

ONGERUBRICEERD

Princetonlaan 6  
3584 CB Utrecht  
Postbus 80015  
3508 TA Utrecht**TNO-rapport**

www.tno.nl

**TNO 2017 R11135 | Eindrapport**T +31 88 866 42 56  
F +31 88 866 44 75**Actualisatie van de richtlijnen voor de  
uitvoering en interpretatie van een puttest**

|                 |   |
|-----------------|---|
| Datum           | 4 december 2017                                       |
| Auteur(s)       | Harmen Mijnlief, Bart van Kempen, Joaquim Juez-Larré. |
| Exemplaarnummer |   |
| Oplage          |   |
| Aantal pagina's | 28 (incl. bijlagen)                                   |
| Aantal bijlagen |   |
| Opdrachtgever   | Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO)          |
| Projectnaam     | D: Adviezen Aardwarmte                                |
| Projectnummer   | 060.26684/01.06.04                                    |

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, 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 belanghebbenden is toegestaan.

© 2017 TNO

ONGERUBRICEERD

## Samenvatting

Om aanspraak te kunnen maken op een eventuele uitkering uit de Garantieregeling voor het boren naar aardwarmte (Regeling Nationale EZ Subsidies – Risico's dekken voor aardwarmte (RNES Aardwarmte)) is het uitvoeren van een puttest vereist. Dit is nodig voor de resultaatverplichting: het eenduidig kunnen bepalen van de transmissiviteit ( $kh$ , en daaruit afgeleid de permeabiliteit) van de aquifer en mechanische skin waaruit het gerealiseerde geothermisch vermogen berekend wordt. Dit rapport is een leidraad die aangeeft waaraan een puttest, en de interpretatie daarvan, minimaal moet voldoen.

De puttest dient op een dusdanige manier te worden uitgevoerd en geïnterpreteerd, dat een eenduidige en reproduceerbare kwantificatie van de transmissiviteit van de beoogde aquifer kan worden gemaakt. Daarnaast dient een eenduidige indicatie van de mechanische skin, die gekoppeld is aan de transmissiviteit, te worden aangeleverd. Met behulp van overige bronnen van data-acquisitie kan de aquiferdefinitie (top, basis, bruto- en netto dikte) en de temperatuur van het formatiewater eenduidig worden afgeleid.

Alle putten van het aardwarmteproject waarop de RNES Aardwarmte van toepassing is, moeten individueel worden getest door middel van een puttest. De hieruit berekende gemiddelde aquiferpermeabiliteit en mechanische skin van de put is representatief voor het reservoir binnen het bereik van de puttest.

Als er reeds twee putten zijn gerealiseerd en getest is het aanbevolen, ter verificatie van de resultaten van de individuele puttesten, een test uit te voeren die gebruik maakt van beide putten. Dit gebeurt bij voorkeur via een interferentietest, maar kan ook middels een operationele test.

Een operationele test kan onder bepaalde omstandigheden gebruikt worden als terugvaloptie indien de individuele puttesten, ondanks zorgvuldige voorbereiding en uitvoering, geen bruikbare gegevensreeks hebben opgeleverd. Daarnaast kan een interferentietest gebruikt worden om de gemiddelde reservoir-transmissiviteit te bepalen, indien de transmissiviteit in de individuele puttesten significant verschilt.

Bovengenoemde, uit de puttest bepaalde, aquiferparameters worden gebruikt bij de berekening van het 'gerealiseerde' geothermisch vermogen in DoubletCalc. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de technische- en installatiespecificaties die ten grondslag liggen aan het scenario bij de acceptatie in de RNES Aardwarmte. Indien de aquifereigenschappen van de twee doubletputten significant van elkaar verschillen is het nodig om een adequaat gemiddelde voor de aquifereigenschappen te bepalen. Resultaten van een interferentietest, operationele test of productiegegevens kunnen sturend zijn in de bepaling van de gemiddelde eigenschappen. De berekening van het geothermisch vermogen met een reservoirmodelleerpakket is mogelijk een laatste alternatief indien de berekening met DoubletCalc alsnog niet mogelijk blijkt. In de berekening van het geothermisch vermogen in alle RNES Aardwarmte scenario's mag de skin maximaal 0 zijn.

De uitvoerder van het geothermische project is in principe vrij in de wijze van uitvoering van de puttest, zolang een eenduidige en reproduceerbare kwantificatie van de transmissiviteit wordt aangeleverd conform industrie-standaard methodieken en daarmee aan de resultaatverplichting wordt voldaan. Dit rapport biedt handvatten en geeft concrete richtlijnen voor een adequate puttestuitvoering, zodat valide en acceptabele resultaten voor de RNES Aardwarmte kunnen worden gerealiseerd.

# Inhoudsopgave

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
|          | <b>Samenvatting .....</b>  | <b>2</b>  |
| <b>1</b> | <b>Inleiding .....</b>   | <b>4</b>  |
| <b>2</b> | <b>Resultaatverplichting .....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>3</b> | <b>Technische eisen aan boring en puttest .....</b>  | <b>6</b>  |
| 3.1      | Definitie puttest type .....   | 6         |
| 3.2      | Eisen aan de boring .....  | 7         |
| 3.3      | Eisen aan de puttest .....   | 12        |
| <b>4</b> | <b>Puttest interpretatie .....</b>   | <b>18</b> |
| 4.1      | Software en interpretatiemethode .....   | 18        |
| 4.2      | Correcties .....   | 18        |
| 4.3      | Rapportage .....   | 19        |
| <b>5</b> | <b>Vermogensberekening en beoordeling van de vaststellingsaanvraag .....</b>                         | <b>20</b> |
| 5.1      | Niet-geologische parameters .....  | 20        |
| 5.2      | Significant verschil in geologische parameters tussen putten .....                                   | 20        |
| 5.3      | Skin in het afreken scenario .....   | 21        |
| <b>6</b> | <b>Afsluiting .....</b>  | <b>23</b> |
| <b>7</b> | <b>Referenties .....</b>   | <b>24</b> |
|          | <b>Bijlage A Data en resultaten van de puttest .....</b>   | <b>25</b> |
|          | <b>Bijlage B Voorbeeld van de systematiek voor het berekenen van het geothermisch vermogen .....</b> | <b>27</b> |

# 1 Inleiding

Dit rapport maakt deel uit van een serie van drie documenten, die gezamenlijk ondersteunend zijn aan de Garantieregeling voor het boren naar aardwarmte (Regeling Nationale EZ Subsidies – Risico's dekken voor aardwarmte (RNES Aardwarmte)). De andere twee zijn de 'Handleiding DoubletCalc' en de 'Specificatie geologisch onderzoek voor geothermieprojecten'. Deze documenten, evenals de DoubletCalc 1.4.3 software, zijn beschikbaar op de door het Ministerie van Economische Zaken geïnitieerde website ([www.nlog.nl/tools](http://www.nlog.nl/tools)).

De RNES Aardwarmte is een regeling, uitgevoerd door de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO). Deze regeling keert een vergoeding uit indien het niet gerealiseerde 'verwacht (P90) vermogen' gerelateerd kan worden aan tegenvallende aquifereigenschappen, te weten: dikte, netto/bruto, permeabiliteit, anisotropie, temperatuur en saliniteit.

Bij de aanmelding van het project voor de RNES Aardwarmte dient de uitvoerder een DoubletCalc scenario aan te leveren waarin het verwachte geothermisch vermogen wordt berekend, dit is het **aanvraagscenario**. Na een audit door TNO-AGE wordt dit scenario, eventueel in aangepaste vorm, omgezet naar een **acceptatiescenario**. Indien het gerealiseerde vermogen lager is dan de P90 van het verwachte vermogen in het acceptatiescenario komt het project in aanmerking voor een uitkering van de RNES Aardwarmte. Daartoe dient de uitvoerder een **claimscenario** in bij RVO dat, na een audit door TNO-AGE, eventueel in aangepaste vorm wordt omgezet naar een **afrekeningscenario**. Het uit te keren bedrag is gebaseerd op het geothermisch vermogen berekend in het afrekeningscenario.

De uitvoerder is verplicht een individuele puttest uit te voeren voor elke put ingediend voor de RNES Aardwarmte zodat de transmissiviteit (kh, en daaruit afgeleid de permeabiliteit) en skin eenduidig en reproduceerbaar berekend kunnen worden. Dat geldt ook voor een vervolgput. Indien beide putten van een aardwarmtedoublet individueel zijn getest, kan een interferentietest of operationele test uitgevoerd worden. Deze testen kunnen aanvullend zijn aan de verplichte enkelvoudige puttesten en kunnen daarmee respectievelijk als precisering en/of verificatie dienen.

In dit rapport worden handvatten en richtlijnen beschreven van hoe een puttest op een adequate wijze kan worden uitgevoerd zodat valide en acceptabele resultaten voor de RNES Aardwarmte kunnen worden bereikt. Daarnaast wordt beschreven wat wordt verwacht van de interpretatie van de test en wat daarbij de belangrijke punten zijn om rekening mee te houden.

Dit rapport is een adviesrapport aan het Ministerie van Economische Zaken. Hoe dit rapport wordt gebruikt in de implementatie van de regels en procedures van de RNES Aardwarmte valt buiten de competentie van TNO.

## 2 Resultaatverplichting

Om aanspraak te kunnen maken op een uitkering uit de RNES Aardwarmte dient de uitvoerder, middels een claimscenario, een zo nauwkeurig mogelijke berekening van het gerealiseerde vermogen aan te leveren. De uitvoering van een puttest is daarvoor een vereiste en verplichting voor de RNES Aardwarmte. Het resultaat hiervan is leidend in de beoordeling van een eventuele vaststellingsaanvraag. Ook als er geen aanspraak wordt gemaakt op een uitkering zijn de puttesten overigens vereist.

De puttest dient op een dusdanige manier te worden uitgevoerd en geïnterpreteerd, dat een eenduidige en reproduceerbare kwantificatie van de transmissiviteit, en daaruit afgeleid de permeabiliteit, van de beoogde aquifer kan worden gemaakt. Daarnaast dient de mechanische skin, die gekoppeld is aan de transmissiviteit eenduidig te worden bepaald. Met behulp van overige bronnen van data-acquisitie wordt de aquiferdefinitie (top, basis, bruto- en netto dikte) en de temperatuur van het formatiewater eenduidig afgeleid. Ongeacht aard en uitvoering van de puttest dient aan bovenstaande voldaan te worden. Dit geheel wordt de **resultaatverplichting** genoemd.

