64094/1

Vlaamse Regering

CONSEIL D'ETAT
LEGISLATION
26 -07- 2018
RAAD VAN STATE
WETGEVING

Ministerieel besluit houdende vaststelling van de richtlijnen en modellen in het kader van de waarborgregeling voor het opsporen en winnen van aardwarmte in de diepe ondergrond

DE VLAAMSE MINISTER VAN BEGROTING, FINANCIËN EN ENERGIE
EN DE VLAAMSE MINISTER VAN OMGEVING, NATUUR EN LANDBOUW,

Gelet op het decreet van 8 mei 2009 betreffende de diepe ondergrond, artikel 63/25/1 tot en met 63/25/5, ingevoegd bij het decreet van 2 maart 2018;

Gelet op het besluit van de Vlaamse Regering van 15 juli 2011 tot uitvoering van het decreet van 8 mei 2009 betreffende de diepe ondergrond en tot wijziging van diverse besluiten, artikel 14/39/25, ingevoegd bij het besluit van de Vlaamse Regering van 20 april 2018;

Gelet op het besluit van de Vlaamse Regering van 25 juli 2014 tot bepaling van de bevoegdheden van de leden van de Vlaamse Regering, het laatst gewijzigd bij het besluit van de Vlaamse Regering van 23 maart 2018;

Gelet op het advies van de Inspectie van Financiën, gegeven op 2 juli 2018;

BESLUITEN:

Artikel 1. De richtlijnen voor het opstellen van het Geologisch Onderzoek worden vastgesteld in bijlage 1, gevoegd bij dit besluit.

Art. 2. De richtlijnen voor het uitvoeren en interpreteren van een puttest worden vastgesteld in bijlage 2, gevoegd bij dit besluit.

Art. 3. Het model Geologisch Onderzoek wordt vastgesteld in bijlage 3, gevoegd bij dit besluit.

Art. 4. Het model puttestrapportage wordt vastgesteld in bijlage 4, gevoegd bij dit besluit.

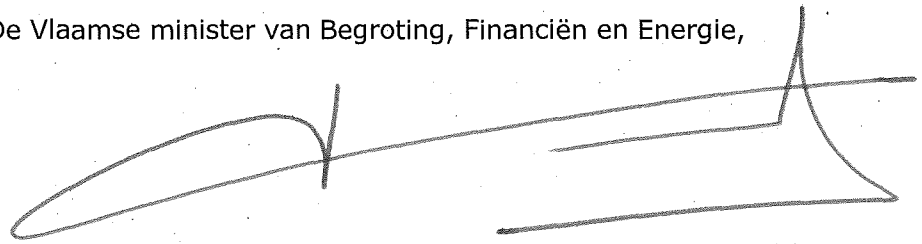
Art. 5. Het model projectplan wordt vastgesteld in bijlage 5, gevoegd bij dit besluit.

Art. 6. Het model eindrapportage wordt vastgesteld in bijlage 6, gevoegd bij dit besluit.

Art. 7. De richtlijnen en modellen kunnen geraadpleegd en gedownload worden op de website van het Departement Omgeving: link nog aan te vullen.

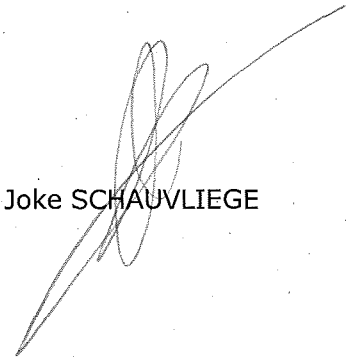
Brussel, ... (datum).

De Vlaamse minister van Begroting, Financiën en Energie,



Bart TOMMELEIN

De Vlaamse minister van Omgeving, Natuur en Landbouw,



Joke SCHAUVLIEGE

Bijlage 1. Richtlijnen voor het opstellen van het Geologisch Onderzoek

De richtlijnen voor het opstellen van het Geologisch Onderzoek, vermeld in artikel 1 van het ministerieel besluit van (datum) houdende vaststelling van de richtlijnen en modellen in het kader van de waarborgregeling voor het opsporen en winnen van aardwarmte in de diepe ondergrond, worden vastgesteld als volgt:

Richtlijnen voor het opstellen van het Geologisch Onderzoek

Deze richtlijn is gebaseerd op het TNO-rapport TNO 2017-R10498 "Specificaties geologisch onderzoek voor geothermieprojecten – Rapportagevereisten SDE+ en RNES", gepubliceerd op 18 april 2017 door H.F. Mijnlieff, B.M.M. van Kempen, J. van der Molen en J.G. Veldkamp, in opdracht van het Nederlandse Ministerie van Economische Zaken. Het Vlaamse Gewest maakt gebruik van de inhoudelijke bepalingen uit voorgaande publicatie met toestemming van TNO. De inhoud van voorliggend document is niet identiek aan het geciteerde werk, maar werd, waar nodig, aangepast in functie van de Vlaamse context.

Samenvatting

Dit rapport geeft richtlijnen bij het "Model Geologisch Onderzoek" voor de waarborgregeling voor het opsporen en winnen van aardwarmte in de diepe ondergrond. Het geeft aan waar de geologische onderbouwing van de aanvraag **minimaal** aan moet voldoen om mogelijk aanspraak te kunnen maken op steun voor toekomstig geïnstalleerd geothermisch vermogen.

In de onderbouwing worden achtereenvolgens beschreven:

- Samenvatting van het geplande doublet
- Beoogde boorlocatie
- Beschrijving van de aanvraag
- Geologische setting
- Gebruikte gegevens
- Seismische interpretatie
- Karakterisering van de aquifer
- Formatiewaterkarakterisering
- Doubletbeschrijving

De geologische onderbouwing dient de indeling van dit rapport te volgen. Daar waar de in dit rapport genoemde beschrijvingen niet relevant zijn voor het uitgevoerde onderzoek wordt dat als zodanig vermeld.

Inhoud

Inhoudsopgave
Samenvatting 2
Inhoud 3
Inleiding 5
1. Samenvatting van het geplande doublet 6
1.1 Gepland doublet en gebruikte parameters 6
1.2 Verwacht vermogen en de overschrijdingskansgrafiek 6
2. Beoogde locatie en putten 10
2.1 Beoogde locatie 10
2.2 Putten 10
3. Aanvraag voor de waarborgregeling 11
3.1 Putten 11
4. Geologische setting 12
4.1 Lokale geologie 12
4.2 Koolwaterstofvoorkomens in de nabijheid van het project 12
5. Beschikbare en gebruikte putten en seismische data 13
5.1 Keuze van de referentieputten en putinformatie 13
5.2 Seismische gegevens 13
5.3 Coördinaatsysteem 14
6. Seismische interpretatie en dieptemodel 15
6.1 Methodebeschrijving 15
6.2 Additionele gegevens 15
6.3 Well to seismic ties 15
6.4 Seismische interpretatie 15
6.5 Gridding algoritme 16
6.6 Tijd-diepte conversie 16
6.7 Dieptekaart van top/basis aquifer 17
6.8 Discussie omtrent onzekerheid van de top-/basis-aquiferkaart 17
7. Model en karakterisering van de aquifer 18
7.1 Stratigrafische correlatie en laterale diktevariatie van de aquifer 18
7.2 Petrofysische evaluatie 19
7.3 Puttestevaluatie 23
7.4 Evaluatie van productiedata 24
7.5 Permeabiliteit uit publieke informatie 24
7.6 Bepaling aquifereigenschappen voor de projectlocatie 24
7.7 Anisotropie 26
7.8 Resultaten en discussie over onzekerheid 27
8. Formatiewaterkarakterisering 29

8.1 Temperatuur 29
8.2 Evaluatie van het formatiewater 29
9. Doublet performance 32
9.1 Doubletconfiguratie in de ondergrond 32
9.2 Putarchitectuur 33
9.3 Operationele instellingen 33
9.4 Indicatie en evaluatie van aandachtspunten bij boren. 34
9.5 Indicatie en evaluatie van aandachtspunten bij productie en injectie. 34
10. Referenties 35
Bijlage 1. Gedetailleerde lijst van gebruikte gegevens 36
Bijlage 2. Resultaten en details van de petrofysische evaluatie en formatiewateranalyse 37
Bijlage 3. Lijst van uitgevoerde puttesten, details en resultaten van de evaluatie 39
Bijlage 4. Lijst van productiedata, details en resultaten van de evaluatie 40
Bijlage 5. Kaarten die gebruikt zijn tijdens de evaluatie van de ondergrond 41
Bijlage 6. Putontwerp 42

Inleiding

Dit rapport bevat de richtlijnen voor de geologische onderbouwing van een aanvraag onder de waarborgregeling voor het opsporen en winnen van aardwarmte in de diepe ondergrond van Vlaanderen. Hierbij worden ook de rapportagevereisten en de berekeningswijze van het indicatieve geothermisch vermogen uiteengezet.

Het indicatieve geothermisch vermogen dat wordt aangevraagd voor steun **moet** worden berekend met behulp van het softwareprogramma **DoubletCalc1.4.3**. De specificaties en gebruikershandleiding van dit programma zijn te vinden in de 'Handleiding DoubletCalc 1.4.3' (Mijnlieff et al., 2014). Dit document alsmede het softwareprogramma zijn beschikbaar op de website van het Departement Omgeving (XXX).

Het voorliggende rapport is een leidraad die aangeeft waar de geologische onderbouwing van de aanvraag minimaal aan moet voldoen. Het uitgangspunt is de gedachte dat deze onderbouwing gebaseerd is op dezelfde geologische evaluatie, die ten grondslag ligt aan het boorplan en gebruikt voor de eigen *businesscase* die toch al opgesteld zou moeten worden bij uitvoering van een geothermieproject. Indien het project nog niet in dat stadium is, wordt de onderbouwing gevormd door een gedegen geologische inventarisatie van het gebied. Hierin worden de essentiële geologische parameters voor de berekening van het indicatieve geothermisch vermogen uitgebreid behandeld.

De aanvrager van de waarborgregeling wordt met klem gevraagd de **indeling van dit rapport te volgen**. Daar waar redundantie optreedt, bijvoorbeeld wanneer van verschillende mogelijke procedures er slechts één uitgevoerd hoeft te worden, kan hiervan uiteraard afgeweken worden. Als delen van de leidraad in het geheel niet relevant zijn voor het uitgevoerde onderzoek, bijvoorbeeld als geen seismische interpretatie is uitgevoerd (§ Seismische interpretatie6.4), kan worden volstaan met het kort noemen van de reden waarom dit onderdeel niet relevant is en welk alternatief is gebruikt.

In de waarborgregeling wordt het P90 geothermische vermogen verzekerd dat berekend is met behulp van DoubletCalc. Het niet gerealiseerde "verwacht (P90) vermogen" moet enkel en eenduidig gerelateerd kunnen worden aan tegenvallende aquifereigenschappen, te weten dikte, netto/bruto verhouding, (horizontale) permeabiliteit, anisotropie, temperatuur en/of saliniteit. Tegenvallend gerealiseerd vermogen ten gevolge van andere (niet-) geologische parameters, zoals putconfiguratie of geologische parameters zoals bijvoorbeeld anomale drukken of voorkomen van koolwaterstoffen (zowel vrij als in opgeloste vorm), worden niet meegenomen in het "afrekenscenario".

1. Samenvatting van het geplande doublet

1.1 Gepland doublet en gebruikte parameters

In de samenvatting moeten genoemd worden:

- De opsporings- of winningsvergunning voor aardwarmte waar het doublet in geplaatst wordt
- Locatie van het doublet
- Toepassing van het doublet
- Aard van de aanvraag:
  een heel doublet of een half doublet bij de waarborgregeling. Als het een aanvraag voor een half doublet betreft, moet gespecifieerd worden welke put voor de waarborgregeling wordt aangemeld
- Productief interval waaruit gewonnen gaat worden
- Korte beschrijving van de architectuur van het doublet
- De belangrijkste variabelen die het geothermisch vermogen beïnvloeden en de onzekerheden in deze variabelen
- De parameters die gebruikt zijn in de berekening van het indicatieve geothermisch vermogen. Deze parameters zijn nodig om een kansverdeling van het indicatieve geothermisch vermogen te maken. Dit dient te gebeuren door een *screenshot* van het invoerscherm van DoubletCalc1.4.3 bij te voegen (Figuur 1).

1.2 Verwacht vermogen en de overschrijdingskansgrafiek

Hier geeft u aan voor welk vermogen u aanspraak wilt maken op steun uit de waarborgregeling (het P90-vermogen). Voor de rapportage van het geothermisch vermogen voldoet een *screenshot* van de "DoubletCalc *result table*" samen met de overschrijdingskansgrafiek.

In het voorbeeld van Figuur 2 en Figuur 3 is het indicatieve vermogen bij een overschrijdingskans van 90% en ook 50% gegeven (het zogenaamde P90 vermogen 6.44 MW en het P50-vermogen van 8.3 MW bij het gegeven voorbeeld). Details zijn te vinden in onderstaande *screenshots* van de DoubletCalc1.4.3 simulatie. U moet in deze paragraaf uiteraard de voor uw eigen situatie relevante gegevens aanleveren:

- De DoubletCalc "*output table*"
- De overschrijdingskansgrafiek.

Doublet Calculator 1.4.3

number of simulation runs (-) 1000 | Calculate ! | Open Scenario | Save Scenario | Exit Program

file: ... entiele Adviezen Mijnbouw\Resource_Assessment_AARDWARMTE\DoubletCalc1D\DC_use\example.xml

Geotechnical input

A) Aquifer properties

Property	min	median	max
aquifer permeability (mD)	150	250	500
aquifer net to gross (-)	0.75	0.80	0.85
aquifer gross thickness (m)	95	105	115
aquifer top at producer (m TVD)	2255.0	2505	2756.0
aquifer top at injector (m TVD)	2221.0	2468	2715.0
aquifer water salinity (ppm)	100000	120000	140000

Property	value
aquifer kh/kv ratio (-)	1
surface temperature (°C)	10
geothermal gradient (°C/m)	0.031
[mid aquifer temperature producer (°C)]	0
[inital aquifer pressure at producer (bar)	0.0
[initial aquifer pressure at injector (bar)]	0.0

B) Doublet and pump properties

Property	value
exit temperature heat exchanger (°C)	35
distance wells at aquifer level (m)	1460
pump system efficiency (-)	0.61
production pump depth (m)	500
pump pressure difference (bar)	40

C) Well properties

calculation length subdivision (m) 50

Producer	
outer diameter producer (inch)	6.125
skin producer (-)	0
penetration angle producer (deg)	45
skin due to penetration angle p (-)	-0.97

Segment	pipe segment sections p (m AH)	pipe segment depth p (m TVD)	pipe inner diameter p (inch)	pipe roughness p (milli-inch)
1	500	500	5	1.2
2	1054	1054	12.375	1.2
3	1930	1833	8.625	1.2
4	2678	2505	6.625	1.2
5				
6				

Injector	
outer diameter injector (inch)	6.125
skin injector (-)	0
penetration angle injector (deg)	45
skin due to penetration angle i (-)	-0.97

Segment	pipe segment sections i (m AH)	pipe segment depth i (m TVD)	pipe inner diameter i (inch)	pipe roughness i (milli-inch)
1	50	50	5	1.2
2	1054	1054	12.375	1.2
3	1930	1833	8.625	1.2
4	2645	2468	6.625	1.2
5				
6				

Figuur 1: Invoerscherm DoubletCalc1.4.3. Witte velden moeten worden ingevuld, grijze worden berekend door de software. Variabelen tussen [ ] zijn optioneel. Invulvelden voorafgegaan door blauwe tekst kunnen door de gebruiker vrij worden gekozen.

Doublet Calculator 1.4.3 Result Table

probabilistic plots | fingerprinting | export base case details

file: ... entiele Adviezen Mijnbouw\Resource_Assessment_AARDWARMTE\DoubletCalc1D\DC_use\example.xml

Geotechnics (Input)

Property	min	median	max
aquifer permeability (mD)	150.0	250.0	500.0
aquifer net to gross (-)	0.75	0.8	0.85
aquifer gross thickness (m)	95.0	105.0	115.0
aquifer top at producer (m TVD)	2255.0	2505.0	2756.0
aquifer top at injector (m TVD)	2221.0	2468.0	2715.0
aquifer water salinity (ppm)	100000.0	120000.0	140000.0

Property	value
number of simulation runs (-)	1000.0
aquifer kh/kv ratio (-)	1.0
surface temperature (°C)	10.0
geothermal gradient (°C/m)	0.031
[mid aquifer temperature producer (°C)]	0.0
inital aquifer pressure at producer (bar)]	0.0
[initial aquifer pressure at injector (bar)]	0.0
exit temperature heat exchanger (°C)	35.0
distance wells at aquifer level (m)	1460.0
pump system efficiency (-)	0.61
production pump depth (m)	500.0
pump pressure difference (bar)	40.0
outer diameter producer (inch)	6.13
skin producer (-)	0.0
skin due to penetration angle p (-)	-0.97
pipe segment sections p (m AH)	500.0,1054.0,1930.0,2678.0
pipe segment depth p (m TVD)	500.0,1054.0,1833.0,2505.0
pipe inner diameter p (inch)	5.0,12.38,8.62,6.62
pipe 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
pipe segment sections i (m AH)	50.0,1054.0,1930.0,2645.0
pipe segment depth i (m TVD)	50.0,1054.0,1833.0,2468.0

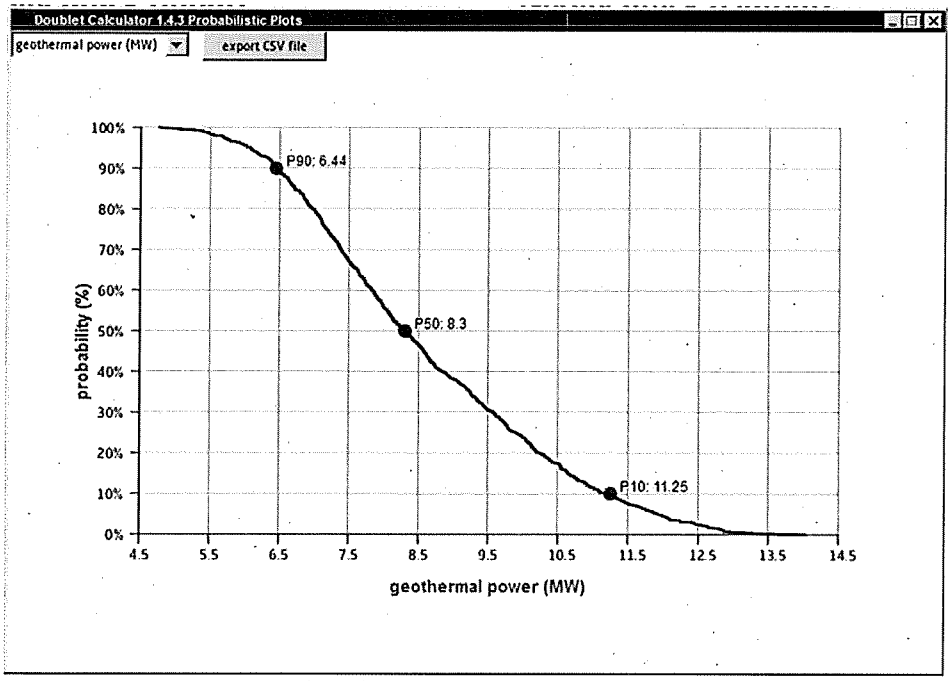
Geotechnics (Output)

Monte Carlo cases (stochastic inputs)	P90	P50	P10
aquifer kH net (Dm)	16.27	21.43	32.71
mass flow (kg/s)	35.22	43.71	58.03
pump volume flow (m³/h)	119.9	148.7	198.2
required pump power (kW)	218.4	270.9	361.1
geothermal power (MW)	6.44	8.3	11.25
COP (kW/kW)	28.1	30.5	32.8
aquifer pressure at producer (bar)	240.17	255.19	270.12
aquifer pressure at injector (bar)	237.08	251.11	265.7
pressure difference at producer (bar)	11.92	13.69	14.64
pressure difference at injector (bar)	22.42	25.62	27.32
aquifer temperature at producer * (°C)	84.98	89.28	93.55
temperature at heat exchanger (°C)	82.45	86.62	90.65

base case (median value inputs)	value
aquifer kH net (Dm)	21.0
mass flow (kg/s)	43.05
pump volume flow (m³/h)	146.6
required pump power (kW)	267.1
geothermal power (MW)	8.12
COP (kW/kW)	30.4
aquifer pressure at producer (bar)	255.08
aquifer pressure at injector (bar)	251.18
pressure difference at producer (bar)	13.78
pressure difference at injector (bar)	25.81
aquifer temperature at producer * (°C)	89.28
temperature at heat exchanger (°C)	86.51
pressure at heat exchanger (bar)	16.35

* @ mid aquifer depth

Figuur 2: Uitvoerscherm DoubletCalc1.4.3 van het project getoond in Figuur 1.



