmenten van de verbuizing in meters vertikaal (TVD);
5. de binnendiameter van de verbuizing per segment (inch; dit is de buis waar het water door stroomt, en de diameter bepaalt zodoende samen met de ruwheid de weerstand die het water ondervindt tijdens stroming);
6. de ruwheid van de buis (milli-inch).

Figuur 5 toont welke punten ingevoerd kunnen worden. Het gedeelte van de put dat zich in de aquifer bevindt (blauw in de figuur) hoeft niet opgegeven te worden als een screen of pack in een 'open hole' is geplaatst. Als een deel van de verbuizing in het reservoir ongeperforeerde buis is, zal dit voor extra weerstand zorgen. Dit deel van de verbuizing moet dan wel in het verbuizingsschema opgenomen worden.

Het detail in Figuur 5 geeft een indruk van de manier waarop het water naar de scheve putmond stroomt. De inclinatie van het boorgat door de aquifer wordt gebruikt om te verdisconteren dat water makkelijker de put instroomt naarmate het contactoppervlak met de aquifer groter is. Meer informatie hierover kan gevonden worden in de paragrafen 3.2 (Scheef doorboren) en 7.5 (Skin ten gevolge van het scheef doorboorde aquifer).

Tijdens de berekening van het vermogen wordt de diepte van de top van de aquifer stochastisch gevarieerd. Hierdoor sluit de opgegeven architectuur van de verbuizing mogelijk niet meer aan bij de top van de aquifer. Om dit te voorkomen zal DoubletCalc het tubing segment met de grootste diameter naar behoren verlengen of verkorten.

DoubletCalc verdeelt tijdens de simulatie de put in segmenten van gelijke lengte (de 'segment length' onder Well properties in het invoerscherm van Figuur 2. Aan segmenten die over een tubing section grens heen gaan wordt een gewogen gemiddelde van de eigenschappen toegekend (zie de 'base case details' file in paragraaf 2.3.3). Het is aan te raden dat de 'segment length' in overeenstemming met het putontwerp wordt gekozen. Een klein gekozen lengte verlengt de rekentijd, een groot gekozen lengte introduceert meer onnauwkeurigheid.



Figuur 5 Schematische weergave van de verbuizing. Het deel van de verbuizing dat zich in het reservoir bevindt kan onder bepaalde omstandigheden opgegeven worden.

Als alle parameters naar believen zijn ingevuld kan de berekening van het geothermisch vermogen worden gestart (knop 'Calculate!'). Na enige tijd verschijnt het scherm Doublet Calculator 1.4 Result Table (Figuur 6).

### 2.3 Uitvoerscherm

Het uitvoerscherm geeft in de linker kolom 'Geotechnics (Input)' de invoerwaarden waarmee de berekeningen zijn uitgevoerd. De rechter kolom 'Geotechnics (Output)' toont de rekenresultaten. In het eerste blok 'Monte Carlo cases' staan de waarden van de stochastische berekening. In het tweede blok 'base case' de resultaten van de berekening met enkel de mediane waarden (als er een spreiding is opgegeven).

Het uitvoerscherm heeft drie opties om de resultaten op een alternatieve manier te presenteren.

1. probabilistische plots
2. fingerprinting
3. export van de base case details

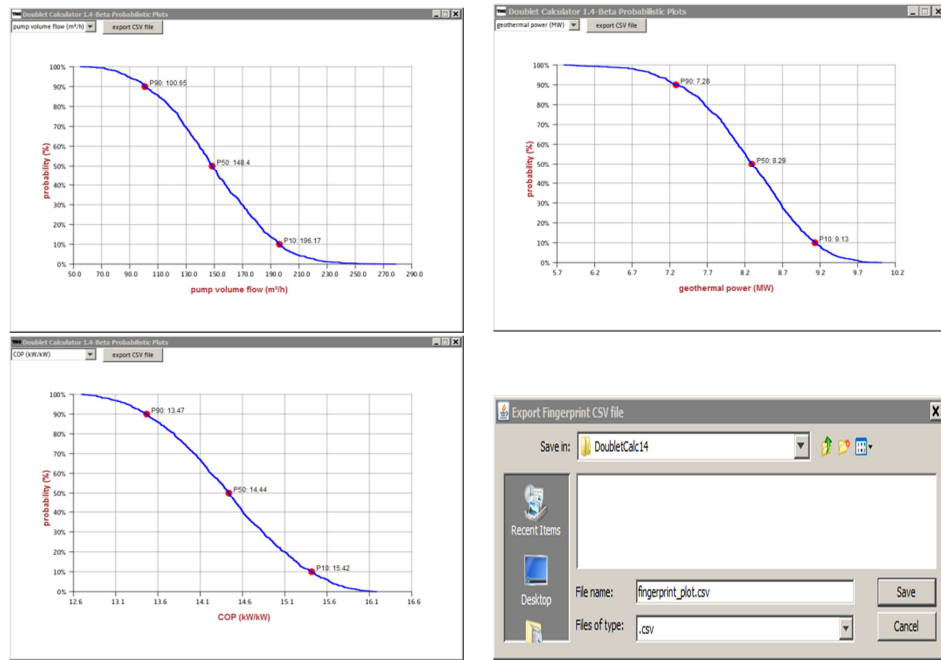
| TNO Doublet Calculator 1.4 Result Table          |                            |                |                             |  |              |            |            |
|--|----------------------------|----------------|-----------------------------|--|--------------|------------|------------|
| probabilistic plots                              |                            | fingerprinting |                             | export base case details                     |              |            |            |
| file: d:\program files\doubletcalc14\example.xml |                            |                |                             |  |              |            |            |
| <b>Geotechnics (Input)</b>                       |                            |                | <b>Geotechnics (Output)</b> |  |              |            |            |
| <b>Property</b>                                  | <b>min</b>                 | <b>median</b>  | <b>max</b>                  | <b>Monte Carlo cases (stochastic inputs)</b> | <b>P90</b>   | <b>P50</b> | <b>P10</b> |
| aquifer permeability (mD)                        | 150.0                      | 250.0          | 500.0                       | aquifer kH net (Dm)                          | 16.4         | 21.3       | 32.52      |
| aquifer net to gross (-)                         | 0.75                       | 0.8            | 0.85                        | mass flow (kg/s)                             | 35.16        | 43.79      | 58.29      |
| aquifer gross thickness (m)                      | 95.0                       | 105.0          | 115.0                       | pump volume flow (m <sup>3</sup> /h)         | 119.8        | 149.1      | 198.5      |
| aquifer top at producer (m TVD)                  | 2255.0                     | 2505.0         | 2756.0                      | required pump power (kW)                     | 218.3        | 271.6      | 361.5      |
| aquifer top at injector (m TVD)                  | 2221.0                     | 2468.0         | 2715.0                      | geothermal power (MW)                        | 6.42         | 8.33       | 11.23      |
| aquifer water salinity (ppm)                     | 100000.0                   | 120000.0       | 140000.0                    | COP (kW/kW)                                  | 28.0         | 30.4       | 32.8       |
| <b>Property</b>                                  | <b>value</b>               |                |                             | <b>base case (median value inputs)</b>       | <b>value</b> |            |            |
| number of simulation runs (-)                    | 1000.0                     |                |                             | aquifer kH net (Dm)                          | 21.0         |            |            |
| aquifer kh/kv ratio (-)                          | 1.0                        |                |                             | mass flow (kg/s)                             | 43.05        |            |            |
| surface temperature (°C)                         | 10.0                       |                |                             | pump volume flow (m <sup>3</sup> /h)         | 146.6        |            |            |
| geothermal gradient (°C/m)                       | 0.031                      |                |                             | required pump power (kW)                     | 267.1        |            |            |
| [ mid aquifer temperature producer (°C) ]        | 0.0                        |                |                             | geothermal power (MW)                        | 8.12         |            |            |
| [ mid aquifer pressure at producer (bar) ]       | 0.0                        |                |                             | COP (kW/kW)                                  | 30.4         |            |            |
| [ mid aquifer pressure at injector (bar) ]       | 0.0                        |                |                             | Aquifer Pressure at producer (bar) *         | 255.08       |            |            |
| exit temperature heat exchanger (°C)             | 35.0                       |                |                             | Aquifer Pressure at Injector (bar) *         | 251.18       |            |            |
| distance wells at aquifer level (m)              | 1460.0                     |                |                             | Pressure difference at producer (bar) *      | 13.78        |            |            |
| pump system efficiency (-)                       | 0.61                       |                |                             | Pressure difference at injector (bar) *      | 25.81        |            |            |
| production pump depth (m)                        | 500.0                      |                |                             | Aquifer temperature at producer (°C) *       | 89.28        |            |            |
| pump pressure difference (bar)                   | 40.0                       |                |                             | Temperature at heat exchanger (°C)           | 86.51        |            |            |
| outer diameter producer (inch)                   | 6.13                       |                |                             | * @ mid aquifer depth                        |              |            |            |
| skin producer (-)                                | 0.0                        |                |                             |  |              |            |            |
| skin due to penetration angle p (-)              | -0.97                      |                |                             |  |              |            |            |
| tubing segment sections p (m AH)                 | 500.0,1054.0,1930.0,2678.0 |                |                             |  |              |            |            |
| tubing segment depth p (m TVD)                   | 500.0,1054.0,1833.0,2505.0 |                |                             |  |              |            |            |
| tubing inner diameter p (inch)                   | 5.0,12.38,8.62,6.62        |                |                             |  |              |            |            |
| tubing roughness p (milli-inch)                  | 1.2,1.2,1.2,1.2            |                |                             |  |              |            |            |
| outer diameter injector (inch)                   | 6.13                       |                |                             |  |              |            |            |
| skin injector (-)                                | 0.0                        |                |                             |  |              |            |            |
| skin due to penetration angle i (-)              | -0.97                      |                |                             |  |              |            |            |
| tubing segment sections i (m AH)                 | 50.0,1054.0,1930.0,2645.0  |                |                             |  |              |            |            |
| tubing segment depth i (m TVD)                   | 50.0,1054.0,1833.0,2468.0  |                |                             |  |              |            |            |
| tubing inner diameter i (inch)                   | 5.0,12.38,8.62,6.62        |                |                             |  |              |            |            |
| tubing roughness i (milli-inch)                  | 1.2,1.2,1.2,1.2            |                |                             |  |              |            |            |

Figuur 6 DoubletCalc 1.4 uitvoerscherf.