*Let well: Het is de verantwoordelijkheid van de uitvoerder om te voldoen aan de resultaatverplichting. Indien niet aan de resultaatverplichting wordt voldaan vanwege een niet adequate dataset, meetreeks of interpretatie bestaat het risico dat een eventuele claim niet ontvankelijk is.*

Dit rapport is een leidraad die aangeeft waaraan een puttest, en de interpretatie daarvan, minimaal moet voldoen. De uitvoerder van het geothermische project is in principe vrij in de wijze van uitvoering van de puttest. De test dient echter te allen tijde aan te sluiten bij de onderzoeksdoelen (reservoirkwaliteit, fractures, breuken), zodat het gerealiseerde geothermisch vermogen op eenduidige en reproduceerbare wijze kan worden berekend en daarmee aan de resultaatverplichting wordt voldaan.

Bij deelname aan de RNES Aardwarmte dient het volgende te worden aangeleverd aan RVO (voor aanleverspecificaties, inclusief format, zie Bijlage A):

- Gegevens en analyses gebruikt bij de evaluatie van de puttest, zoals o.a. een gedetailleerde beschrijving van de **gerealiseerde** putarchitectuur en diepte/locatie (zowel Along Hole (AH) diepte als True Vertical Depth (TVD)) van alle pomp(en)/druksensoren/stroommeter(s) voor elke specifieke test (ondersteund door schematische tekeningen van de opstelling), analyses van het formatiewater, etc.
- De (onbewerkte en bewerkte) meetreeksen (o.a. geproduceerde/geïnjecteerde watervolumes, tijd, druk, temperatuur, zandproductie, opgeloste hoeveelheden gas en/of olie) van de verschillende testen in digitaal format.
- De resultaten van de interpretatie van de puttest(en), inclusief de onderbouwende en begeleidende rapportages.
- Rapporten m.b.t. de ijking en verificatie van de gebruikte meetinstrumenten (druksensoren, sensoren, stroommeters).
- Data (logs, cuttingbeschrijvingen uit mud logs, etc.) op basis waarvan de aquiferdefinitie is bepaald.

Indien RVO naast genoemde data en informatie nog additionele gegevens nodig heeft moet u die toezenden.

## 3 Technische eisen aan boring en puttest

Om in aanmerking te komen voor een uitkering van de RNES Aardwarmte is een eenduidige en reproduceerbare berekening van de transmissiviteit en skin vereist. Daarvoor is het essentieel dat de puttest op een adequate manier wordt uitgevoerd. In dit hoofdstuk worden richtlijnen gegeven voor de minimale technische vereisten aan boring en put en voor de uitvoering van de puttest. Dit wordt gedaan door middel van een beschrijving van de preferente testuitvoering en, afhankelijk van het project, eventuele variaties hierop. Desalniettemin staat het de uitvoerder vrij de test op een alternatieve manier uit te voeren, zolang er wordt voldaan aan de resultaatverplichting.

### 3.1 Definitie puttest type

Wanneer in dit document wordt gesproken over een puttest kunnen daarmee twee verschillende typen puttesten worden bedoeld, afhankelijk van de uitvoering. Een individuele puttest betreft gebruikelijk een productie- of injectietest, waarbij het reservoir in de directe omgeving van de put wordt getest. Als er twee of meer putten beschikbaar zijn, zijn er additionele testen, zoals de interferentietest en operationele test. Deze kunnen de aquifereigenschappen, zoals bepaald uit de individuele puttesten, mogelijk verifiëren. Hieronder volgt een beknopte beschrijving van de bovengenoemde testen:

- **Productietest:** tijdens deze test wordt de druk van de vloeistof onderin de put verlaagd ten opzichte van de druk van de vloeistof in het reservoir. Door dit opgelegde drukverschil ontstaat vloeistofstroming van het reservoir naar de put. Na een of meerdere perioden van productie ('drawdown') wordt de put ingesloten en het drukverschil opgeheven ('build-up'). Daardoor raken de put en het reservoir geleidelijk aan weer in drukbalans. Tijdens de gehele test wordt continu de druk, temperatuur en debiet in de put gemeten. Deze metingen worden gebruikt om de transmissiviteit en skin van het reservoir en de put te berekenen.
- **Injectietest:** de uitvoering en interpretatie van deze test is vergelijkbaar met een productietest. Na een of meerdere perioden van injectie wordt de put ingesloten en het drukverschil opgeheven ('fall-off'). Daardoor raken de put en het reservoir geleidelijk aan weer in drukbalans. Het verschil met een productietest is dat het opgelegde drukverschil de andere kant op werkt, waardoor vloeistof vanuit de put het reservoir in stroomt.
- **Interferentietest:** met een interferentietest kan een gemiddelde permeabiliteit van het reservoir tussen beide putten berekend worden. Deze test wordt uitgevoerd door, tijdens de puttest in de tweede put van het aardwarmteproject, de druk (en temperatuur) te meten van de vloeistof in de eerste put. Met behulp van deze metingen kan de gemiddelde permeabiliteit en/of porositeit van het reservoir tussen beide putten worden ingeschat. Deze test is met name nuttig wanneer de individuele puttesten resulteren in een significant verschillende permeabiliteit, wat een hogere onzekerheid van de gemiddelde reservoir eigenschappen tussen beide putten tot gevolg heeft. Een interferentietest kan deze onzekerheid aanzienlijk verlagen.

- Operationele test: met deze test kan eveneens de reservoirpermeabiliteit per put worden bepaald. Bij een operationele test wordt gedurende een bepaalde periode water rondgepompt van de injector naar de producer. Nadat gestopt is met pompen worden tijd en drukopbouw in beide putten, afzonderlijk van elkaar, geregistreerd. Hiervoor kunnen de druksensoren worden gebruikt die tijdens de operationele fase in de putten aanwezig zijn. Uit de meetreeksen worden skin en transmissiviteit van het reservoir in de omgeving van beide putten berekend.

## 3.2 Eisen aan de boring

### 3.2.1 *Beperking van de skin*

Men draagt zorg dat de booractiviteiten en het plaatsen van de benodigde installatie de doorlatendheid van de aquifer zo weinig mogelijk verminderen. Technisch gesproken wordt gezorgd voor een zo laag mogelijke mechanische skin.

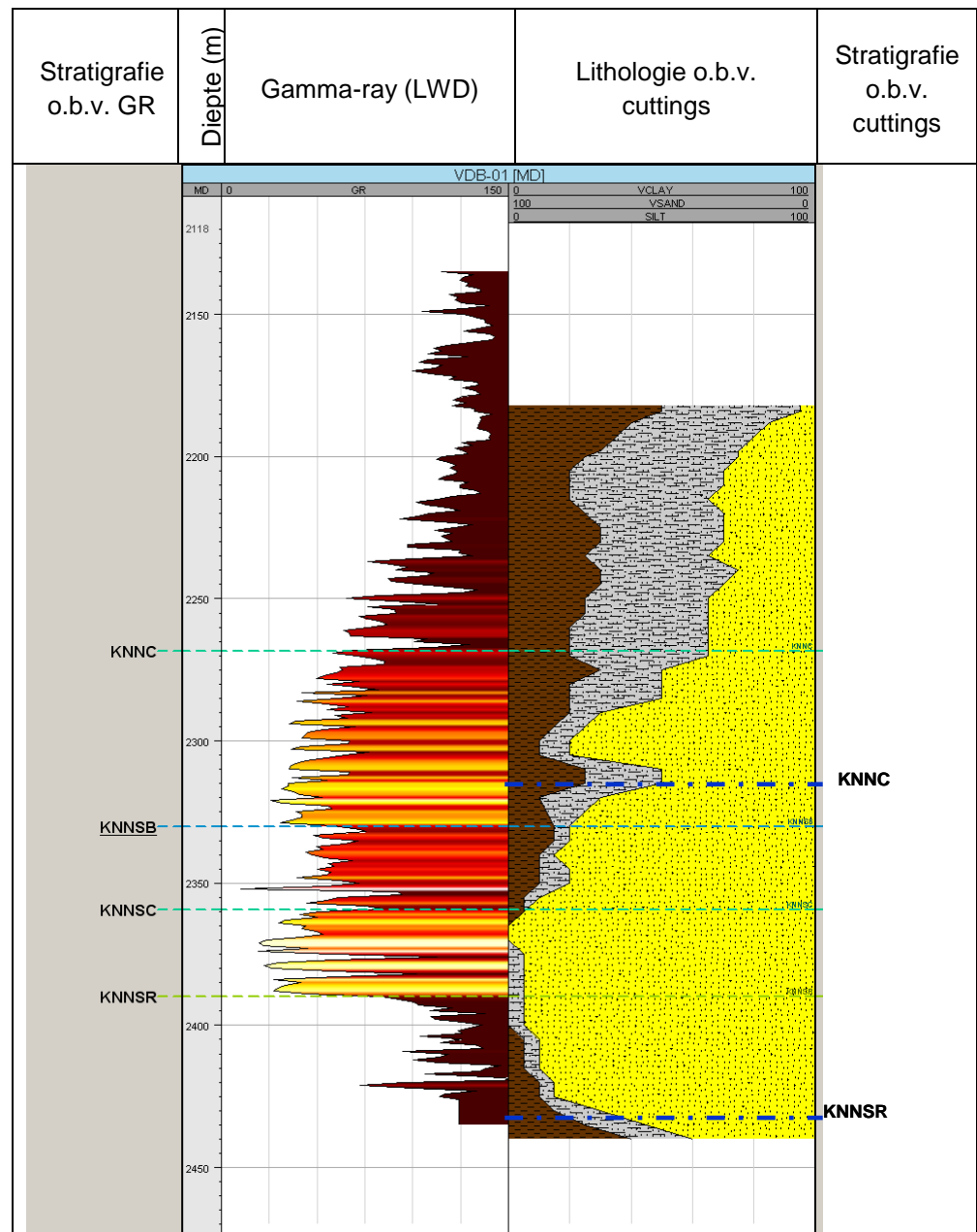
De skin is een dimensieloos getal dat een maat is voor de productie-efficiëntie van een put onder de feitelijke condities, ten opzichte van de theoretische of ideale efficiëntie. Een positieve skin duidt op schade aan de put/reservoir (mechanische skin) of andere factoren die de productiviteit van de put hinderen (reservoir geometrische of debietafhankelijke skin). Mechanische skin treedt op rond de put-aquifer interface, ten gevolge van het aanboren van de aquifer en het plaatsen en in gebruik nemen van de installatie. Een negatieve skin duidt op verbeterde productie, in het algemeen het resultaat van stimuleren van de put.