Figuur 3: De overschrijdingskansgrafiek in de uitvoer van DoubletCalc: het geothermisch vermogen tegen de overschrijdingskans. Bijvoorbeeld: de kans is 50% dat het geothermisch vermogen groter is dan 8.33 MW en 10% dat het geothermisch vermogen groter is dan 11.25 MW.

2. Beoogde locatie en putten

In dit hoofdstuk worden de opsporings- of winningsvergunning voor aardwarmte waarbinnen het doublet valt, de locatie en de toepassing van het doublet behandeld.

2.1 Beoogde locatie

In deze paragraaf wordt opgesomd in welke opsporings- of winningsvergunning voor aardwarmte (naam en dieptebereik) en gemeente de projectlocatie zich bevindt, met referentie naar het Belgisch Staatsblad waar de toekenning van de vergunning is gepubliceerd.

2.2 Putten

In deze paragraaf worden de putten opgesomd die deel gaan uitmaken van het doublet of aardwarmteproject. De namen van de putten worden opgegeven en er wordt ook vermeld welke put beoogd wordt de injectieput te zijn en welke de productieput.

In de figuur (Figuur 4) die u hier opneemt moeten minimaal de volgende punten te zien zijn:

- de begrenzing en de naam van de opsporings- of winningsvergunning voor aardwarmte,
- de locatie van het project,
- de beoogde oppervlakte- en TD-locaties (eindpunt boring), inclusief het voorziene boortraject van de te boren putten en/of van reeds bestaande putten die onderdeel gaan uitmaken van het aardwarmtesysteem, geannoteerd met naam en functie, topografische elementen zoals gemeentegrenzen, waterlopen, stedelijke begrenzingen etc.

Figuur 4 moet tevens voorzien zijn van een duidelijke legende, schaalbalk, noordpijl en referentiecoördinaten langs de rand van de kaart. Deze cartografievereisten gelden voor alle kaarten in de rapportage.

Figuur 4: Hier voegt u een figuur toe "Locatie van het aardwarmteproject" zoals voorgeschreven in sectie 2.2.

3. Aanvraag voor de waarborgregeling

In deze paragraaf wordt gespecificeerd waarvoor er met de waarborgregeling steun wordt aangevraagd. De aanvraag kan bestaan uit:

- een heel doublet of;
- een "half doublet". Dit kan de eerste, de tweede of een vervolgput zijn, waarbij een vervolgput als een vervangings- of extra capaciteitsput op een bestaand operationeel aardwarmteproductiesysteem wordt beschouwd.

In het geval van een "half doublet" dient nader gespecificeerd te worden of het bestaat uit:

- enkel de eerste te boren put van het doublet (half doublet – eerste put) of;
- enkel de tweede put van het doublet (half doublet – tweede put). De tweede put dient ter vervollediging van het doublet. Van dit doublet is de 'eerste' put reeds gerealiseerd als:
  - een verlaten (exploratie)put;
  - een reeds bestaande aardwarmteput.
- enkel een vervolgput in een bestaand aardwarmteproductiesysteem. Hiervan zijn de eerste en tweede put reeds gerealiseerd als doublet van een reeds bestaand aardwarmteproductiesysteem dat operationeel is, of is geweest. De vervolgput dient ter:
  - vervanging van een verstopte dan wel anderszins niet meer operationele injectie- of productieput of;
  - uitbreiding van het doublet of aardwarmteproductiesysteem voor het realiseren van extra capaciteit.

3.1 Putten

Indien de "eerste put" van het aardwarmteproductiesysteem reeds is geboord als: een verlaten exploratieboring (vb. koolwaterstofexploratieboring met als resultaat 'droog' (op het geothermische doelniveau)), een verlaten productieput (vb. gebruikt voor seizoenale gasopslag), of een bestaande aardwarmteboring van het beoogde aardwarmteproductiesysteem, dan meldt u in deze paragraaf: de naam van deze put(ten). In paragraaf 5.1 geeft u een beschrijving van de geschiedenis van en beschikbare gegevens uit deze put(ten).

Gegevens en analyse van gegevens uit deze put(ten) zijn essentieel voor de inschatting van het geothermisch vermogen van het doublet. Deze gegevens en analyseresultaten dienen dan ook onderdeel te zijn van de geologische onderbouwing die in de navolgende hoofdstukken wordt gegeven. Relevante gegevens en analyseresultaten moeten worden toegevoegd als **bijlage** bij dit rapport.

Let op: gezien het belang van de resultaten van de eerste put voor de verwachte resultaten van de tweede put of vervolgput is een **uitgebreide presentatie van de putresultaten** essentieel.

4. Geologische setting

4.1 Lokale geologie

De aan te boren aquifer en de laagpakketten boven die aquifer worden hier lithostratigrafisch beschreven. Eventuele hiaten in de stratigrafie moeten meegenomen worden in de beschrijving. De geologische opeenvolging/stratigrafie van maaiveld tot en met de aquifer wordt geïllustreerd aan de hand van één of meerdere referentieputten en de keuze van de referentieput(ten) moet onderbouwd worden. De begravingsgeschiedenis van de projectlocatie op basis van de referentieput moet behandeld worden. Bij de beschrijving van de aquifer dienen naast de lithostratigrafie ook de lithologie, het afzettingsmilieu, en de laterale uitgebreidheid besproken te worden.

Minimaal dienen hier referenties gebruikt te worden uit publiek materiaal zoals bijvoorbeeld Databank Ondergrond Vlaanderen (dov; https://dov.vlaanderen.be/), wetenschappelijke publicaties, geologische kaartbladen, professional papers en publiek beschikbare rapporten. De beschrijving van de gesteenteopeenvolging vormt de basis voor de uiteindelijke detailuitwerking in het boorprogramma, waar de operationele en geologische gevaren van het doorboren van de gesteentelagen worden geïdentificeerd en beschreven.

Figuur 5: Hier plaatst u een kaart met de locatie van het aardwarmteproject/opsporings- of winningsvergunning voor aardwarmte ten opzichte van de bekende structureel geologische elementen (breuken, flexuren..).

Figuur 6: Hier plaatst u een figuur met een (schematische) dwarsdoorsnede door het projectgebied (loodrecht op de structurele geologische trend / belangrijkste breuktrend) met aanduiding van de beoogde en bestaande putten.

Figuur 7: Hier plaatst u een figuur die de stratigrafie op de projectlocatie weergeeft.

4.2 Koolwaterstofvoorkomens in de nabijheid van het project

In deze paragraaf dient het risico op het voorkomen van koolwaterstoffen in de ruime omgeving van de projectlocatie geïnventariseerd te worden. Bij de beschrijving van de aard van de koolwaterstoffen (olie/gas, vrij/sporen) dient ook het reservoir of de aquifer genoemd te worden waarin deze zich zouden bevinden (inclusief het voorkomen van z.g. "*shallow gas*"). Het aantreffen van koolwaterstoffen wordt niet als een geologisch risico aangemerkt in de waarborgregeling.

5. Beschikbare en gebruikte putten en seismische data

In dit hoofdstuk wordt beschreven welke boringen en seismische data zijn gebruikt.

5.1 Keuze van de referentieputten en putinformatie

In deze paragraaf wordt beschreven welke boringen zijn gebruikt voor de seismische interpretatie (Hoofdstuk 6), de petrofysische evaluatie (Hoofdstuk 7) en de waterevaluatie (Hoofdstuk 8). Ook wordt beschreven welke boringen zijn genegeerd en om welke reden dit is gebeurd. Daarnaast wordt een beoordeling gegeven van de relevantie van de putten voor dit project en een oordeel over de kwaliteit van de putgegevens. Voor verschillende toepassingen kunnen verschillende subsets van de totale verzameling beschikbare boringen zijn gebruikt (bijvoorbeeld subset A voor seismische interpretatie, subset B voor petrofysica).

De locatie van al deze gegevens wordt op een kaart weergegeven (Figuur 8). Hierop zijn ook belangrijke topografische gegevens (zoals steden, dorpen, hoofdwegen en rivieren) afgebeeld, evenals de begrenzing van de opsporings- of winningsvergunning voor aardwarmte waarbinnen het project wordt uitgevoerd. Voor detailinformatie van de gebruikte gegevens verwijst u naar **Bijlage(n) 1 (en 2).**

Indien ook of enkel gebruik is gemaakt van publiek beschikbare putgegevens moet dit eenduidig gerefereerd worden.

Indien de waarborgaanvraag een 'half doublet', tweede of vervolgput betreft, is de 'eerste' put of zijn eerdere putten per definitie de belangrijkste referentieput(ten). In alle analyses, onder meer seismische, petrofysische en geologische analyses moeten die putten een centrale plaats innemen.

Indien één of meerdere putten van het toekomstige aardwarmteproductiesysteem reeds zijn geboord als een verlaten exploratie- of productieput (zie Hoofdstuk 3) dan meldt u in deze paragraaf: de naam van deze put(ten), met een beschrijving van de geschiedenis van en beschikbare gegevens uit deze put(ten).

Gegevens en analyses van gegevens uit deze bestaande put(ten) zijn essentieel voor de inschatting van het geothermisch vermogen van het doublet omdat ze de meest relevante referentieputten zijn. Deze gegevens en analyseresultaten dienen dan ook onderdeel te zijn van de geologische onderbouwing die in de navolgende hoofdstukken wordt gegeven. Relevante gegevens en analyseresultaten moeten worden toegevoegd als **bijlage** bij dit rapport.

5.2 Seismische gegevens

De naam en/of code(s) van de seismische *survey(s)* (evt. welk deel ervan) en de bedekkingsgraad van de geïnterpreteerde seismische lijnen over het aangevraagde gebied worden opgesomd en geïllustreerd op een kaart (Figuur 8). De opsomming van de essentiële metadata van de seismiek omvat onder meer formaat, polariteit, fase, *line spacing* en/of het de versie betreft die in het publieke domein verkrijgbaar is of dat het een recentere *reprocessing* betreft.

Voor een uitgebreide opsomming van de gebruikte seismische lijnen en/of *surveys* en de bijbehorende metadata verwijst u naar **Bijlage 1**.

Indien ook of enkel gebruik is gemaakt van publiek beschikbaar kaartmateriaal moet dit hier gerefereerd worden. Indien eerder seismisch interpretatiewerk gedaan is in dit gebied wordt verwezen naar eerdere rapporten.

Figuur 8: Gebruikte gegevens: locatie van gebruikte putten, niet gebruikte putten, gebruikte seismische data en kaartmateriaal.

5.3 Coördinaatsysteem

Het coördinaatsysteem is **Lambert 72**.

Indien relevant geeft u hier een beschrijving van de gebruikte methode om data die in een ander coördinatensysteem is aangeleverd te converteren naar het gebruikte Lambert 72 systeem. Bijvoorbeeld*: het gebruikte systeem is Lambert 72. Gegevens aangeleverd in WGS84, UTM31, ED50 zijn naar dit systeem geconverteerd met behulp van* etc. Op alle gepresenteerde kaarten in dit rapport dient het geografische referentiegrid in het kader van de kaart te worden gepresenteerd.

6. Seismische interpretatie en dieptemodel

De kaart die de diepte van de top van de aquifer weergeeft dient in volgorde van afnemende voorkeur gebaseerd te zijn op:

1. een zo recent mogelijke (eventueel nog niet publieke) 3D-seismische *survey* (indien beschikbaar voor de aanvrager);
2. een recente *reprocessing* van een (eventueel nog niet publieke) 3D-*survey* (indien beschikbaar voor de aanvrager);
3. een relevante 3D-seismische bedekking van het vergunde gebied van de meest recente publiek beschikbare 3D-*survey*;
4. Indien geen 3D-seismiek beschikbaar is dan worden alle relevante, publieke 2D-seismische lijnen gebruikt die het gebied kruisen of in de nabijheid van het gebied liggen, op zodanige wijze dat het gebied zo goed mogelijk bedekt wordt en omsloten is met seismische lijnen. Eventueel worden deze aangevuld met lijnen uit niet-publieke bron;
5. Eerder locatie-specifiek seismisch interpretatiewerk uitgevoerd door de aanvrager of derden;
6. Indien geen van bovenstaande aanwezig zijn kan teruggevallen worden op publieke kaarten uit bijvoorbeeld Databank Ondergrond Vlaanderen (https://dov.vlaanderen.be/), gepubliceerde data en rapporten en geologische kaarten.

Relevant betekent hierin onder meer dat de beoogde aquiferdiepte uit seismiek en kaarten kan worden afgeleid.

6.1 Methodebeschrijving

Gebruikte software, en in geval van 3D seismische interpretatie om de hoeveel *in-lines / cross-lines* geïnterpreteerd is. Ook de reden waarom sommige lijnen niet of juist wel gebruikt zijn dient opgegeven te worden.

6.2 Additionele gegevens

Opsomming van bestaande interpretaties ter referentie.

6.3 Well to seismic ties

Opsomming van de namen van de relevante putten die gebruikt zijn om de seismische reflectoren aan de laagpakketten te correleren en de diepte te kalibreren. Indien die relevante referentieputten buiten de opsporings- of winningsvergunning voor aardwarmte liggen, dient getracht te worden de informatie via een seismische lijn naar het projectgebied te brengen. In het geval van een aanvraag 'half doublet – 'tweede put dan wel vervolgput', en indien de opgenomen data dit toestaat, dient de 'eerste' put dan wel het bestaande doublet eenduidig onderdeel te zijn van de "*well to seismic*" analyse. Een korte beschrijving van het seismische karakter van de relevante reflectoren wordt hier gegeven, bij voorkeur geïllustreerd met een figuur.

Figuur 9: "well to seismic tie" van put X.

6.4 Seismische interpretatie

Een korte beschrijving van de kwaliteit van de seismiek en de definitie van de belangrijke geologische laagvlakken als seismische horizonten. Ook wordt de

methode van het interpreteren van de gekarteerde horizonten opgegeven: handmatig 'ge-*picked*', gedeeltelijk 'ge-*autotracked*' etc. Er wordt opgelijst welke horizonten zijn geïnterpreteerd en waarom. De resolutie van de seismiek wordt gerelateerd met de verwachte dikte van de aquifer, zodat duidelijk is hoe de seismiek gebruikt kan worden in de aquiferdefinitie (distributie, dikte, seismische facies, (relatieve) indicatieve porositeit). Relateer dit ook aan de cumulatieve datadichtheid (aantal lijnen per kilometer) van de seismische *surveys* (2D-3D) en de breukdichtheid.

In een tabel, zoals in Tabel 1, worden bovenstaande gegevens eenduidig samengevat.

Geïnterpreteerde horizon	Lithostratigrafische code van	karakter	kwaliteit	Interpretatie methodiek
Basis Krijt	K		Uitsteken d	*autotrack*
Top Dinantiaan				

Tabel 1: Voorbeeld van gegevens met betrekking tot de gekarteerde seismische reflectoren, aan te vullen met alle relevante informatie m.b.t. genoemde horizonten.

6.5 Gridding algoritme

De methode die gebruikt is om het tijdgrid te maken, met opsomming van de tijdgrids die gemaakt zijn. Er dient in de *contouring / gridding* rekening gehouden te worden met breuken. Geïnterpreteerde en afgeleide tijdgrids worden getoond in **Bijlage 5**.

6.6 Tijd-diepte conversie

De methode- en parameterbeschrijving (bijvoorbeeld de V_0 en k of intervalsnelheid) van de tijd-diepte conversie, waarbij rekening is gehouden met de lokale geologische opbouw. De parameters worden in een tabel gegeven (Tabel 2). Er wordt ook een korte argumentatie voor de gekozen methode gegeven. Als er andere methodes zijn gebruikt waarbij andere parameters relevant zijn, moeten die worden opgegeven en toegelicht.

Laagpakket / eenheid	Base horizon	Model	V0	k
Dinantiaan	Basis Dinantiaan	V0k		

Tabel 2: V_0 en k parameters of V_{int}.

In het proces om van het tijddomein naar het dieptedomein te komen dienen de verschillen tussen gekarteerde horizon en putdiepten geanalyseerd te worden. Deze zogenaamde residuen geven inzicht in de kwaliteit van het toegepaste snelheidsmodel: het streven is om bij elke put een residu van zo dicht mogelijk bij de 0 te krijgen (zonder '*well-tie*') alvorens het dieptegrid aan de putten aan te passen (*tie to wells*). De residuenkaart en tabel van het gebruikte snelheidsmodel en de referentieputten op relevante horizons dienen in de **bijlage** toegevoegd te worden. Indien de putten alleen boringen zijn die aantoonbaar behoren tot een aselecte distributie, doordat ze bijvoorbeeld enkel op structurele hogen /

horstblokken zijn gesitueerd, dient het risico op een afwijkend snelheidsprofiel in de slenken / de laag gelegen delen te worden beargumenteerd.

6.7 Dieptekaart van top/basis aquifer

Een korte beschrijving van de top/basis aquiferkaart refererend naar de kaart (Figuur 10 en Figuur 11). Als de top of de basis van de aquifer niet direct uit de seismiek is af te leiden, wordt de methode waarmee de top en/of basis aquiferkaart is geconstrueerd beschreven. Indien hiervoor bijvoorbeeld diktekaarten zijn gebruikt, dan dient er ook een opsomming bijgevoegd te worden van de data met beschrijving van de compilatiemethode die ten grondslag ligt aan de betreffende kaart. Indien er kaarten zijn gebruikt in de compilatie dan moeten die ook in een figuur worden gepresenteerd of moet er naar verwezen worden (voor dikte kaart op basis van putgegevens zie Figuur 13). Ook dient in de beschrijving van de kaart een toelichting te worden gegeven bij de breuken die de aquifer doorsnijden, in elk geval bij die breuken die het dichtst bij of tussen de doubletputten zijn gesitueerd.