In de volgende paragrafen wordt de gedetailleerde uitvoer behandeld.

### 2.3.1 Probabilistische plots – grafieken

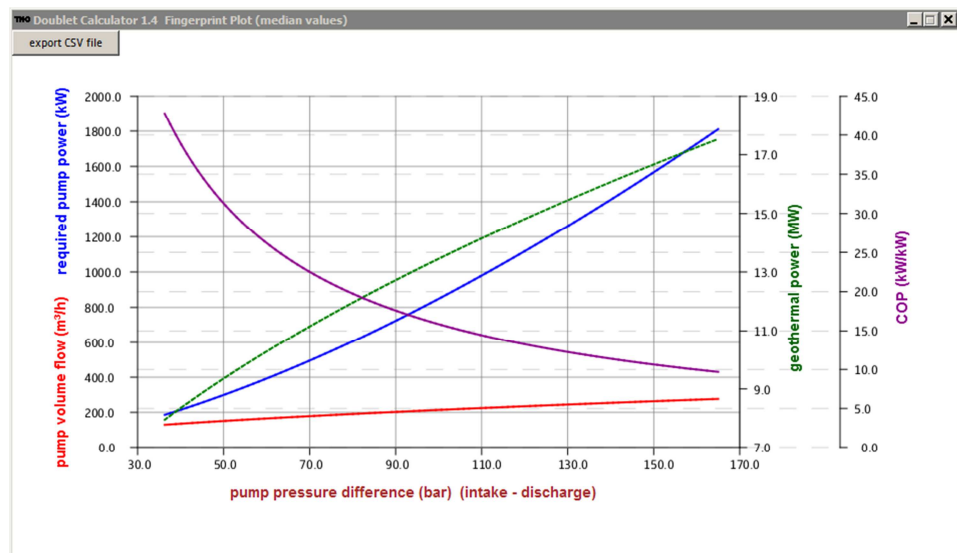
De knop 'probabilistic plots' toont de grafiek met de kansverdeling van het debiet (pump volume flow). In de linkerbovenhoek van de grafiek is dan de mogelijkheid te kiezen om eenzelfde grafiek op te roepen voor het geothermisch vermogen (geothermal power) en de Coefficient of Performance (COP). De knop 'Export CSV file' exporteert de datareeks van de grafiek naar een tekstbestand.



Figuur 7 De drie versies van probabilistische plots die opgeroepen kunnen worden (Pump Volume, Geothermal Power en COP), en het export scherm.

### 2.3.2 Fingerprinting grafiek

Figuur 8 toont de grafiek die wordt gegenereerd onder de knop Fingerprinting. DoubletCalc berekent het geothermisch vermogen (groene curve), de COP (paars), het debiet (rood), en de benodigde pompenergie (blauw) bij een aantal verschillende pompdrukken die rond de opgegeven pompdruk liggen. Als van de parameters minimum, mediaan en maximum waarden zijn opgegeven wordt bij deze berekening gebruik gemaakt van de middenwaardes.



Figuur 8 DoubletCalc Fingerprint grafiek.

### 2.3.3 Base case details

Met 'export base case details' worden voor de productie- en injectieput per rekensegment (in het invoerscherm opgegeven als 'segment length (m)') van de elementen in Tabel 1 de berekende waarden opgeslagen. Daarnaast levert deze uitvoer ook nog de volgende twee tabellen waarin resultaten zijn opgesomd voor het doublet als geheel of op specifieke plekken in het doublet systeem. Bijlage 1 bevat een voorbeeld van een base case details bestand.

| element               | beschrijving  |
|-----------------------|---|
| L(m)                  | diepte langs het boorgat  |
| Z(m)                  | Diepte True Vertical Depth  |
| Angle (deg)           | Gemodelleerde inclinatie  |
| Inner diameter(inch)  | Binnen diameter van de buis   |
| Roughness(milli-inch) | Ruwheid van de buis   |
| P(bar)                | Druk  |
| T(degC)               | Temperatuur   |
| S(ppm)                | Saliniteit (Total Dissolved Solids, NaCl equivalenten)                        |
| Density(kg/m3)        | Dichtheid   |
| Viscosity(Pa s)       | Viscositeit   |
| Qvol(m3/h)            | Volume debiet   |
| dPGrav(bar)           | Drukverschil ten gevolge van werking zwaartekracht op dichtheid van het water |
| dPVisc(bar)           | Drukverschil ten gevolge variërende viscositeit                               |
| dPpump(bar)           | Drukverschil ten gevolge pomp (opgegeven waarde in invoerscherm)              |

Tabel 1 Voor productie- en injectieput berekende elementen in de base case details tekstfile

| == DOUBLET NODES == |        |         |   |
|---------------------|--------|---------|---|
| Node                | P(bar) | T(degC) |   |
| Aquifer_Prod        | 201.86 | 73.55   | In de aquifer nabij de productieput       |
| Aquifer/Prod_Bottom | 186.14 | 73.55   | In de putmond van de productieput         |
| Prod_Top/Entry_HE   | 16.45  | 70.47   | Bij top van de productieput aan maai-veld |
| Exit_HE/Inj_Top     | 16.45  | 35.00   | Bij top van de injectieput aan maai-veld  |
| Inj_Bottom/Aquifer  | 229.29 | 35.71   | In de putmond van de injectieput          |
| Aquifer_Inj         | 203.52 | 73.55   | In de aquifer nabij de injectieput        |

Tabel 2 Druk en temperatuur op specifieke locaties in het Doublet Schema in de base case details tekstfile

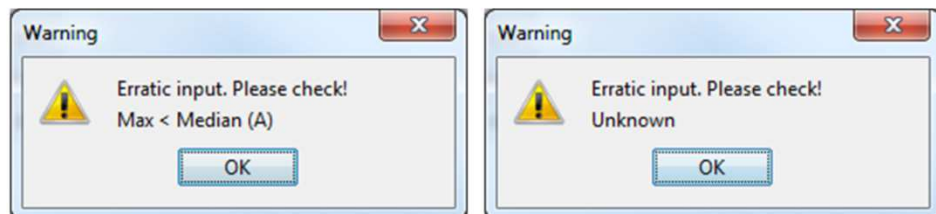
| === BASE CASE RESULTS ===            |        |  |
|--------------------------------------|--------|--|
| aquifer kH net (Dm)                  | 14.85  | Transmissiviteit   |
| mass flow (kg/s)                     | 26.10  | Massa debiet   |
| pump volume flow (m <sup>3</sup> /h) | 84.62  | Volume debiet  |
| required pump power (kW)             | 173.41 | Pomp energie nodig om  |
| geothermal power (MW)                | 3.18   | indic  |
| COP (kW/kW)                          | 18.34  | Coëfficiënt of Performance   |
| pressure difference producer (bar)   | 15.72  | Drukverschil over het grensvlak boorgat ⇔ aquifer in de productieput |
| pressure difference injector (bar)   | 25.77  | Drukverschil over het grensvlak boorgat ⇔ aquifer in de injectieput  |

Tabel 3 Base case details zoals weergegeven in het uitvoerscherm rechter kolom tweede blok van boven. De waarden geven de berekende situatie weer indien enkel de midden waarden in de berekeningen worden gebruikt

## 2.4 Foutmeldingen

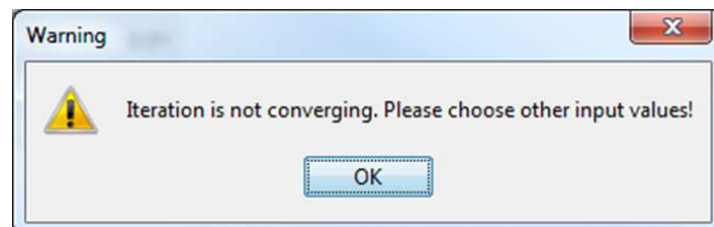
DoubletCalc kan (onder andere) de volgende foutmeldingen genereren:

**Erratic input:** In veel gevallen is er dan een fout gemaakt bij de invoer. Bijvoorbeeld de middenwaarde is kleiner dan de lage waarde in de opgegeven spreiding. Of er is ergens een diepte waarde ingevuld die niet correspondeert met andere dieptewaarden, bijvoorbeeld een pompdiepte dieper dan de TD van de put.



Figuur 9 DoubletCalc foutmelding invoerparameters.

**Data is not converging :** Deze foutmelding is het gevolg van een op zich juiste invoer die echter, in combinatie met andere waarden die voortkomen uit de trekking in de stochastische simulatie van bijvoorbeeld diepte en dikte, resulteert in een onmogelijke situatie tussen put en aquifer.



Figuur 10 DoubletCalc foutmelding voor een onjuiste combinatie van (getrokken) parameterwaarden.

### 3 Opzet van het DoubletCalc model

De doelstelling bij het opzetten van DoubletCalc is om aan de hand van een model van een geothermisch doublet een indicatief geothermisch vermogen te kunnen berekenen. Hierbij wordt rekening gehouden met geologische aquifer-onzekerheden. Om een geothermisch vermogen te kunnen berekenen zijn onder meer aquiferparameters en installatieparameters nodig. De modellering gaat er vanuit dat de installatieparameters bekend zijn en dat de onzekerheden voortvloeien uit onzekerheden in de inschatting van de aquifer karakteristiek voor het boren is aangevangen. De onderstaande tabellen geven alle parameters en hun dimensie die nodig zijn voor de DoubletCalc berekening.

| Parameter  | min | verwacht | max | Dimensie |
|--|-----|----------|-----|----------|
| Aquifer laagpakketnaam of namen                          |     |          |     |          |
| Permeabiliteit   |     |          |     | mD       |
| Bruto dikte watervoerende pakket met spreiding           |     |          |     | m        |
| Netto/bruto percentage watervoerend pakket met spreiding |     |          |     | %        |
| Saliniteit (Total Dissolved Solids, NaCl equivalenten)   |     |          |     | ppm      |
| Diepte top aquifer injectieput                           | -   |          | -   | m        |
| Diepte top aquifer productieput                          | -   |          | -   | m        |

Tabel 4 Doubletcalc invoer geologische parameters (met spreiding)

| Parameter                         | waarde | dimensie |
|-----------------------------------|--------|----------|
| Geothermische gradiënt            |        | °C/m     |
| Gemiddelde oppervlaktetemperatuur |        | °C       |
| $k_v/k_h$ ratio van de aquifer    | 1      | -        |