### 3.2.2 *Completering*

Het te testen interval wordt gecompleteerd over de beoogde aquifer(s). Om eenduidig vast te kunnen stellen dat het geteste interval de aquifer(s) betreft (en of het filter of de perforatie goed voor de aquifer is geplaatst) dient de diepte van de top en basis van de aquifer zo goed mogelijk te worden bepaald. Dit gebeurt op basis van boorgatmetingen, zoals een (LWD, Logging While Drilling) gamma-ray log in combinatie met mud logs.

Indien het resultaat van de gamma-ray log niet toereikend is, kan het dieptebereik ook worden bepaald aan de hand van gesteentemonsters opgevangen tijdens het boorproces (i.c.m. bijvoorbeeld boortechnische parameters, geofysische metingen of een spinner survey). Deze monsterring wordt standaard verricht bij elke boring. Bij het naderen van de aquifer wordt dan het interval waarop monsters genomen worden verkleind naar om de één tot twee meter. Deze intensivering van bemonstering zou voortgezet moeten worden tot eenduidig blijkt dat de basis van de aquifer is gepasseerd, of tot de aquifer tot voldoende diepte is doorboord.

Ondanks de intensievere monsternamen kunnen in veel gevallen de grenzen niet nauwkeurig bepaald worden als gevolg van na-val van cuttings. Het gevolg is dat **niet** aan de resultaatverplichting voldaan wordt. Dit geldt met name bij slecht geconsolideerde aquifers. Het voorbeeld in Figuur 1 illustreert dit probleem.



Figuur 1: Vergelijking van de opname van het aquiferinterval aan de hand van cuttings (rechter kolom) en (LWD) gamma-ray (GR). Merk op dat de basis van de aquifer (KNNSR) op een significant andere positie wordt geïnterpreteerd op basis van de twee methoden (GR @ 2390 m; cuttings @ ca. 2435 m). Hetzelfde geldt voor de top van de aquifer (KNNC). De interpretatie van de dieptes van top en basis van de aquifer op basis van cuttings in hetzelfde diepte referentiesysteem (along hole drillers depth), opgenomen in dezelfde 'trip', geeft significante verschillen. In het algemeen kan gesteld worden dat op basis van de (LWD) gamma-ray log de diepte van de aquifer nauwkeuriger bepaald kan worden.

Als bovenstaande methoden geen eenduidig resultaat opleveren, en om toch aan de eisen te voldoen, is het ook mogelijk om het reservoirinterval te bepalen o.b.v. een 'cased-hole log' (door de filter en verbuizing heen, met minimaal een gamma-ray log). Dit betreft bijvoorbeeld een 'cement bond log survey', met tenminste een gamma-ray log. Deze wordt opgenomen over het aquifer-interval en een voldoende groot deel



(minimaal 100 m) van de bovenliggende en eventueel onderliggende gesteentelagen.

De diepte waarop het filter is afgehangen, dan wel de perforatie is geschoten moet eenduidig bepaald kunnen worden op basis van de aangeleverde operationele en opgenomen gegevens (in hetzelfde diepte-referentiesysteem als voor de opname van top en basis van de aquifer).

Indien het reservoir slechts gedeeltelijk geperforeerd is of een blind pipe is geplaatst voor een deel van het reservoir, kan dit effect in de puttest interpretatie worden verdisconteerd in de skin. Het is mogelijk de permeabiliteit van de aquifer te bepalen in het geval het reservoir achter de blind pipe en achter de perforaties in contact staat met elkaar. Echter, wanneer deze twee intervallen worden gescheiden door een impermeabele laag is het niet mogelijk uit de puttest de permeabiliteit van het deel achter de blind pipe te bepalen omdat deze geen instroming geeft.

Het is ook mogelijk dat een “stacked” reservoir is gecompleteerd voor productie. In dat geval is het aan te raden een Production Logging Tool (PLT) te gebruiken om de individuele bijdrage van de verschillende reservoirlagen aan het totale debiet te bepalen.

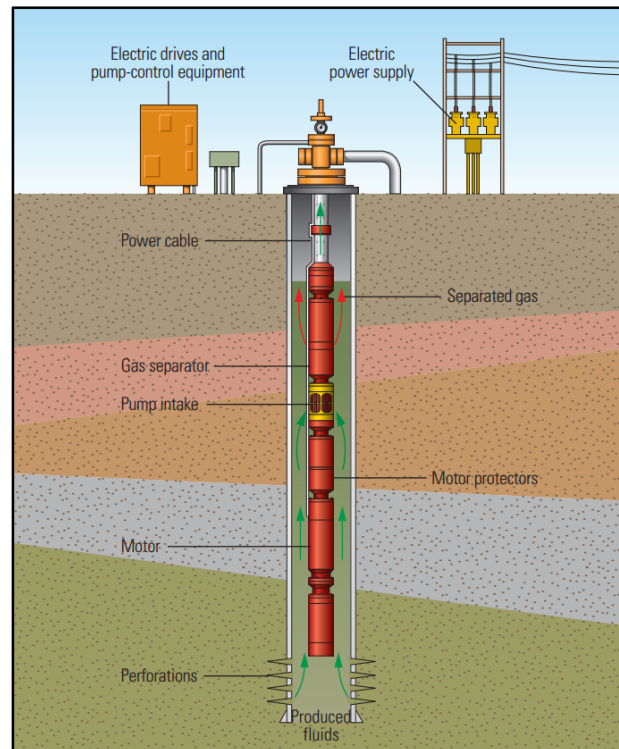
### 3.2.3 *Productiepomp*

Voor de uitvoering van de puttest is het genereren van vloeistofstroming een vereiste. Dit wordt doorgaans bewerkstelligd middels een ‘Electrical Submersible Pump’ (ESP). Hoewel het gebruik van een ESP sterk wordt aanbevolen, is het ook mogelijk andere pomputvoeringen te gebruiken, zoals bijvoorbeeld een Airlift Pump of, in het geval van een injectietest, een Mud Pump.

#### ESP

De meest gangbare optie voor een pomp in geothermische putten is de ESP (Figuur 2). Deze wordt afgehangen op een bepaalde diepte in de productie- of injectieput. De afhangdiepte van de pomp hangt af van de verwachte dynamische en statische kolommen. Dit omdat de aanwezigheid van vrij gas kan leiden tot cavitatie en dus beschadiging van de ESP. De wens is er om de bubble point van opgelost gas boven de ESP te houden, maar in veel gevallen is dit niet haalbaar in relatie tot de hoeveelheid gas in oplossing, het puttraject en de benodigde dynamische kolom (drawdown) die de druk verlaagt.

Het is gangbaar om het vrije gas te scheiden van het formatiewater indien het bubble point hoger dan de systeemdruk is. Dit kan door een gas separator te installeren in de productieput, als onderdeel van de ESP, en/of aan de oppervlakte (afhankelijk van de gas-water ratio (GWR)) (Figuur 2). Er zijn ook andere methodes om dit te doen, bijvoorbeeld middels een “gas anchor”. Dit is een pijp die over de inlaat van de pomp wordt geplaatst zodat de vloeistof moet keren en het gas de annulus in gaat. Het is ook mogelijk het gas niet te scheiden, maar in dat geval moet de systeemdruk tijdens een operationele test boven het “bubble point” gehouden worden.



Figuur 2: Schematisch overzicht van een ESP (Ref.: Schlumberger).

### Airlift Pump

Voor deze methode wordt een buis afgehangen op een bepaalde diepte en wordt doormiddel van een compressor 'lucht' in de productieput gepompt. Doordat deze lucht een deel van het watervolume vervangt en lucht veel lichter is dan water, wordt het gewicht van de totale waterkolom minder en daarmee ook de hydrostatische druk in de put op reservoirdiepte. Hierdoor ontstaat een verschildruk en daarmee vloeistofstroming. Deze techniek is een eenvoudigere en daarom vaak kosten-efficiëntere toepassing dan een ESP. Een airlift putttest geeft minder eenduidige druk-debiet verhoudingen ten opzichte van een ESP, doordat de kolom boven de druksensor niet stabiel is door druksprongen van het bubbel flow regime. Dit zorgt voor een ruis op de dataset. Geadviseerd wordt om voor putttesten met een airlift een druksensor op reservoir niveau te plaatsen om dit effect te minimaliseren. Alsnog is deze methode gevoeliger voor interpretaties ten opzichte van ESP pomp-testen.

Daarnaast is het niet aan te raden om gewone lucht in de productiebuis te pompen, aangezien dit vaak meer dan 20% zuurstof bevat.<sup>1</sup> De aanwezigheid van zuurstof in het systeem kan versnelde corrosie van de casing en productiebuis veroorzaken. Ook gewone lucht in combinatie met methaan kan tot gevaarlijke situaties leiden. Het gebruik van een ander gas, zoals stikstof, brengt daarentegen weer hogere kosten met zich mee.

Let well: er is weinig ervaring met airlift testen in geothermieputten in Nederland. De ervaringen die er zijn lijken suboptimale datareeksen op te leveren. Dit zou kunnen betekenen dat niet aan de resultaatverplichting voldaan kan worden. Vooral nog is het aan te raden deze test niet te gebruiken voor het realiseren van de resultaatverplichting van de RNES Aardwarmte.

<sup>1</sup> Voor zover bij TNO-AGE bekend wordt dit voornamelijk niet toegelaten door SodM.

### 3.2.4 *Alternatieve putconfiguraties*

De definitie van "alternatieve putconfiguraties" voor deze regeling is: alle putconfiguraties die afwijken van een verticale, ongestimuleerde put.

Alternatieve putconfiguraties zijn bijvoorbeeld:

- gedeveeerde put (tot ca. 80 graden met de verticaal)
- horizontale put (>80 graden met de verticaal)
- hydraulisch gestimuleerde put
- put met radials
- multi-lateral put

#### Gedevieerde- en horizontale put

Gedevieerde putten hebben een hellingshoek tot ca. 80° met de verticaal. Wanneer de hellingshoek groter is dan 80° wordt de put als horizontaal beschouwd. Geothermische putten zijn vaak gedevieerd omdat dit over het algemeen een productiviteit-verbeterend effect heeft, wat wordt uitgedrukt in een negatieve skin. Voor deviatiehoeken tot 80° wordt de negatieve skin in Doubletcalc adequaat berekend. Deze negatieve skin is tevens een functie van de anisotropie. Deze geologische parameter dient onderbouwd te worden in de aanvraag en zal worden getoetst bij beschikking.