De top aquifer-dieptekaart wordt gepresenteerd met:

- eventueel aanwezige breuken die de aquifer doorsnijden;
- doorprikpunten van bestaande putten met de gekarteerde aquifer, inclusief *labels* van putnaam en dieptewaarde. In het geval van waarborgaanvraag voor een 'half doublet', tweede of vervolgput, dienen voorgaande putten met dieptewaarde voor de top van het reservoir op de kaart te zijn aangegeven;
- de locatie van de beoogde doorprikpunten op top aquiferniveau van de doubletputten (incl. in een tabel met Lambert 72 coördinaten);
- het traject van de seismische lijnen of de verticale schematische secties die als illustratie zijn gekozen;
- begrenzing van de opsporings- of winningsvergunning voor aardwarmte;

De kaartopmaak dient met schaalbalk en *grid*-annotatie te gebeuren.

Figuur 10: Kaart top en/of basis aquifer op basis van seismische interpretatie.

Figuur 11: Kaart van dikte aquifer op basis van seismiek.

Geïnterpreteerde en afgeleide diepte- en diktegrids worden getoond in **Bijlage 5**.

6.8 Discussie omtrent onzekerheid van de top-/basis-aquiferkaart

De diepte van de top van de aquifer op de doellocaties van de putten wordt afgelezen van de top-aquiferdieptekaart. In deze paragraaf kan een beschouwing gegeven worden over de nauwkeurigheid van de top-aquiferkaart. Deze beschouwing dient primair als input voor het op te stellen boorplan.

Let wel, in de DoubletCalc software wordt de onzekerheid in de diepte-contourkaart gesteld op 10% van de verwachtingswaarde. In deze relatief grote onzekerheid wordt tevens de onzekerheid in de geothermische gradiënt verrekend (welke in DoubletCalc zonder onzekerheidsmarge wordt opgegeven).

7. Model en karakterisering van de aquifer

Het doel van dit hoofdstuk is het **onderbouwen van de aquiferparameters** die gebruikt zijn voor de berekening van het indicatieve geothermische vermogen.

Om een efficiënte audit van de onderbouwing van de gebruikte aquiferparameters en eventuele spreiding daarin mogelijk te maken wordt de daarvoor gebruikte dataset beschikbaar gesteld in de **Bijlagen 2 t/m 4**. Datasets die gebruikt kunnen worden om de aquiferpermeabiliteit te bepalen zijn **puttestgegevens**, **productie-/injectiegegevens**, **kernmetingen** en **"*well log*"-gegevens**. Van de voor de bepaling van de aquiferpermeabiliteit relevante putten dienen, indien beschikbaar, al deze gegevens te worden geëvalueerd.

In geval van waarborgaanvraag voor een half doublet, tweede of vervolgput en/of aanvullende put moet bij de karakterisering van de aquifer in elk van de paragrafen van dit hoofdstuk de data uit de voorgaande putten van het aardwarmtesysteem behandeld worden, naast informatie van de andere referentieputten.

De gebruikte methode voor de bepaling van de permeabiliteitswaarde heeft een voorkeursvolgorde:

1. Puttestgegevens,
2. Productiegegevens,
3. Petrofysische evaluatie (logs en kernmetingen) voor zover representatief voor het reservoir,
4. Publieke bronnen.

De permeabiliteit van de aquifer op een locatie kan geschat worden uit verschillende soorten brongegevens. Vaak zijn de brongegevens afkomstig van een andere locatie dan waar geboord zal worden. In dat geval is het nodig de afgeleide permeabiliteit(-en) te extrapoleren naar de projectlocatie. In dit hoofdstuk volgt de (niet uitputtende) opsomming van een aantal manieren waarop dit gedaan kan worden.

Indien er nog geen puttest is uitgevoerd en/of petrofysische evaluatie onmogelijk is dan wordt minimaal een adequate inschatting gepresenteerd op basis van literatuurgegevens en andere bronnen.

7.1 Stratigrafische correlatie en laterale diktevariatie van de aquifer

In deze paragraaf wordt een korte beschrijving gegeven van de laterale ontwikkeling van de aquifer in de omgeving van de projectlocatie. Dit wordt geïllustreerd met een correlatiediagram (Figuur 12) waarin de referentieputten centraal staan.

Figuur 12: Correlatiediagram van de aquifer.

De eventuele laterale variatie van de **brutodikte van de aquifer** wordt geïllustreerd aan de hand van een diktekaart (Figuur 13). Op de kaart wordt per datapunt / boorgat, per individuele aquiferpakket/-sequentie de dikte van de aquifer aangegeven. Er wordt eenduidig beschreven hoe de diktekaart tot stand is gekomen. Geef ook aan welke putten om welke reden (bijvoorbeeld: erosie top aquifer, breukuitsnijding, niet volledig doorboord) niet zijn meegenomen in de *contouring*. De gebruikte contourmethode wordt genoemd inclusief eventueel gebruikte parameters (bijvoorbeeld correlatielengte, *nugget* en *sill* als *kriging* is

gebruikt, of de exponent voor *'inverse distance'*). Als de berekening van de diktekaart gestuurd is door een breukenkaart of een diktetrendkaart op basis van de seismiek (§6.7, Figuur 11; Figuur 14) wordt deze ook opgenomen, met een beschrijving van de karteermethode (contouralgoritme en eventueel ten grondslag liggende geologische concepten). Ook dient een bij de diktekaart behorende foutenmarge gegeven te worden inclusief een beschrijving van hoe die tot stand gekomen is.

De keuze van de dikte van de aquifer en de spreiding hiervan, die als invoer dient voor de DoubletCalc-berekening van het indicatief geothermisch vermogen, worden genoemd, getabelleerd en vervolgens beargumenteerd.

Figuur 13: Bruto-diktekaart van de aquifer op basis van putgegevens. De begrenzing van de vergunning, de locatie van de correlatielijn van Figuur 12 en de voorgestelde putlocaties op aquiferniveau, met boringnaam en aquiferdikte, staan ter referentie op de kaart.

Figuur 14: Sturende kaart. De begrenzing van de vergunning en de voorgestelde putlocaties op aquiferniveau staan ter referentie op de kaart.

	Min.	Meest waarschijnlijk	Max.
Bruto dikte (m) projectlocatie			

Tabel 3: Bruto-dikte op projectlocatie.

7.2 Petrofysische evaluatie

Het uiteindelijke doel van de petrofysische evaluatie is onder andere een goede inschatting te kunnen maken van de netto-bruto-verhouding en de permeabiliteit. Dit gebeurt door een petrofysische evaluatie adequaat uit te voeren door van (één of) meerdere putten met behulp van de porositeits-logs (*density*, neutron en / of *sonic* logs) een porositeitscurve van de aquifer in een put te berekenen. Deze porositeitscurve wordt vervolgens nader geëvalueerd om de netto reservoirdikte te bepalen waaruit de netto-brutowaarde te berekenen is. Vervolgens wordt de porositeitscurve geconverteerd naar een theoretische permeabiliteitscurve voor die aquifer. Van de intervallen die bijdragen aan de netto aquiferdikte kan de gemiddelde netto aquiferpermeabiliteit berekend worden. Alle stappen in de petrofysische evaluatie worden beschreven en gedocumenteerd met inbegrip van gebruikte methode (petrofysische modellen), opgave van de gebruikte parameters en gebruikte *cut-off* parameters.

Aan elke petrofysische evaluatie zijn inherent **onzekerheden** verbonden die invloed hebben op de uitkomsten. Bijvoorbeeld: 1) de onzekerheid in de gebruikte (*default*) petrofysische parameters en 2) de onzekerheid in de porositeit-permeabiliteit conversiefunctie. In dit hoofdstuk legt u dan ook uit hoe u de onzekerheden heeft aangepakt en hoe ze tot uiting komen in de waarden en de spreiding van de aquiferparameters die als DoubletCalc-invoer dienen.

Kernplugmetingen

De selectie van kernplugmetingen (porositeit en permeabiliteit) uit een aantal representatief geachte putten wordt gepresenteerd. Er wordt beargumenteerd waarom de selectie representatief geacht wordt, en waarom de putten die buiten de selectieset vallen niet gekozen zijn. Indien deze informatie beschikbaar is wordt

de methode waarmee de pluggen zijn schoongemaakt, de druk waaronder de metingen zijn verricht, en de correcties die zijn toegepast (bijvoorbeeld Klinkenberg-correctie) vermeld.

De kernplugmetingen worden tegen elkaar uitgezet in een semi-logaritmische grafiek, met de porositeit op de x-as en de permeabiliteit op de logaritmische y-as (een 'Poro-Permplot', zie Figuur 15). Er wordt zo nodig een correctie op de data uitgevoerd om de in situ effectieve porositeit en permeabiliteit te benaderen, bijvoorbeeld door gebruik te maken van:

- *Special Core Analysis data* (SCAL) ;
- Constante correctiefactor op de porositeit (0,95 is vooralsnog een pragmatische veel gebruikte correctiefactor);
- Klinkenberg-correctie op de permeabiliteit

Indien meerdere facies in het reservoir aanwezig zijn en deze duidelijk verschillende porositeit- of permeabiliteiteigenschappen hebben, moeten deze in de petrofysische evaluatie en permeabiliteitberekening worden onderscheiden.

Op de punten in de grafiek wordt een regressie uitgevoerd. Dit is niet noodzakelijkerwijs één enkele lineaire regressie. In het merendeel van de gevallen lijkt het of in de hogere porositeitsklassen er een andere relatie geldt voor de porositeit-permeabiliteit dan voor de lagere klassen. Indien de data dit toelaat dient bij voorkeur een gekromde regressielijn gebruikt te worden. Als dat niet mogelijk is dan in volgorde van voorkeur:

1. Gekromde lijn, bijvoorbeeld door toepassing van *Swansons mean*, polynoom- of *power*-relatie regressie (van Kempen 2016);
2. Geknikte lijn;
3. RMA lineaire regressie met truncatie op een maximale permeabiliteitswaarde;
4. Y over X lineaire regressie met truncatie op een maximale permeabiliteitswaarde.

Figuur 15: Porositeit-permeabiliteitgrafiek van plugmetingen met de gebruikte correlatielijn en bijbehorende functie.

De keuze van de permeabiliteitwaarde waarbij truncatie plaatsvindt dient beargumenteerd te worden.

Indien er *'Special Core Analysis'* data (SCAL) voorhanden is om de petrofysische parameters voor de berekening van de effectieve porositeit en (water)permeabiliteit beter te bepalen dan wordt hier gemeld of die data is gebruikt. Indien die data niet wordt gebruikt dan wordt beargumenteerd waarom niet. Als die data wel wordt gebruikt dan worden de verschillende stappen van de verwerking beschreven en geïllustreerd.

Ook worden de porositeitsmetingen tegen de diepte uitgezet om inzicht te krijgen in de aard van de porositeit-dieptetrend (Figuur 16).

Figuur 16: Porositeit-diepte-grafiek van plugmetingen met de gebruikte correlatielijn.

Evaluatie kleivolume

Per referentieput wordt een evaluatie van het kleivolume uitgevoerd. De meest gangbare methode om het kleivolume te bepalen is met behulp van de *Gamma-Ray* log (GR-log). Deze evaluatie wordt uitgevoerd door per reservoir twee GR-waarden te definiëren die "zuiver zand" en "klei" representeren. Binnen deze twee randwaarden wordt de GR-log genormaliseerd. Bij voorkeur wordt een lineaire relatie gebruikt. Het resultaat is een curve die het kleivolume in het boorgat beschrijft. Als alternatief kan ook de Neutron-*Density*-logcombinatie gebruikt worden. Hierbij worden, doormiddel van drie puntenparen, een "schoon-zandlijn" en "kleilijn" gedefinieerd in een grafiek waarin de *Density* en Neutron tegen elkaar geplot worden.

De GR- en eventueel Neutron-*Density*-waarden die zijn gebruikt om het kleivolumeprofiel te definiëren worden gegeven in **Bijlage 2**.

Evaluatie porositeit

Er wordt per referentieput een petrofysische evaluatie van 'porositeitslogs' uitgevoerd.

Voor de analyse wordt bij voorkeur de densiteitslog gebruikt. Daarbij wordt uiteraard rekening gehouden met de vulling van de poriën (spoelingsfiltraat, water en/of vrij gas) door bijvoorbeeld de Neutronlog en de (diepe en eventueel ondiepe) weerstandslogs bij de analyse te betrekken. Als de densiteitslog niet voorhanden is, of van slechte kwaliteit, kan de *sonic* log gebruikt worden. In de zeldzame gevallen dat een NMR-log beschikbaar is voor porositeitsevaluatie heeft die voorkeur boven de *sonic* log.

Het resultaat is een porositeitsprofiel van de aquifer in het boorgat. Indien er kernplugmetingen beschikbaar zijn in het geëvalueerde interval in de betreffende put dan dienen die meegenomen te worden in de evaluatie, bijvoorbeeld ter kalibratie van de berekende porositeit. Daarbij wordt rekening gehouden met een in-situ correctie en *core-shift* van de kernmetingen.

In deze paragraaf wordt ook genoemd welk petrofysisch model of welke formules zijn gebruikt (bijvoorbeeld *Indonesian*, *Waxman-Smits*, *Raymer-Hunt* etc.). Daarnaast worden alle relevante petrofysische parameters die zijn gebruikt bij de evaluatie opgesomd, zoals bijvoorbeeld de *a*, *m* en *n* factoren, R_w, dichtheden etc.. Indien de modelparameters, bijvoorbeeld de *n*, *m* en *a*, uit beschikbare SCAL metingen afgeleid kunnen worden dan heeft dat de voorkeur boven het gebruik van de standaardwaarden of benadering van deze waarden voortvloeiend uit het kalibratieproces. Voor de rapportage is het vereist dat put-specifiek, op eenduidige, overzichtelijk wijze de petrofysische evaluatiemethode en gebruikte parameters worden getabelleerd. **Bijlage 2** bevat de uitgebreide behandeling van de petrofysica, inclusief de gebruikte parameters, die overzichtelijk en eenduidig in tabellen zijn weergegeven.

Gemiddelde aquiferporositeit & netto-brutoverhouding of netto aquiferdikte

Voor de bepaling van de gemiddelde aquiferporositeit, permeabiliteit en netto-brutoverhouding moet de netto aquiferdikte bepaald worden. Hiervoor worden in het algemeen *cut-offs* toegepast op het "petrofysisch bepaald kleivolume" (Vsh) en op de porositeit.

De Vsh *cutoff*-waarde wordt gegeven en er wordt beargumenteerd waarom deze keuze is gemaakt. De Vsh *cutoff* is gebruikelijk in de orde van 40-50%.

Indien een porositeit *cut-off*-waarde is gebruikt dan wordt de waarde gegeven met een argumentatie hoe men tot deze waarde is gekomen. Een reguliere methode is het definiëren van een permeabiliteitswaarde waaronder verwacht wordt dat er niet of nauwelijks stroming van water plaats kan vinden op productietijdschaal. Deze permeabiliteitsdrempel wordt omgezet naar een porositeitswaarde met behulp van de correlatielijn in de porositeit-permeabiliteitgrafiek (Figuur 15). Deze naar een geheel getal afgeronde waarde kan als porositeit *cut-off* gebruikt worden.

De permeabiliteitsdrempel die vaak gebruikt wordt / adequaat is voor gas, bedraagt 0,1 mD. Voor water is 1 mD een adequate waarde. De resulterende porositeit *cut-off* is gebruikelijk in de orde van 6-10%.

'Petrofysische' permeabiliteit

Met behulp van de in de porositeit-permeabiliteitgrafiek bepaalde regressielijn(en) wordt elk punt op de berekende porositeitscurve omgerekend naar een permeabiliteitswaarde. Op die manier ontstaat een permeabiliteitscurve.

Indien de datapunten in de porositeit-permeabiliteitgrafiek het niet toelaten een gekromde of geknikte correlatielijn te definiëren, welke de voorkeur genieten (zie § kernplugmetingen), kan voor een rechte lijn gekozen worden. In het geval deze rechte regressielijn in het hoge porositeitsbereik wordt geëxtrapoleerd zonder sturing van punten, dan kan dat leiden tot zeer (onrealistisch) hoge permeabiliteitswaarden in de berekende permeabiliteitslog. Een truncatie op een maximale permeabiliteit is dan een adequate methode om dit te omzeilen.

Voor de bepaling van de gemiddelde aquiferpermeabiliteit zijn meerdere methoden mogelijk (rekenkundig, geometrisch, harmonisch of combinaties daarvan – zie bijvoorbeeld: *'A course in The Fundamentals of Core Analysis'*, *Core Laboratories* 1973). De keuze van de methode is afhankelijk van de aard en opbouw van het reservoir. Voor een eerste orde inschatting van de gemiddelde (horizontale) reservoirpermeabiliteit wordt het rekenkundig (Arithmetisch) gemiddelde afdoende geacht.

In een porositeit-permeabiliteitgrafiek zijn de datapunten gespreid rondom de correlatielijn(en). Dit geeft bij één porositeitswaarde een spreiding van de mogelijke permeabiliteit. Deze informatie kan gebruikt worden om de onzekerheid in de gemiddelde aquiferpermeabiliteit op de putlocatie te bepalen. Eén methode kan zijn om porositeitsklassen (*bins*) te definiëren met een bijbehorende permeabiliteitsdistributie. Door vervolgens voor elke berekende porositeitswaarde in het porositeitsprofiel een overeenkomstige waarde uit de permeabiliteitsdistributie te halen wordt een permeabiliteitsprofiel geconstrueerd. Uit het resulterende permeabiliteitsprofiel wordt de gemiddelde (arithmetische) permeabiliteit berekend. Door deze procedure bijvoorbeeld 1000 keer te herhalen kan een hoge (P90), lage (P10) en een verwachte gemiddelde (P50) aquiferpermeabiliteit bepaald worden.

Evaluatie NMR logs

Indien er in relevante putten een NMR 'permeabiliteitslog' is opgenomen dan worden de resultaten gepresenteerd en besproken. Hierbij dient zorg gedragen te worden dat in de berekening van de permeabiliteit de juiste parameters worden gebruikt, die gekalibreerd zijn aan kernmetingen.

Resultaten van de petrofysische evaluatie

Hier wordt een overzichtstabel gepresenteerd met alle gegevens per geanalyseerde put naast elkaar. Voor de complete set evaluatieresultaten per put wordt verwezen naar **Bijlage 2**. Tabel 4 toont de gemiddelde waarden voor de aquifer.

Put	Formatie / aquifer zone	Top interval (mAH en mTVD)	Basis interval (mAH en mTVD)	Brutodikte (m)	Nettodikte (m)	Netto/Bruto (%)	Lage porositeitsschatting (%)	Gemiddelde porositeitsschatting (%)	Hoge porositeitsschatting (%)	Lage permeabiliteitsschatting	Gemiddelde permeabiliteit (%)	Hoge permeabiliteitsschatting	Transmissiviteit (Dm)

Tabel 4: Karakterisering van de aquifer op basis van log-gegevens. De TVD-diepte op te geven t.o.v. maaiveld én in mTAW.

Bovenstaande petrofysische evaluatieresultaten dienen in twee grafieken te worden gepresenteerd (Figuur 17 & Figuur 18):

1) Diepte (x) tegen gemiddelde aquiferporositeit (y) (Figuur 17)
2) Gemiddelde aquiferporositeit (x) versus permeabiliteit (y) (Figuur 18)

Figuur 17: Grafiek gemiddelde aquiferporositeit tegen gemiddelde diepte top aquifer op basis van boringen / logs. Trendlijnen en/of omhullende lijnen kunnen de porositeit-diepterelatie inzichtelijk maken (op basis van de gegevens uit Tabel 4).

Figuur 18: Grafiek gemiddelde aquiferporositeit tegen gemiddelde aquiferpermeabiliteit op basis van logs (op basis van de gegevens uit Tabel 4).