Tabel 5 DoubletCalc invoer geologische parameters (zonder spreiding)

| Parameter  | waarde | dimensie   |
|--|--------|------------|
| Verbuizingsschema productieput                           |        | m          |
| Verbuizingsschema injectieput.                           |        | m          |
| Binnendiameter opvoerbuis                                |        | inch       |
| Ruwheid opvoerbuis (geeft stromingsweerstand)            |        | milli-inch |
| Boorgat diameter productieput op aquifer niveau          |        | °C         |
| Boorgat diameter injectieput op aquifer niveau           |        |            |
| Skin (weerstand rond putmond) productieput, vaste waarde | 0      | inch       |
| Skin (weerstand rond putmond) injectieput, vaste waarde  | 0      |            |
| Inclinatie put-aquifer traject productieput              |        | °          |
| Inclinatie put-aquifer traject injectieput               |        | °          |

Tabel 6 DoubletCalc invoer voor putspecificatie<sup>1</sup>

| Parameter   | waarde | dimensie |
|---|--------|----------|
| Injectietemperatuur   |        | °C       |
| Afstand tussen productie en injectie put op aquifer niveau. |        | m        |
| Pomp efficiëntie  |        | frac     |
| Afhangdiepte pomp in de productieput                        |        | m        |
| Opgelegd drukverschil pomp                                  |        | bar      |

Tabel 7 DoubletCalc invoer voor pomp en doublet<sup>1</sup>

### Debiet

Met behulp van de bovenstaande invoerparameters wordt het theoretische debiet bepaald bij een gegeven opgelegde drukval over het grensvlak aquifer-put (de putmond).

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

1. Drukverlies door stroming in de aquifer naar de productieput en van de injectieput.
2. Drukverlies rond productie- en/of injectieput tengevolge van een 'skin'.
3. Drukverlies in de productie- en injectieput tengevolge van wrijving door stroming.
4. Drukverschil door zwaartekracht.
5. Drukverschil tengevolge van de pomp in de productieput.

<sup>1</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.



6. 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 hoofdstuk 4 wordt een gedetailleerde theoretische beschrijving van de rekenmethode gegeven.

### 3.1 Opmerkingen bij de modelaanpak

Zoals in Figuur 5 is te zien wordt de put in segmenten opgedeeld. Daar waar een belangrijke overgang in diameter is voorzien moet een nieuw segment worden aangemaakt. De inclinatie van het segment wordt gemodelleerd door per segment de uitstap van het segment te berekenen en dat te combineren met de 'along hole' segmentlengte. Dit resulteert in een gehoekt deviatie traject dat, voor dit doel, de werkelijke deviatie adequaat benadert. Met deze gegevens en de per segment opgegeven diameter en ruwheid kan de stromingsweerstand berekend worden die het water ondervindt, en het verlies aan warmte op weg naar boven (producer) of winst aan warmte op weg naar beneden (injector; zie hoofdstuk 4 voor gedetailleerde specificatie).

De aquifer wordt als een homogeen pakket gemodelleerd met een uniforme dikte, netto/bruto verhouding, permeabiliteit,  $k_v/k_h$  ratio en saliniteit. Om een hellende aquifer te modelleren kan de top (in mTVD) van de aquifer verschillende waarden hebben in de productie- en injectieput.

In het model is geen directe relatie tussen de aquifer en de put. Er wordt impliciet vanuit gegaan dat de volledige aquifer of aquifer-interval is doorboord. Het model gaat er ook vanuit dat de aquifer verticaal wordt aangeboord. Verbeterde toestroming van het water naar de putmond wordt verdisconteerd in de skin (zie paragraaf 3.2: Scheef doorboren van de aquifer).

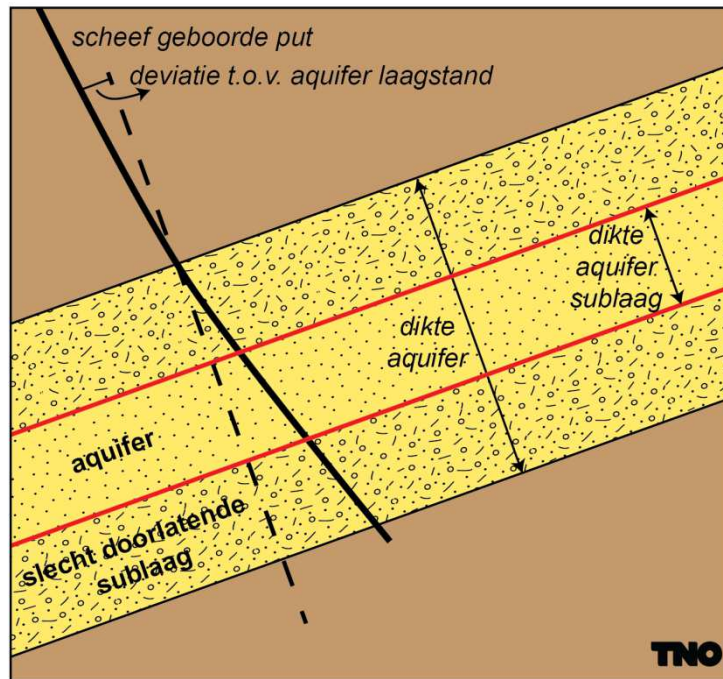
De reservoirtemperatuur die wordt gebruikt in het model is berekend door de diepte van het midden van de aquifer te vermenigvuldigen met de geothermische gradiënt, en daar de gemiddelde oppervlaktetemperatuur bij op te tellen. Het midden van de aquifer wordt bepaald door de in de stochastische simulatie getrokken diepte van de top van de aquifer op te hogen met de getrokken halve aquiferdikte.

### 3.2 Scheef doorboren van de aquifer

De doorsnijding van de put met de aquifer wordt in het model als een verticaal transect gemodelleerd. In de praktijk staan de injectie- en/of productieput vaak niet loodrecht op de aquifer. Deze zogenaamde 'scheve putten' hebben effecten op:

1. het verloop van de afstand tussen de putten in de aquifer
2. de waterstroming naar en van de put

Deze twee effecten worden hieronder besproken.



Figuur 11 Scheef doorboren van een aquifer

### Afstand tussen productie- en injectieput

Een scheef geboorde put heeft tot gevolg dat de afstand tussen de productie- en injectieput in de aquifer afhankelijk is van het traject van de geboorde put. Voor de onderlinge putafstand kan met het scheve karakter van de put rekening worden gehouden door de afstand te nemen tussen de putten op halve aquifer hoogte.

### Effect op waterstroming

De scheve doorboring van de aquifer heeft ook gevolgen voor de stroming van het grondwater. Ten gevolge van de scheve doorboring van de aquifer is in het algemeen de filterlengte groter dan de aquiferdikte. Dit effect kan in rekening worden gebracht door een extra skin in te voeren. Bij scheve doorboring zal de skin negatief zijn: de stroomsnelheid is dan groter dan bij een verticale put. Choi et al (2008) en Rogers & Economides (1996) geven een overzicht van de relatie tussen de skin en de deviatiehoek van de put, de anisotropie, de dikte van de aquifer en de putdiameter.

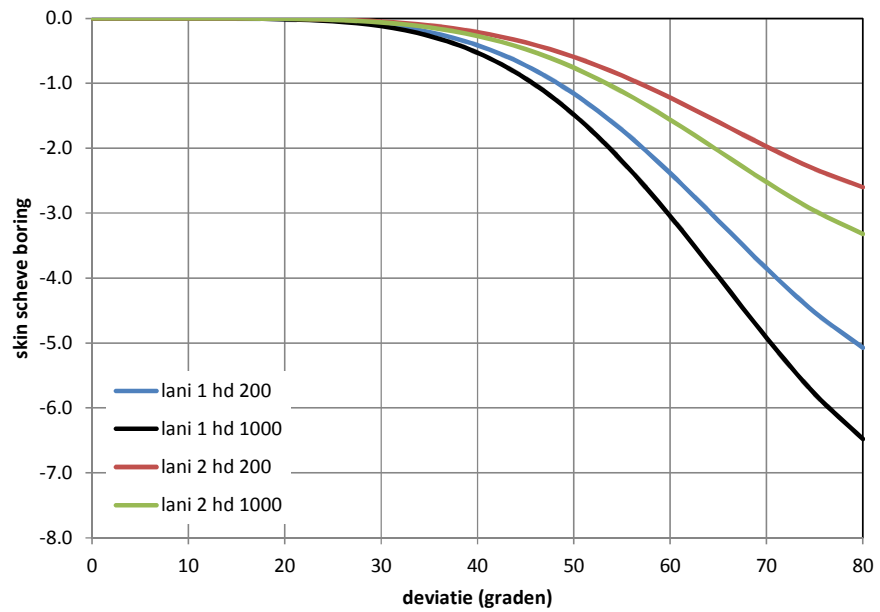
DoubletCalc verdisconteert het positieve effect op de toestroming van water in een negatieve skin. Het programma rekent deze uit met behulp van de formules behandeld in hoofdstuk 4 e.v.

In Figuur 12 is de skin uitgezet als functie van de deviatiehoek voor verschillende waarden van aquiferdikte ( $H$  of  $h_d$ ) en anisotropie ( $I_{ani}$ ). Zoals te zien is in de figuur neemt de (negatieve) skin als gevolg van de scheve put toe met toenemende deviatiehoek en toenemende laagdikte (zie ook paragraaf 7.5).