#### Hydraulisch gestimuleerde put

Een hydraulisch gestimuleerde put wordt gecreëerd door het reservoir te fraccen. Dit wordt veelal gedaan door een mengsel van water, zand/proppant en chemicaliën onder hoge druk in het boorgat te pompen, waardoor het gesteente breekt. Doordat het zand/proppant in de scheurtjes gaat zitten blijven deze open en wordt de productiviteit van de formatie rondom de put verhoogd. Het productie-verbeterende effect van een frac wordt in een negatieve skin uitgedrukt.

Voor de garantiefaciliteit moeten de put of putten zowel vooraf als na de hydraulische stimulatie afzonderlijk getest worden.

#### Put met radials

Dit is een techniek waarbij een waterstraal onder hoge druk gaten spuit in het gesteente. Deze gaten kunnen momenteel een lengte van maximaal 100 m bereiken. Vaak worden 4, 6 of 8 gaten radiaal in een horizontaal vlak gerealiseerd. Het effect van radials op de productiviteit kan, net zoals voor fracs, worden omgezet in een negatieve skin (Peters et al., 2015).

Voor de garantiefaciliteit moeten de put of putten zowel vooraf als na het zetten van de radials afzonderlijk getest worden.

#### Multi-lateral put

Een multi-lateral put is een speciale putconfiguratie waarbij er vanuit het moederboorgat één of meerdere boorgaten (laterals) geboord worden die de aquifer aantappen. Voor de garantiefaciliteit moeten zowel het moedergat als de laterals afzonderlijk getest worden. Het moedergat kan direct na het boren getest worden. Na het boren van de laterals is het mogelijk deze afzonderlijk te testen door een of meerdere packers te plaatsen.

Indien bij de test van de lateral meerdere gaten openstaan, dienen zo mogelijk voorzieningen getroffen te worden teneinde skin en transmissiviteit van het nog niet geteste gat (lateral) eenduidig te kunnen bepalen.

Als er geen voorzieningen zijn getroffen om in een lateral de skin en transmissiviteit (kH) eenduidig en onafhankelijk van het hoofdboorgat of andere laterals te bepalen moeten de "bulk skin" en "bulk permeabiliteit" worden bepaald als ware het een "superput". Dit heeft echter wel implicaties voor de manier waarop permeabiliteit en skin worden meegenomen in de afrekening (zie paragraaf 5.3.2).

De geologische parameters die resulteren uit de interpretatie van de puttesten verschillen mogelijk significant tussen het hoofdgat en de lateral. In dat geval kan het vermogen met DoubletCalc berekend worden door per geologische parameter het (rekenkundige) gemiddelde te nemen van de uit de put en puttest bepaalde waarden. Voor permeabiliteit is dit de gemiddelde transmissiviteit (o.b.v.  $\ln(kH)$ ) bepaald uit de test, gedeeld door de gemiddelde dikte. De 'multi-lateral negatieve skin' t.o.v. de verticale put, zoals gebruikt in het pre-drill garantiescenario, blijft in het afrekeningscenario ongewijzigd.

### 3.3 Eisen aan de puttest

De puttest moet met betrekking tot duur, debiet en drukval zodanig worden ontworpen en uitgevoerd dat uit de meetresultaten de volgende aquifer-/puteigenschappen betrouwbaar kunnen worden bepaald en dus aan de resultaatverplichting wordt voldaan:

- Transmissiviteit (kH, het product van permeabiliteit ( $k_h$ ) en (netto) dikte)
- (mechanische) skin
- Productiviteits-/injectiviteitsindex (debiet/ $\Delta P$  (op reservoirdiepte)). Hierbij dient aangegeven te worden bij welke temperatuur deze bepaald is.
- Optioneel<sup>2</sup>: anisotropie ( $k_h/k_v$ ). De  $k_v$  kan bijvoorbeeld bepaald worden in het geval de put gedeveerd is of slechts gedeeltelijk is geperforeerd, of d.m.v. een verticale interferentie test.

Het testontwerp moet zodanig zijn dat:

- het bereik van de sensoren en stromingsmeters aansluit bij het verwachte debiet en drukken.
- er voldoende voorzieningen zijn getroffen om het geproduceerde water op te vangen, af te voeren en/of te bufferen.
- er voorzieningen zijn getroffen om zandproductie tegen te gaan, zoals het plaatsen van een scherm of filter.
- er wordt voorkomen dat het opgelegde drukverschil resulteert in de vorming van positieve skin in de nabijheid van de put op reservoirdiepte door bijvoorbeeld 'reservoir fines migration' of borehole collapse.
- de put schoon is geproduceerd (skin = 0, of zo laag mogelijke positieve skin).
- de shut-in voor de build-up direct plaatsvindt en niet geleidelijk of in meerdere stappen. Dit heeft invloed op de 'early time' (gebied in de directe nabijheid van de put) en daarom ook op de analyseresultaten.
- effecten van ongewenste drukgolfinterferentie door bijvoorbeeld 'wellbore storage' of beweging van de pomp op de testgegevens is geminimaliseerd.
- effecten van ongewenste stroommetinginterferenties worden geminimaliseerd door het goed positioneren van de stroommeters in relatie tot andere oppervlaktefaciliteiten. Het is bijvoorbeeld aan te raden de flow meter niet te dicht

<sup>2</sup> Indien de aanvrager wenst te rekenen met de daadwerkelijk aangetroffen anisotropie, dan die hij deze tijdens de puttest eenduidig en reproduceerbaar te bepalen. De aanvrager kan er ook voor kiezen dit niet te doen. Dan dient uitgegaan te worden van de anisotropie uit het acceptatiescenario.

bij bochten te plaatsen of achter de ontgasser. Daarnaast moeten de regimes van de stroommeters goed passen bij de geplande debieten.

- de duur van de puttest dusdanig lang is dat het Infinite Acting Radial Flow (IARF) stromingsregime bereikt is. IARF vindt plaats na afloop van de wellbore storage en vóórdat de reservoirgrenzen zijn bereikt.

Onderstaande paragrafen vormen een leidraad voor hoe een put getest kan worden om tot bruikbare resultaten te komen.

### 3.3.1 *Clean-up*

Er wordt een 'clean-up' gedaan, waarbij er zeker gesteld wordt dat de put schoon is. Om aan bovenstaande resultaatverplichting te voldoen kan bijvoorbeeld de clean-up als volgt worden uitgevoerd: in 3-4 stappen van een half uur tot een uur, met een toenemend debiet tot de maximale drawdown het boorgat schoonspoelen. De maximale toegestane drawdown wordt gedefinieerd door SodM (2013). De laatste stap dient gecontinueerd te worden totdat de put schoon water produceert. Dit kan bepaald worden door te constateren dat er (vrijwel) geen afname meer is van de mee geproduceerde boorspoeling en geen bijbehorende afname van de drukval bij gelijkblijvend debiet. De afname van drukval geldt niet op zichzelf omdat dit ook andere oorzaken kan hebben. Een andere optie is om het productieinterval voor het zetten van de completie te "underreamen" zodat het grootste deel van de mudcake al verwijderd is.

### 3.3.2 *Puttest type*

Een productietest geeft de grootste kans op een betrouwbare interpretatie van de transmissiviteit en skin van een reservoir en heeft daarom de voorkeur. Tijdens deze test wordt warm formatiewater geproduceerd en kan een constanter debiet worden opgelegd dan tijdens een injectietest. Bij een injectietest wordt vooral koud water geïnjecteerd, met andere fysische eigenschappen dan het formatiewater in het reservoir. Dit heeft effect op het druksignaal en leidt mogelijk tot een minder betrouwbare interpretatie van de test. Dat geldt ook voor de injectie van zoet water, wat in sommige gevallen wordt gebruikt (in klei-arme gesteenten). Het kan de skin positief beïnvloeden door het oplossen van zouten. Echter, in kleirijke gesteenten heeft dit mogelijk een negatieve invloed op de skin (clay swelling).

In het geval er specifieke geologische reservoir condities zijn aangetroffen (zoals bijvoorbeeld "fractured reservoir") en de put beoogd is als een injectieput dan dient ook een injectietest uitgevoerd te worden om de effectiviteit van het duale permeabiliteits-systeem (matrix en fractures) goed te kunnen interpreteren.

Een interferentie- of operationele test wordt alleen uitgevoerd als additionele test of in het uiterste geval als een productie- en/of injectietest geen bruikbaar resultaat heeft opgeleverd, om communicatie tussen beide putten te bewijzen en de gemiddelde reservoirpermeabiliteit tussen de twee putten in te schatten. Bijvoorbeeld in het geval de twee individuele tests een groot verschil in permeabiliteit laten zien. De voorkeur gaat daarbij uit naar een interferentietest, omdat in dat geval telkens één individuele put wordt getest. Bij een operationele test zijn beide putten actief en kan het druksignaal van de ene put het signaal van de ander verstoren, wat als een (niet bestaande) constante-druk barrière geïnterpreteerd kan worden.

### 3.3.3 *Voorkeursontwerp*

In deze paragraaf wordt een voorkeursontwerp voor een puttest beschreven en mogelijke alternatieven op basis van variaties in de testopstelling. Er zijn

verschillende testontwerpen mogelijk. Essentieel is echter dat de testresultaten zodanig zijn dat de verkregen gegevens voldoende zijn om het testresultaat te kunnen interpreteren, beoordelen en vergelijken met de verwachtingswaarde die was berekend voordat de boring was uitgevoerd.

Indien de druksensor zich tijdens de productietest ter hoogte van de ESP bevindt, wordt aanbevolen om de duur van de test te verlengen zodat de wellbore storage niet overlapt met het IARF signaal. Een alternatieve methode is de installatie van een “packer” aan het eind van de productiebuis die de “annulus” afsluit (de ruimte tussen de productiebuis en de casing). Het installeren van een “packer” kan de duur van de wellbore storage verminderen, maar niet elimineren. Er spelen echter ook andere kortstondige wellbore effecten die niet kunnen worden uitgeschakeld d.m.v. een packer, zoals *water-hammer* en het effect op de ESP drukken (verandering in hydrostatische druk) door de motorwarmte.

Er dient een multi-rate test uitgevoerd te worden in het geval de druk ter hoogte van de ESP wordt opgenomen. Bij een dergelijke test wordt het opgelegde debiet tussen put en aquifer in stappen verhoogd (minimaal 3 stappen). Dit is nodig omdat de skin ook een debietsafhankelijke component bevat, die wordt veroorzaakt door wrijving van het geproduceerde water met de verbuizing (“rate dependent skin”). Door bij verschillende debieten de skin te meten kan deze debietsafhankelijke component en zo ook de constante mechanische skin tussen put en reservoir bepaald worden.