7.3 Puttestevaluatie

Indien in de ruime omgeving puttestgegevens (uit geothermie-, gasopslag- of koolwaterstofputten) voorhanden zijn waarmee de relevante eigenschappen van de doelaquifer bepaald kunnen worden, dan kunt u deze gebruiken om een indicatie van de permeabiliteit van de aquifer te krijgen. In deze paragraaf licht u toe hoe u uit beschikbare puttesten de permeabiliteit schat. De gebruikte puttest dient over een relevante aquifersectie te zijn uitgevoerd en adequaat te zijn geïnterpreteerd. In het geval dat de transmissiviteit is afgeleid uit stromingstest(en) wordt een geïllustreerde samenvatting van de interpretatie van de puttest bijgevoegd als figuur. Details van de puttesten en bijbehorende interpretaties vermeldt u in **Bijlage 3**.

Instructies of richtlijnen hoe een puttest te interpreteren worden gegeven in het document ***richtlijnen voor de uitvoering en interpretatie van een puttest***.

U beschrijft de gebruikte methode om de puttestgegevens te analyseren om zodoende tot een representatieve waarde voor de transmissiviteit of permeabiliteit te komen.

U presenteert de resultaten van de analyse, alsmede de validiteit en eventuele onzekerheid van de gepresenteerde gegevens in Tabel 5.

Put	Formatie / aquifer-zone	Top interval	Basis interval	□P over put aquifer	Q (m^3/uur)	Stof (water / gas / olie)	k_H (Dm)	Skin	Gemiddelde perme-	PI (m^3/uur/bar)

Tabel 5: Karakterisering aquifer uit puttest.

7.4 Evaluatie van productiedata

Indien er in de ruime omgeving productiegegevens voorhanden zijn van de winning van water, gas of olie op basis waarvan reservoireigenschappen bepaald kunnen worden, dan kunt u deze gebruiken om een indicatie van de permeabiliteit van de aquifer te krijgen.

In deze paragraaf licht u toe hoe u uit productiedata de permeabiliteit heeft geschat. U moet beschrijven welke methode en parameters zijn gebruikt om de productiegegevens te analyseren en om tot een transmissiviteit of permeabiliteit te komen. De resultaten van de analyse worden in tabelvorm gepresenteerd (Tabel 6). U bespreekt de validiteit en eventuele onzekerheid van de gepresenteerde gegevens.

Details van de productiedata presenteert u in **Bijlage 4**.

Put	Formatie / aquifer-zone	Top interval	Basis interval	□P over put aquifer *interface*	Q (m^3/uur)	Stof (water /	k_H (Dm)	Skin	Gemiddelde per-	PI (m^3/uur/bar	Prod. Water temp

Tabel 6: Karakterisering van de aquifer uit productiegegevens.

7.5 Permeabiliteit uit publieke informatie

Indien de permeabiliteitsschatting uit publiek beschikbare bronnen is afgeleid moeten deze bronnen worden gerefereerd. Daarnaast moet de eventuele verwerkingsmethode worden beschreven.

7.6 Bepaling aquifereigenschappen voor de projectlocatie

Indien er permeabiliteitswaarden zijn bepaald met verschillende technieken dan wordt een evaluatie uitgevoerd waarbij de verschillen worden aangekaart. Bovendien wordt beargumenteerd of ze al dan niet in combinatie met elkaar gebruikt kunnen worden.

Indien relevant worden aan de verschillende aquifereigenschapswaarden een gewicht toegekend op basis van betrouwbaarheid van de analyse waarbij bovendien rekening gehouden wordt met de voorkeursmethode:

1) puttest
2) productiedata
3) petrofysica
4) publieke informatie

Vervolgens wordt een argumentatie gegeven hoe de waarde naar de projectlocatie te extrapoleren waarbij rekening gehouden wordt met (maximale) begravingsdiepte en facies.

Petrofysische data-extrapolatie

De petrofysisch bepaalde gemiddelde aquiferporositeit en netto-bruto-waarde zijn aan elkaar gerelateerd door de gebruikte "*cut-off*"-waarden. In deze paragraaf worden de berekende waarden op zodanige wijze in een geologisch en ruimtelijk kader geplaatst dat duidelijk wordt wat de meest waarschijnlijke reservoireigenschapswaarde (porositeit, netto-bruto en permeabiliteit) is op de projectlocatie. Daarnaast wordt hier beschreven hoe de spreiding rond deze meest waarschijnlijke waarde is bepaald.

De permeabiliteit is een van de meest bepalende factoren bij de berekening van het geothermisch vermogen. De keuze van de minimum-, maximum- en verwachtingswaarden die in DoubletCalc worden ingevuld, wordt bepaald door alle relevante analyseresultaten in het geologisch model van het gebied.

Er zijn veel methoden om door extrapolatie van lokale petrofysische gegevens (zoals hierboven beschreven) een inschatting te maken van de permeabiliteit op de projectlocatie. De keuze van de methode is afhankelijk van de lokale geologie, het type aquifer, en de hoeveelheid beschikbare gegevens. Voor de rapportage wordt de gekozen methode beschreven. Hierbij worden de methode, parameters en eventuele aannames opgesomd en beargumenteerd. In het proces wordt in ieder geval de hieronder genoemde locatie-onafhankelijke methode gepresenteerd. Indien relevant en/of het aantal datapunten dat toestaat, dan dient de vervolgstap, waarbij de laterale variatie meegenomen wordt, ook uitgevoerd te worden.

Locatieonafhankelijke analyse

Als eerste-ordebenadering kan de opgestelde dataset (Tabel 4) van de referentieputten gebruikt worden om te onderzoeken of er een porositeit-(maximale)begravingsdiepterelatie is (Figuur 17). Zo ja, dan kan deze relatie gebruikt worden om de porositeit op de diepte van de projectlocatie in te schatten inclusief een maximale en minimale porositeit. Deze porositeitswaarden kunnen met behulp van de gemiddelde porositeit-permeabiliteitgrafiek (Figuur 18) omgezet worden naar permeabiliteitswaarden.

Reservoireigenschapkaarten

Met behulp van de verzamelde lokale (gemiddelde) aquiferporositeits- en netto/bruto-waarden wordt een porositeits- en netto/brutokaart gemaakt. De interpolatiemethode wordt genoemd evenals de hierbij gebruikte parameters.

Als uit de basisgegevens blijkt dat er een porositeitstrend is, bijvoorbeeld de begravingsdiepte (huidige dan wel maximale begraving, zie § Locatieonafhankelijke analyse) dan wordt hiermee rekening gehouden in de *contouring* door bijvoorbeeld de dieptekaart als sturende kaart mee te nemen in de *contouring* (*co-kriging*). Indien de datakwaliteit van de seismische *survey* het toelaat kan één van de seismische attributen die variatie in de porositeit kunnen oppikken (zoals de akoestische impedantie), sturend zijn bij de *contouring*.

De porositeit op de doellocatie van het doublet kan worden afgelezen van de kaart. De permeabiliteit wordt bepaald door de gemiddelde reservoirporositeit af te lezen in de porositeit-permeabiliteitgrafiek uit de petrofysische evaluatie van de gebruikte putten (Figuur 18).

In het geval een *(co-)kriging* methode is gekozen voor de *contouring* kan de onzekerheid in de porositeit direct afgeleid worden uit de resultaten van deze analyse (bijvoorbeeld als 2x de standaarddeviatie).

De onzekerheid in de porositeit op de doellocatie kan ook benaderd worden door enkel de porositeit in referentieputten te beschouwen (zie § Locatieonafhankelijke analyse). De spreiding in porositeit kan afgeleid worden uit de spreiding van de gemiddelde porositeit op de diepte van de doellocatie (Figuur 17).

De porositeitswaarden (incl. de hoge en lage schattingen) worden geconverteerd naar gemiddelde aquiferpermeabiliteit met de grafiek uit Figuur 18.

De aquiferkaarten worden gepresenteerd. Op de kaarten zijn de doellocaties van de boringen zichtbaar, alsook de locatie van de datapunten waarop de kaart is gebaseerd. Deze datapunten zijn gelabeld met de putnaam en de parameterwaarde. Daarnaast is uiteraard de begrenzing van de opsporings- of winningsvergunning voor aardwarmte zichtbaar op de kaart weergegeven.

Figuur 19: Kaart porositeit aquifer.

Figuur 20: Kaart permeabiliteit aquifer (eventueel).

Figuur 21: Bij contouring gebruikte sturende kaart(-en), bijvoorbeeld akoestische impedantie.

7.7 Anisotropie

Voor de berekening van het positieve effect op de stroming van water van of naar de put-aquifer intersectie van een gedevieerd puttraject door de aquifer is de parameter "anisotropie" nodig (zie ook handleiding DoubletCalc, Hoofdstuk 8). Met behulp van de gegeven formules en een vijftal parameterwaarden, waaronder de anisotropie, wordt het verwachte positieve effect uitgedrukt in een negatieve skinwaarde voor de betreffende put. Deze anisotropieparameter is de verhouding tussen de horizontale en de verticale permeabiliteit: k_h/k_v.

Er zijn verschillende methodes om een inschatting te maken van de anisotropie. Hieronder worden er een aantal beschreven.

Anisotropie uit kernmetingen

In een heel aantal gevallen is voor dezelfde diepte in een put zowel een horizontale als een verticale permeabiliteit gemeten op een kernplug. Per dieptewaarde kan een anisotropie berekend worden en vervolgens een gemiddelde aquiferanisotropie. Deze gegevens kunnen ook per permeabiliteitspaar geplot worden in een log-log plot van verticale tegen horizontale permeabiliteit waarbij ook de iso-anisotropie lijnen van 1, 10, 100 en 1000 zijn getrokken. Dit geeft een goed inzicht in de spreiding. Deze methode geeft een aquiferanisotropie op kernplugschaal. Daardoor wijkt deze waarde mogelijk af van de aquiferanisotropie zoals bepaald via onderstaande methodes, die de aquiferanisotropie op reservoirniveau weergeven.

Figuur 22: Anisotropiegrafiek met verticale tegen horizontale permeabiliteit.

Anisotropie op basis van de permeabiliteitslog

De anisotropie van de aquifer kan ook benaderd worden vanuit permeabiliteitsmetingen. Uit het hierboven beschreven permeabiliteitsprofiel kan zowel het arithmetisch als het harmonisch gemiddelde berekend worden. Daarbij kan men aannemen dat het arithmetisch gemiddelde staat voor laagparallelle stroming en daarmee de effectieve horizontale permeabiliteit het best benadert. Het harmonisch gemiddelde daarentegen benadert eerder *cross-laminar*, subverticale stroming en vormt daarmee een adequate benadering van de verticale permeabiliteit. De ratio van horizontale en verticale permeabiliteit geeft dan een indicatie van de anisotropie van de aquifer in de put.

Anisotropie op basis van rekenmodellen

In de publieke literatuur zijn verschillende methodes gepubliceerd die op basis van modellen en een aantal parameters een benadering geven voor de anisotropie van een reservoir. Het artikel van Begg, Chang en Haldorsen uit 1985 is daar een voorbeeld van.

Anisotropie op basis van puttestresultaten

Afhankelijk van de modelkeuzes gemaakt in een puttestinterpretatie (zie document "richtlijnen voor de uitvoering en interpretatie van een puttest") is het mogelijk de verticale permeabiliteit te berekenen. Bij het gebruik van "*derivative analysis*" bij puttestinterpretatie kan bij, bijvoorbeeld de modelkeuze "*two-layers / double permeability*" of het "*partial penetration*" model, een verticale permeabiliteit afgeleid worden.

Keuze anisotropiewaarde voor berekening

Voor de uiteindelijke keuze van de anisotropiewaarde geniet het de voorkeur om de anisotropiebepaling te doen op basis van de permeabiliteitslog, met daarbij ter ondersteuning de anisotropiebepaling op basis van de kernplugmetingen.

7.8 Resultaten en discussie over onzekerheid

De gekozen aquiferwaarden en bijhorende spreiding (lage, midden- en hoge verwachtingswaarde) worden in tabelvorm gepresenteerd (Tabel 7).

Vervolgens wordt, per aquifereigenschap, beargumenteerd waarom deze waarden gekozen zijn. Indien er verschillen zijn tussen de resultaten van de verschillende gebruikte methodes van bijvoorbeeld de permeabiliteitsbepaling dan worden deze besproken. Indien er een keuze is gemaakt voor één van de methodes wordt kort beargumenteerd op grond waarvan deze voorkeur is bepaald. Als de resultaten van de ene methode (lagere voorkeursmethode) een trend laten zien, bijvoorbeeld een porositeit-(permeabiliteit)-diepte trend die gebruikt kan worden om de resultaten van de hoge-voorkeursmethode (bijvoorbeeld puttestresultaten in een ondiepere referentieput) te extrapoleren dan wordt dat hier uitgelegd.

Aquifer	Lage waarde	Midden waarde	Hoge waarde
Bruto dikte			
Netto / bruto			
Gemiddelde porositeit			
Gemiddelde			
Saliniteit			
Kh/kv	-nvt		-nvt

Tabel 7: Gemiddelde aquiferparameters.

8. Formatiewaterkarakterisering

In dit hoofdstuk presenteert u de inschatting van de temperatuur en de saliniteit van het formatiewater op de doellocatie.

8.1 Temperatuur

Evaluatie temperatuurgegevens en schatting van de geothermische gradiënt

Als *default*-waarde wordt de gemiddelde geothermische gradiënt van Vlaanderen gebruikt (30 °C per km, EFRO-project 910: Geothermie, 2020). Als uit analyse blijkt dat voor de projectlocatie een andere gradiënt opportuun is, dan wordt die analyse hier gepresenteerd en duidelijk beargumenteerd met de nodige gegevens en referenties. Gegevens om de temperatuurgradiënt te bepalen hebben een voorkeursvolgorde zowel qua acquisitiemethode als verwerkingsmethode. Gegevens voor de bepaling van de geothermische gradiënt zijn in volgorde van voorkeur:

1. Temperatuurgegevens uit geothermische systemen
2. Gestabiliseerde temperatuurmetingen opgenomen na het boren uit referentieputten
3. Als die niet of slechts beperkt voorhanden zijn, worden (gecorrigeerde) ruwe meetgegevens gebruikt met een onderbouwing hoe deze redelijkerwijs gebruikt kunnen worden.
4. Er kan gerefereerd worden naar een geothermische gradiënt uit publieke studies en datasets indien geen eigen analyse van putgegevens is uitgevoerd.

Figuur 23: Grafiek met de temperatuur uitgezet tegen de diepte met daarin de bepaalde geothermische gradiënt. De datapunten zijn gelabeld met de putnaam.

In DoubletCalc wordt de onzekerheid in de temperatuurgradiënt verrekend in de onzekerheid in de diepte van de top van de aquifer, die DoubletCalc standaard op 10% stelt.

8.2 Evaluatie van het formatiewater

In deze paragraaf beargumenteert u hoe u uit de gebruikte dataset(s) tot de hoge en lage schatting van de saliniteit van het formatiewater komt. Gebruikte dataset(s) maakt u beschikbaar in **Bijlage 2**.

In de rapportage wordt de methode die gebruikt is beschreven alsmede de spreiding van de parameterwaarden in de verschillende putten, en de onzekerheid van de saliniteitswaarden die besloten ligt in de evaluatiemethode. Deze onzekerheid dient als indicatie voor de in DoubletCalc op te geven spreiding. In principe wordt qua volgorde de voorkeur gegeven aan:

1. saliniteitsbepalingen op watermonsters,
2. uit logmetingen,
3. uit publieke overzichtspublicaties.

In watermonsters gemeten saliniteit

De saliniteit van de watermonsters uit relevante referentieputten wordt hier opgesomd en besproken. De saliniteit wordt gegeven als "*Total Dissolved Solids*" (TDS) in *parts per million* (ppm) NaCl equivalenten (Tabel 8). De methode om de saliniteit te bepalen uit de basisgegevens wordt besproken dan wel gerefereerd.

Put	monsterdiepte	Formatie	Saliniteit (ppm)

Tabel 8: Formatiewater saliniteit uit watermonsters.

Uit logs afgeleide saliniteit

De saliniteit is ook te bepalen door een evaluatie van de porositeits- en weerstandslogs (*Pickett plot*). Als het mogelijk is, kunt u deze evaluatie uitvoeren voor watervoerende aquifers in de referentieputten. De resultaten worden in een tabel (Tabel 9) gepresenteerd.

Put	Interval (top—basis in m)	Formatie	R_w	Saliniteit (ppm)

Tabel 9: Formatiewater weerstand en saliniteit.

Saliniteit uit gegevens uit (wetenschappelijke) publicaties

Er kan gerefereerd worden naar saliniteitschattingen uit publieke studies en locatie-onafhankelijke datasets indien geen relevante putgegevens beschikbaar zijn.

Resultaten en discussie over onzekerheid

De gekozen saliniteitswaarde en bijhorende spreiding (lage, midden- en hoge verwachtingswaarde) worden in tabelvorm (Tabel 10) gepresenteerd.

Aquifer	Lage waarde	Middenwaarde	Hoge waarde
Saliniteit (ppm)			

Tabel 10: Waarden saliniteit: lage, midden- en hoge schatting.

Koolwaterstoffen

Wanneer er een risico is geïdentificeerd op het aantreffen van koolwaterstoffen (vrije fase of opgelost in het formatiewater; zie §4.2), worden hier de gevolgen voor de eigenschappen van het formatiewater besproken zoals bijvoorbeeld een indicatie van het "*bubblepoint*".

Aquiferdruk

In het algemeen wordt er van uit gegaan dat de aquiferdruk op de doellocatie hydrostatisch is. Deze aanname is in DoubletCalc geïmplementeerd. DoubletCalc berekent modelmatig de aquiferdruk aan de hand van de diepte, geothermische

gradiënt en de dichtheid van het water op basis van de opgegeven saliniteit. In deze paragraaf wordt duidelijk gemaakt of:

1. verondersteld wordt dat de aquiferdruk hydrostatisch is, of
2. dat er gegronde redenen zijn om aan te nemen dat er een ander drukregime in de aquifer heerst. Indien dit het geval is moet er een onderbouwing gegeven worden voor de verwachte aquiferdruk die in DoubletCalc als verwachtingswaarde wordt ingevuld (*mid aquifer pressure at producer* (bar) en *mid aquifer pressure at injector* (bar)) (zie DoubletCalc 1.4 handleiding).

DoubletCalc gaat er vanuit dat de waterkolom in de productieput en de injectieput met elkaar in drukcommunicatie staan. Mogelijkerwijs is dit in de realisatie niet het geval, bijvoorbeeld omdat er een ontgassingsinstallatie is geplaatst. In dit geval is er meer energie nodig om het water rond te pompen. Dit heeft invloed op met name de COP.

9. Doublet performance

In dit hoofdstuk komen de niet-geologische parameters die in DoubletCalc ingevoerd moeten worden aan bod. Voor het uiteindelijke resultaat van het DoubletCalc scenario dat onderliggend is aan de waarborgaanvraag wordt verwezen naar de samenvatting (Hoofdstuk 1). Het staat de aanvrager vrij om naast het DoubletCalc-scenario een berekening uit te voeren met een eigen model. Dit dient dan gepresenteerd te worden met een eenduidige verhandeling waarom DoubletCalc in deze situatie niet adequaat is en vervolgens een verhandeling die de verschillen in uitkomst tussen de twee scenario's (DoubletCalc en eigen methode) inzichtelijk maakt en verklaart.