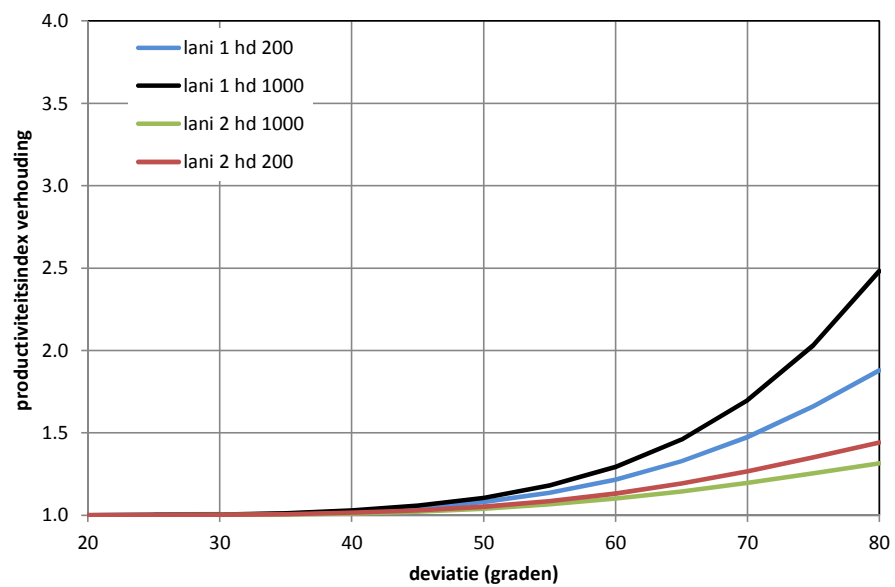
In het navolgende wordt voor twee voorbeelden van veel voorkomende waarden van de aquiferdikte en van de anisotropie-index de scheve-put-skin berekend. Deze parameterwaarden zijn:

H = 20 of 100 m  
 $h_d = 200$  of  $1000 (= H / r_w)$   
 $r_w = 0.10$  m (overeenkomend met een putdiameter van circa 8 inch)  
 $l_{ani} = 1$  of  $2$

Als voorbeeld is voor een onderlinge afstand van 1600 m en  $r_w$  van 0.10 m de verhouding van de productiviteitsindex met en zonder deviatiehoek uitgezet tegen de deviatiehoek in Figuur 13. Uit de figuur kan worden geconstateerd dat voor deviaties kleiner dan ongeveer  $40^\circ$  het effect hiervan op de produktiviteitsindex te verwaarlozen is. Voor deze deviatie is het effect met ongeveer 10% het grootst voor  $l_{ani} = 1$  en  $h_d = 1000$ .



Figuur 12 De skin van een scheve-boring als functie van de deviatie



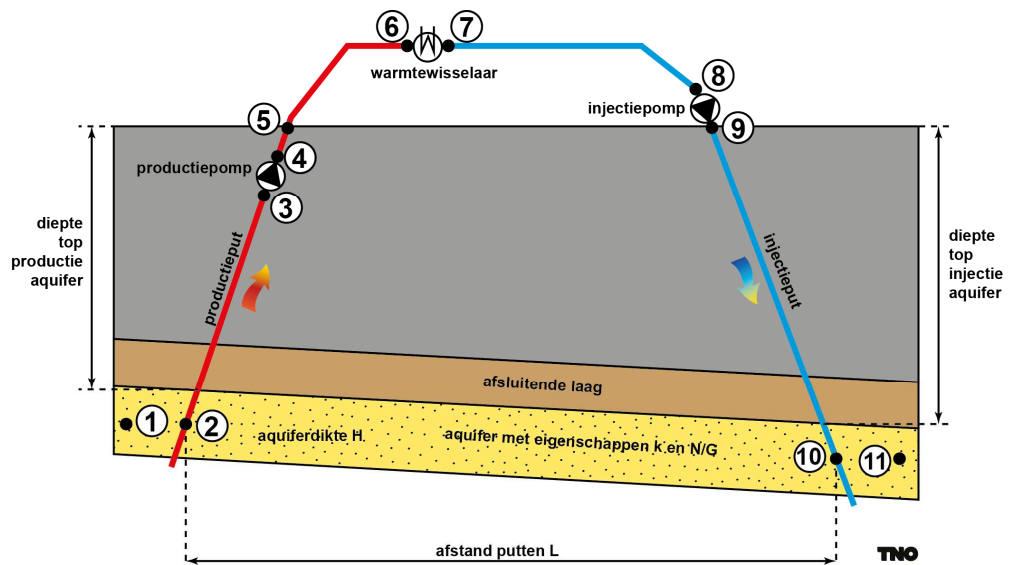
Figuur 13 De verhouding van de productiviteitsindex met en zonder scheve-put-skin

## 4 Theoretische onderbouwing van het DoubleCalc model

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

1. Massabalans: Het massadebiet (kg/s) is in het doubletsysteem vanaf de inname in de productieput tot en met de injectie in de aquifer constant.
2. 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 bepaalt het massadebiet bij gegeven pompdruk.
3. Energiebalans: Deze geldt voor ieder van de systeemelementen. Er wordt rekening gehouden met warmteafgifte in productieput aan omgeving en temperatuursdaling in de warmtewisselaar.

Figuur 14 laat een schematisch overzicht van het doubletsysteem zien. Hierin zijn nu de knooppunten gelokaliseerd die genoemd en gebruikt worden in Tabel 8 en Tabel 9 om de componenten van de druk- en energiebalansen te beschrijven.



Figuur 14 Overzicht van een geothermisch doubletsysteem met referenties naar knooppunten gebruik in Tabel 8 en Tabel 9.

| Van knooppunt |   | Naar knooppunt |  | Element         | Oorzaak drukverschil                              | Formules |
|---------------|---|----------------|--|-----------------|---|----------|
| 1             | Statische druk aquifer bij productieput | 2              | Bodem productieput                     | Aquifer         | Visceuze krachten                                 | 7        |
| 2             | Bodem productieput                      | 3              | Ingang productiepompe                  | Tubing/buis     | Visceuze krachten en zwaartekracht                | 9        |
| 3             | Ingang productiepompe                   | 4              | Uitgang productiepompe                 | Pomp            | Druk verhoging door pompe                         | 13       |
| 4             | Uitgang productiepompe                  | 5              | Top productieput                       | Tubing/buis     | Visceuze krachten en zwaartekracht                | 4        |
| 5             | Top productieput                        | 6              | Ingang warmtewisselaar                 | Buis            | Visceuze krachten en zwaartekracht. Verwaarloosd. | n.v.t.   |
| 6             | Ingang warmtewisselaar                  | 7              | Uitgang warmtewisselaar                | Warmtewisselaar | Visceuze krachten en zwaartekracht. Verwaarloosd. | n.v.t.   |
| 7             | Uitgang warmtewisselaar                 | 8              | Ingang injectiepompe                   | Buis            | Visceuze krachten en zwaartekracht. Verwaarloosd. | n.v.t.   |
| 8             | Ingang injectiepompe                    | 9              | Uitgang injectiepompe                  | Pomp            | Wordt niet apart gemodelleerd (zie § 3.6)         | n.v.t.   |
| 9             | Uitgang injectiepompe                   | 10             | Top injectieput                        | Buis            | Visceuze krachten en zwaartekracht. Verwaarloosd. | n.v.t.   |
| 10            | Top injectieput                         | 11             | Bodem injectieput                      | Tubing/buis     | Visceuze krachten en zwaartekracht                | 9        |
| 11            | Bodem injectieput                       | 12             | Statische druk aquifer bij injectieput | Aquifer         | Visceuze krachten                                 | 7        |

Tabel 8 Drukbalans

| Van knooppunt |                                 | Naar knooppunt |                                | Element          | Oorzaak warmte-uitwisseling  | Formules |
|---------------|---------------------------------|----------------|--------------------------------|------------------|--|----------|
| 1             | Midden aquifer bij productieput | 2              | Bodem productieput             | Aquifer          | Geen   | n.v.t.   |
| 2             | Bodem productieput              | 3              | Ingang productie-pomp          | Tubing/buis      | Warmteuitwisseling met de omgeving   | 20       |
| 3             | Ingang productie-pomp           | 4              | Uitgang productie-pomp         | Pomp             | Warmteuitwisseling met de omgeving. Verwaarloosd.                                | n.v.t.   |
| 4             | Uitgang productie-pomp          | 5              | Top productieput               | Tubing/buis      | Warmteuitwisseling met de omgeving   | 20       |
| 5             | Top productieput                | 6              | Ingang warmte-wisselaar        | Buis             | Warmteuitwisseling met de omgeving. Verwaarloosd.                                | n.v.t.   |
| 6             | Ingang warmte-wisselaar         | 7              | Uitgang warmte-wisselaar       | Warmte-wisselaar | Warmteverlies aan warmte-wisselaar   | 21       |
| 7             | Uitgang warmte-wisselaar        | 8              | Ingang injectie-pomp           | Buis             | Warmteuitwisseling met de omgeving Verwaarloosd.                                 | n.v.t.   |
| 8             | Ingang injectie-pomp            | 9              | Uitgang injectie-pomp          | Pomp             | Wordt niet apart gemodelleerd (zie §5.6)   | n.v.t.   |
| 9             | Uitgang injectie-pomp           | 10             | Top injectieput                | Buis             | Warmteuitwisseling met de omgeving Verwaarloosd.                                 | n.v.t.   |
| 10            | Top injectieput                 | 11             | Bodem injectieput              | Tubing/buis      | Warmteuitwisseling met de omgeving   | 20       |
| 11            | Bodem injectieput               | 12             | Midden aquifer bij injectieput | Aquifer          | Opwarming water door warmteuitwisseling met gesteente. Verwaarloosd (zie §11.2). | n.v.t.   |

Tabel 9 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 paragraaf 7.4).

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 Massabalans

### 5.1 Massadebiet

Zoals opgemerkt in hoofdstuk 3 (Opzet van het DoubletCalc model) 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:

$$Q_m = \text{constant} \dots\dots\dots(\text{formule 1})$$

### 5.2 Volumedebiet

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

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho} \dots\dots\dots(\text{formule 2})$$

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 Impulsbalans

De impulsbalans (drukbalans) wordt gegeven door:

$$\sum_{k=1}^{N-1} \Delta p_{k+1,k} + \Delta p_{1,N} = 0 \dots\dots\dots(\text{formule 3})$$

Waarbij  $N$  het aantal knooppunten  $k$  is in het doubletsysteem (Figuur 14, Tabel 8) en

$$\Delta p_{k+1,k} = p_{k+1} - p_k \dots\dots\dots(\text{formule 4})$$

En in het bijzonder

$$\Delta p_{1,N} = p_{stat,p} - p_{stat,i} \dots\dots\dots(\text{formule 5})$$

$p_{stat,p}$  en  $p_{stat,i}$  zijn de initiële hydrostatische drukken bij respectievelijk de productie- en injectieput (zie §5.7: Initiële hydrostatische druk bij productie- en injectieput).