Het voorkeursontwerp voor een puttest in een geothermische put wordt door de volgende stappen beschreven:

1. ‘Clean-up’ van de put (zie paragraaf 3.3.1).
2. Optioneel: put insluiten voor initiële build-up (2-4 uur) om mogelijk alvast analyseerbare data te verkrijgen voor het geval de data van de finale build-up niet voldoende zijn voor de resultaatverplichting.
3. Test de put in 3 opeenvolgende (drawdown) stappen met significant verschillende debieten (multi-rate test) (bijvoorbeeld 30, 60 en 90% van het maximale debiet toegepast bij de ‘clean-up’, maar in ieder geval binnen het functionele bereik van de ESP). Tussentijdse build-ups zijn niet vereist. De tijdsduur van de eerste 2 drawdown periodes betreft 2 uur en van de laatste periode liefst 8 uur. Dit zijn indicatieve tijden omdat de duur van de drawdown nauw samenhangt met de reservoirkwaliteit en daarmee de benodigde tijd om IARF te bereiken.
4. Finale build-up (tenminste zolang dat IARF is bereikt, maar minimaal 12 en liefst 24 uur of langer). In het geval dat een breuk wordt verwacht in de nabijheid van de put, die mogelijk effect heeft op het debiet en/of de levensduur van de vergunning, zou de duur van de build-up verlengd kunnen worden zodat de drukrespons van de breuk tijdens de well test wordt gezien. In de literatuur bestaan methodes waarmee op basis van een aantal aannamen een grove inschatting van de straal van het onderzoeksgebied kan worden berekend (Lee, 1982):

$$r_i = \sqrt{\frac{kt}{948\phi\mu c_t}}$$

met de straal van onderzoeksgebied "Radius of investigation" ( $r_i$ , voet), permeabiliteit ( $k$ , miliDarcy), tijd ( $t$ , uren), porositeit ( $\Phi$ , fractie), totale compressibiliteit ( $C_t$ ,  $\text{psi}^{-1}$ ); viscositeit ( $\mu$ , centipoise).

Tijdens de volledige testperiode, ook gedurende de build-ups, dienen tijd, debiet, druk en temperatuur gemeten te worden. De meetfrequentie en -nauwkeurigheid moet zodanig zijn dat de benodigde correcties kunnen worden toegepast en de test correct geïnterpreteerd kan worden (4 metingen per minuut is een voldoende hoge frequentie). Het is bovendien belangrijk dat het debiet tijdens de drawdown periodes zo constant mogelijk wordt gehouden.

In het geval een injectietest wordt uitgevoerd kan hetzelfde voorkeursontwerp worden gebruikt als hierboven beschreven staat. De drawdown periodes worden in dat geval injectieperiodes en de "build-ups" worden "fall-offs". Bij een injectietest staan de pomp en stroommeters aan de oppervlakte. De drukmeter kan zowel bij de well head als op reservoirniveau geplaatst worden.

Het maximaal opgelegde drukverschil moet binnen de geldende veiligheidsnormen blijven voor de injectietest. Hoe het maximaal op te leggen drukverschil kan worden bepaald staat beschreven in het injectieprotocol, opgesteld door Staatstoezicht op de Mijnen (SodM, 2013).

#### Alternatieven ontwerpen

Het testontwerp moet te allen tijde aansluiten bij de onderzoeksvragen die nodig zijn om in de aangetroffen situatie aan de resultaatverplichting te kunnen voldoen. Het is bijvoorbeeld mogelijk de tijdsduur van de laatste drawdown en build-up aan te passen.

Het is vereist om het opvangbassin te dimensioneren op basis van de voorgeschreven tijdsduur van de drawdown stappen en het verwachte debiet, die nodig zijn om een succesvol well test resultaat te bereiken. Indien dit niet mogelijk is, kan de tijdsduur van de laatste periode (hoogste drawdown) van de multi-rate test ingekort worden. De vereiste minimale duur van deze stap bedraagt 4 uur. Dit is echter op eigen risico. Als hierdoor niet eenduidig een transmissiviteit en skin kan worden bepaald en dus niet wordt voldaan aan de **resultaatverplichting** is dat de verantwoordelijkheid van de aanvrager.

Vermindering van het wellbore storage effect kan worden gerealiseerd door het plaatsen van de drukmeter zo dicht mogelijk bij de reservoirdiepte. Een verdere vermindering van de wellbore storage kan worden bereikt door het plaatsen van een uitneembare packer of downhole shut-in tool op reservoirdiepte. In dat geval is het niet strikt noodzakelijk een multi-rate test uit te voeren, omdat de debietsafhankelijke skin, die het drukverlies door wrijving met de verbuizing representeert, verwaarloosbaar is. In plaats daarvan wordt aanbevolen om eerst een korte build-up van 4 uur uit te voeren, gevolgd door een drawdown periode (minimaal 8 uur) en een langere build-up van minimaal 24 uur (maar tenminste totdat IARF is bereikt). In het geval een drukmeetsonde op reservoirniveau is geplaatst dan kan er in essentie volstaan worden met één enkele build-up en draw-down cyclus. Er dient wel zeker gesteld te worden dat de resulterende data goed is voor interpretatie om te voldoen aan de **resultaatverplichting** van de RNES Aardwarmte regeling. Dit kan

bijvoorbeeld door de data live te monitoren en interpreteren. Indien dit niet is gerealiseerd dan dient nog een drawdown en build-up cyclus te worden uitgevoerd.

In het geval er specifieke geologische reservoircondities zijn aangetroffen (zoals bijvoorbeeld een “fractured reservoir”) dient een multi-rate injectietest uitgevoerd te worden om de mogelijke debietsafhankelijke skin ten gevolge van het openen (progressief conductief worden) van fractures onder opgelegde druk te bepalen.

#### 3.3.4 *Doublettest*

Het doublet kan op twee verschillende manieren getest worden indien beide putten van een aardwarmte doublet zijn gerealiseerd. Het oogmerk is dan eveneens om de skin en de transmissiviteit te berekenen. De resultaten van deze tests kunnen als verificatie van de interpretatie van de puttest worden gebruikt, maar vervangen deze niet.

In bepaalde gevallen is het echter mogelijk de transmissiviteit en skin, die uit de doublettest worden afgeleid, te gebruiken in het claims scenario voor de vaststelling. Dit kan bijvoorbeeld als de (enkele) puttest door onvoorziene omstandigheden tot meetresultaten heeft geleid waaruit de aquiferparameters niet betrouwbaar kunnen worden afgeleid. Er zijn hier twee opties mogelijk:

- Interferentietest
- Operationele test

##### Interferentietest

In deze test wordt uit één van de putten (de actieve put) relatief kortstondig geproduceerd/geïnjecteerd onder een opgelegd debiet. Hierbij wordt de druk en temperatuur in de stilgelegde andere put (de observatieput) gemeten, waarbij deze put geheel wordt afgesloten van de atmosfeer. Als deze observatieput al minstens drie weken (liefst langer) voor de test is ingesloten kan de reservoirdruk betrouwbaar gemeten worden door twee of drie drukmeters op 10 en 30 m onder het vrije waterniveau te hangen. Daarbij is het dus van belang dat de exacte positie van de drukmeters wordt gerapporteerd, alsmede de diepte van het vrije waterniveau. Een correctie op de gemeten druk kan worden toegepast voor het dichtheidsverschil (door temperatuurverschil) van het water op diepte van de druksensor t.o.v. reservoirniveau:  $\rho_{res}/\rho_{sensor}$ .

Het geproduceerde water wordt afgevangen en gebufferd. De productiepuls genereert een drukgolf in de aquifer. In de observatieput wordt met een sonde de druk geregistreerd, minimaal vanaf de start van de opwekking van de puls tot tenminste twee tot drie weken na productie. Druksignalen gegenereerd in de actieve put kunnen echter alleen gedetecteerd worden door de druksensor in de observatieput als de frequentie en intensiteit anders zijn dan het achtergrondsignaal, zoals bijvoorbeeld dat van dichtbij gelegen putten. Daarnaast is het aan te raden meerdere drukstappen toe te passen zodat eventuele lineaire effecten uit de data kunnen worden gefilterd.

Uit het opgelegde debiet in de actieve put en de gemeten drukverandering in de observatieput (de aankomsttijd en hoogte van de drukgolf) is onder meer de gemiddelde permeabiliteit van de aquifer tussen beide putten te bepalen. Voor de inschatting van de permeabiliteit is een goede aanname van de totale compressibiliteit, viscositeit en reservoirporositeit nodig. Daarvoor dient de watercompositie worden gemeten, alsmede de eventuele gas/water ratio en de ontgassingsdruk.



In het geval van een verticale interferentietest, die in een enkele put wordt uitgevoerd, kan ook een systeem met verschillende productie intervallen en verschillende doorlaatbaarheden aangetoond worden.

#### Operationele test

In deze test wordt in het doublet water rondgepompt op de wijze zoals beoogd in de operationele fase van het doublet. De afzonderlijke permeabiliteitsdikte en skin voor beide putten kan echter enkel worden bepaald als er tijdens (een interpretabel deel van) de operationele test geen interferentie optreedt tussen beide putten. In het geval van interferentie zal bij de analyse van de druk data een constant-pressure boundary verschijnen tussen beide putten ten gevolge van het "image-well" effect. Deze barrière is dus niet echt aanwezig en slechts het gevolg van de interferentie tussen beide putten. Deze interferentie toont aan dat er geen flow barrière tussen beide putten aanwezig is.

De opzet van de test is zodanig dat gedurende het rondpompen van water zowel in de productie- als in de injectieput voortdurend de druk, het debiet en de temperatuur van het rondgepompte water gemeten worden. De uitvoering van de test is grotendeels gelijk aan die van een enkele puttest, met dien verstande dat in één put geproduceerd wordt en in de andere geïnjecteerd. Er wordt zodanig getest dat het opgelegde debiet tussen putten en aquifer in stappen (perioden) wordt verhoogd (drawdown test). Er worden minimaal drie stappen (van verschillend debiet) uitgevoerd. Bovendien wordt na de laatste stap het debiet teruggebracht naar nul (build-up test). Op dat moment worden de waterkolommen in beide putten van elkaar gescheiden door een afsluitklep. Hierdoor wordt voorkomen dat beide drukresponsen van de aquifer (bij de injectie- en productieput) bovengronds met elkaar interfereren. Ook bij deze test is het bovendien belangrijk dat het debiet tijdens de drawdown-periodes zo goed mogelijk constant wordt gehouden. De meetreeksen van druk, debiet en temperatuur tegen de tijd kunnen op dezelfde wijze worden geïnterpreteerd als een enkelvoudige puttest.