9.1 Doubletconfiguratie in de ondergrond

Er wordt een top aquiferkaart gepresenteerd met de locatie van de beoogde doorprikpunten op top aquiferniveau van de doubletputten, de oppervlaktelocatie van de putten en de omtrek van de onderhavige opsporings- of winningsvergunning voor aardwarmte (Figuur 24). U noemt en behandelt ook de afstand tussen productie- en injectieput op aquiferniveau en de penetratiehoek in de aquifer. Daarnaast wordt een tabel met ruimtelijke coördinaten (Lambert72) van de beoogde doellocaties en de oppervlaktelocaties van de putten gegeven.

Additioneel presenteert u een figuur (Figuur 25) waarin het beoogde doublet is geprojecteerd op een seismische sectie of schematische doorsnede. Het gaat hierbij om minimaal één sectie die zodanig is georiënteerd dat de beoogde doorprikpunten van de putten met de aquifer nagenoeg op de sectie liggen.

Figuur 24: Top aquiferkaart met doorprikpunten, geplande en bestaande putten en begrenzing van de opsporings- of winningsvergunning voor aardwarmte (evt. met verwijzing naar Figuur 11).

Locatie	X	Y
Oppervlakte locatie put 1		
Doorprikpunt top aquifer put 1		
TD put 1		
Oppervlakte locatie put 2		
Doorprikpunt top aquifer put 2		
TD put 2		

Tabel 11: Ruimtelijke coördinaten van de beoogde doellocaties en oppervlaktelocaties van de putten, in Lambert72.

Figuur 25: Het beoogde doublet geprojecteerd op een seismische sectie of schematische doorsnede.

Extra skin factor

Het positieve effect van het scheef doorboren van de aquifer kan verrekend worden in een skinfactor. Deze wordt door DoubletCalc uitgerekend en gebruikt bij de berekening van het indicatieve geothermisch vermogen.

In andere gevallen, bijvoorbeeld als één put, of beide putten gestimuleerd (bijvoorbeeld aangezuurd, hydraulisch gefractureerd zijn of multi-laterals/radial drillings hebben) of horizontaal geboord is/zijn, dan kan het gunstige effect op de productie en/of injectie verrekend worden in een negatieve skinfactor. Deze kan uitgerekend worden door de productiviteitsindex (PI) van de gestimuleerde put of alternatieve putconfiguratie te relateren aan de productiviteitsindex (PI) van een verticale ongestimuleerde put. De formule om dit te berekenen is bijvoorbeeld gegeven in Peters et al. (2015).

Het effect van een extra injectie- of productiegat (extra put of *multi-lateral*) kan worden beschouwd als extra injectie- of productieoppervlak van de put-aquifer-*interface* en dus verlaging van de stromingsweerstand, vergelijkbaar met een horizontale put of een putstimulatie. Derhalve kan het effect van de extra injectie- of productieput ingevoerd worden als negatieve skin in de huidige versie van DoubletCalc1.4.3. Deze benadering heeft momenteel de voorkeur omdat het een adequate benadering van het effect van een extra drainage- of injectiepunt betreft en omdat voor de waarborgregeling de generieke methodiek voor het berekenen van een indicatief geothermisch vermogen gehandhaafd blijft.

Als deze extra skin (niet de 'scheve-put-skin') wordt opgevoerd dan moet de berekening van deze skinfactor inzichtelijk gemaakt en onderbouwd worden.

In de waarborgregeling wordt de skinfactor beschouwd als een **niet-geologische parameter** die buiten de te waarborgen geologische parameters valt.

9.2 Putarchitectuur

Hier dient een beschrijving gegeven te worden van de specificaties van de ondergrondse installatie. U noemt en behandelt de installatiespecificaties uit Tabel 3 en Tabel 4, voor zover relevant voor productie- en injectieput:

- afhangdiepte pomp ten opzichte van het maaiveld en in mTAW,
- pompefficiëntie,
- diameter boorgat in het reservoir,
- verbuizingsschema,
- dieptes van de segmenten in mAH (gemeten *along hole*) en mTVD (*true vertical depth*), en bij de laatste zowel ten opzichte van het maaiveld als in mTAW,
- binnendiameter opvoerbuis per segment,
- ruwheid opvoerbuis per segment.

Het configuratieschema van zowel de injectie- als de productieput wordt grafisch geïllustreerd (Figuur 26). De beoogde deviatietrajecten worden gegeven in **Bijlage 6**.

Figuur 26: Verbuizingsschema put (voor elke put één figuur).

9.3 Operationele instellingen

In deze paragraaf behandelt u:

- de pompdruk die u denkt te gaan gebruiken bij de productie van aardwarmte. U laat hierbij zien hoe u de nodige voorzorgen neemt om veilig

en verantwoord te opereren (maximale *draw-down*, vermijden van ontgassing, maximale injectiedruk; *fracturing* en *slip* criteria,...).
- de injectietemperatuur.

9.4 Indicatie en evaluatie van aandachtspunten bij boren.

In deze paragraaf zet u uiteen welke geologische gerelateerde aandachtspunten geadresseerd moeten worden in het boorprogramma om met zo min mogelijk problemen op doeldiepte te raken. Dit zijn bijvoorbeeld:

1. Het voorkomen van (vrije) koolwaterstoffen op het beoogde boortraject
2. Het doorboren van breuken op het boortraject (gevaar op significante spoelingsverliezen)
3. Het voorkomen van anomale (hogere of lagere) drukken t.o.v. hydrostatisch (in bijvoorbeeld "*floaters*")
4. Voorkomen van lastig te doorboren gesteentelagen:
    a. Zwellende kleien
    b. Grote competentiecontrasten over lange boortrajecten
    c. Oplossingsholten
    d. Etc.
5. Doorboren van drinkwaterpakketten

9.5 Indicatie en evaluatie van aandachtspunten bij productie en injectie.

In deze paragraaf geeft u een indicatie welke geologische gerelateerde aandachtspunten geadresseerd moeten worden bij de verwachte toekomstige ingebruikstelling van het doublet:

1) *Scaling*
2) Corrosie
    a. Chemisch
    b. Mechanisch
3) Aanwezigheid van zwevende deeltjes (*fines*)
4) Radio-actieve straling (NORM) van *scaling* en *fines*
5) Injectiedruk vs "*fracture propagation*"-druk
6) Bodembeweging:
    a. Bodemstijging / -daling.
    b. Seismiciteit
7) Interferentie met andere toepassingen in de diepe ondergrond
8) Interferentie met aanpalende aardwarmtewinningssystemen

10. Referenties

In dit hoofdstuk worden de rapportages en artikelen opgesomd waar in alle voorgaande hoofdstukken naar wordt gerefereerd.

- Begg, S.H., Chang, D.M. & Haldorsen, H.H., 1985. A simple Method for calculating the effective vertical permeability of a reservoir containing discontinuous shales. Society of Petroleum Engineers Symposium on Reservoir Simulation, Dallas, TX, Feb. 10-13, SPE 14271

- Core Laboratories, 1973. A course in The Fundamentals of Core Analysis.

- EFRO-project 910, "Geothermie2020", 2015. Stappenplan voor de ontwikkeling en implementatie van geothermie als duurzame, stabiele en betaalbare bron van warmte en elektriciteit in Vlaanderen. Projectbrochure, 57pp.

- Mijnlieff, H.F., Obdam, A.N.M., van Wees, J.D.A.M., Pluymaekers, M.P.D. and Veldkamp, J.G., 2014. DoubletCalc 1.4 manual, English version for DoubletCalc 1.4.3, 54pp. TNO rapport: TNO-2014-R11396.

- Mijnlieff, H.F., van Kempen, B.M.M., van der Molen J. en Veldkamp, J.G., 2017. Specificaties geologisch onderzoek voor geothermieprojecten – Rapportagevereisten SDE+ en RNES, 46pp. TNO rapport:TNO-2017-R10498.

- Peters, E., Veldkamp, J.G., Pluymaekers, M.P.D., Wilschut., F., 2015. Radial drilling for Dutch geothermal applications. 45pp. TNO rapport: TNO-2015-R10799-Final report.

Bijlage 1. Gedetailleerde lijst van gebruikte gegevens

In deze bijlage wordt opgenomen:

- Hoeveel seismische lijnen er beschikbaar zijn voor de evaluatie van het gebied;
- Welke seismische *survey(s)* (evt. welk deel ervan) gebruikt zijn en de bedekkingsgraad van het aangevraagde gebied;
- Welke data aan de kaarten ten grondslag liggen;
- Tabel met putten in, en in de omgeving van, de opsporings- of winningsvergunning voor aardwarmte met annotatie of ze al dan niet zijn gebruikt voor de seismische interpretatie, voor de petrofysische evaluatie en voor de waterevaluatie, en welke gegevens verder zijn gebruikt;
- Kaart met locatie van de seismische lijnen en geannoteerde putten;
- Datasets i.v.m. formatiewater, seismische interpretatie, etc.
- De opsporings- of winningsvergunning voor aardwarmte waarbinnen het project wordt uitgevoerd.

Bijlage 2. Resultaten en details van de petrofysische evaluatie en formatiewateranalyse

Indien petrofysische evaluaties zijn uitgevoerd dan moeten hier de resultaten (de volledige datasets) worden gepresenteerd. Daarnaast dienen, afhankelijk van de gekozen methodes en modellen, alle parameters gegeven te worden die zijn gebruikt voor de evaluatie.

Petrofysische evaluatieresultaten per put: (m TVD dient opgegeven t.o.v. maaiveld en in m TAW)

put	Reservoirzone	Top (m AH)	Basis (m AH)	Top (m TVD)	Basis (m TVD)	Dikte (m TVD)	N/B (%)	Porositeit (%)	Watersaturatie (%)	Permeabiliteit	Transmissiviteit	*Cut-offs* (Vsh,

Petrofysische parameters:

Put	Reservoirzo	GRclean [GAPI]	GRclay [GAPI]	*Densityclay*	Neutron clay	*Densitycl ean1*	Neutroncl ean1	*Densitycl ean2*	Neutroncl ean2

Petrofysische evaluatie modellen en parameters:

Put	Reservoirzone	Gebruikte	*Density* (wet clay)	*Density* (dry clay)	Neutron (wet clay)	Neutron (wet clay)	*Clay resistivity*	*density* matrix [g/cm³]	*Sonic* matrix [µs/ft]	a	m	n

Evaluatie formatiewater:

Put	Reservoirzone	Saturatiemodel	Water resistivity (Rw) [Ohmm]	Temperatuur bij Rw [°C]	Sonic formatiewater [us/ft]	Hydrocarbon density [g/cm^3]	Hydrocarbon sonic [µs/ft]

Bijlage 3. Lijst van uitgevoerde puttesten, details en resultaten van de evaluatie

	Put		Put	
Parameter	**test 1**	**test 2**	**test 1**	**test 2**
Interpretatie model				
Toegepaste correcties				
Top aquifer (m AH & TVD)				
Basis aquifer (m AH & TVD)				
Bruto aquiferdikte (m)				
Netto aquiferdikte (m)				
Zoutgehalte (ppm)				
Top productieinterval / perforatie / *screen*				
basis productieinterval / perforatie / *screen*				
Locatie pomp (m AH & TVD)				
Locatie sonde voor temp., druk (m AH & TVD)				
Verbuizingsschema (m AH & TVD)				
Deviatiehoek in aquifer (°)				
Etc.				
Resultaten				
Aquiferdruk				
Aquifertemperatuur				
Permeabiliteitsdikte (Dm)				
Permeabiliteit (mD)				
Skin (-)				
Productiviteitsindex (PI) (m^3/uur/bar)				
Evt. Verticale permeabiliteit (mD)				

M TVD op te geven in m TAW en t.o.v. maaiveld

Bijlage 4. Lijst van productiedata, details en resultaten van de evaluatie

Bijlage 5. Kaarten die gebruikt zijn tijdens de evaluatie van de ondergrond

Hier presenteert u kaarten die gebruikt zijn, maar niet in de voorgaande hoofdstukken zijn getoond:

- Tijdgrids van de geïnterpreteerde horizons
- *Residualsmap* met *residuals*-waarde als *label* bij de referentieputten
- Dieptegrids van de tijd-diepte-geconverteerde horizons
- Additionele kaarten die gebruikt zijn bij het maken van de top- en basiskaarten van de aquifer
- Kaarten van de dikte, porositeit en permeabiliteit van de aquifer
- Kaarten met seismische attributen

De (absolute en relatieve) residuen worden weergeven in onderstaande tabel. Indien een residu *grid* is gemaakt en toegepast, wordt deze weergeven in een figuur.

Horizon	Put	Putdiepte (m)	Horizondiepte (m)	Absolute en relatieve residu

Dieptes op te geven in m TAW en t.o.v. maaiveld

Bijlage 6. Putontwerp

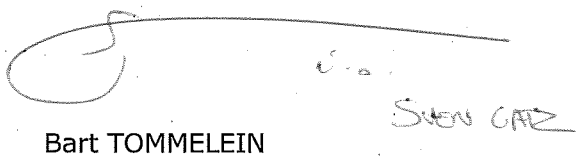
Hier toont u:

- Het verbuizingsschema van de productie- en injectieput
- Het deviatietraject van de productie- en injectieput

Gezien om gevoegd te worden bij het ministerieel besluit van (datum) houdende vaststelling van de richtlijnen en modellen in het kader van de waarborgregeling voor het opsporen en winnen van aardwarmte in de diepe ondergrond.

Brussel, ... (datum).

De Vlaamse minister van Begroting, Financiën en Energie,



Bart TOMMELEIN

De Vlaamse minister van Omgeving, Natuur en Landbouw,

Joke SCHAUVLIEGE

Bijlage 2. Richtlijnen voor het uitvoeren en interpreteren van een puttest

De richtlijnen voor het uitvoeren en interpreteren van een puttest, vermeld in artikel 2 van het ministerieel besluit van (datum) houdende vaststelling van de richtlijnen en modellen in het kader van de waarborgregeling voor het opsporen en winnen van aardwarmte in de diepe ondergrond, worden vastgesteld als volgt:

Richtlijnen voor het uitvoeren en interpreteren van een puttest

Deze richtlijn is gebaseerd op het TNO-rapport TNO-2017 R11135 "Actualisatie van de richtlijnen voor de uitvoering en interpretatie van een puttest", gepubliceerd op 4 december 2017 door Harmen Mijnlieff, Bart van Kempen en Joaquim Juez-Larré in opdracht van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO). Het Vlaamse Gewest maakt gebruik van de inhoudelijke bepalingen uit voorgaande publicatie met toestemming van RVO en TNO. De inhoud van voorliggend document is niet identiek aan het geciteerde werk, maar werd, waar nodig, aangepast in functie van de Vlaamse context.

Samenvatting

Om aanspraak te kunnen maken op een eventuele uitkering uit de waarborgregeling voor het opsporen en winnen van aardwarmte in de diepe ondergrond is het uitvoeren van een **puttest vereist**. Dit is nodig voor de **resultaatverplichting**: het eenduidig kunnen bepalen van de **transmissiviteit** (k_h, en daaruit afgeleid de **permeabiliteit**) van de aquifer en van de **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 waarborgregeling van toepassing is, moeten individueel worden getest door middel van een puttest. De hieruit berekende gemiddelde aquiferpermeabiliteit en mechanische skin van de put zijn 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 goedkeuring van de waarborgaanvraag. 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 waarborgregelingscenario'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, mechanische skin, aquiferdefinitie en temperatuur 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 waarborgregeling kunnen worden gerealiseerd.

Inhoud

Inhoudsopgave
Samenvatting 2
Inhoud 3
1. Inleiding 4
2. Resultaatverplichting 5
3. Technische eisen aan boring en puttest 6
3.1 Definitie puttest type 6
3.2 Eisen aan de boring 7
3.2.1 Beperking van de skin 7
3.2.2 Completering 7
3.2.3 Productiepomp 9
3.2.4 Alternatieve putconfiguraties 11
3.3 Eisen aan de puttest 12
3.3.1 Clean-up 12
3.3.2 Puttesttype 13
3.3.3 Voorkeursontwerp 13
3.3.4 Doublettest 16
3.3.5 Puttest na verbeterwerkzaamheden 17
4. Puttest interpretatie 18
4.1 Software en interpretatiemethode 18
4.2 Correcties 18
4.2.1 Toelichting op afkoelingscorrectie 18
4.3 Rapportage 19
5. Vermogensberekening en beoordeling van de vaststellingsaanvraag 20
5.1 Niet-geologische parameters 20
5.2 Significant verschil in geologische parameters tussen putten 20
5.3 Skin in het afrekenscenario 21
5.3.1 Mechanische skin 21
5.3.2 Negatieve skin door alternatieve putconfiguraties 21
6. Afsluiting 23
7. Referenties 24
Bijlage A Data en resultaten van de puttest 25
Bijlage B Voorbeeld van de systematiek voor het berekenen van het geothermisch vermogen 27

1. Inleiding

Dit rapport maakt deel uit van een serie van drie documenten, die gezamenlijk ondersteunend zijn aan de waarborgregeling voor het opsporen en winnen van aardwarmte uit de diepe ondergrond. De andere twee zijn de **'Handleiding DoubletCalc'** en de **Richtlijnen voor het opstellen van het Geologisch Onderzoek'**. Deze documenten, evenals de DoubletCalc 1.4.3 software, zijn beschikbaar op de website van het Departement Omgeving (www.XXXXXXXXXXXXX).

De waarborgregeling keert een vergoeding uit indien het niet gerealiseerde 'verwacht (P90) vermogen' gerelateerd kan worden aan tegenvallende aquifereigenschappen, te weten: dikte, netto/bruto, permeabiliteit, diepte van de top, temperatuur en saliniteit.

Bij de aanvraag voor de waarborgregeling dient de uitvoerder van het project een DoubletCalc scenario aan te leveren waarin het verwachte geothermisch vermogen wordt berekend; dit is het **aanvraagscenario**. Na een audit door het Departement Omgeving en eventueel externe experten 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 waarborgregeling. Daartoe dient de uitvoerder een **claimscenario** in bij het Departement Omgeving dat, na een audit door het departement en externe experten, eventueel in aangepaste vorm wordt omgezet naar een **afrekenscenario**. Het uit te keren bedrag is gebaseerd op het geothermisch vermogen berekend in het afrekenscenario.

De uitvoerder is verplicht een individuele puttest uit te voeren voor elke put ingediend voor de waarborgregeling zodat de transmissiviteit (k_h, 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 waarborgregeling 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.

2. Resultaatverplichting

Om aanspraak te kunnen maken op een uitkering uit de waarborgregeling 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. 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 wel!: Het is de **verantwoordelijkheid van de uitvoerder** om te voldoen aan de resultaatverplichting. Indien niet aan de resultaatverplichting wordt voldaan wordt een eventuele claim geweigerd.*

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 waarborgregeling dient het volgende te worden aangeleverd aan het Departement Omgeving (voor aanleverspecificaties, inclusief formaat, 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, productie van vaste deeltjes, opgeloste hoeveelheden gas en/of olie) van de verschillende testen in digitaal formaat.
- 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, *cutting*beschrijvingen uit *mud logs*, etc.) op basis waarvan de aquiferdefinitie is bepaald.

Indien het Departement Omgeving 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 waarborgregeling 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 reservoireigenschappen 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**.