Substitutie van 5 in 3 geeft

$$p_{stat,p} + \sum_{k=1}^{N-1} \Delta p_{k+1,k} - p_{stat,i} = 0 \dots\dots\dots(\text{formule 6})$$



In de volgende paragrafen worden ieder van de elementen uit bovenstaande formule besproken. Zoals in Tabel 8 aangegeven worden drukverliezen in bovengrondse pijpen en de warmtewisselaar verwaarloosd.

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

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

$$\Delta p_{w,aq} = p_w - p_{aq} = Q_v \frac{\mu}{2\pi k H R_{ntg}} \left( \ln \left( \frac{L}{r_{out,w}} \right) + S \right) \dots\dots\dots (formule 7)$$

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   |

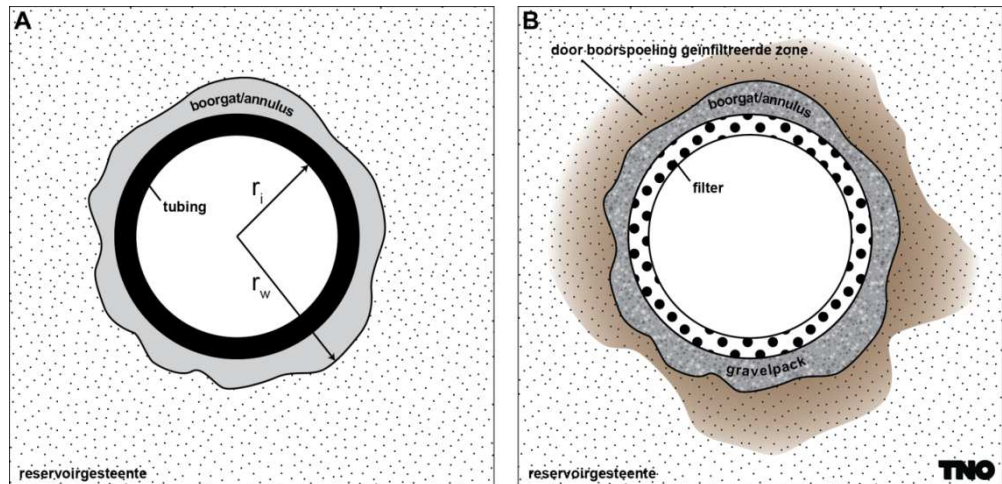
Deze formule geldt voor stationaire stroming naar verticale putfilters en voor homogene aquifereigenschappen.

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 paragraaf 7.4.

De rechterkant van vergelijking van formule 7 is afhankelijk van druk en temperatuur omdat  $\rho$  afhankelijk is van temperatuur en druk en  $\mu$  van temperatuur.

De eerste term in vergelijking van formule 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 15 illustreert schematisch de situatie rond de putmond met de buiten- en binnendiameter van het boorgat, de tubingdiameter en in bruin de door de boorspoeling geïnfiltreerde zone.



Figuur 15 Schets van het boorgat met verbuizing en aquifer (A) en infiltratie van boorspoeling in de aquifer (B)

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

$$\Delta p_{skin} = Q_v \frac{\mu}{2\pi k H} S \dots\dots\dots (formule 8)$$

De skin S 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.

**5.5 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 8). 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
- Wrijvingsweerstand / visceuze krachten
- 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 en Brill, 1985)

$$\frac{dp}{dl} = - \frac{f \rho v^2}{2D_{in}} - g \rho \frac{dz}{dl} \dots\dots\dots (formule 9)$$

De eerste term is het gevolg van visceuze 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:              |

$$v = \frac{4Q_v}{\pi D_{in}^2} \dots\dots\dots(formule 10)$$

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 en Brill, 1985, p99):

$$f = \left[ 1.14 - 2 \log \left( \frac{\varepsilon}{D_{in}} + \frac{21.25}{R_e^{0.9}} \right) \right]^{-2} \dots\dots\dots(formule 11)$$

Waarbij

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

$$R_e = \frac{\rho v D_{in}}{\mu} \dots\dots\dots(formule 12)$$

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

## 5.6 Drukverloop in de pomp

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

$$\Delta p_{pomp} = constant \dots\dots\dots(formule 13)$$

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

productiepomp tot ingang injectiepomp. De druk door de gebruiker gespecificeerde druk van de productiepomp 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.

### 5.7 Initiële hydrostatische druk bij productie- en injectieput

De initiële statische druk volgt uit formule 9 waarbij  $v=0$  en  $dz/dl = 1$ :

$$\frac{dp}{dz} = -g\rho \dots\dots\dots(formule 14)$$

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 temperatuursprofiel, zie paragraaf 6.1. De saliniteit op enig punt in de put is het statische saliniteitsprofiel zoals beschreven in paragraaf 7.4.

Met temperatuur en saliniteit gegeven wordt formule 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.

## 6 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:

- 1 Productieput
- 2 Warmtewisselaar

Startpunt voor de berekening is de geothermische temperatuur aan de productieput, welke wordt berekend uit het geothermische temperatuursprofiel (zie §6.1). Het temperatuurverlies in productieput en warmtewisselaar wordt behandeld in §6.2 en §6.3.

### 6.1 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:

$$T_{gt} = T_{gt}(d) = T_{opp} + \lambda d \dots\dots\dots(formule 15)$$

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:

$$T_{aquifer} = T_{opp} + \lambda(d_{top,p} + 0.5H) \dots\dots\dots(formule 16)$$

Met

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

### 6.2 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 warmte verlies per lengte-eenheid volgt uit (Garcia-Gutierrez et al., 2001):

$$q_{w, put} = \frac{4\pi k_{t,g} (T_c - T_{gt})}{\ln\left(\frac{4\alpha_{t,g} t}{\sigma r_c^2}\right)} \dots\dots\dots(formule 17)$$

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 constante  $\gamma = 0.577216$   
 $\alpha_{t,g}$  = thermische diffusiecoëfficiënt van het aquifergesteente:

$$\alpha_{t,g} = \frac{k_{t,g}}{\rho_g c_{p,g}} \dots\dots\dots(formule 18)$$

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:

$$q_{w, put} = Q_m c_p \frac{dT_{put}}{dl} \dots\dots\dots(formule 19)$$

Hierbij is

- $T_{put}$  = de temperatuur van het water in de put.  
 $l$  = lengte (afstand) langs de put.  
 $c_p$  = warmtecapaciteit van water (zie § 5.3).

Herschrijven van formule 17 geeft

$$\frac{dT_{put}}{dl} = \frac{q_{w, put}}{Q_m c_p} \dots\dots\dots(formule 20)$$

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  $1^{\circ}\text{C}$ . Het enige effect is op de viscositeit van het geïnjecteerde water.

### 6.3 Temperatuurverlies in de warmtewisselaar

Het temperatuursverlies in de warmtewisselaar is:

$$\Delta T_{ww} = T_{ww,in} - T_{ww,uit} \dots\dots\dots(\text{formule 21})$$

$T_{ww,in}$ , 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 §6.2.

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

$$T_{ww,uit} = \text{constant} \dots\dots\dots(\text{formule 22})$$

## 7 Watereigenschappen

### 7.1 Dichtheid van water

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

$$\rho_{fw} = 1 + 10^{-6}(-80T - 3.3T^2 + 0.00175T^3 + 489p - 2Tp + 0.016T^2p - 1.3 \cdot 10^{-5}T^3p - 0.333p^2 - 0.002Tp^2) \dots\dots\dots(\text{formule 23})$$

$$\rho = \rho_{fw} + s\{0.668 + 0.44s + 10^{-6}[300p - 2400ps + T(80 + 3T - 3300s - 13p + 47ps)]\} \quad (\text{formule 24})$$

Hierbij is

|             |   |  |
|-------------|---|--|
| $\rho_{fw}$ | = | dichtheid van zoet water (g/cm <sup>3</sup> )  |
| $\rho$      | = | dichtheid van zout water (g/cm <sup>3</sup> )  |
| $p$         | = | druk (MPa)                                     |
| $s$         | = | zoutgehalte (saliniteit) van het water (kg/kg) |
| $T$         | = | temperatuur (°C)                               |

### 7.2 Viscositeit van water

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

$$\mu = 0.1 + 0.333s + (1.65 + 91.9s^3) \exp(-[0.42(s^{0.8} - 0.17)^2 + 0.045]T^{0.8}) \dots\dots(\text{formule 25})$$

Hierbij is

|       |   |  |
|-------|---|--|
| $\mu$ | = | viscositeit van water (cP)                     |
| $s$   | = | zoutgehalte (saliniteit) van het water (kg/kg) |
| $T$   | = | temperatuur (°C)                               |

### 7.3 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 Grunberg (1970). Ondanks het feit dat dit een gedateerde referentie is wordt die betrouwbaar geacht temeer omdat er in een aantal recentere publicaties als Feistel en Marion (2008) Grunberg als betrouwbare bron voor de de warmtecapaciteit wordt genoemd.



$$\begin{aligned}
c_p = & \left( + 5.328 - 9.760 \cdot 10^{-2} s + 4.040 \cdot 10^{-4} s^2 \right) \\
& + \left( - 6.913 \cdot 10^{-3} + 7.351 \cdot 10^{-4} s - 3.150 \cdot 10^{-6} s^2 \right) T \\
& + \left( + 9.600 \cdot 10^{-6} - 1.927 \cdot 10^{-6} s + 8.230 \cdot 10^{-9} s^2 \right) T^2 \\
& + \left( + 2.500 \cdot 10^{-9} + 1.666 \cdot 10^{-9} s - 7.125 \cdot 10^{-12} s^2 \right) T^3 \dots\dots\dots (formule 26)
\end{aligned}$$

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 vermeld staat (+3.15·10<sup>-6</sup> i.p.v. - 3.15·10<sup>-6</sup>).