Een indicatie van het moment waarop interferentie optreedt kan worden bepaald met behulp van de formule voor de radius of investigation in paragraaf 3.3.3.

Voor de rapportage van de interferentie- en/of doublettest kan, voor zover relevant, hetzelfde formulier gebruikt worden als voor de puttest (Bijlage A). Dit is gelijk aan de richtlijnen gesteld in de 'Model Puttestrapportage' Bijlage b bij het vaststellingsformulier RNES Risico's dekken voor aardwarmte.

#### 3.3.5 *Puttest na verbeterwerkzaamheden*

Als verbeterwerkzaamheden worden gerealiseerd dient de put opnieuw getest te worden. Dit moet gebeuren volgens de specificatie zoals beschreven in de bovenstaande paragrafen in 3.3.

## 4 Puttest interpretatie

De gegevens uit de puttest (het verloop van debiet, druk en temperatuur) worden, samen met de gegevens van de put- en pompspecificaties, geïnterpreteerd middels een putttestanalyse. Informatie over de uitvoering van putttest interpretaties wordt o.a. beschreven in Lee (1982) en Lee et al. (2003), Kappa (2012).

### 4.1 Software en interpretatiemethode

Bij voorkeur wordt de “derivative well test analysis” methodiek gebruikt voor de interpretatie van de putttest gegevens (ook bekend als Pressure Transient Analysis, PTA). Deze methodiek maakt onder andere gebruik van de Bourdet derivative in een log-log plot (Bourdet, 2002). Daarmee kunnen de sequentiële stromingsregimes in de put, het reservoir en eventuele reservoirgrenzen worden geïdentificeerd. Vooral het Infinite Acting Radial Flow (IARF) regime in het reservoir is van groot belang voor de bepaling van de transmissiviteit en de skin. Daarnaast kunnen verschillende analytische put/reservoir/grensmodellen worden toegepast om een match te krijgen met de well test resultaten, op basis van o.a. de put/reservoir/geologische data. Naast de reservoirpermeabiliteit en skin levert deze methodiek een grote variëteit aan andere belangrijke eigenschappen, zoals bijvoorbeeld de straal van het onderzoeksgebied, verticale permeabiliteit, storativity, rate dependent skin etc. Kortom, door het gebruik van de derivative analysis kunnen de meetreeksen op de meest adequate en betrouwbare manier worden geïnterpreteerd.

Daarnaast kunnen verschillende numerieke reservoirmodellen worden toegepast. Het gebruik van deze methodiek is tevens aanbevolen voor de interpretatie van interferentietesten. Deze analyse levert naast een inschatting van de gemiddelde reservoirpermeabiliteit mogelijk ook een indicatie van de totale reservoircompressibiliteit en porositeit.

De eenvoudige straight-line fitting (Horner plot) evaluatie kan ook worden gebruikt voor het bepalen van de permeabiliteit, skin en gemiddelde initiële reservoirdruk. Dit wordt echter gezien als een suboptimale interpretatiemethode omdat het IARF regime niet met zekerheid bepaald kan worden, vanwege de onzekerheid in de duur van de wellbore storage en grenseffecten in een semi-log plot. Dit kan mogelijk leiden tot een onjuiste inschatting van de transmissiviteit en skin.

### 4.2 Correcties

Afhankelijk van het type en uitvoering van de putttest kunnen bepaalde correcties nodig zijn voordat de well test analyses kunnen worden uitgevoerd, om zodanig een betrouwbaar resultaat te verkrijgen. Een aantal voorbeelden van mogelijke correcties zijn:

- Afkoeling en opwarming effect van de waterkolom tijdens respectievelijk een build-up en fall-off periode (zie paragraaf 3.3.3).
- Krimp van de kabel waar de diepe druksensoraan hangt.
- Getijden effect.
- Atmosferische druk (voor langdurige productie of interferentie tests).
- Drukmetingen bij hoge gas-water ratio's.
- Afwijkingen van de sensoren tijdens de metingen (drift).

#### 4.2.1 *Toelichting op afkoelingscorrectie*

De build-up druk gemeten bij de ESP moet gecompenseerd worden voor de afkoeling van de waterkolom tussen de ESP en top reservoir en voor de motorwarmte. Dit is mogelijk door ook een diepe druksensor zo dicht mogelijk boven het reservoir te plaatsen en het drukverschil tussen beide druksensoren tijdens de lange build-up te plotten versus de ESP temperatuur. Zonder deze correctie is analyse van ESP data in de praktijk onmogelijk gebleken. Wel kan zonder correctie een goed idee van de permeabiliteit verkregen worden uit de drawdown periodes aangezien de temperatuur van de waterkolom dan constant is; de duur van de laatste flow periode kan verlengd worden ten koste van de duur van de build-up. Deze analyse kan leiden tot een iets te hoge permeabiliteitswaarde.

Bovenstaande geldt ook voor een injectietest, met als complicatie een *Top Hole Pressure* (THP) die nul wordt bij de fall-off. Daar moet dus altijd een diepe druksensor gebruikt worden.

### 4.3 **Rapportage**

Naast de ruwe testdata worden ook de rapportages, met daarin een gedetailleerde beschrijving en onderbouwing van de databewerking en interpretaties van de test, aangeleverd aan RVO.

De uitkomsten van de puttestanalyse omvatten tenminste de transmissiviteit (kH), skin en temperatuur. Uit de transmissiviteit en de gegevens van de data-acquisitie uit de put (bruto en/of netto dikte van de aquifer) kan de permeabiliteit (k) bepaald worden. Hierbij wordt duidelijk gemaakt of de dikte van de gehele aquifer is gebruikt, of slechts de netto dikte van het interval. Additioneel kan zo mogelijk een indicatie van de verticale anisotropie van het reservoir uit de puttest gedestilleerd te worden. De gemeten en berekende gegevens die gebruikt zijn voor de interpretatie en beoordeling van de puttest dienen te worden opgesomd in de tabel in Bijlage A. De opsomming bevat daarnaast een vermelding van de gevolgde methode, programmatuur en eventuele parameters, alsmede een onderbouwing van de keuze hiervoor.

Tevens dienen een aantal rapportages te worden aangeleverd. Dit betreft o.a. het puttest programma, een beschrijving van de meetopstelling en testuitvoering per puttest, inclusief een schematische tekening. Daarnaast dient een document te worden aangeleverd waarin de resultaten worden gegeven en beschreven en de keuze van het toegepaste model wordt onderbouwd. Het voorkeursmodel moet aansluiten bij de structurele en geologische kennis van het reservoir.

## 5 Vermogensberekening en beoordeling van de vaststellingsaanvraag

Met de gegevens van de put en de resultaten van de puttestinterpretatie wordt het gerealiseerde vermogen van het doublet (of vermogensscenario van het verzekerde halve doublet) berekend volgens de specificaties in de handleiding van DoubletCalc. Indien alle gerealiseerde geologische parameters ingevoerd worden als mediane waarden kan het 'Garantiefonds' gerealiseerde vermogen afgelezen worden op het uitvoerscherm 'Geotechnics'- kolom (Output) - vak 'base case (median value inputs)'.

### 5.1 Niet-geologische parameters

De vooraf opgegeven niet-geologische parameters (bijvoorbeeld de diameter van het boorgat en productie tubing) hebben invloed op het uiteindelijke vermogen dat uit de puttest blijkt. Daarom moeten de boringen en puttesten overeenkomstig deze waarden worden uitgevoerd. Bij de berekening van het gerealiseerde vermogen (op basis van de puttesten) zal gerekend worden met de vooraf opgegeven (installatie/niet-geologische) parameters indien **ongunstigere** waarden worden toegepast of gerealiseerd. Indien er gunstigere waarden zijn gerealiseerd zullen die wel in het afrekeningscenario worden gebruikt. Welke van de twee putten beschouwd wordt als injectieput c.q. productieput wordt bepaald door de configuratie die het meeste vermogen oplevert.

Indien het gerealiseerde vermogen lager is dan het verwachte (P90) vermogen in het acceptatiescenario, en er aanspraak op de garantieregeling gemaakt wordt, moet uitgesloten worden dat het lagere vermogen aan niet-geologische bronnen te wijten is, te weten:

- Slechts gedeeltelijk aanboren van de totale dikte van de aquifer.
- Foutieve plaatsing van de perforatie of het filter ten opzichte van het beoogde productie- of injectie-interval.
- Afwijking van de bij aanmelding opgegeven niet-geologische parameters.
- Mechanische skin.
- Overige problemen met de put.

### 5.2 Significant verschil in geologische parameters tussen putten

Het gerealiseerde vermogen kan niet direct met DoubletCalc berekend worden wanneer de geologische parameters voortvloeiend uit de interpretatie van de put- of doublettest significant verschillen tussen beide putten. Het is dan de bedoeling een passende gemiddelde waarde voor de aquifereigenschappen te bepalen. De resultaten van de interferentietest of productiegegevens kunnen richtinggevend zijn in de bepaling van de gemiddelde transmissiviteit. Tevens is het mogelijk het vermogen te berekenen met behulp van een reservoirsimulator. Hierbij moet zeker gesteld worden dat de niet-geologische parameters identiek zijn aan die in het acceptatiescenario, en dat er een geleidelijke afname of toename is van de aquifereigenschappen van de ene naar de andere put.

Indien er geen interferentietest is uitgevoerd kan er mogelijk gebruik worden gemaakt van andere methoden om een indicatie van de gemiddelde reservoirpermeabiliteit te

verkrijgen. Bijvoorbeeld door de resultaten van de puttesten en de productiedata van de eerste operationele maanden te combineren.

Onder de aanname dat de skin in de eerste paar maanden van productie niet drastisch verandert ten opzichte van de skins bepaald uit de puttesten, kunnen deze skins worden ingevuld in het DoubletCalc. Door vervolgens het gemiddelde drukverschil over de pomp van een bepaalde productiemaand in te vullen in dit DoubletCalc scenario kan de permeabiliteit bepaald worden die nodig is om het gemiddelde debiet van die betreffende productiemaand te produceren. Wanneer zodanig voor een aantal opeenvolgende maanden eenzelfde permeabiliteit wordt bepaald, kan deze worden aangenomen als de gemiddelde reservoirpermeabiliteit. Als de permeabiliteit sterk varieert binnen een paar maanden, kan dit ook verklaard worden door een variërende skin en is de bepaling van de permeabiliteit onbetrouwbaar.

Door de aanname van een constante skin uit de puttesten kent deze bepaling een hoge mate van onzekerheid. Het gebruik hiervan is daarom enkel van toepassing in bovengenoemd geval, of ter verificatie van de resultaten van een andere bepalingsmethodiek.