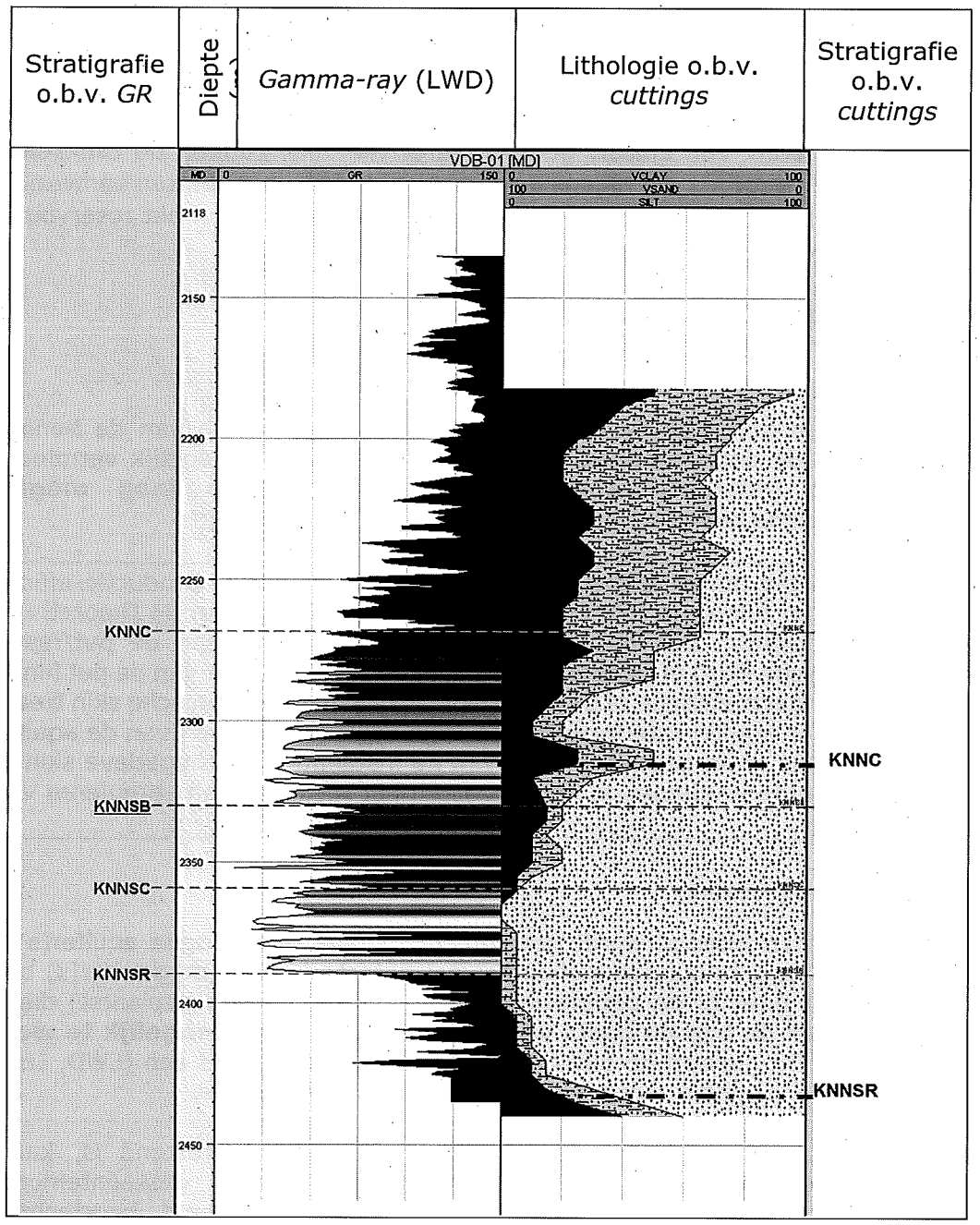
De skin is een dimensieloos getal dat een maat is voor de productie-efficiëntie van een put onder de feitelijke condities, ten opzichte van de theoretische of ideale efficiëntie. Een positieve skin duidt op schade aan de put/reservoir (mechanische skin) of andere factoren die de productiviteit van de 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 monstering 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 monstername 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

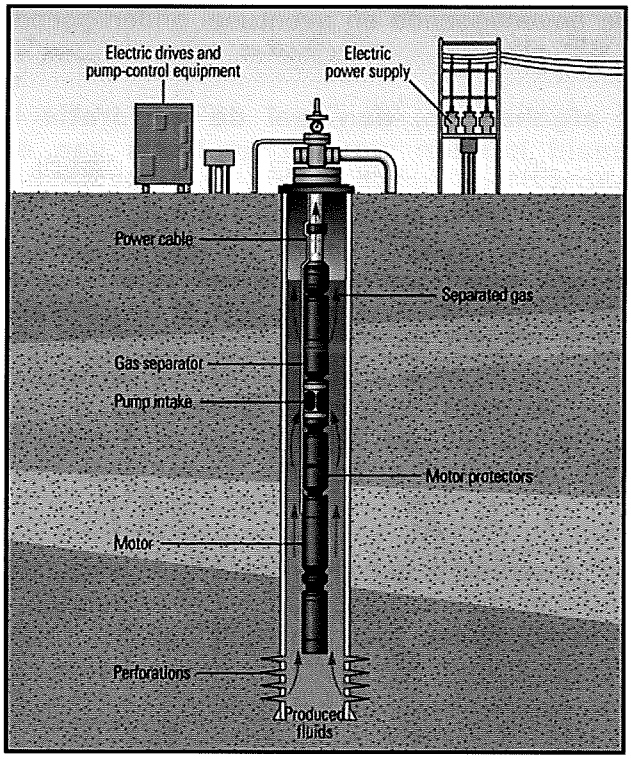
Voor de uitvoering van de puttest is het generen van **vloeistofstroming** een vereiste. Dit wordt doorgaans bewerkstelligd middels een '*Electrical Submersible Pump*' (ESP). Hoewel het gebruik van een ESP sterk wordt aanbevolen, is het ook mogelijk andere pompuitvoeringen te gebruiken, zoals bijvoorbeeld 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 door middel 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* puttest 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 puttesten met een *airlift* een druksensor op reservoirniveau te plaatsen om dit effect te minimaliseren. Alsnog is deze methode gevoeliger voor interpretaties ten opzichte van ESP pomptesten.

Daarnaast is het niet aan te raden om gewone lucht in de productiebuis te pompen, aangezien dit vaak meer dan 20% zuurstof bevat. 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 wel!: er is weinig ervaring met airlift-testen in geothermieputten. De ervaringen die er zijn lijken suboptimale datareeksen op te leveren. Dit zou kunnen betekenen dat niet aan de resultaatverplichting voldaan kan worden. Vooralsnog is het aan te raden deze test niet te gebruiken voor het realiseren van de resultaatverplichting van de waarborgregeling.

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:

- gedevieerde 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 waarborgregeling 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 waarborgregeling 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 waarborgregeling 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.

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/ΔP (op reservoirdiepte)). Hierbij dient aangegeven te worden bij welke temperatuur deze bepaald is.
- Optioneel[1] : anisotropie (k_h/k_v). De k_v kan bijvoorbeeld bepaald worden in het geval de put gedevieerd 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 productie van vaste deeltjes 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 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

[1] *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.*

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 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 Puttesttype

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 (Φ, fractie), totale compressibiliteit (C_t, psi^{-1}); viscositeit (μ, 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[2].

Wanneer de waarborgregeling wordt gevraagd voor een **doublet**, dan dient de aanvrager **bij het testen van de tweede put gelijktijdig in de eerste put een druk- en temperatuursonde te hangen** zodat een minimale inschatting van de interferentie tussen de twee putten kan gemaakt worden tijdens de (enkelvoudige) puttest (i.e. beperkte interferentietest). Dit is een snelle en eenvoudige manier om reeds in een vroeg stadium de connectiviteit tussen beide putten te onderzoeken. Zeker wanneer geboord werd in breukzones kan deze eerste inschatting erg belangrijk zijn om inzicht te krijgen of er geen onverwachte drukverhogingen plaatsvinden en of er een preferentiële stroming optreedt die haaks staat op het traject tussen beide putten. Dit inzicht levert dan ook waardevolle informatie over de verwachte levensduur van het doublet.

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 waarborgregeling. 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.

[2] Voor een indicatie van het maximaal op te leggen drukverschil kan worden verwezen naar het injectieprotocol, opgesteld door Staatstoezicht op de Mijnen (SodM, 2013) dat in Nederland gehanteerd wordt.

3.3.4 Doublettest

Het doublet kan op twee verschillende manieren getest worden indien beide putten van een aardwarmtedoublet 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 claimscenario 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

<u>Interferentietest</u>

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: ρ_{res}/ρ_{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.

<u>Operationele test</u>

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. Dit is gelijk aan de richtlijnen gesteld in het 'Model Puttestrapportage'.

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 **puttestanalyse**. Informatie over de uitvoering van puttest 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 puttest 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 puttest 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 druksensor aan 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 het Departement Omgeving.

De uitkomsten van de puttestanalyse omvatten tenminste de transmissiviteit (k_H), 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 **puttestprogramma**, 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 gewaarborgde halve doublet) berekend volgens de specificaties in de handleiding van DoubletCalc. Indien alle gerealiseerde geologische parameters ingevoerd worden als **mediane waarden** kan het 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 waardes 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 waardes worden toegepast of gerealiseerd. Indien er gunstigere waarden zijn gerealiseerd zullen die wel in het afrekenscenario worden gebruikt**. Welke van de twee putten beschouwd wordt als injectieput c.q. productieput wordt bepaald door de configuratie die het meeste vermogen oplevert, tenzij wisselen van functie niet aangewezen is omwille van veiligheids- of andere redenen.

Indien het gerealiseerde vermogen lager is dan het verwachte (P90) vermogen in het acceptatiescenario (d.i. het verwachte vermogen zoals vermeld in het ministerieel besluit houdende goedkeuring van de waarborgaanvraag), en er aanspraak op de waarborgregeling 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 afrekenscenario

5.3.1 Mechanische skin

De waarborgregeling 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 afrekenscenario 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 waarborgregeling 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 afrekenscenario. Alleen deze kan eenduidig uitsluitsel geven over de ongestimuleerde aquifereigenschappen die onder de waarborgregeling 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 afrekenscenario.

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 formaat gegeven in Bijlage A.

Multi-lateral put

Voor de *multi-lateral* put gelden andere principes voor het afrekenscenario. 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[3] 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 afrekenscenario worden gebruikt. Ook hier blijft de "*multi-lateral* negatieve skin" t.o.v. de verticale put zoals gebruikt in het *pre-drill* waarborgscenario in het afrekenscenario ongewijzigd.

Omdat een *multi-lateral* put een niet standaard doubletconfiguratie betreft moet er rekening worden gehouden met het feit dat de standaardspecificaties 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.

[3] 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 waarborgregeling is de resultaatverplichting van de puttest. Deze staat beschreven in hoofdstuk 2. **Indien niet aan de resultaatverplichting is voldaan, dan** *wordt een eventuele claim geweigerd.*.

Het Departement Omgeving 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 het toekennen van de waarborg**) 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 testinterpretatie	Waarde	Dimensie
Naam van de put		
Coördinaten van de put (X, Y)		(Lambert 72)
Top aquifer		m (langs boorgat) en m (TVD)
Basis aquifer		m (langs boorgat) en m (TVD)
Dikte aquifer		m (TVD)
Netto/bruto aquifer		%
Gemiddelde porositeit aquifer		%
Zoutgehalte formatiewater (TDS = *total dissolved solids*)		ppm
Gestabiliseerde temperatuur geproduceerde water[1]		°C
Diameter boorgat bij aquifer		inch
Top productie-interval/filter		m (langs boorgat) en m (TVD)
Basis productie-interval/filter		m (langs boorgat) en m (TVD)
Filter permeabiliteit /weerstand		Darcy of bar
Locatie pomp		m (langs boorgat) en m (TVD)
Locatie meetsonde voor druk		m (langs boorgat) en m (TVD)

[1]Deze temperatuur wordt als gemiddelde aquifertemperatuur beschouwd

Meetreeks Put Deviatie[2]	**Diepte (m AH), diepte (m TVD), inclinatie, azimuth, dX , dY**				
Schema verbuizing[3]	Sectie	Einddiepte sectie (m AH)	Uitstap einddiepte sectie (m)	Binnen diameter buis (inch)	Ruwheid buis (milli-inch)
	1: 2: 3: Etc: Filterbuis				

[2] In een apart document of bijlage

[3] Inclusief een schema van het boorgat met verbuizing en pomp-locatie als bijlage

***Clean up* gegevens**		
Pompdruk		bar
Debiet vs. tijd		m^3/uur
Duur		uur
Indicatie hoeveelheid meegeproduceerde '*fines*'		Eindwaarde, Semi-kwantitatief

Meetreeksen Puttest[4]		
Stap	Eind/stabiele Pompdruk (bar)	Eind/stabiele Debiet (m^3/uur)
1		
2		
3		

[4] 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 (liefst digitaal) te worden aangeleverd

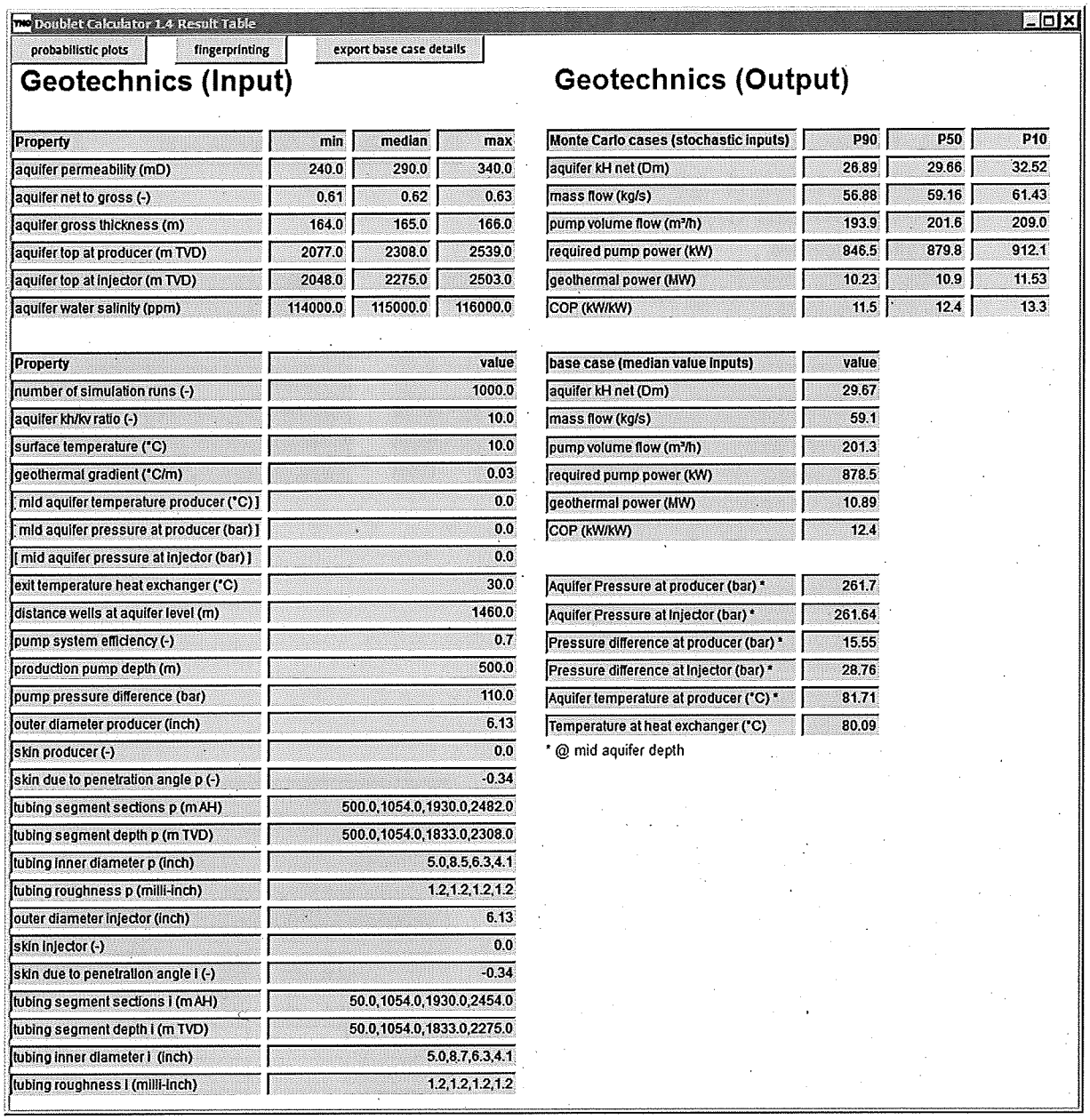
Uitkomsten test interpretatie en analyses		
Skin		-
k_H		Dm (darcy-meter)
Aangenomen H		m (AH)
k		mD
Productiviteitsindex (PI)		m^3/uur/bar
Verticale anisotropie (k_h/k_v)		-

Conclusie gerealiseerd vermogen op basis van DoubletCalc invoer[5]		
Injectietemperatuur conform waarborgscenario		°C
Opgelegde pompdruk conform waarborgscenario		bar
Debiet Q		(m^3/s)
Gerealiseerd vermogen P[6]		MW

[5] zie uitvoerscherm DoubletCalc - Geotechnics – *base case*. Het uitvoerscherm van de realisatiecase in DoubletCalc dient bijgevoegd te worden.
[6] 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 "Richtlijnen voor het opstellen van het Geologisch Onderzoek" 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 goedkeuring van de waarborgaanvraag.**



Doublet Calculator 1.4 Result Table

probabilistic plots | fingerprinting | export base case details

Geotechnics (Input)

Property	min	median	max
aquifer permeability (mD)	240.0	290.0	340.0
aquifer net to gross (-)	0.61	0.62	0.63
aquifer gross thickness (m)	164.0	165.0	166.0
aquifer top at producer (m TVD)	2077.0	2308.0	2539.0
aquifer top at injector (m TVD)	2048.0	2275.0	2503.0
aquifer water salinity (ppm)	114000.0	115000.0	116000.0

Property	value
number of simulation runs (-)	1000.0
aquifer kh/kv ratio (-)	10.0
surface temperature (°C)	10.0
geothermal gradient (°C/m)	0.03
[mid aquifer temperature producer (°C)]	0.0
[mid aquifer pressure at producer (bar)]	0.0
[mid aquifer pressure at injector (bar)]	0.0
exit temperature heat exchanger (°C)	30.0
distance wells at aquifer level (m)	1460.0
pump system efficiency (-)	0.7
production pump depth (m)	500.0
pump pressure difference (bar)	110.0
outer diameter producer (inch)	6.13
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

Geotechnics (Output)

Monte Carlo cases (stochastic inputs)	P90	P50	P10
aquifer kH net (Dm)	26.89	29.66	32.52
mass flow (kg/s)	56.88	59.16	61.43
pump volume flow (m³/h)	193.9	201.6	209.0
required pump power (kW)	846.5	879.8	912.1
geothermal power (MW)	10.23	10.9	11.53
COP (kW/kW)	11.5	12.4	13.3

base case (median value inputs)	value
aquifer kH net (Dm)	29.67
mass flow (kg/s)	59.1
pump volume flow (m³/h)	201.3
required pump power (kW)	878.5
geothermal power (MW)	10.89
COP (kW/kW)	12.4
Aquifer Pressure at producer (bar) *	261.7
Aquifer Pressure at injector (bar) *	261.64
Pressure difference at producer (bar) *	15.55
Pressure difference at injector (bar) *	28.76
Aquifer temperature at producer (°C) *	81.71
Temperature at heat exchanger (°C)	80.09

* @ mid aquifer depth

Uitvoerscherm van DoubletCalc met de niet-geologische parameters van het **waarborgscenario bij de goedkeuring van de waarborgaanvraag**.