#### 7.4 Zoutgehalte van water

Voor het zoutgehalte van het water (saliniteit) gelden twee regimes:

1. Statisch: initieel statisch evenwicht in de ondergrond
2. 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

$$s(d) = s_{aq} \frac{d}{d_{top,p} + 0.5H} \dots\dots\dots (formule 27)$$

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

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

$$s = s_{aq} \dots\dots\dots (formule 28)$$

#### 7.5 Skin ten gevolge van het scheef doorboorde aquifer

De formule van de extra skin t.g.v. scheef doorboorde aquifer is:

$$s_\theta = -2.48 \frac{(\sin \theta)^{5.87} \cdot h_d^{0.152}}{I_{ani}^{0.964}} \text{ voor } I_{ani} \geq 1 \dots\dots\dots (formule 29)$$

Met:

$s_\theta$  = skin voor scheve put (dimensieloos)  
 $\theta$  = hoek van de put t.o.v. de verticaal (graden)

|           |   |   |
|-----------|---|---|
| $h_d$     | = | dimensieloze aquifer(sub)laag-dikte = $\frac{h}{r_w}$ |
| $h$       | = | aquifer(sub)laag-dikte (m)                            |
| $l_{ani}$ | = | anisotropie-index = $\sqrt{\frac{k_h}{k_v}}$          |
| $k_h$     | = | horizontale permeabiliteit (m <sup>2</sup> )          |
| $k_v$     | = | verticale permeabiliteit (m <sup>2</sup> )            |
| $r_w$     | = | uitwendige putdiameter (m)                            |

De laagdikte wordt loodrecht op de aquifergelaagdheid gemeten (Figuur 11). Dit geldt ook voor de deviatiehoek. De formule geldt voor deviatiehoeken tot 85. Indien er in de aquifer ondoorlaatbare lagen voorkomen is de laagdikte is de dikte van de sublaag. De aanwezigheid van ondoorlaatbare lagen verkleint dus het effect van de scheve put. Bijlage 2 gaat in op de details van het omgaan met sublagen.

Deze (negatieve) skin ten gevolge van de scheve put wordt opgeteld bij eventuele skins ten gevolge van andere factoren (bijvoorbeeld putbeschadiging of putstimulatie).

Het scheve-put-effect neemt af bij toenemende anisotropie. De verhouding van de productiviteitindex met en zonder scheve-put-skin geeft een beter inzicht in het effect van het scheve karakter van de put dan de skin. De formule voor de productiviteit luidt (zie formule 6.5 uit Verruijt (1970), en Dake 1978):

$$J = \frac{Q}{p_w - p_{aq}} = \frac{2\pi k H R_{ntg}}{\mu \left( \ln\left(\frac{L}{r_w}\right) + S \right)} \dots\dots\dots (formule 30)$$

Waarbij:

|           |   |   |
|-----------|---|---|
| $J$       | = | put productiviteit (m <sup>3</sup> /s/bar)  |
| $p_w$     | = | druk in de put bij aquifer (bottom hole pressure) (Pa)                                |
| $p_{aq}$  | = | initiële hydrostatische druk in de aquifer ter hoogte van de put (Pa)                 |
| $Q$       | = | $Qm / \rho$ = debiet, positief voor stroming van put naar aquifer (m <sup>3</sup> /s) |
| $\mu$     | = | water viscositeit (functie van temperatuur en zoutgehalte) (Pa-s)                     |
| $k$       | = | permeabiliteit van de aquifer (m <sup>2</sup> )                                       |
| $H$       | = | hoogte van de aquifer (m)   |
| $R_{ntg}$ | = | netto/bruto verhouding (net-to-gross ratio)   |
| $L$       | = | afstand tussen productie- en injectieput (m)  |
| $r_w$     | = | buitenstraal van de put (filter) (m)  |
| $S$       | = | skin (-)  |

De produktiviteitindex verhouding voor een put met en zonder scheve-put-skin is dan na enige bewerking:

$$\frac{J_{scheef\ geboorde\ put}}{J_{verticaal\ geboorde\ put}} = \frac{\ln\left[\frac{L}{r_w}\right]}{\ln\left[\frac{L}{r_w}\right] + s_\theta} \dots\dots\dots (formule 31)$$

Met:

|            |   |                                |
|------------|---|--------------------------------|
| $L$        | = | putafstand (m)                 |
| $s_\theta$ | = | scheve put-skin (dimensieloos) |
| $r_w$      | = | uitwendige putdiameter in (m)  |

Aangezien  $L$  typisch 1500-2000 m is en  $r_w$  ongeveer 0.1 m zal  $\ln(L/r_w)$  9.6-9.9 zijn. Dit betekent dat het effect van de extra skin pas zichtbaar wordt als deze skin in absolute waarde groter dan 1 is.

## 8 Oplossingsmethode

De drukbalans  $f_{db}$  (formule 31) is bij alle andere gegeven parameters een functie van behalve pompdruk en massadebiet:

$$f_{db} = p_{stat,p} + \sum_{k=1}^{N-1} \Delta p_{k+1,k} - p_{stat,i} = f_{db}(\Delta p_{pomp}, Q_m) = 0 \quad \dots\dots\dots(formule\ 32)$$

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

De drukbalans wordt segment voor segment opgebouwd beginnend bij  $p_{stat,p}$ , de statische aquiferdruk bij de productieput. Zie de volgorde van de knooppunten in Figuur 14.

Druk en temperatuur zijn bekend in de aquifer bij de productieput (knooppunt 1). Vanaf hier worden de druk- en temperatuurverschillen berekend voor ieder successievelijk doubletelement (zie Figuur 14, Tabel 8 en Tabel 9), bij gegeven pompdruk en  $Q_m$ . De druk- en temperatuurverschillen over een doubletelement kunnen expliciet berekend worden voor ieder element, 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 (de *segment length* onder 'C) Well properties' in Figuur 2). Het verdient aanbeveling deze niet groter te nemen dan de lengte van het kleinste tubing segment (dit veroorzaakt onnauwkeurigheid), maar ook niet te klein (want de rekentijd is langer bij meer segmenten). Voor ieder segment worden de formules 9 en 19 simultaan opgelost met de 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 achtereenvolgens alle segmenten berekend.

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

## 9 Berekende kenmerken van het geothermische doubletsysteem

Voor de berekende kenmerken van het geothermische doubletsysteem worden drie kenmerken in een waarschijnlijkheidsgrafiek gepresenteerd (zie 10: Parameterspreiding):

1. Debiet bij (de ingang van) de warmtewisselaar
2. Geothermisch vermogen,
3. Coefficient Of Performance (COP).

In onderstaande paragrafen worden de formules gegeven voor deze grootheden.

### 9.1 Geothermisch vermogen

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

$$P_{ww} = Q_m c_p \Delta T_{ww} \dots\dots\dots (formule 33)$$

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

### 9.2 Benodigd vermogen voor de pomp

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

$$P_{pomp,netto} = Q_v \Delta p_{pomp} = \frac{Q_m}{\rho} \Delta p_{pomp} \dots\dots\dots (formule 34)$$

En het brutovermogen is

$$P_{pomp,bruto} = P_{pomp,netto} / \eta \dots\dots\dots (formule 35)$$

Hierbij is  $\eta$  de pompefficiëntie. Zie paragraaf 5.6 voor de situatie met zowel productie- als injectiepomp.

### 9.3 Coefficient of performance (COP)

De Coefficient 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:

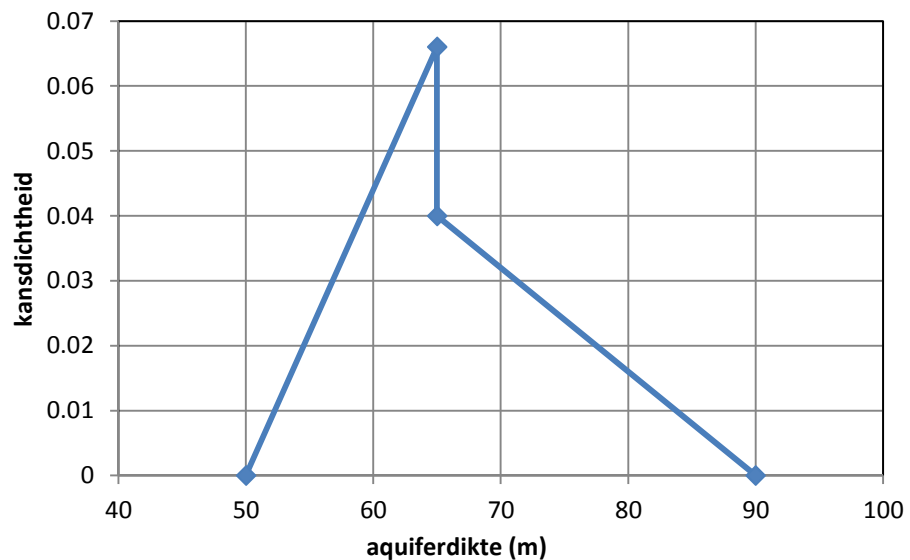
$$COP = \frac{P_{ww}}{P_{pomp,bruto}} \dots\dots\dots (formule 36)$$

## 10 Parameterspreiding

Van een aantal invoerparameters moet een spreiding worden opgegeven (zie Hoofdstuk 5), namelijk:

1. 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.
2. Permeabiliteit van de aquifer.  
De spreiding in permeabiliteit kan afgeleid worden uit de waarden van de gemiddelde permeabiliteit in de gebruikte putten.
3. 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 onafhankelijk van elkaar. 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 (Figuur 16).



Figuur 16 Voorbeeld van een dubbele driehoek kansverdeling. Minimum, mediaan en maximum (de door de gebruiker opgegeven waarden) zijn in dit geval 50, 65 en 90m. Het resulterende gemiddelde is 66.7m. De totale oppervlakte onder de beide driehoeken is 1.

## 11 Beschouwingen

### 11.1 Vermogenswinst door dichtheidsverschil 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 formule valt af te leiden dat dit een verschil in de hydrostatische druk  $\Delta p_h$  tussen de twee putten oplevert van ongeveer:

$$\Delta p_h = p_{h,i} - p_{h,p} = g(\bar{\rho}_i - \bar{\rho}_p)\Delta h \quad \dots\dots\dots(\text{formule 37})$$

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

$$P_h = \Delta p_h Q_v \quad \dots\dots\dots(\text{formule 38})$$

Voor een typisch doublet is het drukverschil ongeveer 1-2 bar. Dus, bij een typische  $Q_v$  van 150 m<sup>3</sup>/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.

### 11.2 Verschil 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 massadebiet is in het hele systeem hetzelfde is (zie paragraaf 5.2) 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 totale effect is echter verwaarloosbaar omdat:

1. 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.

### 11.3 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 injectieput 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:

1. Het injectiewater warmt snel op zoals beschreven in paragraaf 11.2. Dit vermindert de drukval van injectieput naar aquifer.
2. 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 van het water aan de bodem van de injectieput te gebruiken.



## 12 Referenties

Batzle, M., & Wang, Z. (1992). Seismic properties of pore fluids. *Geophysics*, Vol. 57, 1396-1408.