### 5.3 Skin in het afreken scenario

#### 5.3.1 *Mechanische skin*

De RNES Aardwarmte gaat uit van een mechanische skin niet hoger dan nul. Indien uit de test blijkt dat de put een positieve skin heeft, is de conclusie dat het te lage vermogen in ieder geval deels te wijten is aan een te laag debiet ten gevolge van deze positieve skin. Bij de bepaling van het 'gerealiseerde vermogen' wordt de aquiferpermeabiliteit gebruikt die bepaald is uit de puttest. Een mechanische skin hoger dan 0, bepaald in dezelfde test, wordt bij de berekening van het gerealiseerde vermogen dus genegeerd.

#### 5.3.2 *Negatieve skin door alternatieve putconfiguraties*

Alternatieve putconfiguraties, zoals beschreven in paragraaf 3.2.4, worden in het algemeen vertaald naar een negatieve skin. Deze factor wordt voor het boren vastgesteld, en in het afreken scenario onveranderd meegenomen. De skin van deviatie is de enige skin parameter die in een claimscenario kan afwijken van het acceptatiescenario vanwege de gerealiseerde geologische parameters.

#### Gedevieerde en horizontale put

De deviatie skin valt onder de garantiefaciliteit omdat de verticale anisotropie, die invloed heeft op de berekening van de deviatieskin, als een geologische parameter wordt gezien. Deze anisotropie dient, zo mogelijk, eenduidig bepaald te worden uit de puttest, ter onderbouwing van het claimscenario. Bij de afrekening wordt de deviatiehoek overgenomen uit het pre-drill scenario omdat dit geen geologische parameter betreft. Als gekozen is de anisotropie niet nader te bepalen, zal deze worden overgenomen uit het pre-drill scenario.

#### Hydraulische gestimuleerde put en put met radials

Indien putstimulatie door hydraulisch fraccen of het plaatsen van radials is gerealiseerd, dient zowel voor als na realisatie hiervan een puttest te worden uitgevoerd. Als de puttest na stimuleren leidt tot een vermogen dat groter is of gelijk aan het in het kader van de RNES Aardwarmte gegarandeerde vermogen, dan is deze leidend in de afrekening.

In het geval dat de hydraulische gestimuleerde put of de put met radials onderdeel was van het aanvraagscenario en een integraal onderdeel van het project, is voor deze putconfiguraties de puttest vóór verbeteroptie leidend voor het afrekeningscenario. Alleen deze kan eenduidig uitsluitsel geven over de ongestimuleerde aquifereigenschappen die onder de garantiefaciliteit vallen. Een post-hydraulische stimulatie of post-radial drilling test laat naar verwachting een productiviteitsverbetering zien die omgerekend kan worden naar een negatieve skin. Er valt echter niet eenduidig te achterhalen of het eventuele verschil tussen pre-drill verwachte skin en slechtere "gerealiseerde skin" te wijten is aan een geologische oorzaak of de uitvoering van de stimulatie. Daarom blijft de pre-drill skin leidend in het afrekeningscenario.

De informatie uit de post-hydraulische stimulatie of post-radial drilling puttest of productietest dient ook te worden aangeleverd, net als de pre-hydraulische stimulatie of pre-radial drilling puttest, conform het format gegeven in Bijlage A.

#### Multi-lateral put

Voor de multi-lateral put gelden andere principes voor het afrekeningscenario. Dit is omdat bij een lateral de formatie op een andere plek wordt aangeboord dan het moedergat, wat een bepaalde geologische onzekerheid met zich meebrengt<sup>3</sup> en omdat in principe een lateral eenduidig getest kan worden.

Als er geen voorzieningen zijn getroffen om in een lateral de skin en transmissiviteit (kH) eenduidig en onafhankelijk van het hoofdboorgat of andere laterals te bepalen moeten de "bulk skin" en "bulk permeabiliteit" worden bepaald als ware het een "superput" (in het hoofdboorgat moet zoals eerder gemeld in ieder geval een puttest worden uitgevoerd). Uit de uitkomsten van de test van het hoofd-/moedergat en de "superput" puttest interpretatie wordt de **hoogste** permeabiliteitswaarde gekozen als representatief voor de aquifer. Immers, de lage waarde in de "superput" kan het gevolg zijn van een niet nader en eenduidig te bepalen positieve skin in het moedergat of de lateral(s). De "hoge" permeabiliteitswaarde moet dan in het DoubletCalc afrekeningscenario worden gebruikt. Ook hier blijft de "multi-lateral negatieve skin" t.o.v. de verticale put zoals gebruikt in het pre-drill garantiescenario in het afrekeningscenario ongewijzigd.

Omdat een multi-lateral put een niet standaard doubletconfiguratie betreft moet er rekening worden gehouden met het feit dat de standaard specificaties voor een doublet ook niet helemaal toereikend zijn. Echter, het uitgangspunt blijft dat voor **alle** putten (het hoofdgat van de put en de laterals) de puttest zodanig ontworpen en uitgevoerd dient te worden dat uit de resultaten/meetreeksen de transmissiviteit, de skin, de productiviteitsindex en de temperatuur eenduidig kunnen worden bepaald.

---

<sup>3</sup> In enige zin wordt bij hydraulisch stimuleren en radial drilling de formatie op een andere plaats aangeboord. Voor deze regeling wordt deze informatie niet meegenomen. Dit is omdat uit de vergelijking van pre- en post-stimulatie productiviteit niet eenduidig kan worden afgeleid of de eventuele teleurstellende productiviteitsverbetering alleen door geologische parameters wordt veroorzaakt, of deels dan wel geheel zijn oorzaak heeft in een andere oorzaken, zoals slechtere realisatie van de fracture of de radials dan beoogd (en waarop de pre-drill skin waarde is bepaald)

## 6 Afsluiting

Leidend in de garantiefaciliteit is de resultaatverplichting van de puttest. Deze staat beschreven in hoofdstuk 2. Indien niet aan de resultaatverplichting is voldaan, dan is een eventuele claim op basis van de puttest niet ontvankelijk.

RVO houdt zich het recht voor te allen tijde extra informatie op te vragen dan wel additionele testen voor te schrijven dan wel productiegegevens in de behandeling van een eventuele claim of herziening (zelfs tot 5 jaar na vaststelling) van een toegekende claim te gebruiken.

## 7 Referenties

Bourdarot, G., 1996. Well testing. Interpretation methods. ISBN 2-7108-0738-6.

Bourdet, D. (2002). Well Test Analysis: The use of advanced interpretation models. Elsevier, 438 pp.

Kappa (2012). Dynamic Data Analysis. The theory and practice of pressure transient, production analysis, well performance analysis, production logging and the use of permanent downhole gauge data. 537pp.

Kruseman, G.P. & De Ridder, N.A., 1994. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. International Institute for Land Reclamation and Improvement, The Netherlands, Publication 47, 377 p.

Lee, J., 1982. Well testing SPE textbook series. ISBN-13: 978-0895203175.

Lee, J., Rollins, J.B., Spivey, J.P., 2003. Pressure Transient Testing. SPE Text books Series Vol. 9, 356p.

Peters, E., Veldkamp, J.G., Pluymaekers, M.P.D., Wilschut, F., 2015. Radial drilling for Dutch geothermal applications. TNO rapport 2015 R10799.

Staatstoezicht op de Mijnen (SodM), 2013. Protocol bepaling maximale injectiedrukken bij aardwarmtewinning.



## Bijlage A Data en resultaten van de puttest

| Gegevens voor test interpretatie                             | Waarde | Dimensie                        |
|--|--------|---------------------------------|
| Naam van de put  |        |                                 |
| Coördinaten van de put (X, Y)                                |        | m (RD)                          |
| Top aquifer  |        | m (langs boorgat)<br>en m (TVD) |
| Basis aquifer  |        | m (langs boorgat)<br>en m (TVD) |
| Dikte aquifer  |        | m (TVT)                         |
| Netto/bruto aquifer  |        | %                               |
| Gemiddelde porositeit aquifer                                |        | %                               |
| Zoutgehalte formatiewater (TDS = total dissolved solids)     |        | ppm                             |
| Gestabiliseerde temperatuur geproduceerde water <sup>1</sup> |        | °C                              |
| Diameter boorgat bij aquifer                                 |        | inch                            |
| Top productie-interval/filter                                |        | m (langs boorgat)<br>en m (TVD) |
| Basis productie-interval/filter                              |        | m (langs boorgat)<br>en m (TVD) |
| Filter permeability /weerstand                               |        | Darcy of bar                    |
| Locatie pomp   |        | m (langs boorgat)<br>en m (TVD) |
| Locatie meetsonde voor druk                                  |        | m (langs boorgat)<br>en m (TVD) |

<sup>1</sup> Deze temperatuur wordt als gemiddelde aquifertemperatuur beschouwd

| Meetreeks Put Deviatie <sup>2</sup> | Diepte (mAH), diepte (m TVD), inclinatie, azimuth, dX , dY |                         |                               |                             |                           |
|-------------------------------------|--|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Schema verbuizing <sup>3</sup>      | Sectie   | Einddiepte sectie (mAH) | Uitstap einddiepte sectie (m) | Binnen diameter buis (inch) | Ruwheid buis (milli inch) |
|                                     | 1:<br>2:<br>3:<br>Etc:<br><br>Filterbuis                   |                         |                               |                             |                           |

<sup>2</sup> In een apart document of bijlage

<sup>3</sup> Inclusief een schema van het boorgat met verbuizing en pomp-locatie als bijlage

| Clean up gegevens                              |  |                                  |
|--|--|----------------------------------|
| Pompdruk                                       |  | bar                              |
| Debiet vs. tijd                                |  | m <sup>3</sup> /uur              |
| Duur   |  | uur                              |
| Indicatie hoeveelheid meegeproduceerde 'fines' |  | Eindwaarde,<br>Semi-kwantitatief |

| Meetreeksen Puttest <sup>4</sup> |                              |  |
|----------------------------------|------------------------------|--|
| Stap                             | Eind/stabiele Pompdruk (Bar) | Eind/stabiele Debiet (m <sup>3</sup> /uur) |
| 1                                |                              |  |
| 2                                |                              |  |
| 3                                |                              |  |

<sup>4</sup> In deze tabel kunnen het debiet en druk verschil worden opgegeven van de verschillende stappen. De totale meetreeksen van de test (druk, temperatuur en debiet) dienen in een aparte bijlage (lieftst digitaal) te worden aangeleverd

| Uitkomsten test interpretatie en analyses               |  |                         |
|---|--|-------------------------|
| Skin  |  | -                       |
| kH  |  | Dm (darcy-meter)        |
| Aangenomen H  |  | m (AH)                  |
| k   |  | mD                      |
| Productiviteitsindex (PI)                               |  | m <sup>3</sup> /uur/bar |
| Verticale anisotropie (k <sub>n</sub> /k <sub>v</sub> ) |  | -                       |

| Conclusie gerealiseerd vermogen op basis van DoubletCalc invoer <sup>5</sup> |  |                     |
|--|--|---------------------|
| Injectietemperatuur conform verzekerings-scenario                            |  | °C                  |
| Opgelegde pompdruk conform verzekerings-scenario                             |  | bar                 |
| Debiet Q   |  | (m <sup>3</sup> /s) |
| Gerealiseerd vermogen P <sup>6</sup>   |  | MW                  |

<sup>5</sup> zie uitvoerscherm DoubletCalc - Geotechnics – base case. Het uitvoerscherm van de realisatiecase in DoubletCalc dient bijgevoegd te worden.