Gezien om gevoegd te worden bij het ministerieel besluit van (datum) houdende vaststelling van de richtlijnen en modellen in het kader van de waarborgregeling voor het opsporen en winnen van aardwarmte in de diepe ondergrond.

Brussel, ... (datum).

De Vlaamse minister van Begroting, Financiën en Energie,

Bart TOMMELEIN

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

Doublet Calculator 1.4-Beta

number of simulation runs (-) 1000 | Calculate ! | Open Scenario | Save Scenario | Exit Program

file: D:\program files\DoubletCalc14\example_realisatie.xml

Geotechnical input

A) Aquifer properties

Property	min	median	max
aquifer permeability (mD)	240	290	340
aquifer net to gross (-)	0.61	0.62	0.63
aquifer gross thickness (m)	164	165	166
aquifer top at producer (m TVD)	2077.0	2308	2539.0
aquifer top at injector (m TVD)	2048.0	2275	2503.0
aquifer water salinity (ppm)	114000	115000	116000

Property	value
aquifer kh/kv ratio (-)	10
surface temperature (°C)	10
geothermal gradient (°C/m)	0.030
[mid aquifer temperature producer (°C)]	0
[mid aquifer pressure at producer (bar)]	0.0
[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) 50

Producer	
outer diameter producer (inch)	6.125
skin producer (-)	0
penetration angle producer (deg)	45
skin due to penetration angle p (-)	-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)
1	500	500	5	1.2
2	1054	1054	8.5	1.2
3	1930	1833	6.3	1.2
4	2482	2308	4.1	1.2
5				
6				
7				
8				

Injector	
outer diameter injector (inch)	6.125
skin injector (-)	0
penetration angle injector (deg)	45
skin due to penetration angle i (-)	-0.34

Segment	tubing segment sections i (m AH)	tubing segment depth i (m TVD)	tubing inner diameter i (inch)	tubing roughness i (milli-inch)
1	50	50	5	1.2
2	1054	1054	8.7	1.2
3	1930	1833	6.3	1.2
4	2454	2275	4.1	1.2
5				
6				
7				
8				

[ ] optional

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

De Vlaamse minister van Omgeving, Natuur en Landbouw,

Joke SCHAUVLIEGE

Bijlage 3. Model geologisch onderzoek

Het model Geologisch Onderzoek, vermeld in artikel 3 van het ministerieel besluit van (datum) houdende vaststelling van de richtlijnen en modellen in het kader van de waarborgregeling voor het opsporen en winnen van aardwarmte in de diepe ondergrond, wordt vastgesteld als volgt:

Bij uw steunaanvraag moet u als bijlage bij het aanvraagformulier een geologisch onderzoeksrapport toevoegen. In het Model Geologisch Onderzoek staat aangegeven welke aspecten u daarin dient te behandelen. Een uitgebreidere tekst met richtlijnen (Richtlijnen voor het opstellen van het Geologisch Onderzoek) vindt u op xxx.

Het geologisch onderzoek concentreert zich op het inschatten van de geologische parameters. Met deze parameters, en met de niet-geologische parameters uit het projectplan (zie model projectplan), berekent u de P90 waarde. Het resultaat presenteert u eveneens in het geologisch onderzoeksrapport.

Als u aanvraagt voor een half doublet, moet u in dit rapport duidelijk aangeven voor welke put de waarborg moet gelden. Als u aanvraagt voor de tweede put of een vervolgput, dan presenteert u ook de resultaten van (de) voorgaande put(ten).

Voor het geologisch onderzoek geldt een verplichte hoofdstukindeling. Belangrijk is dat u telkens motiveert waarom u een bepaalde keuze gemaakt heeft. Als het onderwerp van een bepaalde paragraaf niet relevant is voor uw situatie, dan moet u dit kort motiveren.

Het departement Omgeving van de Vlaamse Overheid stelt voor het geologisch onderzoek op xxx de volgende hulpmiddelen ter beschikking:

- Een uitgebreide toelichting op de verplichte hoofdstukindeling (Richtlijnen voor het opstellen van het Geologisch Onderzoek)
- Het softwarepakket "DoubletCalc" ontwikkeld door TNO,waarmee op eenvoudige wijze het P90 vermogen te berekenen is.
- Een handleiding/documentatie van DoubletCalc, die ingaat op het werken met DoubletCalc maar ook op de te gebruiken methodiek om het P90-vermogen te berekenen.

Verplichte inhoudsopgave "Geologisch Onderzoek"

1 Samenvatting

- 1.1 Gepland doublet en gebruikte parameters
- 1.2 Verwacht vermogen en overschrijdingskansgrafiek

(zie volgende bladzijde voor verplichte onderdelen van de samenvatting)

2 Beoogde locatie en putten

- 2.1 Beoogde locatie
- 2.2 Putten

3 Aanvraag voor de waarborgregeling

4 Geologische setting

- 4.1 Lokale geologie
- 4.2 Koolwaterstofvoorkomens in de nabijheid van het project

5 Beschikbare en gebruikte putten en seismische data

- 5.1 Keuze referentieputten en putinformatie
- 5.2 Seismische gegevens
- 5.3 Coördinaatsysteem

6 Seismische interpretatie en dieptemodel

- 6.1 Methodebeschrijving
- 6.2 Additionele gegevens
- 6.3 Well to seismic ties
- 6.4 Seismische interpretatie
- 6.5 Gridding algoritme
- 6.6 Tijd-diepte-conversie
- 6.7 Dieptekaart van top/basis aquifer
- 6.8 Discussie omtrent onzekerheid van de top-/basis-aquiferkaart

7 Model en karakterisering van de aquifer

- 7.1 Stratigrafische correlatie en laterale diktevariatie van de aquifer
- 7.2 Petrofysische evaluatie
- 7.3 Puttestevaluatie
- 7.4 Evaluatie van productiedata
- 7.5 Permeabiliteit uit publieke informatie.
- 7.6 Bepaling aquifereigenschappen voor de projectlocatie
- 7.7 Anisotropie
- 7.8 Resultaten en discussie over onzekerheid

8 Formatiewaterkarakterisering

- 8.1 Temperatuur
- 8.2 Evaluatie van het formatiewater

9 Doublet performance

- 9.1 Doubletconfiguratie in de ondergrond

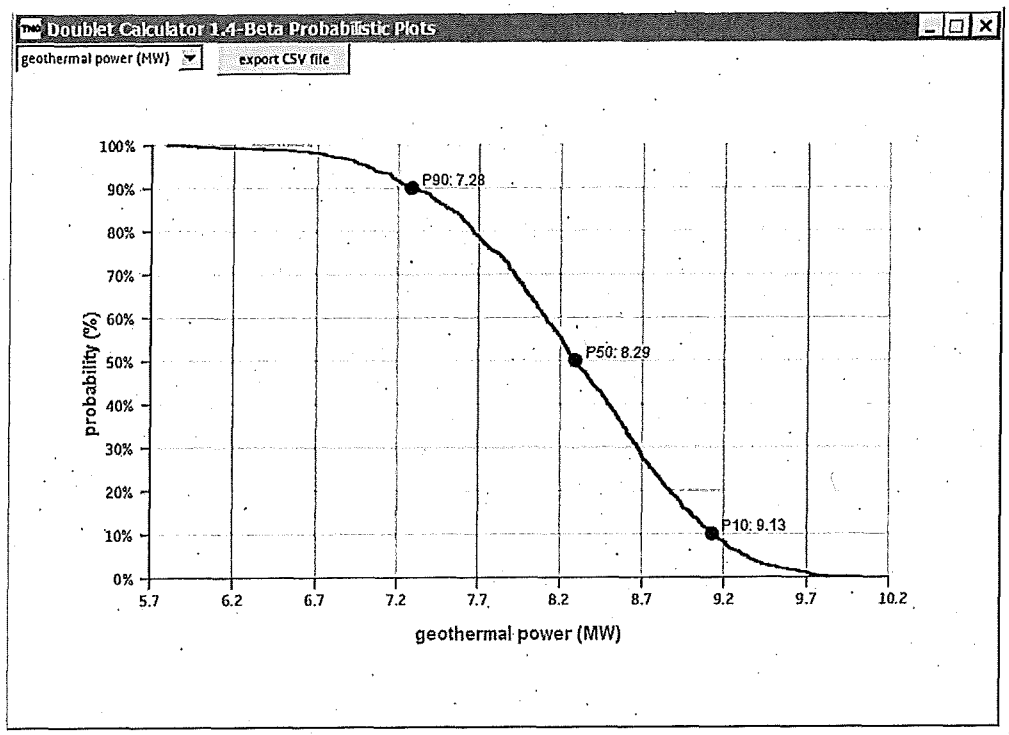
9.2 Putarchitectuur
9.3 Operationele instellingen
9.4 Indicatie en evaluatie van aandachtspunten bij boren
9.5 Indicatie en evaluatie van aandachtspunten bij productie en injectie
10 Referenties
Bijlagen

Verplichte onderdelen samenvatting 'geologisch onderzoek'

1.1. Gepland doublet en gebruikte parameters

-Locatie en toepassing van het doublet. Als u een half doublet verzekert: ook specificatie welke put voor de waarborgregeling wordt aangemeld.
-Parameters die gebruikt worden bij de berekening van het verwacht geothermisch vermogen, door het opnemen van een leesbare screendump van DoubletCalc **en** door het invullen van onderstaande tabellen.

Aquifer laagpakketnaam of namen				
Geologische parameters met spreiding	min	verwacht	max	
Permeabiliteit				mD
Bruto dikte watervoerende pakket met spreiding				m
Netto/bruto percentage watervoerende pakket met spreiding				%
Zoutgehalte (Total Dissolved Solids)				Ppm
Diepte top aquifer injectieput	-		-	m
Diepte top aquifer productieput	-		-	m
Geologische parameters zonder spreiding				
Geothermische gradiënt				°C/m
Gemiddelde oppervlaktetemperatuur				°C
k_v/k_h ratio van de aquifer	1			-
Niet-geologische parameters: Putspecificatie				
Verbuizingsschema productieput; dieptes van de segmenten in mAH en mTVD				m
Binnendiameter opvoerbuis per segment				Inch
Ruwheid opvoerbuis per segment				milli-inch
Diameter boorgat productieput op aquiferniveau				Inch
Skin (weerstand rond putmond) productieput	0 (vaste waarde)			-
Inclinatie put-aquifer traject productieput				°
Verbuizingsschema injectieput; dieptes van de segmenten in mAH en mTVD				m
Binnendiameter opvoerbuis per segment				Inch
Ruwheid opvoerbuis per segment				milli-inch
Diameter boorgat injectieput op aquiferniveau				Inch
Skin (weerstand rond putmond) injectieput	0 (vaste waarde)			-
Inclinatie put-aquifer traject injectieput				°
Niet-geologische parameters: Pomp en doubletspecificatie				
Injectietemperatuur				°C
Afstand tussen productie en injectieput op aquifer niveau.				m



Figuur 1: Voorbeeld van overschrijdingskansgrafiek

Gezien om gevoegd te worden bij het ministerieel besluit van (datum) houdende vaststelling van de richtlijnen en modellen in het kader van de waarborgregeling voor het opsporen en winnen van aardwarmte in de diepe ondergrond.

Brussel, ... (datum).

De Vlaamse minister van Begroting, Financiën en Energie,

Bart TOMMELEIN

De Vlaamse minister van Omgeving, Natuur en Landbouw,

Joke SCHAUVLIEGE

Pompefficiëntie		Frac
Afhangdiepte pomp in de productieput		m
Opgelegd drukverschil pomp		Bar

1.2 Verwacht vermogen en overschrijdingskansgrafiek

Hier geeft u aan voor welk vermogen u aanspraak wilt maken op ondersteuning uit de waarborgregeling. U presenteert:

- De resultaten van uw berekeningen in cijfers als DoubletCalc 'output table' of een vergelijkbare vorm van presenteren.
- De overschrijdingskansgrafiek, waaruit het P90 vermogen is af te lezen (zie onderstaand voorbeeld).
- Het aangevraagd vermogen.

Bijlage 4. Model puttestrapportage

Het model puttestrapportage, vermeld in artikel 4 van het ministerieel besluit van (datum) houdende vaststelling van de richtlijnen en modellen in het kader van de waarborgregeling voor het opsporen en winnen van aardwarmte in de diepe ondergrond, wordt vastgesteld als volgt:

Het gerealiseerd vermogen wordt vastgesteld aan de hand van (een) puttest(en). De uitvoering en interpretatie van de test(en) is (zijn) bijgevolg cruciaal om de vaststelling te evalueren.

In deze bijlage vindt u de belangrijkste minimale vereisten voor de puttestrapportage en enkele richtlijnen in verband met het organiseren van adequate puttesten. Een uitgebreidere tekst met richtlijnen (Richtlijnen voor het uitvoeren en interpreteren van een puttest) vindt u op xxx. Voorafgaand aan de boring dient u zich reeds te verdiepen in de eisen die aan een boring en testprogramma gesteld worden.

U dient een puttest te voorzien na het afronden van **elke** boring waarvoor de waarborg wordt aangevraagd. De puttest moet worden uitgevoerd door een ISO 9001 gecertificeerde instelling en moet strikt voldoen aan de gestelde voorwaarden.

Ongeacht het resultaat van de puttest dienen de resultaten en interpretatie ten laatste 8 weken na het afronden van de puttest gerapporteerd te worden bij het departement Omgeving. U ontvangt een ontvangstbevestiging, maar de puttest wordt pas getoetst bij de vaststellingsaanvraag, dus na het rapporteren van eventuele latere puttesten van vervolgboringen en / of verbeterwerkzaamheden. Voor deze testen gelden dezelfde vereisten als voor de puttesten na boring.

Naast de verplichte puttest na boren kunt u ook een doublettest en / of interferentietest uitvoeren om een beter inzicht te verwerven in de eigenschappen en gedrag van het ondergrondse reservoir. De resultaten en interpretatie van die testen dient u eveneens te rapporteren bij het departement Omgeving.

De resultaten van de puttesten en de onderzoeken die u heeft gedaan als onderdeel van de voor steun in aanmerking komende projectkosten en de door de Vlaamse Overheid geformuleerde adviezen over de puttesten dienen 4 weken na vaststelling van het aardwarmteproject openbaar gemaakt worden door publicatie op de website van het departement.

Technische eisen aan boring en puttest

1. Inleiding

In onderstaande paragrafen wordt een reeks voorwaarden gepresenteerd waaraan de put en de puttest moeten voldoen om een adequate set meetgegevens op te leveren die gebruikt kunnen worden om het testresultaat te kunnen interpreteren, vervolgens te beoordelen en af te zetten tegen de verwachtingswaarde (i.e. verwacht P90-vermogen zoals eerder berekend en opgegeven in de aanvraag) voordat de boring was geplaatst.

2. Eisen Boring

U moet ervoor zorgen dat de boring zo goed als mogelijk uitgevoerd wordt rekening houdend met de gesteente-eigenschappen die op voorhand ingeschat werden. Een technisch minder zorgvuldig uitgevoerde boring kan immers de aquifer in de omgeving van de put beschadigen waardoor de doorlatendheid vermindert. Technisch gesproken zorgt u voor een zo laag mogelijke mechanische skin (skin=0).

3. Puttest

Algemeen:

Het interval dat getest wordt dient gecompleteerd te zijn over de beoogde aquifer. Dit dient eenduidig vastgesteld te kunnen worden aan de hand van boorgatmetingen zoals een *Gamma-Ray* of met behulp van gesteentemonsters. De puttest dient zodanig te worden uitgevoerd dat uit de resultaten/meetreeksen de transmissiviteit, de skin, de productiviteitsindex en de temperatuur betrouwbaar kunnen worden bepaald. Het testontwerp moet zodanig zijn dat:

- er voldoende voorzieningen zijn getroffen om het geproduceerde water op te vangen, af te voeren en/of te bufferen;
- de put goed schoon is geproduceerd;
- effecten van ongewenste drukgolfinterferentie door bijvoorbeeld *'wellbore storage'* of beweging van de pomp op de testgegevens is geminimaliseerd.

U moet zorgen dat het opgelegde drukverschil niet resulteert in permanente schade aan de aquifer door bijvoorbeeld "*fines migration*". U moet voorzieningen treffen om eventuele zandproductie tegen te gaan zoals het plaatsen van een filter.

Voor de test:

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

Test:

Er dient vervolgens zodanig getest te worden dat het opgelegde debiet (als gevolg van een opgelegd drukverschil) tussen put en aquifer in stappen wordt verhoogd (*drawdown* test). Er dienen minimaal drie stappen (perioden) te worden uitgevoerd, bij verschillend debiet. Het opgelegde debiet bij één van de stappen dient het verwachte debiet te benaderen. Tijdens de volledige testperiode, ook gedurende *build-ups*, moeten het debiet, het drukverloop en de temperatuur gemeten worden. De metingen moeten een voldoende hoge frequentie hebben, zodat de test correct geïnterpreteerd kan worden. Bovendien moet het debiet tijdens de *drawdown* periodes zo goed mogelijk constant worden gehouden. De

testperiode dient zo lang te duren dat de transmissiviteit, productiviteitsindex (PI) en skin betrouwbaar berekend kunnen worden. Dit kan bijvoorbeeld door te testen totdat bij opgelegd debiet de druk stabiel blijft (*flow in semi-steady state*). Tussen de stappen en na de laatste stap, wanneer er geen opgelegd debiet over put en aquifer is, dient het drukverloop ook gemeten te worden tot het moment dat de druk niet meer verandert.

Het maximaal opgelegde drukverschil moet binnen de geldende veiligheidsnormen blijven.

4. Interpretatie puttest

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

De gegevens uit de puttest (het verloop van het debiet, drukverloop, en temperatuurverloop) worden samen met de gegevens van de put- en pompspecificaties geïnterpreteerd middels een puttestanalyse. Minimaal dient de 'Hornerplot' evaluatie te zijn uitgevoerd en zo nodig evaluatie met type-curve fitting.

Informatie over de uitvoering van puttestinterpretaties vindt u onder meer in:

- Bourdorot, G., 1996. Welltesting. Interpretation methods. ISBN 2-7108-0738-6
- 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. and de Ridder, N.A., 1994, Analysis and Evaluation of Pumping Test Data: International Institute for Land Reclamation and Improvement, The Netherlands, Publication 47, 377 p.
- 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.

Uitkomsten van de puttestanalyse dienen tenminste de k_H, de skin en de temperatuur te zijn. Uit de k_H kan de permeabiliteit bepaald worden met behulp van de aangetroffen aquiferdikte waarbij duidelijk moet zijn of de brutodikte van de gehele aquifer wordt genomen, de nettodikte of slechts de bruto- of nettodikte van het gecompleteerde interval.

5. Skin

Indien uit de puttestanalyse blijkt dat de skin groter dan nul is, wordt de stroming van water naar de put gehinderd, resulterend in een verlaagd debiet en dus verlaagd vermogen.

Uitkering in de waarborgregeling vindt altijd plaats op basis van een berekening met een maximale skin van 0 (en met een negatieve skin als dit van toepassing is).