Beggs, H., & Brill, J. (1973). A study of two-phase flow in inclined pipes. *Journal of Petroleum Technology*, May 1973, 607-617.

Choi, S.K., Ouyang, L.-B. and Huang, W.-S. (2008): A comprehensive comparative study on analytical PI/IPR correlations. SPE 116580

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

Farshad, F., & Rieke, H. (2006). Surface-Roughness Design Values for Modern Pipes. *SPE Drilling & Completion*, Vol. 21, 212-215.

Feistel, R., & Marion, G. (2007). A Gibbs-Pitzer function for high-salinity seawater thermodynamics. *Progress in Oceanography*, 515-539.

Garcia-Gutierrez, A., Espinosa-Paredes, G., & Hernandez-Ramirez, I. (2001). Study on the flow production characteristics of deep geothermal wells. *Geothermics*, Vol. 31, 141-167.

Grunberg, L. (1970). Properties of sea water concentrations. *Third International Symposium on Fresh Water from the Sea*, Vol. 1, pp. 31-39.

Odeh, A.S. (1980). An Equation for Calculating Skin Factor Due to Restricted Flow Entry. JPT

Rogers, E.J., Economides, M.J. (1996): The skin due to slant of deviated wells in permeability-anisotropic reservoirs. SPE 37068

Saidikowski, R.M. (1979). Numerical Simulations of the Combined Effects of Wellbore Damage and Partial Penetration. Paper SPE 8204 presented at 1979 AFTCE, Las Vegas, NV, September 23 - 26.

Verruijt, A. (1970): Theory of Groundwater Flow. Macmillan, 1970.

## 13 Ondertekening

Utrecht, <datum>

Placeholder

<naam afdelingshoofd>

H.F. Mijnlieff, A.N.M. Obdam, A.  
Kronimus, J.D.A.M. van Wees, P. van  
Hooff, M.P.D. Pluymaekers en J.G.