<sup>6</sup> Dit is de "median value", het vermogen dat op het uitvoerscherm is te vinden onder het kopje "base case (median input values)".

Als bijlage wordt de onderbouwing van bovengenoemde parameters aangeleverd. Deze bestaat uit de rapportage van de interpretatie van de puttests en/of de doublettest en eventueel de rapportage van de petrofysica (bepaling porositeit / permeabiliteit) overeenkomstig de richtlijnen die in 'Specificaties geologisch onderzoek voor geothermie-projecten' zijn omschreven. Daarnaast worden de gerealiseerde geologische parameters als invoer gebruikt in een 'realisatiescenario' van DoubletCalc. Hierbij zijn de geologische gegevens ingevoerd conform de interpretaties van de puttest en van de boorgatdata. De installatieparameters volgen hierbij zoveel mogelijk die van de werkelijke situatie, tenzij deze aantoonbaar ongunstiger zijn dan die zijn opgegeven bij de acceptatie van de Garantiefaciliteit.

## Bijlage B Voorbeeld van de systematiek voor het berekenen van het geothermisch vermogen

TNO Doublet Calculator 1.4-Beta

number of simulation runs (-)  Calculate ! Open Scenario Save Scenario Exit Program

file: D:\program files\DoubletCalc14\example\_realisatie.xml

### Geotechnical input

#### A) Aquifer properties

| Property                        | min    | median | max    | Property                                   | value |
|---------------------------------|--------|--------|--------|--|-------|
| aquifer permeability (mD)       | 240    | 290    | 340    | aquifer kh/kv ratio (-)                    | 10    |
| aquifer net to gross (-)        | 0.61   | 0.62   | 0.63   | surface temperature (°C)                   | 10    |
| aquifer gross thickness (m)     | 164    | 165    | 166    | geothermal gradient (°C/m)                 | 0.030 |
| aquifer top at producer (m TVD) | 2077.0 | 2308   | 2539.0 | [ mid aquifer temperature producer (°C) ]  | 0     |
| aquifer top at injector (m TVD) | 2048.0 | 2275   | 2503.0 | [ mid aquifer pressure at producer (bar) ] | 0.0   |
| aquifer water salinity (ppm)    | 114000 | 115000 | 116000 | [ mid aquifer pressure at injector (bar) ] | 0.0   |

#### B) Doublet and pump properties

| Property                             | value |
|--------------------------------------|-------|
| exit temperature heat exchanger (°C) | 30    |
| distance wells at aquifer level (m)  | 1460  |
| pump system efficiency (-)           | 0.7   |
| production pump depth (m)            | 500   |
| pump pressure difference (bar)       | 110   |

#### C) Well properties

segment length (m)

| Producer                            |                                  |                                |                                |                                 | Injector                            |                                  |                                |                                |                                 |
|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| outer diameter producer (inch)      | 6.125                            |                                |                                |                                 | outer diameter injector (inch)      | 6.125                            |                                |                                |                                 |
| skin producer (-)                   | 0                                |                                |                                |                                 | skin injector (-)                   | 0                                |                                |                                |                                 |
| penetration angle producer (deg)    | 45                               |                                |                                |                                 | penetration angle injector (deg)    | 45                               |                                |                                |                                 |
| skin due to penetration angle p (-) | -0.34                            |                                |                                |                                 | skin due to penetration angle i (-) | -0.34                            |                                |                                |                                 |
| Segment                             | tubing segment sections p (m AH) | tubing segment depth p (m TVD) | tubing inner diameter p (inch) | tubing roughness p (milli-inch) | Segment                             | tubing segment sections i (m AH) | tubing segment depth i (m TVD) | tubing inner diameter i (inch) | tubing roughness i (milli-inch) |
| 1                                   | 500                              | 500                            | 5                              | 1.2                             | 1                                   | 50                               | 50                             | 5                              | 1.2                             |
| 2                                   | 1054                             | 1054                           | 8.5                            | 1.2                             | 2                                   | 1054                             | 1054                           | 8.7                            | 1.2                             |
| 3                                   | 1930                             | 1833                           | 6.3                            | 1.2                             | 3                                   | 1930                             | 1833                           | 6.3                            | 1.2                             |
| 4                                   | 2482                             | 2308                           | 4.1                            | 1.2                             | 4                                   | 2454                             | 2275                           | 4.1                            | 1.2                             |
| 5                                   |                                  |                                |                                |                                 | 5                                   |                                  |                                |                                |                                 |
| 6                                   |                                  |                                |                                |                                 | 6                                   |                                  |                                |                                |                                 |
| 7                                   |                                  |                                |                                |                                 | 7                                   |                                  |                                |                                |                                 |
| 8                                   |                                  |                                |                                |                                 | 8                                   |                                  |                                |                                |                                 |

[ ] optional

Invoerscherm van DoubletCalc waarbij de **gerealiseerde geologische parameters** zijn ingevuld. De installatieparameters zijn identiek aan de voorgestelde installatiespecificaties. Het gerealiseerde Garantiefondsvermogen is in het outputscherf hieronder af te lezen in de kolom 'base case (median value inputs)' (10.89 MW).

| TNO Doublet Calculator 1.4 Result Table                            |                            |          |          |   |        |       |       |
|--|----------------------------|----------|----------|---|--------|-------|-------|
| probabilistic plots <b>fingerprinting</b> export base case details |                            |          |          |   |        |       |       |
| Geotechnics (Input)  |                            |          |          | Geotechnics (Output)                    |        |       |       |
| Property   | min                        | median   | max      | Monte Carlo cases (stochastic inputs)   | P90    | P50   | P10   |
| aquifer permeability (mD)  | 240.0                      | 290.0    | 340.0    | aquifer KH net (Dm)                     | 26.89  | 29.66 | 32.52 |
| aquifer net to gross (-)   | 0.61                       | 0.62     | 0.63     | mass flow (kg/s)                        | 56.88  | 59.16 | 61.43 |
| aquifer gross thickness (m)  | 164.0                      | 165.0    | 166.0    | pump volume flow (m <sup>3</sup> /h)    | 193.9  | 201.6 | 209.0 |
| aquifer top at producer (m TVD)                                    | 2077.0                     | 2308.0   | 2539.0   | required pump power (kW)                | 846.5  | 879.8 | 912.1 |
| aquifer top at injector (m TVD)                                    | 2048.0                     | 2275.0   | 2503.0   | geothermal power (MW)                   | 10.23  | 10.9  | 11.53 |
| aquifer water salinity (ppm)                                       | 114000.0                   | 115000.0 | 116000.0 | COP (kW/kW)                             | 11.5   | 12.4  | 13.3  |
| Property   | value                      |          |          | base case (median value inputs)         | value  |       |       |
| number of simulation runs (-)                                      | 1000.0                     |          |          | aquifer KH net (Dm)                     | 29.67  |       |       |
| aquifer kh/kv ratio (-)  | 10.0                       |          |          | mass flow (kg/s)                        | 59.1   |       |       |
| surface temperature (°C)   | 10.0                       |          |          | pump volume flow (m <sup>3</sup> /h)    | 201.3  |       |       |
| geothermal gradient (°C/m)   | 0.03                       |          |          | required pump power (kW)                | 878.5  |       |       |
| [mid aquifer temperature producer (°C)]                            | 0.0                        |          |          | geothermal power (MW)                   | 10.89  |       |       |
| [mid aquifer pressure at producer (bar)]                           | 0.0                        |          |          | COP (kW/kW)                             | 12.4   |       |       |
| [mid aquifer pressure at injector (bar)]                           | 0.0                        |          |          |   |        |       |       |
| exit temperature heat exchanger (°C)                               | 30.0                       |          |          | Aquifer Pressure at producer (bar) *    | 261.7  |       |       |
| distance wells at aquifer level (m)                                | 1460.0                     |          |          | Aquifer Pressure at Injector (bar) *    | 261.64 |       |       |
| pump system efficiency (-)   | 0.7                        |          |          | Pressure difference at producer (bar) * | 15.55  |       |       |
| production pump depth (m)  | 500.0                      |          |          | Pressure difference at injector (bar) * | 28.76  |       |       |
| pump pressure difference (bar)                                     | 110.0                      |          |          | Aquifer temperature at producer (°C) *  | 81.71  |       |       |
| outer diameter producer (inch)                                     | 6.13                       |          |          | Temperature at heat exchanger (°C)      | 80.09  |       |       |
| skin producer (-)  | 0.0                        |          |          |   |        |       |       |
| skin due to penetration angle p (-)                                | -0.34                      |          |          |   |        |       |       |
| tubing segment sections p (m AH)                                   | 500.0,1054.0,1930.0,2482.0 |          |          |   |        |       |       |
| tubing segment depth p (m TVD)                                     | 500.0,1054.0,1833.0,2308.0 |          |          |   |        |       |       |
| tubing inner diameter p (inch)                                     | 5.0,8.5,6.3,4.1            |          |          |   |        |       |       |
| 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 (-)                                | -0.34                      |          |          |   |        |       |       |
| tubing segment sections i (m AH)                                   | 50.0,1054.0,1930.0,2454.0  |          |          |   |        |       |       |
| tubing segment depth i (m TVD)                                     | 50.0,1054.0,1833.0,2275.0  |          |          |   |        |       |       |
| tubing inner diameter i (inch)                                     | 5.0,8.7,6.3,4.1            |          |          |   |        |       |       |
| tubing roughness i (milli-inch)                                    | 1.2,1.2,1.2,1.2            |          |          |   |        |       |       |

\* @ mid aquifer depth

Uitvoerscherm van DoubletCalc met de niet-geologische parameters van het verzekeringsscenario bij de acceptatie Garantiefaciliteit.