6. Vermogensberekening

Met de gegevens uit de put en de resultaten van de puttestinterpretatie wordt het gerealiseerde vermogen van het doublet of het half doublet berekend in overeenstemming met de specificaties in de handleiding van DoubletCalc. Alle gerealiseerde geologische parameters moeten worden ingevoerd als *median* waarde. Het gerealiseerde vermogen is dan ook de "*Base case median value*" output. De boringen en puttesten moeten overeenkomstig de vooraf opgegeven niet-geologische parameters (bijvoorbeeld de diameter van het boorgat en productie-*tubing*) 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 afrekenscenario worden gebruikt.**

Er zijn resultaten denkbaar die met zich meebrengen dat het gerealiseerde vermogen niet met DoubletCalc berekend kan worden. Bijvoorbeeld indien de geologische parameters voortvloeiend uit de interpretatie van de put- of doublettest significant verschillen tussen beide putten. Het vermogen dient dan berekend te worden met behulp van een reservoirsimulator. Voor het bovengenoemde geval moet u er hierbij voor zorgen dat de niet-geologische parameters identiek zijn aan die in het waarborgscenario en dat er een geleidelijke afname of toename is van de aquifereigenschappen van de ene naar de andere put.

7. Beoordeling van de vaststellingsaanvraag

De vooraf opgegeven niet-geologische parameters hebben invloed op het uiteindelijke vermogen dat uit de puttest(en) blijkt. Daarom dienen de boringen en puttesten (minimaal) overeenkomstig deze waarden uitgevoerd te worden. 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.

Indien het vermogen dat gerealiseerd is lager is dan het in het ministerieel besluit vermelde verwachte vermogen en er aanspraak op steun gedaan wordt, dient uitgesloten te worden dat het lagere vermogen aan niet-geologische oorzaken te wijten is, te weten:

- Foutieve plaatsing productie/injectie interval (perforatie) of filter;
- Afwijking van de bij aanmelding opgegeven niet-geologische parameters;
- Mechanische skin;
- Andere problemen met de put.

Om een eventuele *second opinion* mogelijk te maken dienen de meetreeksen (druk, temperatuur en debiet) van de test inclusief alle relevante parameters voor de interpretatie van de test (bijvoorbeeld locatie pomp en meetsonde, diameter verbuizing etc.) digitaal aangeleverd te worden aan het departement Omgeving.

Resultaten van de puttest

De resultaattabel van de puttest (Tabel 1) moet op de hierbij beschreven manier ingevuld worden met inbegrip van de vereiste onderbouwing.

De volgende onderbouwing van de resultaattabel puttest is minimaal vereist:

1. Boorgatmetingen, die onderbouwen dat het geteste interval is gecompleteerd over de beoogde aquifer (bij voorkeur *Gamma-ray*).
2. Meetreeks putdeviatie (diepte langs boorgat – m AH; werkelijke diepte – m TVD; inclinatie; azimuth; dX, dY). De diepte wordt uitgedrukt ten opzichte van maaiveld en ten opzichte van TAW.
3. Schema boorgat met verbuizing en pomplocatie, sondelocatie en gegevens op welke diepte het filter is afgehangen of de perforatie is geschoten.
4. Beschrijving van de *clean-up*.
5. Totale meetreeksen van de test(en) (druk, temperatuur, debiet, tijd).
6. Onderbouwing van de parameters uit de resultaattabel, dat is rapportage van de interpretatie van de puttesten en rapportage van de petrofysica (bepaling porositeit) inclusief een toelichting van de gebruikte methodiek.
7. Indien van toepassing, motivatie voor de gekozen verbeterwerkzaamheden en een korte bespreking van het verloop van deze werkzaamheden.
8. Een presentatie van het "realisatiescenario", bij voorkeur als in- en uitvoerscherm van DoubletCalc, of op vergelijkbare wijze.

Hierbij moeten de geologische gegevens zijn ingevoerd conform de interpretatie van de puttest en data uit het boorgat. De installatieparameters dienen zoveel mogelijk de realisatie te volgen tenzij zij aantoonbaar ongunstiger zijn dan parameters opgegeven bij de goedkeuring van de waarborgaanvraag.

Als bepaalde onderdelen al bij het departement in bezit zijn, kunt u daarnaar verwijzen. Meetreeksen moeten ook digitaal worden toegezonden.

Tabel 1: resultaattabel puttest

Gegevens voor testinterpretatie	**Waarde**	**Dimensie**
Naam van de put		
Coördinaten van de put (X, Y)		(Lambert 72)
Top aquifer		m (langs boorgat) en m (TVD)
Basis aquifer		m (langs boorgat) en m (TVD)
Dikte aquifer		m (TVD)
Netto/bruto aquifer		%
Gemiddelde porositeit aquifer		%
Zoutgehalte formatiewater (TDS = *total dissolved solids*)		ppm
Gestabiliseerde temperatuur geproduceerde water[1]		°C
Diameter boorgat bij aquifer		inch
Top productie-interval / filter		m (langs boorgat) en m (TVD)
Basis productie-interval / filter		m (langs boorgat) en m (TVD)
Filter permeabiliteit /weerstand		Darcy of bar
Locatie pomp		m (langs boorgat) en m (TVD)
Locatie meetsonde voor druk		m (langs boorgat) en m (TVD)

[1]Deze temperatuur wordt als gemiddelde aquifertemperatuur beschouwd.

Tabel 2: putdeviatie

Meetreeks Put Deviatie[2]	Diepte (m AH), diepte (m TVD), inclinatie, azimuth, dX, dY				
Schema verbuizing[3]	Sectie	Einddiepte sectie (m AH)	Einddiepte sectie (m TVD)	Binnen diameter buis (inch)	Ruwheid buis (milli-inch)
	1: 2: 3: Etc: Filterbuis				

[2] In een apart document of bijlage

[3] Inclusief een schema van het boorgat met verbuizing en pomplocatie als bijlage

Tabel 3: beschrijving van de *clean-up*

Clean up gegevens		
Pompdruk		bar
Debiet vs. tijd		m^3/uur
duur		uur
Indicatie hoeveelheid meegeproduceerde 'fines'		Eindwaarde, semi-kwantitatief

Tabel 4: opbouw van de puttest

Meetreeksen Puttest [4]		
Stap	Eind/stabiele pompdruk (bar)	Eind/stabiel debiet (m^3/uur)
1		
2		
3		

[4] In deze tabel kunnen het debiet en drukverschil worden opgegeven van de verschillende stappen. De totale meetreeksen van de test (druk, temperatuur en debiet) dienen in een aparte bijlage (liefst digitaal) te worden aangeleverd

Tabel 5: geïnterpreteerde resultaten van de puttest

Uitkomsten test interpretatie en analyses		
Skin		-
k_H		Dm (darcy-meter)
Aangenomen H		m (AH)
k		mD
Productiviteitsindex (PI)		m^3/uur/bar
Verticale anisotropie (k_H/k_V)		-

Tabel 6: gerealiseerd vermogen volgens de opgelegde berekening

Conclusie gerealiseerd vermogen op basis van DoubletCalc-invoer[5]		
Injectietemperatuur conform waarborgscenario		^oC
Opgelegde pompdruk conform waarborgscenario		bar
Debiet Q		(m^3/s)
Gerealiseerd vermogen P[6]		MW

[5] zie uitvoerscherm DoubletCalc - *Geotechnics – base case*. Het uitvoerscherm van de realisatie*case* in DoubletCalc dient bijgevoegd te worden.

[6] Dit is de "*median value*", het vermogen dat op het uitvoerscherm is te vinden onder de hoofding "*base case* (*median input values*)"

Als de geologische parameters significant verschillen tussen beide putten moet u het doubletvermogen apart bepalen en invullen, zie paragraaf 6.

Als bijlage wordt de onderbouwing van bovengenoemde parameters aangeleverd. Deze bestaat uit de rapportage van de interpretatie van de puttesten en/of de doublettest en eventueel de rapportage van de petrofysica (bepaling porositeit / permeabiliteit) overeenkomstig de richtlijnen die in 'Richtlijnen voor het opstellen van het Geologisch Onderzoek' 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 goedkeuring van de waarborgaanvraag.

Conclusie gerealiseerd vermogen doublet (indien van toepassing)		
Gerealiseerd vermogen doublet		MW

Voorbeeld van systematiek

Doublet Calculator 1.4 Beta

number of simulation runs (-) 1000 | Calculate ! | Open Scenario | Save Scenario | Exit Program

file: D:\program files\DoubletCalc14\example_realisatie.xml

Geotechnical input

A) Aquifer properties

Property	min	median	max
aquifer permeability (mD)	240	290	340
aquifer net to gross (-)	0.61	0.62	0.63
aquifer gross thickness (m)	164	165	166
aquifer top at producer (m TVD)	2077.0	2308	2539.0
aquifer top at injector (m TVD)	2048.0	2275	2503.0
aquifer water salinity (ppm)	114000	115000	116000

Property	value
aquifer kh/kv ratio (-)	10
surface temperature (°C)	10
geothermal gradient (°C/m)	0.030
[mid aquifer temperature producer (°C)]	0
[mid aquifer pressure at producer (bar)]	0.0
[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) 50

Producer	
outer diameter producer (inch)	6.125
skin producer (-)	0
penetration angle producer (deg)	45
skin due to penetration angle p (-)	-0.34

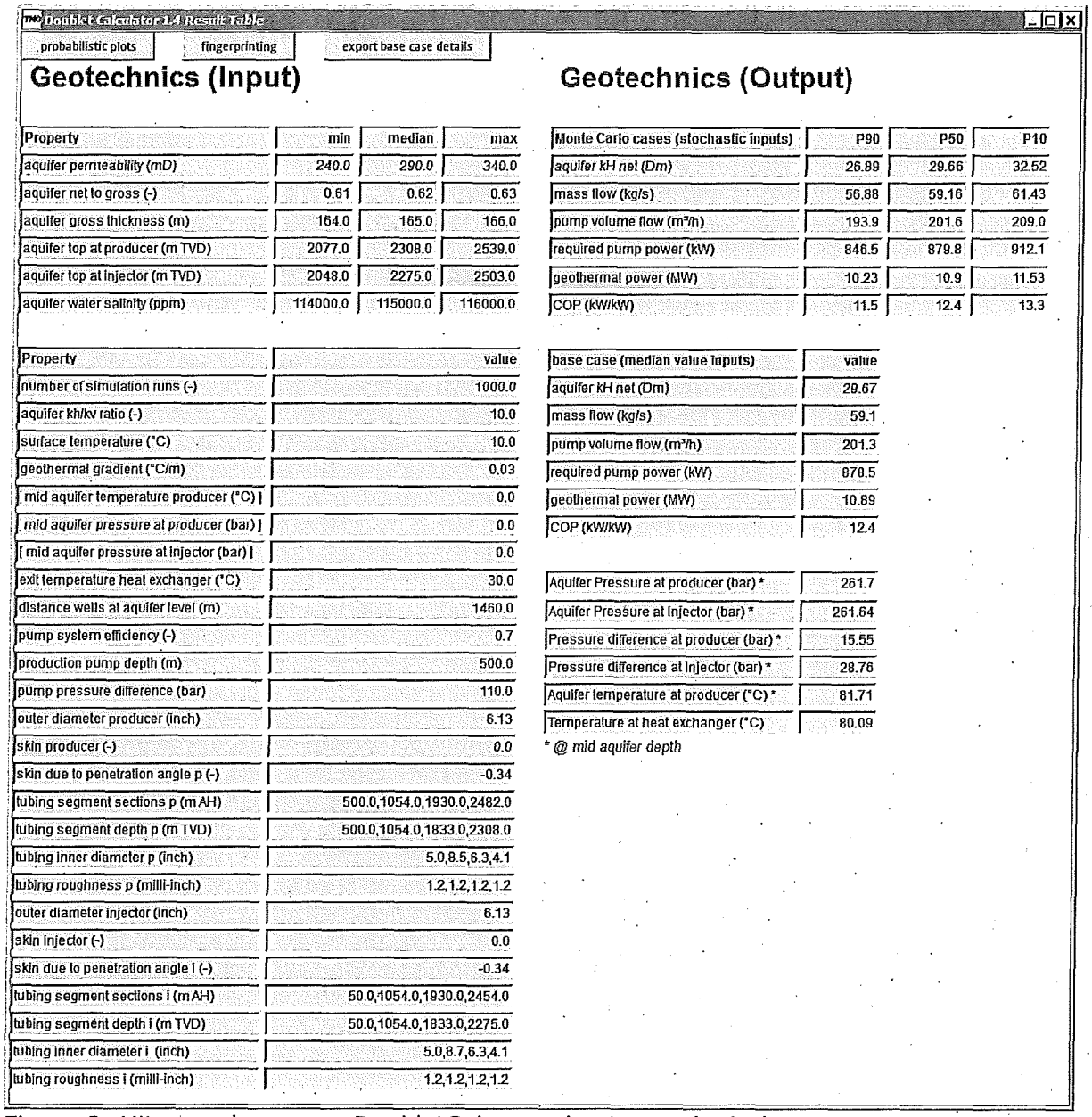
Segment	tubing segment sections p (m AH)	tubing segment depth p (m TVD)	tubing inner diameter p (inch)	tubing roughness p (milli-inch)
1	500	500	5	1.2
2	1054	1054	8.5	1.2
3	1930	1833	6.3	1.2
4	2482	2308	4.1	1.2
5				
6				
7				
8				

Injector	
outer diameter injector (inch)	6.125
skin injector (-)	0
penetration angle injector (deg)	45
skin due to penetration angle i (-)	-0.34

Segment	tubing segment sections i (m AH)	tubing segment depth i (m TVD)	tubing inner diameter i (inch)	tubing roughness i (milli-inch)
1	50	50	5	1.2
2	1054	1054	8.7	1.2
3	1930	1833	6.3	1.2
4	2454	2275	4.1	1.2
5				
6				
7				
8				

[ ] optional

Figuur 1: Invoerscherm van DoubletCalc waarbij de **gerealiseerde geologische parameters** zijn ingevuld. De **installatieparameters zijn identiek aan de voorgestelde installatiespecificaties**. Het gerealiseerde vermogen is in het outputscherm hieronder af te lezen in de kolom '*base case* (*median value inputs*)' (10.89 MW).



Doublet Calculator 1.4 Result Table

probabilistic plots | fingerprinting | export base case details

Geotechnics (Input)

Property	min	median	max
aquifer permeability (mD)	240.0	290.0	340.0
aquifer net to gross (-)	0.61	0.62	0.63
aquifer gross thickness (m)	164.0	165.0	166.0
aquifer top at producer (m TVD)	2077.0	2308.0	2539.0
aquifer top at injector (m TVD)	2048.0	2275.0	2503.0
aquifer water salinity (ppm)	114000.0	115000.0	116000.0

Property	value
number of simulation runs (-)	1000.0
aquifer kh/kv ratio (-)	10.0
surface temperature (°C)	10.0
geothermal gradient (°C/m)	0.03
[mid aquifer temperature producer (°C)]	0.0
[mid aquifer pressure at producer (bar)]	0.0
[mid aquifer pressure at injector (bar)]	0.0
exit temperature heat exchanger (°C)	30.0
distance wells at aquifer level (m)	1460.0
pump system efficiency (-)	0.7
production pump depth (m)	500.0
pump pressure difference (bar)	110.0
outer diameter producer (inch)	6.13
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

Geotechnics (Output)

Monte Carlo cases (stochastic inputs)	P90	P50	P10
aquifer kH net (Dm)	26.89	29.66	32.52
mass flow (kg/s)	56.88	59.16	61.43
pump volume flow (m³/h)	193.9	201.6	209.0
required pump power (kW)	846.5	879.8	912.1
geothermal power (MW)	10.23	10.9	11.53
COP (kW/kW)	11.5	12.4	13.3

base case (median value inputs)	value
aquifer kH net (Dm)	29.67
mass flow (kg/s)	59.1
pump volume flow (m³/h)	201.3
required pump power (kW)	878.5
geothermal power (MW)	10.89
COP (kW/kW)	12.4

Aquifer Pressure at producer (bar) *	261.7
Aquifer Pressure at injector (bar) *	261.64
Pressure difference at producer (bar) *	15.55
Pressure difference at injector (bar) *	28.76
Aquifer temperature at producer (°C) *	81.71
Temperature at heat exchanger (°C)	80.09

* @ mid aquifer depth

Figuur 2: Uitvoerscherm van DoubletCalc met de niet-geologische parameters van het waarborgscenario bij de goedkeuring van de waarborgaanvraag.

Gezien om gevoegd te worden bij het ministerieel besluit van (datum) houdende vaststelling van de richtlijnen en modellen in het kader van de waarborgregeling voor het opsporen en winnen van aardwarmte in de diepe ondergrond.

Brussel, ... (datum).

De Vlaamse minister van Begroting, Financiën en Energie,

Bart TOMMELEIN

De Vlaamse minister van Omgeving, Natuur en Landbouw,

Joke SCHAUVLIEGE

Bijlage 5. Model projectplan

Het model projectplan, vermeld in artikel 5 van het ministerieel besluit van (datum) houdende vaststelling van de richtlijnen en modellen in het kader van de waarborgregeling voor het opsporen en winnen van aardwarmte in de diepe ondergrond, wordt vastgesteld als volgt:

Bij uw aanvraag om een waarborg te verkrijgen moet u een projectplan bijvoegen. In het model projectplan dat u hier aantreft is aangegeven welke aspecten u in uw projectplan dient te behandelen.

1. Managementsamenvatting
   1.1. Het boorproject
        Dit is een samenvatting van hoofdstuk 3 van dit projectplan
   1.2. Toepassing van de aardwarmte
        Dit is een samenvatting van hoofdstuk 4 van dit projectplan
   1.3. Openbare samenvatting
        Het Departement Omgeving van de Vlaamse Overheid publiceert de openbare samenvatting van gehonoreerde projecten.

2. Deelnemers en derden
   Vermeld hier voor alle deelnemers en belangrijke uitbestedingsrelaties (bijv. het boorbedrijf):
   Naam
   Land van vestiging
   Website
   Kernactiviteiten
   Concrete rol in het project

3. Het boorproject
   3.1. Beschrijving boorproject
        Technische beschrijving van de boring en het boorgat met o.a. onderbouwing voorziene pompdruk
   3.2. Organisatie en planning boorproject
        Organisatorische beschrijving van de boring met o.a. planningsschema (let wel, binnen 12 maanden na de beslissing over de aanvraag van de waarborg moet de uitvoering gestart worden) en onderbouwing beschikbaarheid bovengrondse locatie voor de boring (i.v.m. vergunningen)

4. Toepassing van de aardwarmte
   4.1. Beschrijving toepassingsproject
        Technische beschrijving van het toepassingsproject met o.a. schema van het energieconcept van het toepassingsproject, onderbouwing voorziene uitkoeling van de geothermische bron, en verwacht jaarlijks vraagpatroon (MWh of GJ warmte)
   4.2. Betrokken partijen toepassingsproject
        Beschrijving additionele betrokken partijen bij toepassingsproject, taakverdeling, overleg en samenwerkingsstructuur, en commitment (bestaande samenwerkingsovereenkomsten, intentieverklaringen etc.)

4.3. Financiering toepassingsproject
Overzicht hoe de financiering van het toepassingsproject wordt opgebouwd, incl. bewijsstukken.

4.4. Organisatie en planning toepassingsproject
Organisatorische beschrijving van het toepassingsproject met o.a. planningsschema (let wel, binnen 2 jaar na voltooiing van de boringen moet het project leiden tot toepassing van aardwarmte in Vlaanderen) incl. benodigde vergunningen.

Gezien om gevoegd te worden bij het ministerieel besluit van (datum) houdende vaststelling van de richtlijnen en modellen in het kader van de waarborgregeling voor het opsporen en winnen van aardwarmte in de diepe ondergrond.

Brussel, ... (datum).

De Vlaamse minister van Begroting, Financiën en Energie,

Bart TOMMELEIN

De Vlaamse minister van Omgeving, Natuur en Landbouw,

Joke SCHAUVLIEGE