Afdelingshoofd

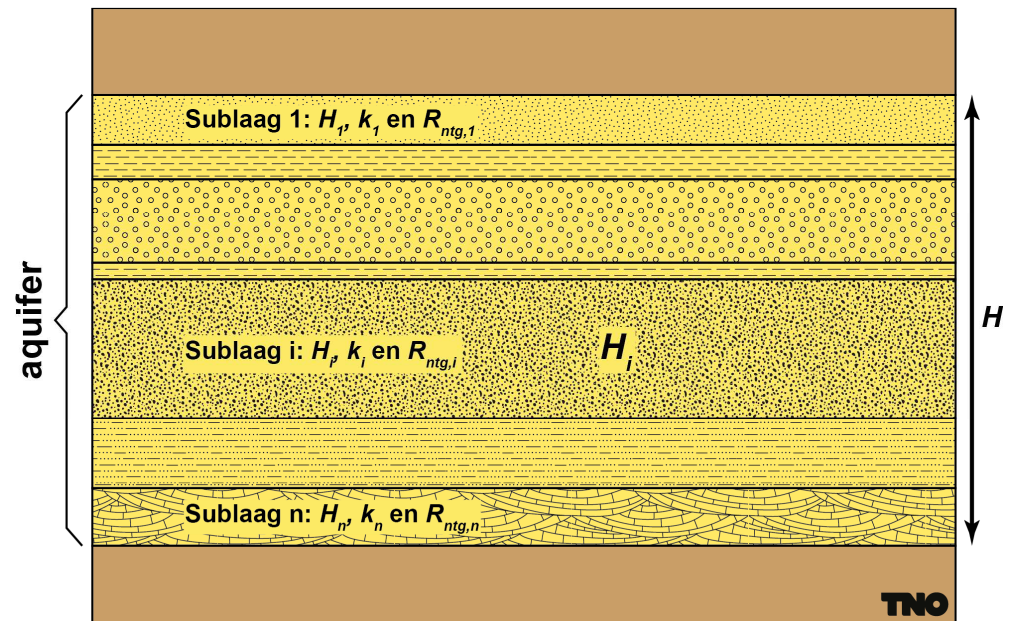
Veldkamp  
Auteurs

# A Voorbeeld uitvoer van de base case details

| Doublet Calculator 1.4-Beta Base Case Details |             |         |          |             |                      |                       |        |         |           |                |                 |            |        |
|---|-------------|---------|----------|-------------|----------------------|-----------------------|--------|---------|-----------|----------------|-----------------|------------|--------|
| === PRODUCER ===                              |             |         |          |             |                      |                       |        |         |           |                |                 |            |        |
| iN  | Segment     | L(m)    | Z(m)     | Angle (deg) | Inner diameter(inch) | Roughness(milli-inch) | P(bar) | T(degC) | S(ppm)    | Density(kg/m3) | Viscosity(Pa s) | Qvol(m3/h) |        |
| 0   | 1           | 0.00    | 0.00     | 0.00        | 5.00                 | 1.19                  | 16.46  | 70.47   | 180000.00 | 1109.81        | 0.00            | -84.67     |        |
| 1   | 1           | 99.64   | -99.64   | 0.00        | 5.00                 | 1.19                  | 27.54  | 70.73   | 180000.00 | 1110.04        | 0.00            | -84.65     |        |
| 2   | 1           | 199.27  | -199.27  | 0.00        | 5.00                 | 1.19                  | 38.63  | 70.97   | 180000.00 | 1110.29        | 0.00            | -84.64     |        |
| 3   | 1           | 298.91  | -298.91  | 0.00        | 5.00                 | 1.19                  | 49.73  | 71.20   | 180000.00 | 1110.54        | 0.00            | -84.62     |        |
| 4   | 1           | 398.55  | -398.55  | 0.00        | 5.00                 | 1.19                  | 60.82  | 71.42   | 180000.00 | 1110.79        | 0.00            | -84.60     |        |
| 5   | 1           | 498.18  | -498.18  | 0.00        | 5.00                 | 1.19                  | 71.92  | 71.63   | 180000.00 | 1111.05        | 0.00            | -84.58     |        |
| 6   | 2           | 597.82  | -592.53  | 18.75       | 8.68                 | 1.19                  | 37.21  | 71.85   | 180000.00 | 1109.76        | 0.00            | -84.68     |        |
| 7   | 2           | 697.45  | -686.88  | 18.75       | 8.68                 | 1.19                  | 47.49  | 72.05   | 180000.00 | 1110.00        | 0.00            | -84.66     |        |
| 8   | 2           | 797.09  | -781.23  | 18.75       | 8.68                 | 1.19                  | 57.78  | 72.24   | 180000.00 | 1110.24        | 0.00            | -84.64     |        |
| 9   | 2           | 896.73  | -875.58  | 18.75       | 8.68                 | 1.19                  | 68.07  | 72.42   | 180000.00 | 1110.49        | 0.00            | -84.62     |        |
| 10  | 2           | 996.36  | -969.93  | 18.75       | 8.68                 | 1.19                  | 78.36  | 72.58   | 180000.00 | 1110.74        | 0.00            | -84.60     |        |
| 11  | 2           | 1096.00 | -1064.28 | 18.75       | 8.68                 | 1.19                  | 88.65  | 72.73   | 180000.00 | 1111.00        | 0.00            | -84.58     |        |
| 12  | 3           | 1195.64 | -1145.16 | 35.73       | 6.28                 | 1.19                  | 97.54  | 72.86   | 180000.00 | 1111.22        | 0.00            | -84.56     |        |
| 13  | 3           | 1295.27 | -1226.04 | 35.73       | 6.28                 | 1.19                  | 106.44 | 72.98   | 180000.00 | 1111.45        | 0.00            | -84.55     |        |
| 14  | 3           | 1394.91 | -1306.93 | 35.73       | 6.28                 | 1.19                  | 115.33 | 73.09   | 180000.00 | 1111.68        | 0.00            | -84.53     |        |
| 15  | 3           | 1494.55 | -1387.81 | 35.73       | 6.28                 | 1.19                  | 124.23 | 73.18   | 180000.00 | 1111.92        | 0.00            | -84.51     |        |
| 16  | 3           | 1594.18 | -1468.70 | 35.73       | 6.28                 | 1.19                  | 133.13 | 73.27   | 180000.00 | 1112.16        | 0.00            | -84.49     |        |
| 17  | 3           | 1693.82 | -1549.58 | 35.73       | 6.28                 | 1.19                  | 142.03 | 73.34   | 180000.00 | 1112.41        | 0.00            | -84.47     |        |
| 18  | 3           | 1793.45 | -1630.47 | 35.73       | 6.28                 | 1.19                  | 150.93 | 73.41   | 180000.00 | 1112.67        | 0.00            | -84.45     |        |
| 19  | 3           | 1893.09 | -1711.35 | 35.73       | 6.28                 | 1.19                  | 159.83 | 73.46   | 180000.00 | 1112.93        | 0.00            | -84.43     |        |
| 20  | 3           | 1992.73 | -1792.24 | 35.73       | 6.28                 | 1.19                  | 168.74 | 73.50   | 180000.00 | 1113.19        | 0.00            | -84.41     |        |
| 21  | 4           | 2092.36 | -1870.01 | 38.68       | 4.05                 | 1.19                  | 177.93 | 73.53   | 180000.00 | 1113.47        | 0.00            | -84.39     |        |
| 22  | 5           | 2192.00 | -1938.86 | 46.29       | 4.05                 | 1.19                  | 186.15 | 73.55   | 180000.00 | 1113.72        | 0.00            | -84.37     |        |
| total/average/difference                      |             | 5       | 2192.00  | -1938.86    | 23.59                | 6.44                  | 1.19   | 169.69  | 3.08      | 180000.00      | 1111.37         | 0.00       | -84.55 |
| === INJECTOR ===                              |             |         |          |             |                      |                       |        |         |           |                |                 |            |        |
| iN  | Segment     | L(m)    | Z(m)     | Angle (deg) | Inner diameter(inch) | Roughness(milli-inch) | P(bar) | T(degC) | S(ppm)    | Density(kg/m3) | Viscosity(Pa s) | Qvol(m3/h) |        |
| 0   | 1           | 0.00    | 0.00     | 0.00        | 5.00                 | 1.19                  | 16.46  | 35.00   | 180000.00 | 1125.79        | 0.00            | 83.47      |        |
| 1   | 1           | 101.95  | -101.95  | 0.00        | 5.00                 | 1.19                  | 27.46  | 34.90   | 180000.00 | 1126.25        | 0.00            | 83.44      |        |
| 2   | 1           | 203.91  | -203.91  | 0.00        | 5.00                 | 1.19                  | 38.46  | 34.81   | 180000.00 | 1126.70        | 0.00            | 83.40      |        |
| 3   | 1           | 305.86  | -305.86  | 0.00        | 5.00                 | 1.19                  | 49.47  | 34.73   | 180000.00 | 1127.15        | 0.00            | 83.37      |        |
| 4   | 1           | 407.82  | -407.82  | 0.00        | 5.00                 | 1.19                  | 60.48  | 34.67   | 180000.00 | 1127.59        | 0.00            | 83.34      |        |
| 5   | 1           | 509.77  | -509.77  | 0.00        | 5.00                 | 1.19                  | 71.50  | 34.62   | 180000.00 | 1128.03        | 0.00            | 83.30      |        |
| 6   | 2           | 611.73  | -604.77  | 21.28       | 8.68                 | 1.19                  | 82.00  | 34.59   | 180000.00 | 1128.44        | 0.00            | 83.27      |        |
| 7   | 2           | 713.68  | -699.77  | 21.28       | 8.68                 | 1.19                  | 92.49  | 34.57   | 180000.00 | 1128.85        | 0.00            | 83.24      |        |
| 8   | 2           | 815.64  | -794.78  | 21.28       | 8.68                 | 1.19                  | 103.00 | 34.56   | 180000.00 | 1129.25        | 0.00            | 83.21      |        |
| 9   | 2           | 917.59  | -889.78  | 21.28       | 8.68                 | 1.19                  | 113.50 | 34.57   | 180000.00 | 1129.64        | 0.00            | 83.19      |        |
| 10  | 2           | 1019.55 | -984.78  | 21.28       | 8.68                 | 1.19                  | 124.01 | 34.59   | 180000.00 | 1130.03        | 0.00            | 83.16      |        |
| 11  | 3           | 1121.50 | -1065.72 | 37.45       | 6.28                 | 1.19                  | 132.90 | 34.62   | 180000.00 | 1130.35        | 0.00            | 83.13      |        |
| 12  | 3           | 1223.45 | -1146.66 | 37.45       | 6.28                 | 1.19                  | 141.79 | 34.67   | 180000.00 | 1130.67        | 0.00            | 83.11      |        |
| 13  | 3           | 1325.41 | -1227.61 | 37.45       | 6.28                 | 1.19                  | 150.68 | 34.72   | 180000.00 | 1130.98        | 0.00            | 83.09      |        |
| 14  | 3           | 1427.36 | -1308.55 | 37.45       | 6.28                 | 1.19                  | 159.58 | 34.79   | 180000.00 | 1131.28        | 0.00            | 83.06      |        |
| 15  | 3           | 1529.32 | -1389.49 | 37.45       | 6.28                 | 1.19                  | 168.47 | 34.87   | 180000.00 | 1131.59        | 0.00            | 83.04      |        |
| 16  | 3           | 1631.27 | -1470.43 | 37.45       | 6.28                 | 1.19                  | 177.37 | 34.96   | 180000.00 | 1131.88        | 0.00            | 83.02      |        |
| 17  | 3           | 1733.23 | -1551.37 | 37.45       | 6.28                 | 1.19                  | 186.28 | 35.06   | 180000.00 | 1132.17        | 0.00            | 83.00      |        |
| 18  | 3           | 1835.18 | -1632.32 | 37.45       | 6.28                 | 1.19                  | 195.18 | 35.17   | 180000.00 | 1132.46        | 0.00            | 82.98      |        |
| 19  | 3           | 1937.14 | -1713.26 | 37.45       | 6.28                 | 1.19                  | 204.09 | 35.30   | 180000.00 | 1132.74        | 0.00            | 82.96      |        |
| 20  | 3           | 2039.09 | -1794.20 | 37.45       | 6.28                 | 1.19                  | 213.00 | 35.43   | 180000.00 | 1133.01        | 0.00            | 82.94      |        |
| 21  | 4           | 2141.05 | -1880.17 | 32.52       | 4.05                 | 1.19                  | 221.82 | 35.57   | 180000.00 | 1133.28        | 0.00            | 82.92      |        |
| 22  | 5           | 2243.00 | -1954.03 | 43.58       | 4.05                 | 1.19                  | 229.29 | 35.71   | 180000.00 | 1133.50        | 0.00            | 82.90      |        |
| total/average/difference                      |             | 5       | 2243.00  | -1954.03    | 25.32                | 6.33                  | 1.19   | 212.84  | 0.71      | 180000.00      | 1130.07         | 0.00       | 83.15  |
| === DOUBLET NODES ===                         |             |         |          |             |                      |                       |        |         |           |                |                 |            |        |
| Node  | P(bar)      | T(degC) |          |             |                      |                       |        |         |           |                |                 |            |        |
| Aquifer_Prod                                  | 201.8678811 | 73.55   |          |             |                      |                       |        |         |           |                |                 |            |        |
| Aquifer/Prod_Bottom                           | 186.1450188 | 73.55   |          |             |                      |                       |        |         |           |                |                 |            |        |
| Prod_Top/Entry_HE                             | 16.45503667 | 70.47   |          |             |                      |                       |        |         |           |                |                 |            |        |
| Exit_HE/Inj_Top                               | 16.45503667 | 35.00   |          |             |                      |                       |        |         |           |                |                 |            |        |
| Inj_Bottom/Aquifer                            | 229.2937261 | 35.71   |          |             |                      |                       |        |         |           |                |                 |            |        |
| Aquifer_Inj                                   | 203.5227778 | 73.55   |          |             |                      |                       |        |         |           |                |                 |            |        |
| === BASE CASE RESULTS ===                     |             |         |          |             |                      |                       |        |         |           |                |                 |            |        |
| aquifer kH net (Dm)                           | 14.85000038 |         |          |             |                      |                       |        |         |           |                |                 |            |        |
| mass flow (kg/s)                              | 26.10258865 |         |          |             |                      |                       |        |         |           |                |                 |            |        |
| pump volume flow (m³/h)                       | 84.62617493 |         |          |             |                      |                       |        |         |           |                |                 |            |        |
| required pump power (kW)                      | 173.4142303 |         |          |             |                      |                       |        |         |           |                |                 |            |        |
| geothermal power (MW)                         | 3.181682348 |         |          |             |                      |                       |        |         |           |                |                 |            |        |
| COP (kW/kW)                                   | 18.34729767 |         |          |             |                      |                       |        |         |           |                |                 |            |        |
| pressure difference produc                    | 15.72286237 |         |          |             |                      |                       |        |         |           |                |                 |            |        |
| pressure difference injecto                   | 25.77094829 |         |          |             |                      |                       |        |         |           |                |                 |            |        |
| === end of file ===                           |             |         |          |             |                      |                       |        |         |           |                |                 |            |        |

## B Sublagen in een aquifer

DoubletCalc gaat uit van een aquifer bestaande uit één continue laag. Hieronder wordt beschreven hoe de invoergegevens voor DoubletCalc berekend kunnen worden in geval de aquifer bestaat uit meerdere (sub-)lagen. Figuur 17 geeft een voorbeeld van een aquifer met sublagen.



Figuur 17 Opdeling van een aquifer in sublagen met eigen karakteristieken

De gelaagdheid van de aquifer beïnvloedt de effectieve (gemiddelde) permeabiliteit, netto hoogte, en netto/bruto verhouding. Deze parameters worden gebruikt voor de berekening van de productiviteitsindex  $J$  (zie Verruijt 1970, formule 6.5 en Dake 1978):

$$J = \frac{Q}{p_w - p_{aq}} = \frac{2\pi k H R_{ntg}}{\mu \left( \ln\left(\frac{L}{r_w}\right) + S \right)} \dots \dots \dots (1)$$

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
- $Q$  =  $Q_m / \rho$  = debiet, positief voor stroming van put naar aquifer
- $M$  = water viscositeit (functie van temperatuur en zoutgehalte)
- $k_{eff}$  = de effectieve permeabiliteit van de aquifer
- $H$  = bruto dikte van de aquifer
- $R_{ntg}$  = netto/bruto verhouding (net-to-gross ratio) van de aquifer
- $L$  = afstand tussen productie- en injectieput
- $r_w$  = buitenstraal van de put (filter)
- $S$  = skin

Voor een gelaagde aquifer moet de factor  $kHR_{ntg}$  in formule 1 geïnterpreteerd worden als

$$kHR_{ntg} = \sum_{i=1}^n k_i H_i R_{ntg,i} \dots\dots\dots(2)$$

Waarbij  $k_i$ ,  $H_i$ , en  $R_{ntg,i}$  de permeabiliteit, bruto hoogte en netto/bruto verhouding zijn van de afzonderlijke lagen. Hierbij wordt verondersteld dat de stroming van injectieput naar productieput parallel is aan de gelaagdheid van de aquifer. De invoer parameters  $k$ ,  $H$ , en  $R_{ntg}$  moeten zodanig gekozen worden dat  $kHR_{ntg}$  voldoet aan formule 2. De bruto aquifer dikte  $H$  wordt ook voor andere berekeningen gebruikt en kan dus niet aangepast worden. Vandaar dat we de netto/bruto verhouding en de permeabiliteit aanpassen.

De netto/bruto verhouding volgt uit

$$R_{ntg} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i R_{ntg,i}}{H} \dots\dots\dots(3)$$

De permeabiliteit volgt vervolgens uit:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n k_i H_i R_{ntg,i}}{HR_{ntg}} \dots\dots\dots(4)$$

De bruto hoogte  $H$ , de netto/bruto verhouding  $R_{ntg}$  (formule 3) en de permeabiliteit  $k$  (formule 4) worden in DoubletCalc ingevoerd.

## C Verklaring van gebruikte letters en symbolen

De genoemde eenheden zijn SI<sup>2</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) loodrecht op bedding                  |
| $k$       | 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   |
| $R_{ntg}$ | netto/bruto verhouding (net-to-gross ratio)             |
| $s$       | saliniteit, zoutgehalte van water (gewichtfracctie)     |
| $S$       | 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); 1cP = 0.001 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 $\gamma = 0.577216$ |
| $\theta$      | hoek van de put t.o.v. de verticaal                                |

<sup>2</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                    |